

**ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ**

**ВОЈНА АКАДЕМИЈА
УНИВЕРЗИТЕТА ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ**



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Пројектили и упаљачи

Предмет: Технологија производње УБС

Број индекса: 525/2013

Марија М. Петровић

**Примена технологије резања воденим млазом артиљеријске муниције
(Water Jet)**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Југослав Радуловић – ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У оквиру овог рада кандидат треба да опише поступак резања абразивним воденим млазом – AWJ.

Кроз приказ процеса AWJ, кандидат треба да покаже како водени млаз утиче на материјал који се сече. У самој анализи да покаже колики притисци и које брзине су потребне приликом сечења како обичних предмета тако и муниције.

Такође, треба да наведе основне предности и недостатке овог поступка и да представи примену у области наменске индустрије.

ментор:

Др Југослав Радуловић

Крагујевац, јун 2017.

Садржај:

Резиме	1
1. Увод	2
2. Карактеристике процеса резања млазом воде	3
2.1 Опис технологије.....	3
2.2 Обрада чистим воденим млазом	4
2.3 Обрада абразивним воденим млазом	5
2.4 Систем за генерисање високог притиска	7
2.5 Резна глава	9
2.6 Систем за управљање помоћу рачунара.....	13
2.7 Изглед обрађене површине	15
3. Употреба технологије сечења воденим млазом код муниције.....	19
3.1 Приказ стања.....	20
3.2 Експериментално сечење и дискусија.....	22
3.3 Предлог радног места за одстрањивање муниције абразивним воденим млазом .	26
3.4 Сечење воденим млазом	26
3.5 Брусни и водени млаз	30
3.6 Алтернативни флуиди.....	31
3.7 Приказ сечења и предности/недостаци сечења	32
3.8 Тема АЕД примене.....	33
3.9 Предности/разлике резања под водом.....	35
3.10 Тема RMCS примене.....	36
3.11 Предуслов за стварање почетног импулса.....	38
4. Испирање воденим млазом (Wash out)	39
5. Експериментално сечење пројектила артиљеријске муниције калибра 100 и 105 mm ...	40
5.1 Параметри сечења TRZ – Чачак.....	40
6. Закључак	47
7. Скраћенице	48
8. Литература.....	49

Резиме

Овај рад се бави представљањем производног процеса резања муниције абразивним воденим млазом како би се повећала сигурност оператера, заштита животне средине и употреба материјала. Циљ овог рада је предлог аутоматске линије с резањем муниције абразивним воденим млазом како би се искористила сировина, повећала сигурност и заштита животне средине и искључили радници из процеса. У циљу проналажења и анализирања понашања процеса резања изведен је експеримент не-термичког експерименталног резања противтенковских зрна од 100 mm, Nk 100 SHK 44 ТК, помоћу абразивног млаза. На основу експерименталних резултата предложена је структура аутоматизованог система за резање муниције абразивним воденим млазом. Ова неконвенционална технологија се лако може имплементирати помоћу овог система. Повећана ефикасност је такође могућа при обради муниције уз коришћење добијених металних комадића.

Кључне речи: *абразивни водени млаз, противтенковски метак, аутоматска линија.*

Abstract

This paper deals with presenting a manufacturing cutting process of munitions disposal by abrasive water jet in order to increase safety of operator, environmental protection and material utilization. The paper aims at proposing an automatic line with abrasive water jet cutting of unused munitions in order to utilize raw materials, increase safety and environment protection and exclude workers from the process. In order to find out and analyze the cutting process behaviour a non-thermal experimental cutting was performed of 100 mm antitank bullet Nk 100 ShK 44 TK by abrasive jet. Based on experimental results the structure of AWJ automated cutting system for discarded munitions was proposed. This unconventional technology can be easily implemented by this system. Increased effectiveness is also possible during munitions processing with the utilization of obtained metal scraps.

Key words: *abrasive water jet, anti tank bullet, automatic line.*

1. Увод

У циљу повећања квалитета и смањења трошкова израде производа, јавила се потреба за проналаском нових материјала, али и унапређењем постојећих и развојем нових технологија обраде материјала. Предмет бројних истраживања је резање млазом воде (water jet) које се управо развило као релативно млада технологија обраде материјала резањем, а спада у нестандартне поступке обраде. Неконвенционални поступци обраде су поступци код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује кориштењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других видова енергије доведених непосредно у процес – зону резања.

Ова технологија почела је да се развија пред крај шездесетих година XX века. Упоредо са њеним развојем почиње и примена нових материјала, првенствено композита и керамичких материјала који примену налазе у авио и војној индустрији. Научници су пошли од теорије која претпоставља да се течност, сабијена екстремно високим притиском (реда величине 4000 до 6000 bar) и напуштајући дизну брзином чак до 1000 m/s, понаша као чврсто тело. У почетку је коришћен чисти течни млаз воде, а након 1983. године технологија је модификована много интензивнијим процесом течног млаза са додатком абразива. Крајем осамдесетих година, технологија почиње шире да се примењује и из оквира авио и војне производње све више улази и у цивилну употребу.



Слика 1. Резање млазом воде (Water Jet) [2]

Основу процеса представља чисти водени млаз или водени млаз са додатком абразивног материјала веома малог пречника (0,2 до 1 mm) који се под високим притиском судара са површином радног предмета. Технологија се базира на природним материјалима (вода и ситни песак), па није штетна по околину.

Одликује је изузетна прецизност, као и одсуство зоне утицаја топлоте, што значи да не мења структуру обрађиваног материјала. Притом је у питању технологија која се може применити на највећи број материјала који се користе у модерној производњи.

Технологија воденим млазом се користи за уклањање експлозива и погонских горива из велике муниције и ракетних мотора.

Настанку данашњег воденог млаза датира у патенту Др. Norman Franz, професор шумарства на универзитету Британске Колумбије, Канада 1968. Он је узео идеју компаније Ingersoll-Rand и израдили су први водени млаз високог притиска (око 50 000 psi) као алат за сечење водом, пре свега се користи у производњи намештаја. Ово се проширило на сечење многих неметалних материјала.

Америчка војска и морнарица су урадиле значајна истраживања у вези са коришћењем технологије воденим млазом за уклањање експлозива из муниције. Неколико од ових пројеката је уговорено на универзитету у Missouri at Rolla, где је много тога урађено да се одреде фактори сигурности у вези са воденим млазом уклањања експлозива.

Постројење је израђено и тренутно ради у Израелу на испирању експлозива на муницији од 105 mm и 155 mm. Постројење користи 5000 psi кавитациони млаз водом као средство за сечење. Хиљаде пројектила је испрано у овој фабрици.

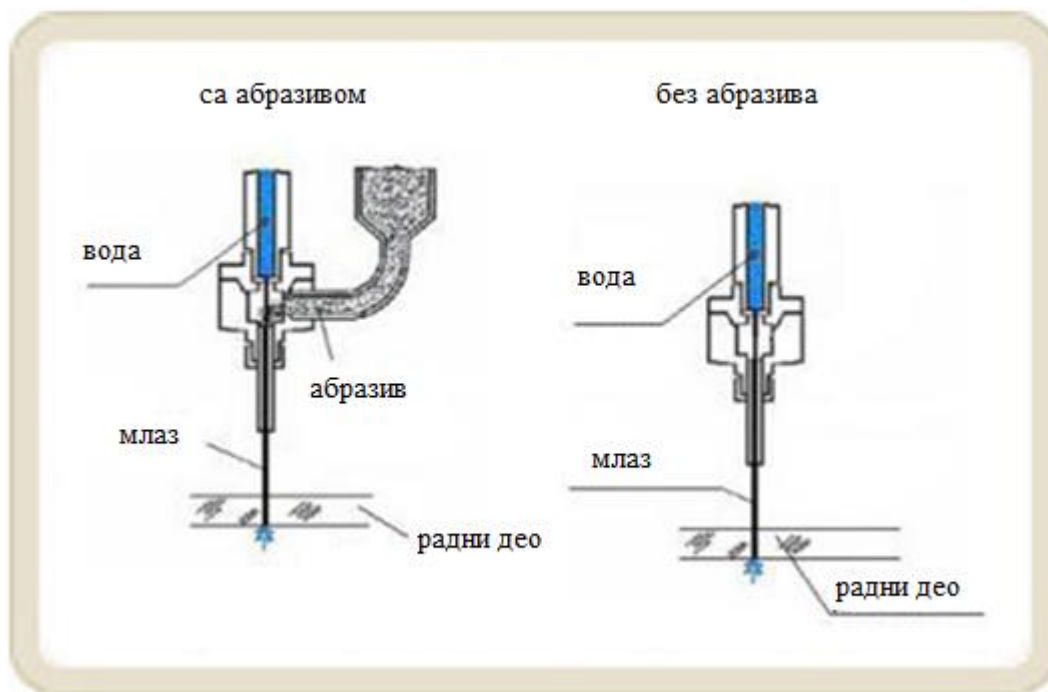
Веома је важно напоменути да се ова технологија може користити и за израду елемената муниције. Генерално, она се може примењивати код УБС, али овај рад ће бити фокусиран на артиљеријску муницију.

2. Карактеристике процеса резања млазом воде

2.1 Опис технологије

Процес резања заснива се на коришћењу кинетичке енергије млаза добијене услед изузетно велике брзине струјања воде (до 1000 m/s). Постоје два поступка обраде воденим млазом:

- обрада чистим воденим млазом (без додатака (слика 2) – за резање се користи искључиво млаз воде, тако да је поступак обраде ограничен на тање и мекше материјале) и
- обрада абразивним воденим млазом (са чврстим додацима (слика 2) – абразивом – у млазници се абразивна средства (нпр. камени песак) мешају са водом под високим притиском што је методу обраде учинило ефикаснијом и применљивијом за материјале веће дебљине и тврдоће).



Слика 2. Обрада абразивним и чистим воденим млазом [3]

2.2 Обрада чистим воденим млазом

Код машина за сечење чистим воденим млазом, као „алат“ се користи млаз воде настао истицањем под притиском. Потребан притисак обезбеђује пумпа високог притиска. Притисци који се данас користе у комерцијалној употреби су притисци величине до 400 МПа.

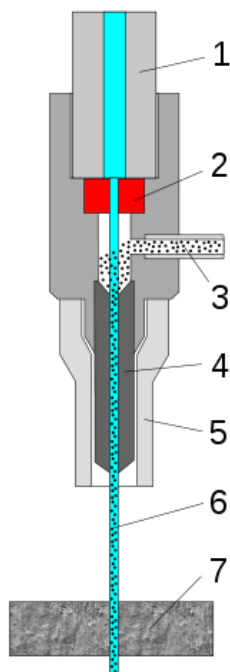
Вода под притиском се до резне главе доводи високопритисним цевима. У резној глави се налази млазница пречника отвора од 0,08 до 0,4 mm. Приликом истицања из млазнице, вода услед високог притиска и мале површине попречног пресека отвора млазнице излази брзином до 1000 m/s. На овај начин се могу резати неметали и храна. Поступак обраде чистим воденим млазом се примењује у процесима производње пелена, папира, у аутомобилској индустрији за сечење делова унутрашње декорације, делова од гуме и пластике итд.

Сечење чистим воденим млазом при притиску од 400 МПа није погодно за обраду метала због недовољне енергије млаза. Сечење метала чистим млазом воде би било могуће при притисцима између 700 и 1000 МПа, међутим садашњом технологијом и расположивим материјалима није могуће израдити пумпу и компоненте система који би задовољили све захтеве потребне за индустријску примену.

2.3 Обрада абразивним воденим млазом

Технолошки процес резања абразивним воденим млазом се изводи у производном простору помоћу високобрзинског водено - абразивног млаза.

Воденом млазу се, у међурезервоару за снабдевање резне главе, додају честице абразива при чему настаје абразивни водени млаз. Абразивни водени млаз се сужава на обрадак абразивном млазницом чији је пречник од 0,75 до 1,2 mm. Задатак млаза воде је да пренесе кинетичку енергију на честице абразива и усмери их према обратку.



Слика 3. 1. Улаз воде под високим притиском 2. Драги камен 3. Абразиви 4. Цев за мешање 5. Водилица 6. Водени млаз који реже 7. Обрадак или радни комад [3]

Ово доприноси томе да је сам процес обраде абразивним воденим млазом сличан брушењу с том разликом да абразивна зрна нису уграђена у тоцило (брус) већ се налазе у млазу воде. Резање абразивним воденим млазом се примењује за сечење тврдих материјала као што су: метали, камен, керамика, стакло, композити итд. Захваљујући додавању зрна абразива која повећавају снагу резања, учинак резања абразивним воденим млазом је више стотина пута већи од учинка резања чистим млазом воде.

Основни делови система за резање млазом воде са абразивом (AWJ) су:

- довод воде,
- систем за генерисање високог притиска воденог млаза,
- резна глава са резервоаром за абразив,
- резервоар за скупљање абразива и одвојених честица након резања,
- систем за управљање помоћу рачунара којим се дефинише путања резне главе.



Слика 4. Основни делови AWJ система [4]

2.4 Систем за генерисање високог притиска

На самом улазу система за генерисање високог притиска поставља се филтер који треба да обезбеди захтевани квалитет воде. Основни део система за генерисање високог притиска је хидраулична пумпа, при чему су у употреби:

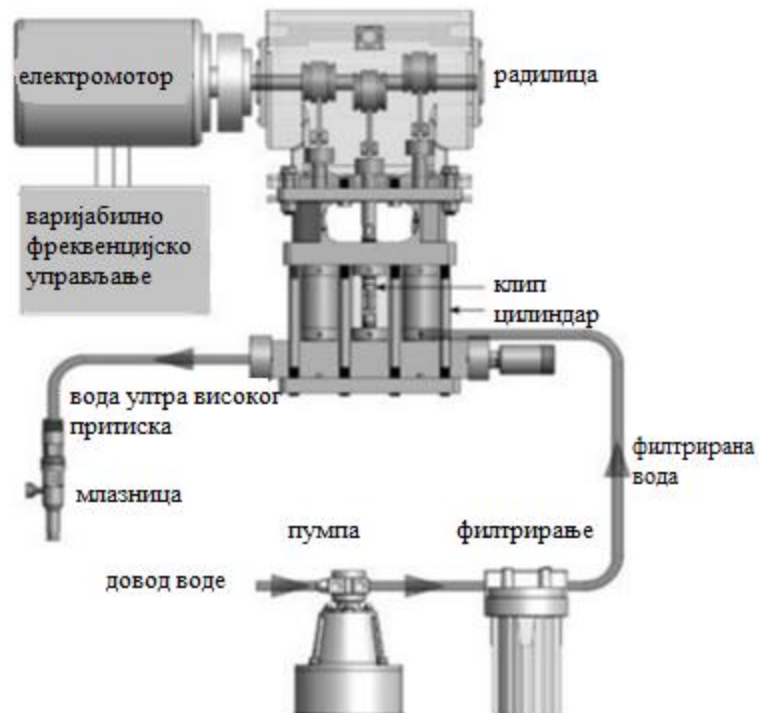
- хидрауличне пумпе са радилицом (слика 5) и
- хидрауличне пумпе са појачавачима (слика 6).

Хидрауличне пумпе са радилицом користе се за ниске и средње притиске (до 270 МПа). На радилицу, која је везана за електромотор, повезано је три или више клипова који се креће сталном брзином. Померањем клипа у горњи положај отвара се једносмерни вентил који „повлачи“ одређену количину воде у цилиндар. Његовим спуштањем у доњи положај вода се даље потискује и долази до следећег цилиндра. С обзиром на то да је неопходно осигурати константан и ламинаран проток воде високог притиска, ове пумпе није препоручиво користити за веће притиске.

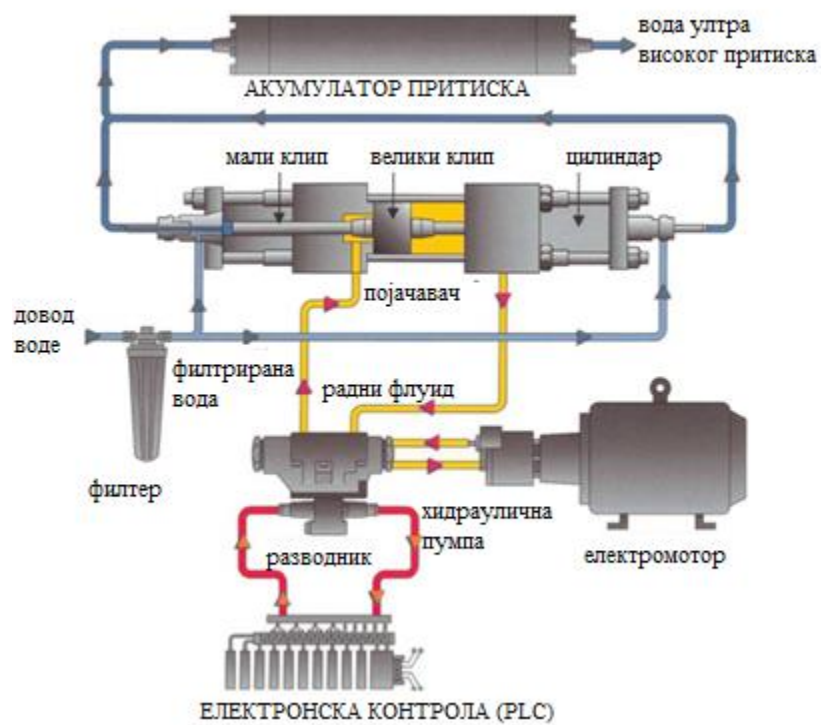
Ако је потребно остварити више притиске воде (изнад 400 МПа) користе се пумпе са једним или више појачавача.

Хидраулична пумпа (погођена помоћу електромотора) потискује радни флуид (уље) кроз леву или десну грану, тј. са једне или друге стране великог наизменично покретног клипа, у зависности од положаја разводника који се дефинише посредством програмабилног логичког контролера (PLC). За велики клип су причвршћена и два мања клипа – један у левом а други у десном цилиндру. Ако се хидраулични флуид (уље) креће левом граном, клипови ће бити потиснути из левог положаја према десном. Тиме ће се отворити вентил у цилиндру мањег клипа, па вода из леве улазне гране испуњава простор унутар левог цилиндра. Преусмеравањем разводника тако да се радни флуид потискује десном граном, клипови се померају у леву страну. Тада ће се вода из левог цилиндра потиснути у леву излазну грану, при чему ће се на десној страни појачавача, тј. у десном цилиндру, отворити вентил који „повлачи“ воду из десне усисне гране. Процес се наизменично понавља. Интензитет појачања појачавача пропорционалан је односу површина попречних пресека великог и малог клипа.

Још један важан елемент пумпе са појачавачима је тзв. акумулатор притиска односно пригушивач. С обзиром на то да је неминовно наизменично померање клипова долази до осцилација у притиску воде, тј. до њеног ритмичног струјања на излазу из млазнице што може довести до грешака при резању, односно појаве видљивих трагова на резној површини. С тога вода високог притиска, пре доласка до резне главе, пролази кроз акумулатор притиска који представља посуду под високим притиском која има задатак да ублажи флукуације притиска које производи појачавач и проследи константан и стабилан млаз воде. Пригушивач није неопходан код пумпи са радилицом, јер оне дају готово константан притисак. Хидрауличне пумпе са појачавачима су скупље, али су им зато нижи трошкови одржавања и имају дужи век трајања, јер пумпа са радилицом ради у више тактова па је потрошња вентила и заптивки знатно већа.



Слика 5. Тростепена хидраулична пумпа

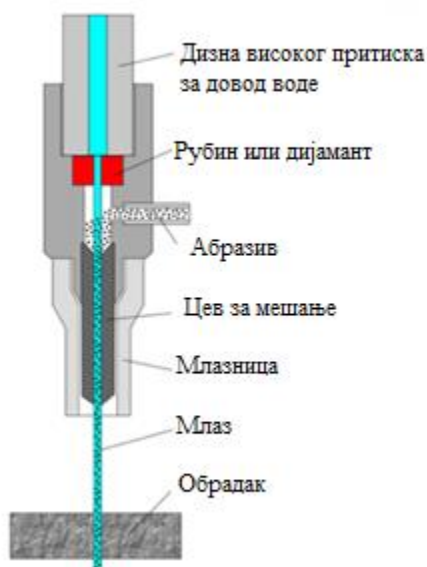


Слика 6. Хидраулична пумпа са појачавачем [4]

2.5 Резна глава

Резна глава (слика 7) у многоме може утицати на ефикасност поступка резања млазом воде али и изглед обрађене површине. Због тога је она предмет константног усавршавања.

С обзиром на то да је пречник излазне цеви млазнице веома мали, а да на воду делује изузетно висок притисак, то се мора обезбедити да млаз воде у потпуности буде центриран на излазу из млазнице. У противном би дошло до проширења излазног пречника што би даље условило појаву слабијег квалитета обраде. Да би овај услов био задовољен, користи се ситан део од рубина или дијаманта у коме је изузетно прецизно израђен цилиндрични или конусни отвор. Млаз воде под високим притиском пролази кроз отвор у рубину или дијаманту који су веома тврди те нису подложни деформацијама или оштећењу.



Слика 7. Резна глава [3]

У резној глави, односно у цеви за мешање, долази до мешања воде под високим притиском и абразивних честица (слика 8) које се из посебног резервоара доводе до резне главе. Процес мешања је доста сложен с обзиром на турбулентну природу млаза. Како на воду делује велики притисак, то се водени млаз креће великом брзином, а самим тим са собом носи и велику количину кинетичке енергије. Вода у цеви за мешање захвата абразивне честице и убрзава их, тј. предаје им део кинетичке енергије. Други део енергије се губи. С обзиром на то да вода при великој брзини захвата абразивне честице, то долази до њиховог ломљења на које се троши одређена количина енергије.

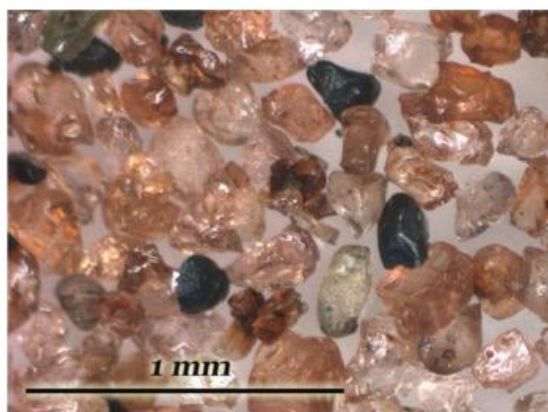
Губици енергије се јављају и услед удара честица о зидове цеви који доводи до даљег лома честица. Долази и до међусобног судара честица, тако да већ при самом формирању млаза део честица бива толико уситњен да представља отпад. Честице у млазу ротирају огромним брзинама које се крећу од неколико хиљада до пет милиона обртаја у секунди. Од абразивних честица се захтева да су отпорне на раслојавање и да су тврде.

Дакле, абразивне честице и сломљене абразивне честице локално ометају проток воде, тј. смањују га. Млаз потом излази кроз излазну цев која, осим што служи за фокусирање млаза, служи и за повећање брзине истицања и кинетичке енергије с обзиром на то да у њој долази до коначне редукције попречног пресека млаза. Због удара абразивних честица о унутрашње зидове цеви за усмеравање долази до њеног трошења које је нарочито изражено у горњем делу цеви. Због трења између абразива и зидова цеви, које може утицати на смањење брзине млаза, препоручује се да излазна цев (цев за фокусирање) не буде много дугачка, при чему јој пречник треба бити до пет пута већи од пречника абразивних честица.

Настали млаз има приближно цилиндрични облик, а његов облик и димензије зависе од:

- димензија млазнице,
- облика цеви за фокусирање,
- врсте абразивног материјала,
- масеног протока абразива,
- удаљености цеви за фокусирање од површине обрађиваног материјала.

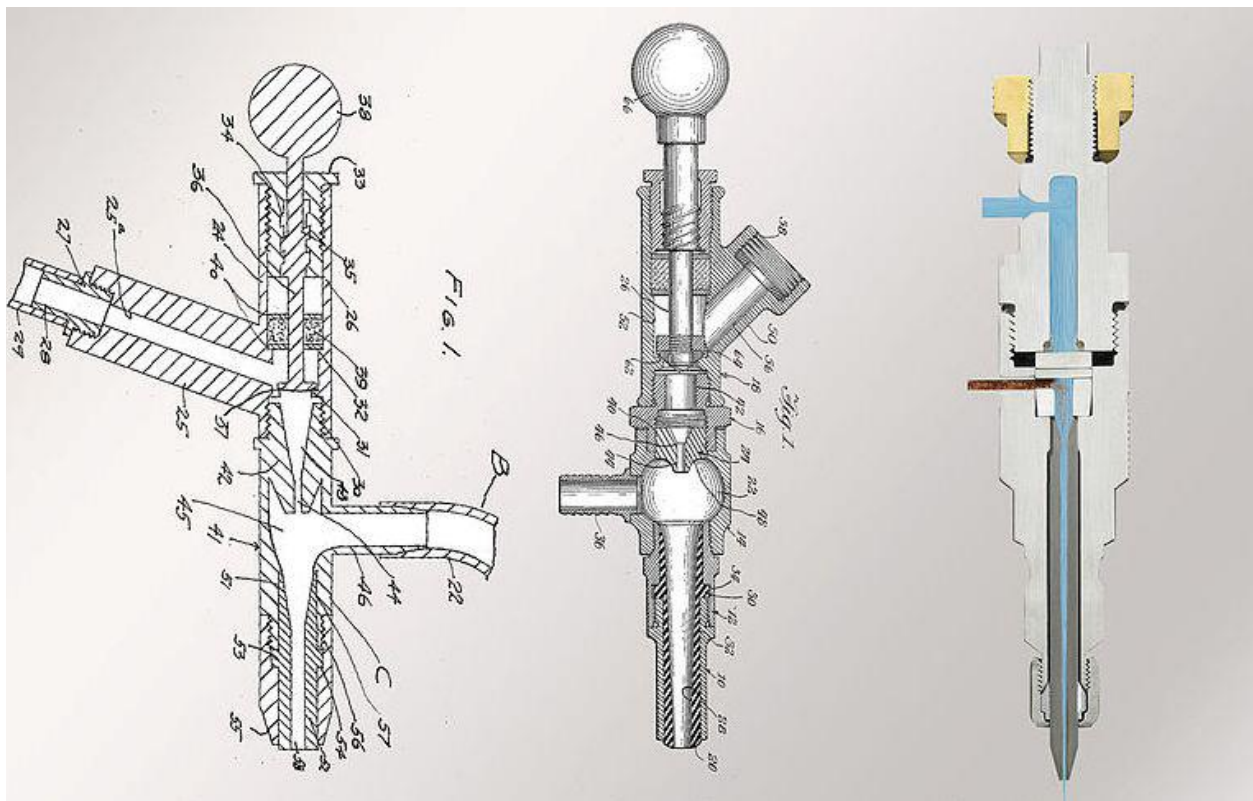
Због утицаја околине млаз континуалан облик задржава само на малом сегменту након напуштања млазнице, па је због тога пожељно да резна глава буде што више примакнута обрађиваном комаду (од 1 mm до 3 mm). Млаз губи енергију и мења облик у зависности од смера резања, брзине млаза и типа и дебљине обратка. Искоришћена вода се, помоћу посебних система, може рециклирати и поново користити за процес резања, мада је понекад довољно извршити стандардни процес филтрирања претходно коришћене воде. Систем за воду – абразивно резање троши свега до 4 литра воде у минути.



Слика 8. Увећан приказ абразивних честица [3]

Најчешће се користе Гарнет абразивна зрна. Њихова потрошња се обично креће у границама од 0,25 до 0,68 kg/min, а могу се и рециклирати.

Систем за довод абразива до резне главе је доста сложен, јер проток абразива треба прилагодити осталим условима. Раније се проток абразива прилагођавао врсти и дебљини обрађиваног материјала. У последње време је тај систем поједностављен тиме што се проток абразива прилагођава само протоку воде, док се брзина кретања млазнице прилагођава врсти и дебљини материјала који се реже.



Слика 9. Развој модерне абразивне млазнице [3]

Elmo Smit (1935)

Lesli Tajler (1937)

Пресек модерне млазнице

2.6 Систем за управљање помоћу рачунара

Веома је пожељно употребљавати рачунарски систем за управљање процесом резања млазом воде. То поспешује прецизност резања и отвара могућност аутоматизације поступка, што је веома битно при производњи великих серија, а уједно пружа могућност једноставне израде комада без претходне израде радионичких цртежа (уколико то врста и намена комада дозвољавају). Рачунарски систем за контролу над процесом резања компатибилан је са CAD фајловима. То значи да у неком CAD софтверу можемо нацртати елемент који желимо изградити, а потом документ у коме је нацртан елемент имплементирати у адекватан софтвер и на основу цртежа дефинисати путању резне главе. Софтвери за управљање процесом резања развијени су до те мере да се без претходног знања о програмирању, а за свега неколико сати, радник може обучити за рад у њему.

Предности:

Знатне су предности поступка резања водо – абразивним млазом у односу на конвенцијалне поступке обраде, што ову методу чини све применљивијом и доприноси њеном даљем усавршавању.

- Поступак резања млазом воде не зависи значајно од својстава обрађиваног материјала, те се могу резати и чврсти и деформабилни материјали, металног или неметалног порекла.
- Док се већина других технологија резања одликује загревањем резних површина, тј. уношењем топлоте у зону резања, резањем млазом воде се избегава та непожељна појава, јер управо млаз воде хлади резне површине. Тиме се спречава појава заосталих напона и деформација при резању, а резна ивица бива fino обрађена за разлику од поступака резања са уношењем топлоте попут ласерског резања (слика 10), па најчешће нема потребе за додатном обрадом резних површина.



Слика 10. Изглед резне ивице [2]

- Због директног хлађења резних површина технологија је веома погодна за обраду материјала са високом топлотном проводношћу, као што су нпр. бакар и алуминијум.
- За резање се користи само један алат – водо абразивни млаз за све операције резања, што није случај са већином других поступака резања код којих се примењује више различитих алата. Дакле, водо – абразивни млаз може се користити за резање, бушење, пробијање, просецање, брушење, израду зупчаника, глодање...
- Водо – абразивни млаз кинетичку енергију предаје материјалу на врло малој површини, тако да ширина резне зоне износи свега око 0,3 mm за тање (у специјалним случајевима чак и до 0,08 mm), односно до 3 mm за дебље материјале, што поспешује искоришћеност материјала. Могу се остварити толеранције резања у границама од 0,025 mm до 0,127 mm.
- При резању вода паралелно уклања и одвојене честице са површине материјала.
- Технологијом резања млазом воде се спречава ослобађање честица обратка у ваздух, што је веома битно при резању канцерогених или токсичних материјала.
- Могућност рачунарске нумеричке контроле процеса резања омогућава прецизну обраду.

- Још једна битна предност ове технологије је да апсолутно није штетна по околину.
- Могу се израђивати доста комплексни геометријски облици (слика 11).



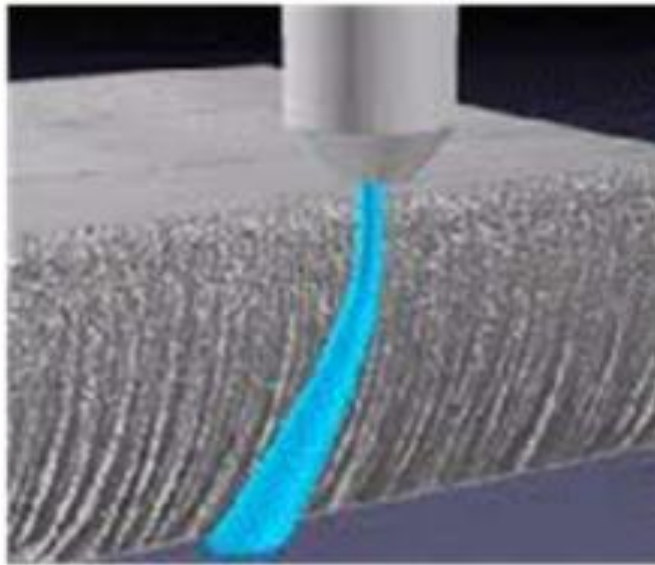
Слика 11. Различити геометријски облици добијени резањем млазом воде [2]

Недостаци:

- Недостатком овог поступка резања може се сматрати чињеница да постоји опасност од кородирања површина обрађиваног материјала који није корозионо постојан. Међутим, и овај се проблем решава заштитом од корозије пре самог почетка резања или након резања и сушења обрађиваних површина.
- Примењивост ове технологије ограничена је само на тање материјале, мада су се њеним константним усавршавањем успеле постићи дебљине резања веће од 200 mm.
- Недостатак ове методе огледа се у појави разлика у храпавости обрађене површине које су израженије при резању дебљих материјала. Главни узрочник ове појаве огледа се у чињеници да са повећањем дубине долази до губитка кинетичке енергије која се користи за одвајање честица материјала. Због тога доње површине бивају храпавије од горњих.
- Висока је цена опреме за резање млазом воде.

2.7 Изгед обрађене површине

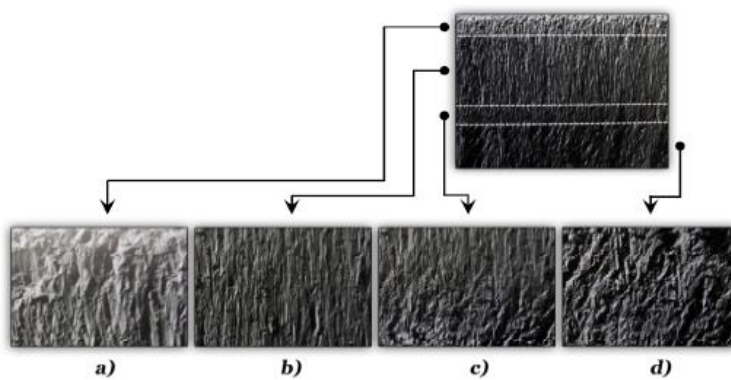
Још увек у довољној мери није истражен утицај водо – абразивног млаза на изглед обрађење површине. Како највећа кинетичка енергија делује у условима врло мале удаљености млаза од излазне цеви, то ће при порасту дубине резања долазити до пада кинетичке енергије и деформације млаза (слика 12), што узрокује разлике у храпавости резне површине.



Слика 12. Деформација млаза са повећањем дубине резања [2]

Микроструктура резне површине указала је на постојање следећих зона (слика 13):

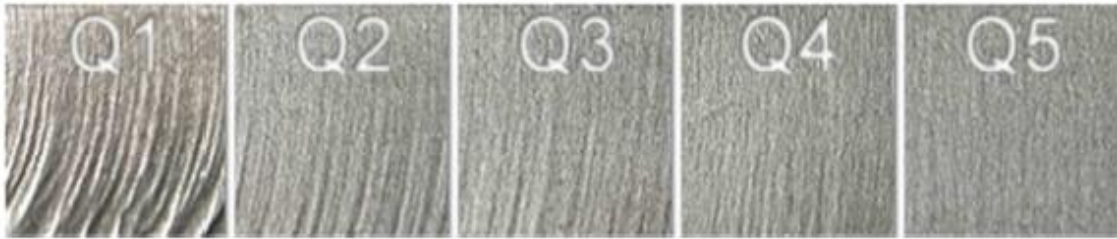
- a) зона иницијације,
- b) глатка зона,
- c) прелазна зона (према различитим ауторима се третира или не третира) и
- d) храпава зона.



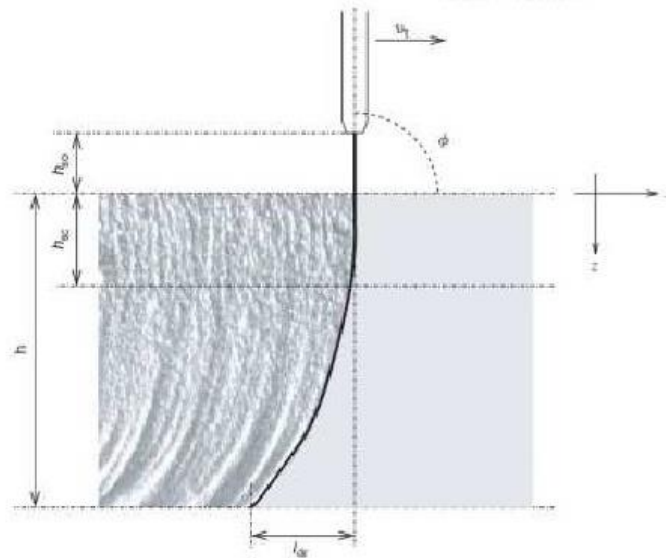
Слика 13. Микроструктура резне површине [2]

При првом удару млаза о материјал долази до стварања малог кратера (зона иницијације), а затим почиње резање. Зона иницијације се одликује нешто већом храпавошћу због повећаног отпора резању материјала. Горњи део резне зоне је гладак, док је доњи део храпавији. Прелаз између глатке и храпаве зоне може бити постепен или скоковит. Технологију резања абразивним млазом карактеришу четири основна параметра резања, а то су:

- радни притисак,
- проток абразива и воде,
- брзина резања,
- удаљеност млазнице од површине радног комада (слика 14).



Слика 14. Различите храпавости резне површине [2]



Слика 15. Шематски приказ геометрије [2]

v_t – попречна брзина резне главе,
 ϕ – упадни угао,
 h_{so} – удаљеност резне главе од обрадка,
 h – дубина реза,
 h_{sc} – дубина резања глатке зоне,
 l_{dr} – заостајање млаза.

Квалитет Q_1 добија се када је потребна велика брзина резања (велика продуктивност) уз мали квалитет и тачност обраде. Такође, оваква површина се може добити са великим пречником млазнице, малим и недовољним притиском воде или старом (оштећеном) млазницом.

Квалитет површине Q_2 се добија када захтеви за толеранцијом дела и квалитетом површине нису доминантни.

Квалитет површине Q_3 је најчешће захтеван. У овом случају постиже се усклађивање брзине предмета обраде и притиска млаза воде.

Квалитет Q_4 је бољи од квалитета Q_3 , а добијен је смањењем брзине предмета обраде.

Квалитет Q_5 је веома висок и постиже се код високо прецизних делова, али са веома малим брзинама обраде предмета.

3. Употреба технологије сечења воденим млазом код муниције

Широм света је ускладиштено много муниције која у себи има концентрисан скуп материјала који је неискоришћен. Муниција значајно представља потенцијални ризик за човека и његово окружење. Према анализи коју је направио Ктеџ пронађено је да се одбачена муниција уништава коришћењем конвенционалних техника као што је одлагање на мору, спаљивањем на отвореном и детонацијом, рударске детонације као и отворено горење са неутрализацијом сагоревања. Уништавање одбачене војне муниције конвенционалним начинима представља изузетно опасан процес који је данас неприхватљив. Поступак производи опасан отпад који садржи углавном Рb. Насупрот томе постоје неконвенционални начини обрађивања одбачене муниције са коришћењем не-термичког начина – резање (сечење) абразивним воденим млазом (AWJ).

Технологија која се назива абразивни водени млаз (AWJ) је индустријски коришћена од 1983. Технолошки процес користи трансформацију млаза високог притиска и велику брзину воденог млаза као алат за сечење материјала.

Додавањем одређеног финог абразива (чврсте честице) постиже се боља ефикасност резања, чиме се проширују могућности коришћења воденог млаза. Хладни ефекат процеса абразивног воденог млаза омогућава сечење више компонентних материјала у свим правцима, уз једноставно сечење облика.

Главне предности су:

- могућност сечења неких сложених материјала,
- употреба на меким и тврдим материјалима,
- нема потребе за фиксирањем радног предмета,
- хетерогеност облика,
- нема варница приликом сечења,
- висока тачност,
- поузданост и једноставност рада,
- могућност завршетка на било ком месту,
- могућност сечења вишеслојних материјала.

Ове предности представљају технологију абразивним воденим млазом као технологију за побољшање процеса демилитаризације муниције. Ово поље истраживања није обухваћено и многи проблеми остају нерешени. Стога, циљ овог рада је дизајнирати аутоматску линију уз коришћење те технологије. Сврха је побољшање сигурности, искључење радника на минимум и коначно уштеда природних ресурса коришћењем рециклираних материјала добијених од уништавања исечене муниције од стране абразивног воденог млаза.

3.1 Приказ стања

При избору методе уклањања муниције, морамо узети у обзир нека основна питања:

1. Каква врста муниције се очекује да буде уништена?
2. Ко ће то учинити? (оружане снаге, полиција, приватна кућа за обезбеђење)
3. Где ће се догодити? (у објекту компаније, на месту изван стамбених подручја или у случају да пренос муниције представља велики ризик, на месту где је пронађена)
4. Колико муниције треба уништити? (једну или неколико хиљада).

Тек након одговора на ова питања можемо пронаћи најбољи начин одлагања при чему морамо узети у обзир трошкове и еколошке последице било које врсте одлагања. Данас се начини одлагања могу поделити на два основна типа:

- класичне и
- нове методе.

Табела 1. Преглед класичних метода одстрањивања одбачене муниције

Технологија	Технолошки услови примене
Детонација на отвореном	Не постоји друга технологија. Транспорт није могућ. Високих сигурносних ризика у области уклањања муниције. Велика и средња.
Сагоревање на отвореном	Не постоји друга технологија. Ограничена количина муниције.
Ротациона пећ	Велики број мале и средње муниције. Након прилагођавања применљивим за муницију великог калибра.
Сагоревање течности	Велика количина експлозива и горива. Могућа употреба енергије.
Деконтаминација врућег гаса	Велика количина контаминираног отпадног метала.
Детонацијске коморе	Ограничена количина примене.
Технологије раздвајања	Рециклирање и поновно коришћење.
Експерименталне технологије конверзије	Посебну апликацију за опасне материје као спречавање високо токсичних супстанци за заштиту животне средине.

У погледу утицаја на животну средину и здравље људи, класичне методе имају веома катастрофалан утицај тј. емисије тешких метала (олово, антимон, баријум), емисије токсичних гасова (HCl, SO, HCN), емисије високо токсичних супстанци (азбеста) и концентрације подземних вода и земљишта. За особље које се бави уклањањем муниције а исто тако и за становнике у оближњим градовима то значи повећан ризик од канцерогених болести и тровања тешким металима. Услови за одабир једне од одговарајућих метода описане су у табели 1.

Методе за одабир исечене муниције користе се у широком спектру механичких, електричних, топлотних и хемијских процеса за уклањање материјала. Поред „конвенционалних“ технологија за сечење које су одговориле на потребу за машинском обрадом нових материјала, на пример користећи нове материјале за сечење (резање керамике) нове технологије познате као прогресивне (неконвенционалне) технологије такође помажу у проблемима материјала који се тешко обрађују. Међу новим начинима одлагања одбачене муниције укључени су:

1. ласерско сечење,
2. сагоревање у плазма пећима,
3. топљење,
4. испирање,
5. сечење амонијаком и
6. сечење хидроабразивном водом.

Термичке методе се углавном користе за сечење муниције али је могуће користити течност. Резање материјала са воденим млазом је не-термални метод у којем нема додатне топлоте материјалу. Коришћење одговарајућих материјала (течности) може бити потребно због њихових хемијских састава како би се постигли адекватни резултати. Амонијак је показао погодне особине. Амонијак је безбојан инертан гас на собној температури. Данас је то једна од најпроизводивих хемикалија са обимом производње од 90 милиона тона годишње. Амонијак се користи за сечење ракета М60 и М61 које су попут копија хемијске ракете М55, ради постигнутог елиминисања хемијских супстанци алкалним металима раствореним у гасовима амонијака и за чишћење других делова муниције због њихове поновне употребе или рециклирања. Велики посао на терену су урадили Miller, Summers, Fossey који припадају пионирима међу онима који користе високи притисак абразивног воденог млаза као одрживу алтернативу у тој области. Сви извештаји показују да технологија абразивног воденог млаза има велики потенцијал због тога што се у материјалу не јавља никаква зона захваћена топлотом или промена молекуларне структуре. Нема изобличења као што се види са типичним методама сечења топлотом. При сечењу материјала који је обично повезан са опасним финим честицама, оне се уклањају и одводе са површине у резервоар са водом, елиминишући ризик и опасност.

3.2 Експериментално сечење и дискусија

Машински тест је спроведен на подесивом прецизном резном столу компаније PTV, намењен за примену технологије AWJ. За експериментално испитивање коришћен је противтенковски метак дебљине 100 mm (пројектил) и 130 mm (случај). Радни комад је био машински алат који је генерисала FLOW9×D55 са $Q = 4,7 \text{ l/min}$ са снагом $P = 60 \text{ HP}$ са Ingersoll Rand резном главом. Детаљни услови резања у експерименту приказани су у табели 2.

Табела 2. Експериментални параметри сечења

Фактори	Ниво
Притисак p :	350 Мпа
Брзина пролаза v :	15 mm/min
Абразивни масени проток ma :	300 g/min
Пречник воденог отвора d :	0,33 o / min
Пречник фокусиране цеви df :	0,8 mm
Дужина фокусиране цеви lf :	72 mm
Удаљеност z :	3 mm
Број пролаза:	1
Нападни угао:	90°
Број пролаза:	Осовински правац
Абразив:	Barton Garnet
MESH	80
Карактеристике појачавачем PTV-37-60 PUMP	
Врста појачавача:	Двоструко
Притисак у хидрауличном колу :	37 МПа
Појачавање односа:	20
Максимални притисак:	415 МПа
Обим акумулатора :	20 V/l
Водена маса протока :	3,68 l/min

Сечење муниције хидроабразивним млазом приказано је на слици 17 која приказује делове артиљеријског метка. Слика 18 приказује пресек пројектила створеног абразивним воденим млазом.

Експериментално сечење је започето на ободу чауре која се користи за пуњење користећи брзину 15 mm/min. Експериментална копија противтенковског метка потписана као 100 ShK 44 ТК била је без барута и експлозивног пуњења. 100 ShK 44 ТК је индикација топа унутрашњег пречника за метак. Nk је знак за пуњење. Ако узмемо у обзир континуирани рад и нето радно време без времена потребног за одржавање и сервисне паузе добијемо 22,5 сати – 1350 минута.

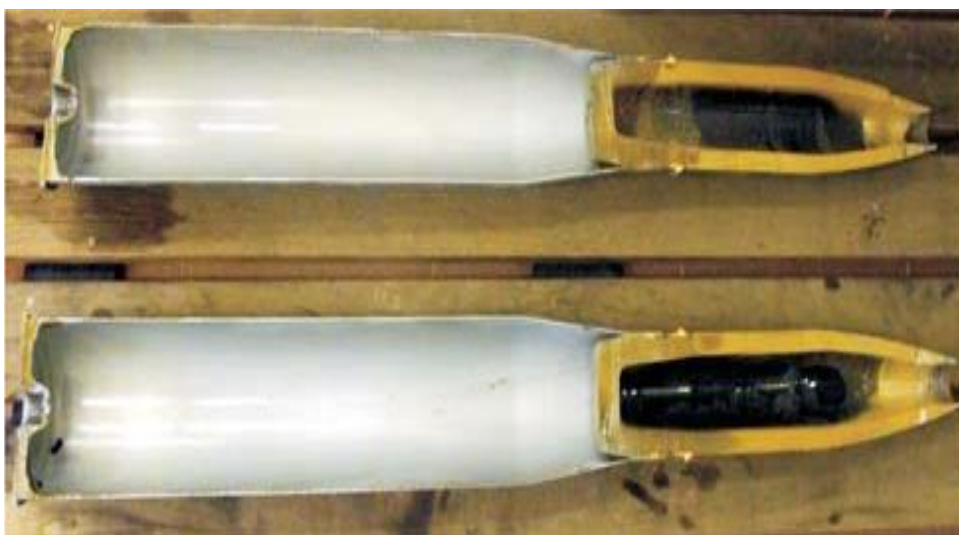


Слика 16. Артиљеријска мунџија 100 mm [1]

Од тог времена потребно је одузети време за руковање метком. Овај пут зависи од брзине преноса робота за руковање. Да би смо видели да ли ће абразивни водени млаз да пресече мунџију користили смо копију 100 mm артиљеријске противоклопне ракете укупне дужине 1000 mm са имитацијом припале, које запали погонско гориво.



Слика 17. Експериментално резање противтенковског метка са абразивним воденим млазом [1]



Слика 18. Пресечен метак са чауром [1]

Метак са пуњењем је био сечен на машини која се обично користи у производњи. Пролазна брзина при експерименталном сечењу метка износила је 15 mm/min. Потрошња воде, абразива и укупног времена по метку са пуњењем је приказана у табели 3.

Табела 3. Потрошња материјала и продуктивност

Брзина пролаза:	15 mm/min
Потрошња воде:	4 l/min
Потрошња абразива:	300 g/min
Укупно време сечења:	67,2 min
Дневна потрошња воде:	5400 l
Дневна потрошња абразива:	1620 kg
Дневна производња:	20 комада

Овај пројектил је исечен са пуњењем. Међутим ако се метак одвоји од подлоге, део обода и пуњења које је испуњено барутом или кордитом, биће више продуктивно. Пуњење се може испразнити окретањем наопако, тако да ће се време сечења значајно смањити а дневна производња ће порастати. Овакав начин обраде метка препоручује пиротехника углавном из безбедносних разлога. Код хидроабразивног сечења метка (слика 17) не постоји мешање два различита пиротехничка елемента (пуњење и меци), где је једно пуњење за прах а друго за пластику.

Могућност дневне производње ако смо само резали метак дужине 430 mm приказана је у табели 4. Приказано је да број метака који се може исећи применом абразивног воденог млаза се повећава за 133,5 %. Али у том случају неопходно је укључити време потребно за пренос реза метка и време за руковање новим метком који се сече.

Табела 4. Потрошња материјала и продуктивност

Брзина пролаза:	15 mm/min
Потрошња воде:	4 l/min
Укупно време сечења:	28,9 min
Дневна потрошња воде:	5400 l
Дневна потрошња абразива:	1620 kg
Дневна производња.	46 комада

3.3 Предлог радног места за одстрањивање муниције абразивним воденим млазом

Приликом пројектовања радног места за сечење муниције, потребно је размотрити неколико важних аспеката:

- ✓ безбедност за запослене и животну средину,
- ✓ како би се избегла инцидентна ситуација,
- ✓ минимални број особља који служе или њихово потпуно искључивање приликом обраде метка,
- ✓ могућност непрекидног рада (осим времена потребног за одржавање и чишћење).

Из ових разлога радно место се дели на два независна радна места. Ако смањимо раднике на минимум током руковања метком, три радника су довољна за редовну операцију, под условом да се целокупно руковање муницијом остави роботима. Једино место где су потребни радници је место где се врши распакивање контејнера муниције која је сада спремна за складиштење на специјалним палетама. Остала два радника задржаће се као оператери предложених аутоматских линија, по један за свако одељење.

Предложени концепт мора бити модуларан како би се осигурала и омогућила флексибилност континуираног побољшања. Квалитет система се може повећати системом надзора заснованим на анализи вибрација или акустичној емисији због сечења проблематичних делова метка.

Коришћењем овог метода могуће је осигурати технолошку ефикасност процеса уклањања материјала. За успешну реализацију комплетне аутоматске муниције обрада технологије сечења са абразивним воденим млазом је неопходна за развој нове употребе и уређаја. У циљу обезбеђења система за производњу нултих дефеката са доступним мониторингом, који је тренутно делимично проучен.

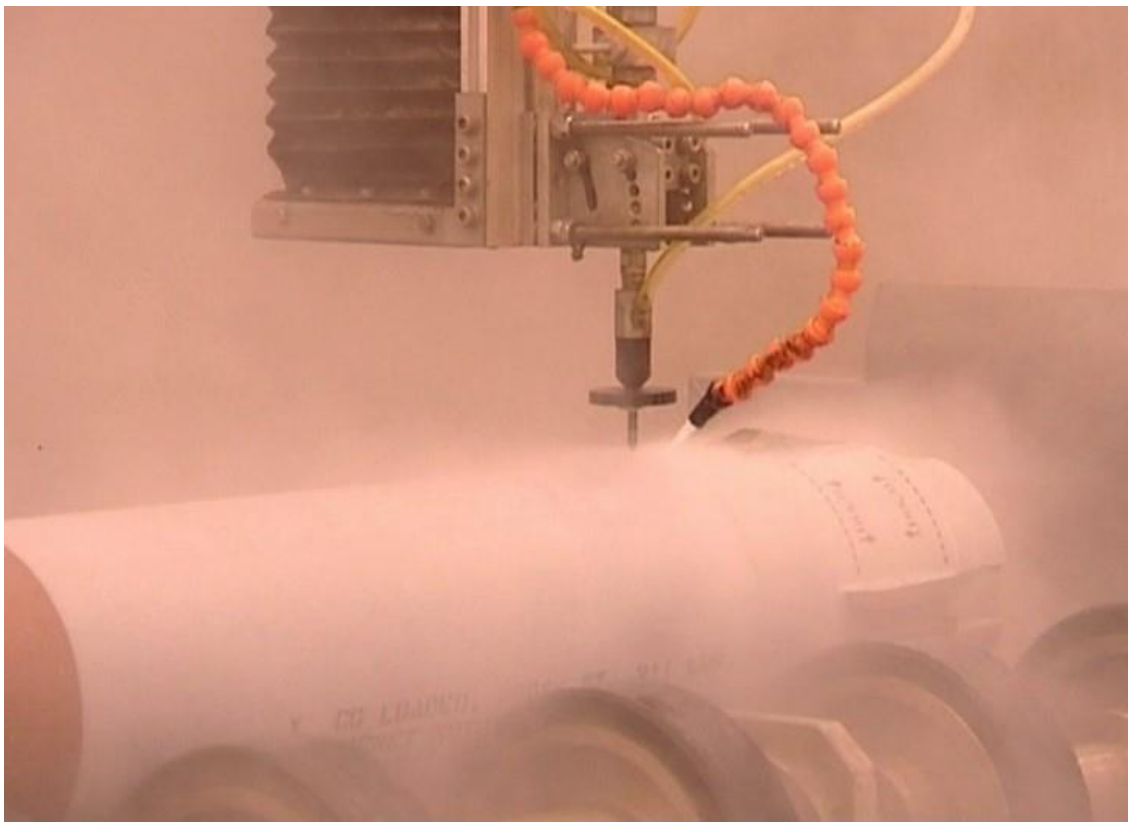
3.4 Сечење воденим млазом

Техника сечења воденим млазом подразумева отварање муниције помоћу воденог млаза са високим притиском и неким абразивним материјалом, попут граната. То је моћна алтернатива конвенционалним аtima резање метала. То је релативно сигурна метода. Док вода хлади метал могуће паљење експлозива је потиснуто. Ова техника се може користити на оној муницији која не може бити отворена обрнутом монтажом (неправилна муниција или муниција у лошим условима).

Ова техника је монтирана на многим различитим калибрима, од 20 mm до веома великих бомби, минобацача и пиротехничких ракета и то на врло осетљивим деловима (упаљачи) и процес није изазвао никакву нежељену реакцију. Граната се може сећи уздужно тако да ће већина компоненти бити доступна за уклањање, али из безбедносних разлога, пожељна операција је да се сече око упаљача док се не ослободи кућиште (пуњење). муниција мора бити исечена под водом како би се избегла бука и ширење абразива и остатка око подручја као и да би се избегло стварање варница услед контакта два метала (метал о метал). Вода контаминирана експлозивом се сакупља и може се поново користити након филтрирања, али на крају се мора третирати као отпад који садржи експлозив.



Слика 19. Сечење воденим млазом по највећем пречнику



Слика 20. Испирање воденим млазом

Значи ова технологија користи течност под притиском за резање или уклањање материјала. Има две главне улоге у демилитаризацији, и то:

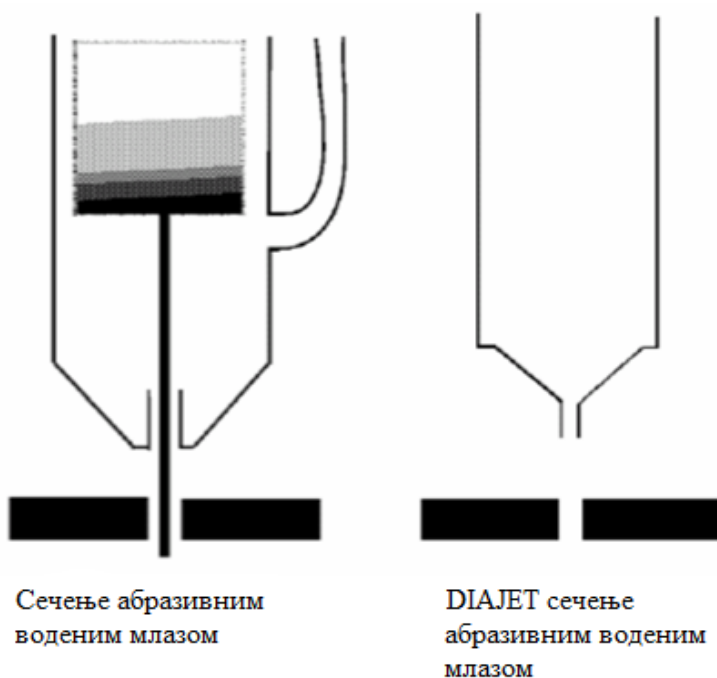
- ❖ Демонтажа при сечењу или сечење муниције. Најснажније може уклонити муницију док је у кућишту. Мање моћне млазнице се могу користити за смањивање величине нестручних енергетских материјала за уништавање.
- ❖ Испирање од енергетских материјала из кућишта.

Флуидни млаз – процес коришћења флуида високог притиска до 410 МПа, усмереног кроз отвор. Брзина честица у млазници са течношћу је обично веома висока, максимално 1000 ms^{-1} и способна је директно сећи многе материјале мале чврстоће ниске потрошње без употребе додатних абразива.

Абразивни флуидни млаз (Abrasive Fluid Jet - AFJ)– флуидни млаз који, након што се течност убрзава према отвору, усисава абразивне честице и меша их механичким деловањем у великој брзини тока течности унутар фокусирајуће цеви.

У зависности од абразивних и других параметара, млазеви абразивних течности могу да исеку практично било који материјал. Најчешће коришћена течност је вода и зато се зове абразивни водени млаз.

Абразивни брусни (густи) млаз (Abrasive Slurry Jet - ASJ) – познат и као брусни алат за директно убризгавање, систем који користи мешавину течности и абразивну густину, која је притом под притиском а мешавина велике густине пролази кроз млазницу. Иако је брусни млаз потенцијално ефикаснији од абразивног млаза када раде при истим притиском, тренутни притисак у производној оперми је само око 20 процената од абразивног млаза и има пропорцијално нижу ефикасност. Разлика између абразивног воденог млаза где је абразив помешан у млазници и брусног воденог млаза где је абразив мешавина далеко од млазнице илустровано је на слици 21.



Слика 21. Поређење AWJ (лево) и ASJ (десно) [3]

Кавитациони флуидни млаз (Cavitating Fluid Jet - CFJ) – средњи притисак, отприлике 68 МПа, процес воденог тока са специјалном млазницом која изазива „природну кавитацију“ (формирање паре мехурића) у току флуида. Кавитациони млаз флуида укључује иницијације, расте утицај мехурића паре против циљаног материјала. Колапс ових мехурића паре изазива интензивне, локализоване утицаје на веома променљив начин како би се еродирао циљани материјал.

3.5 Брусни и водени млаз

Употреба водених млазница за демилитаризацију датира још од 1924 године, када су патенти издати витезу у САД-у за систем за испирање високо експлозивних пројектила. Повећани притисак доводи до употребе на тактичким пројектиlima у америчкој армији Redstone Arsenal у 1954 и даље повећање притиска је направила америчка морнарица 1970-тих година. Употреба водених млазница за потребе резања потекла је од Franz-а у Канади 1968 и идеја је комерцијализована од Ingersoll-Rand. Међутим до деведесетих није објављено истраживање о њиховој употреби за демонтажу муниције.

Miller и Munoz сумирају информације везане за сигурност водених млазница, абразивне и не абразивне. Они тврде да су водене млазнице на 350 МПа прихватљиво сигурне у погледу осетљивости на удар за употребу на високо експлозивним пројектиlima и дају сугестије у решавању других опасности повезаних са демилитаризацијом воденог млаза.

Кључне опасности су:

- Утицај – од млаза, аналогно обликованом струјном млазу.
- Електростатичко пражњење – од брзог кретања молекула воде.
- Механичка варница – од абразивних материјала (посебно граната) на металним кућиштима.
- Пост процесне реакције – ово може бити узроковано реакцијом течности са експлозивом, са додатком метала у експлозиву, абразивима који сензибилизују експлозив или загађиваче попут боје или рђе која реагује са експлозивом.
- Индустијске опасности – повезано са радом опасних машина уопште и посебно водена млазница високог притиска.

Доказ о вероватноћи иницирања од удара мање од 1×10^{-6} за високо експлозивне експлозиве мање осетљиве од PETN-а дају Miller и Miller. Овај закључак покривен је доказима о великом броју муниције (процењено на више од милион) исеченој са абразивним воденим млазом без инцидената. Докази такође показују да механичке варнице не представљају опасност.

Параметри који утичу на перформансе воденог млаза су:

- притисак,
- дизајн млазнице,
- тип абразива, величина и брзина испуштања и
- стопа ротације муниције.

Burch и Summers су погледали ефекат AWJ параметара за раздвајање различитих пројектила у распону од 40 mm до 81 mm у калибру.

Идентификовали су економично абразивно оптерећење и притисак. Summers је такође погледао тип млазнице, тип абразива и рециклирање абразива с циљем смањења трошкова технике.

Сви облици демилитаризације воденим млазом или брусним млазом пате од низа недостатака:

- Генерисање отпада – иако су протоци ниски због високих притисака, технике воденог млаза и даље производе велику количину контаминиране воде. Ова отпадна вода мора бити заробљена и третирана увођењем значајних трошкова.
- Емулзије – вода ствара емулзије са много експлозива. На пример TNT формира „розе воду“ која је токсична и са којима је тешко располагати.
- Експлозивна опасност – иако вода, у довољној количини, смањује опасност TNT-а, отпадне воде које садрже RDX и HMX могу и даље детонирати и пропагирати током цеви.
- Пирофорна опасност – посебно са експлозивом у води.

Што се тиче експлозивне опасности, истраживање је показало да чврст експлозив са 48 % TNT-а и средством за стабилизацију може бити класификован као класа опасности 4.1 у систему УН-а који је не експлозиван и знатно лакши за транспорт. Остали експлозиви и даље представљају опасност у чврстом облику. Као резултат ових недостатака, разматране су и друге течности иако ниједна није толико широко употребљена и третирана као вода.

3.6 Алтернативни флуиди

Течни млазови **азота** високог притиска сматрају се алтернативом водено млазних технологија. У поређењу са водом, азот је испарљив па не доприноси отпад. Такође је инертан и токсичан.

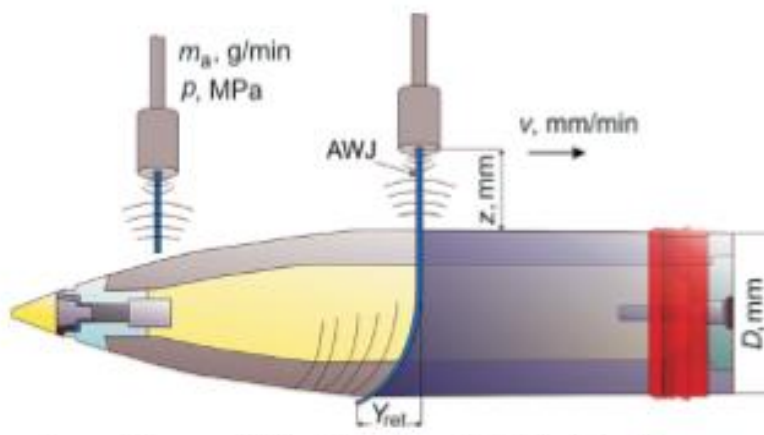
Muenchausen је испитао перформансе резања течног азота. Млаз може да се користи за уклањање експлозива испод 100 МПа. У опсегу од 100 - 400 МПа млаз може да се користи за сечење. Адекватне перформансе резања су постигнуте до 1,5 инча у НЕ експлозивима. Техника је посебно погодна за опоравак енергетике и користи се за испирање ракетних мотора. Додатни трошкови који се тичу управљања азотом под високим притиском морају бити уравнотежени због пречишћавања отпадних вода или опоравка енергије.

Anhydrous **амонијак** се сматра алтернативним флуидом за испирање и сечење због своје способности да делује као растварач, десензибилизатор за широк спектар експлозива.

Овим се елиминишу два од највећих проблема са струјом отпада од воденог млаза – формирање емулзија и да отпад задржава експлозивне особине. Иако је амонијак токсична хемикалија, добро је разумети и да се широко користи у индустријским апликацијама.

3.7 Приказ сечења и предности/недостаци сечења

Док је већина примена са воденим млазом за демилитаризацију фокусирана на уклањање експлозива и рад дирекције за опрему муниције. Munitions and Chemical Command (AMCCOM) првенствено је усмерена на сечење муниције ради уклањања упаљача/детонатора тако да се предмети муниције могу спалити у пећи за деактивацију без детонације. Истовремено, сличан рад је спровео Chemical Systems Group, Royal Military College of Science (RMCS), Shrivenham, Swindon, England.



Слика 22. Сечење пројектила [1]

Предности/недостаци сечења воденим млазом:

Претходне методе за постизање предпроцесирања муниције за спаљивање су укључивале механичко сечење, тестирање или пробијање да би се уклонили упаљачи/детонатори или експлозивна пуњења. Већина ове опреме је скупа и дуготрајна за развој, израду и тестирање. Са друге стране, резање муниције са абразивним воденим млазом има следеће предности:

- 1) Разноврсност/прилагодљивост – сечење воденим млазом примењује се на широк спектар муниције са мањим променама у млазници, притисцима и местим реза.

- 2) Механичка једноставност – једини развој опреме (неопходно је руковати широким спектром предмета који се требају резати) је транспортна оперма која испоручује/уклања предмете из резне главе и држи предмете у одговарајућем положају за сечење.
- 3) Минимална изложеност опреме потенцијалној експлозији – излагање опреме на потенцијалне штетне експлозије ограничено је на водену млазницу, транспортну опрему и причвршћивање у близини потенцијалне детонације.
- 4) Релативно ниска цена опреме – опрема воденог млаза је комерцијално доступна по цени која је једнака или нижа од трошкова развоја једног комада опреме за пробијање/стругање/сечење који ће се бавити само малим бројем различитих ставки.
- 5) Уграђено каљење/хлађење – водени млаз обезбеђује локализовано хлађење/каљење материјала на месту сечења. Осим тога, одмах се уклања материјал који је угрожен од локације за сечење која додатно смањује ширење било какве реакције у експлозиву што је утицало на водени млаз. Хлађење/каљење се додатно побољшава ако се резање врши под водом.
- 6) Флексибилна производња – стопе производње резних артикала се лако могу варирати уз додавање вишеструких млазница и дуплих водених млазних система.

Примарни недостатак сечења абразивним воденим млазом је да вода која се користи у резању постаје контаминирана експлозивом, металним честицама и песком. Контаминирана вода постаје проблем одлагања и мора се сматрати опасним отпадом због присуства експлозива. Идеално решење би било филтрирање воде за рециклажу у процесу резања и одвојено руковати са филтром као са опасним отпадом. То би у великој мери смањило обим опасног отпада који би се требао уклонити, вероватно спаљивањем. Треба напоменути да филтрација воде за рециклажу није једноставан задатак јер дозвољена величина честица у систему водоснабдевања воденим млазом коју користи АЕД не сме прелазити 0,5 микрона. **Дирекција за опрему муниције (Ammunition Equipment Directorate - AED)** истражује методе филтрације која ће уклонити и честице и растворене експлозиве, производећи воду одговарајућег квалитета за рециклирање за систем воденог млаза.

3.8 Тема Ammunition Equipment Directorate (AED) примене

За истраживачки рад који је урадила дирекција за опрему муниције, набављена су два различита система воденог млаза, један из Jet Edge корпорације, а други из система Flow. Ова два система су различитих величина и капацитета.

Систем Jet Edge ће применити само једну млазницу, док јединица Flow систем може да напаја три млазнице. Тестови спроведени са овим јединицама нису намењени за упоређивање једног система са другим. Према томе, подаци представљени у овом раду, као што је време потребно за исецање различитих предмета под различитим условима, треба упоређивати само када се користи исти систем.

Ammunition Equipment Directorate експерименти су се у почетку фокусирали на гранате M42/M46, субмуницију која се налази у пројектилима 155 mm. Ове бомбе су биле пуњене и састављене у фабрици муниције у Mississippi Army. Пробијање ових граната да би се открио експлозив није у потпуности заустављено детонацијом пошто су спаљене. Сматрало се да водени млаз може одсећи већи део гранате, излажући више експлозивних подручја, тако да се детонације могу уклонити у пећи за деактивацију. Инертне гранате су пре биле исечене да би се утврдили најбољи начини и локације за прављење резова. Тело гранате је направљено од челика 4140, а дебљина тела на месту које је одабрано за резање је приближно 0,090 инча. Почетни резови су почињали цртањем гранате испод млазнице воденог млаза тако да је млазник пресекао целу гранату. Гранатно зрно величине 80 метака је коришћено и потребно је 15 секунди да се пресече граната. Велика количина симулираног експлозива је испрана из гранате.

С обзиром на то да се ефикасност резања воденог млаза смањује док се дубина реза повећава, утврђено је да ће рез бити ефикаснији уколико је млазница постављена тако да је резни млаз тангенцијалан на гранатни зид. Ово је смањило дубину реза са читавог пречника 1 – 3/8“ гранате, до отприлике 0,1“. Да би се тестирао овај приступ, инертна граната била је позиционирана у ротирајућој арматури са воденим млазом тангенцијалним на гранатни зид тако да је млаз само прорезао дебљину челичног зида. Исти параметри воденог млаза тј. величина млазнице, величина отвора, притисак воде и величине зрна, коришћене су као у претходном тесту, а граната је ротирана за 48°/min. Водени млаз је исекао уски жлеб око тела гранате док је врх упаљача на гранати одвојен. Време за сечење гранате је отприлике 8 секунди, а експлозивно пуњење је било мало еродирано. На овај начин је исечено неколико граната а време за сечење сваке гранате је било врло поновљиво, око 8 секунди. Забринутост у овим тестовима је варничење које је резултирало приликом коришћења гранатног зрна за сечење чауре од челика. Пошто варнице нормално нису сматране компатибилним са експлозивом извршени су додатни тестови. Произведене варнице нису значајно смањене, али се време сечења повећало на 8 секунди за гранатно зрно, а на 15 секунди за гранулацију.

Интересантно је приметити да у тестовима које је спровео **Royal Military College of Science (RMSC)**, варнице произведене при резању воденим млазом изгледају „хладне“ варнице са недовољном енергијом за припаљивање експлозивних концентрација водоника у ваздуху. Ово смањује забринутост присуства таквих варница приликом сечења муниције испуњене експлозивом.

3.9 Предности/разлике резања под водом

Следећи тестови упоређују стопе сечења изнад и испод воде. Гранате су ротиране максимално 28°/min. Користећи систем Jet Edge и исте параметре воденог млаза за сваки тест, потребно је отприлике 15 секунди да се пресече граната изнад воде, а 17,5 секунди да се пресече граната испод воде. Иако је време резања под водом било мало дуже, чини се да нуди следеће предности над сечењем на отвореном:

- 1) Бука је знатно смањена.
- 2) Вода у резервоару у суштини елиминише варничење при резању метала. Свака произведена варница је краткотрајна због брзог гашења са околном водом.
- 3) Прскање преко и шприцање се практично елиминише, чиме се ограничавају остаци на резервоару за воду.

Недостаци сечења под водим су следећи:

- 1) Тешко је посматрати и чути шта се дешава током сечења. Приликом сечења на отвореном, оператер може чути када је водени млаз завршио резање променом звука. Ово није тако очито под водом.
- 2) Кавитација се може створити када се висок притисак сусреће са водим у резервоару, иако то можда није од велике забринутости за ову апликацију.
- 3) Више компонената држача/преносних уређаја мора бити запечаћено од уласка воде.

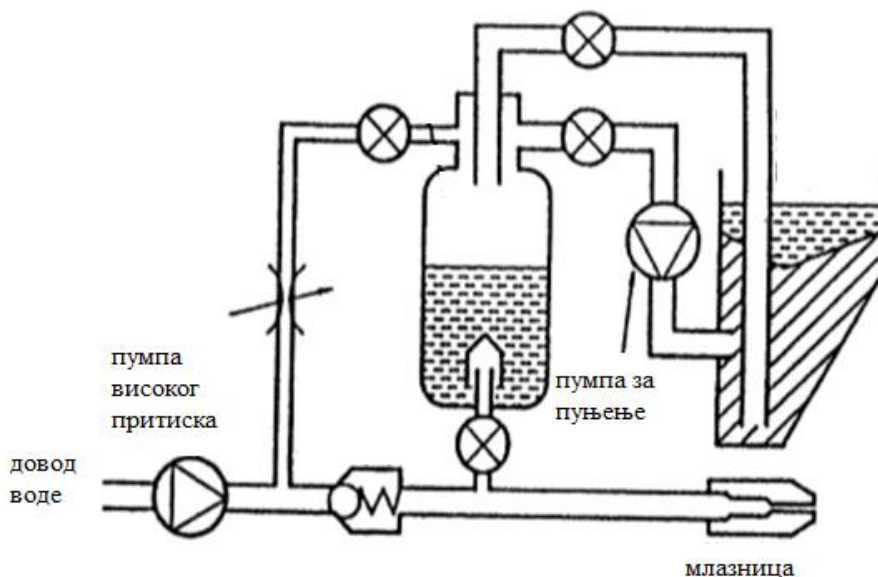
Оцењујући предности и недостатке, чини се да предности подводног резања у великој мери надмашују резултате, а даље ће их наставити Ammunition Equipment Directorate.

Испитивања су тада спроведена са напуњеним M42/M46 гранатама са експлозивом A5. 200 граната је пресечено на отвореном без инцидента. Гранате су спаљене у пећи за деактивацију где су две гранате експлодирале, иако је уклоњен читав горњи део гранате како би се открило експлозивно пуњење. С обзиром на то да изложеност подручја експлозивног пуњења није успела да елиминише детонацију гранате у пећи, одлучено је додати још једну опцију у процесу где би експлозивно пуњење могло бити уклоњено неабразивним воденим млазом.

3.10 Тема Royal Military College of Science (RMCS) примене

Royal Military College of Science (RMCS) није само демонстрирао резање (сечење) различите муниције са воденим млазом, већ је развио модификације конвенционалног начина увођења абразива у ток воденог млаза који дозвољава употребу ниских притисака воде, повећава животни век млазнице и повећава ефикасно растојање сечења са смањеним ширењем тока воденог млаза.

Royal Military College of Science (RMCS) је утврдио да је уобичајни поступак додавања абразива у струју воденог млаза у млазницу уводио значајан ваздух у ток који смањује растојање одвода воденог млазног тока што резултира одговарајућим смањењем ефетивног растојања. Такође, турбуленција у млазници узрокована увлачењем ваздуха и песка довела је до ерозије отвора млазнице, што је смањило животни век млазнице. Као резултат њихових процена, Royal Military College of Science (RMCS) се концентрисао на модификацију методе додавањем абразива у воду под високим притиском.

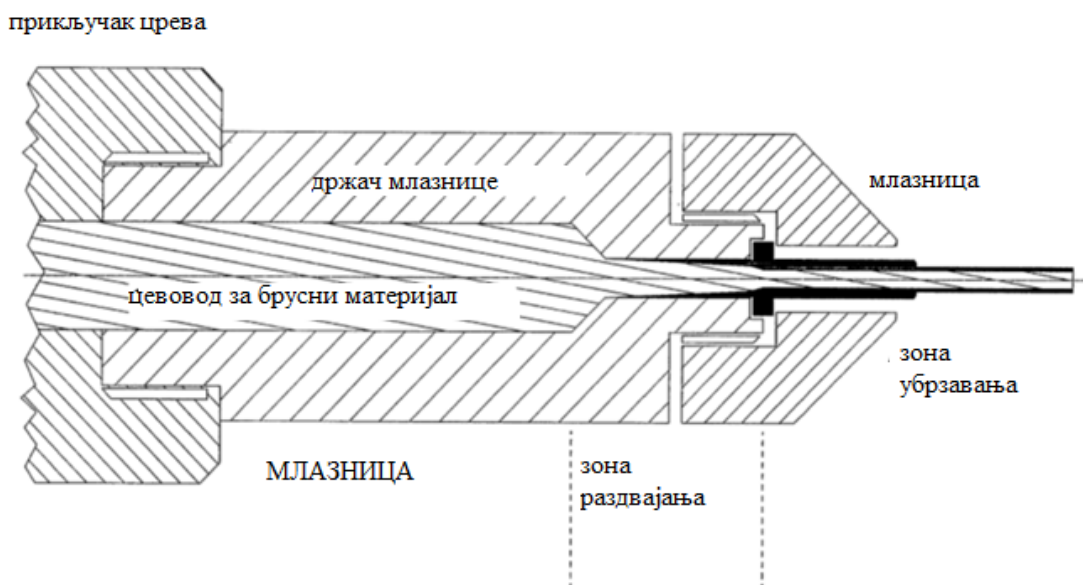


Слика 23. RMCS водено млазни систем [3]

На слици 23 је приказан Royal Military College of Science водено млазни систем који су патентирали и пласирали под трговачким називом DIAJET. Концентрисани абразивни муљ пумпа се у резервоар за снабдевање воденог млаза под високим притиском пумпе.

Благо ограничење водене млазне линије производи нешто веће притиске у резервоару са абразивним муљем, тако да густина може бити уведена у воду млазне линије са одговарајућом брзином преко контролног вентила за производњу жељеног абразива концентрисаног у воденом млазу. Овај процес доводи до увођења абразива у водени млаз без додавања ваздуха. Пошто водени млаз струји док излази из млазнице нема улаза ваздуха, ток задржава свој дужи облик, што резултира повећањем ефикасног растојања. Без убаченог ваздуха, притисак који је потребан за сечење такође може бити значајно смањен. Већина Royal Military College of Science резања муниције је постигнута са 5000 и 10 000 psi.

Још један значајан развој Royal Military College of Science је у патентираном дизајну млазнице. Носач млаза приказан на слици 23, има зону сепарације која се спушта тако да теже абразивне честице у воденом млазу буду фокусиране у средини тока воденог млаза. Ово ствара филм воде око абразива тако да абразив не додирује површину млазнице као вода – млаз/абразивна мешавина улази у зону убрзања и излази из млазнице. Као резултат, животни век млазнице је значајно повећан. Још једна предност смањеном притиску воде потребном за сечење је да се флексибилна гума, цев/цево може користити између пумпе високог притиска и млазнице. Дужина црева није критична, омогућавајући дугачко цево. Ово је веома пожељно на локацијама као што је Енглеска где се рутински налазе неексплодирана убојна средства, а водени млаз се може користити за даљинско уклањање фузија и на други начин разоружавања муниције.



Слика 24. DIAJET млазница [3]

Остале потенцијалне апликације

И Ammunition Equipment Directorate и Royal Military College of Science су спровели експерименте са резањем различитих муниција. Ammunition Equipment Directorate је пресекао инертни пројектил 9014М за 3 минута и 10 секунди окретањем пројектила под млазницом, постављен ван центра на круг тако да се смањи само до дубине $5/8$ ". Водени млаз сече пројектил као струг, сечући све дубље после сваке ротације. Ова метода резултирала је само мањом ерозијом симултаног експлозивног пуњења. Royal Military College of Science је исекао муницију до 5 инча у пречнику без ротације јер њихов систем може смањити већу дебљину без погоршавања млаза. Они си такође доживели мању ерозију експлозива. Још једна могућност примене резања воденог млаза показала је Ammunition Equipment Directorate са резањем инертне ракете М55 да се одвоји мотор од бојеве главе. Рез је завршен за око 45 секунди.

3.11 Предуслов за стварање почетног импулса

Експлозивна реакција (појашњено у 3.9 и 3.10) не може да настане спонтано, мора бити покренута неким спољни дејством. Могућност настајања експлозивног разлагања под било којим почетним импулсом зависи, пре свега, од количине енергије предате експлозивном систему и од њене концентрације у одређеној запремини.

Да би се изазвало експлозивно разлагање, молекулима експлозивне материје се мора саопштити енергија активирања. Енергија почетног импулса прелази непосредно у енергију активирања само у ретким случајевима. По правилу, енергију почетног импулса експлозивна материја прима директно или посредно у виду топлоте и само један део ове енергије прелази у енергију активирања, односно непосредно побуђује хемијску реакцију. Овај део је утолико већи, уколико је виша температура.

Оба наведена параметра побуђивања експлозивне реакције (количина енергије и ново концентрације) међусобно су повезана; што су веће концентрације енергије и одговарајућа брзина реакције, то мање могу бити димензије делова експлозивне масе у којима реакција отпочиње (жаришта реакције), односно може бити мања енергија почетног импулса.

Све речено важи и за енергију удара, јер је побуђивање експлозивног разлагања ударом резултат локалних загревања изазваних ударом, која постају жаришта реакције. Међутим, оцена ефикасности удара као почетног импулса само преко енергије удара је тешка и због тога што се део енергије предат експлозивној материји, који зависи од услова удара, особина експлозивне материје и расподеле удара, мења у врло широким границама.

Експлозивно разлагање могу побудити разни облици енергије: топлотна, механичка, електрична, хемијска и енергије ослобођене дејством иницијалног или другог експлозива и разним зрачењима.

У пракси се срећу бројни примери који недвосмислено показују зависност осетљивости експлозивне материје од природе почетног импулса. На пример, оловни азид у поређењу са стифнатом олова има већу осетљивост на механички импулс, а мању на топлотни. Исти је случај са хексогеном у поређењу са тетрилом. У условима статичког напрезања на притисак TNT не експлодира чак ни на притиску од 5 GPa, а при импулсном напрезању може експлодирати већ на притиску од 150 MPa.

Покретање експлозије механичким средствима, као што је удар и трење, за широк спектар експлозива услед стварања врућих тачака коначне величине. Експлозија се развија из вреле тачке просесом самог загревања и пропагира кроз већину експлозива. Постоје докази да се одговарајуће вруће тачке могу генерисати на три главна начина. Први је фрикцијом на честици песка, на кристалу експлозива самог себе или на другој површини. Други, а то је обично и најосетљивији, јесте адијабатска компресија минијатурних или парних цепова заробљених у експлозиву. Трећа, а то је обично оперативна у екстремним условима, је вискозно загревање експлозива који брзо протиче.

4. Испирање воденим млазом (Wash out)

Експлозивна пуњења која не садрже TNT и нису за кумулативне пројектиле, овим класичним (наведеним) методама се не могу делаборисати. Савремена метода за делаборацију таквих експлозивних пуњења се зове Wather Jet. Иста се састоји у испирању честица експлозива воденим млазом високог притиска (360 bar, температура воде око 80°C). Метода се може применити на већину врста експлозива. Недостатак ове методе је мали капацитет. Алтернатива овој методи је уништавање пројектила детонацијом (слика 24).



Слика 25. Испирање преко упаљача [6]

Испирање (издувавање) воденим млазом је развијено од стране Холандске краљевске морнарице уз помоћ TNOPML (Холандска организација за примењена истраживања). Помоћу воденог млаза високог притиска, експлозиви се могу уклонити из кућишта муниције. За разлику од резања воденим млазом, не постоји увек потреба за абразивом у води. Предности у односу на стандардну технику испирања су:

- мање време потребно за уклањање експлозива из пројектила,
- примењује се на све експлозиве укључујући PBX,
- потребно је мање енергије у односу на отапање,
- мање загађења јер се вода поново користи и
- мање испирање TNT-а, тако да је мања опасност по здравље за особље у згради.

У процесу отапања, TNT филм остаје на зидовима пројектила, али са техником воденог млаза, уклањање је потпуније. Постоје недостаци у овој техници. На пример, ствара се отпадна вода и постоји опасност у вези са експлозивним својствима једињења (детонација може настати у цевима). Техника за испирање воденим млазом користи се од стране Staple Division, Naval Surface Warfare Center у подршци САД-а програма за обнову муниције и програма за уклањање великих ракетних мотора заједничке службе, за уклањање и враћање енергије из PBX-а из муниције. Циљ је био демилитаризација PBX – убацио муниције без стварања непожељних загађујућих материја и могућност повраћаја материјала који се могу поновно употребити. Употреба млаза воде под високим притиском за уклањање PBX из убојних средстава је испитивана, са фокусом на безбедност операције и дизајна аутоматизованог објекта.

Показано је да притисак воденог млаза мора бити пажљиво одабран, пошто PBX може детонирати под ударцем високог притиска воде. Радни млазни притисци од 35 до 175 МПа били су довољни да уклоне све интересантне PBX. Да би се квантификовала осетљивост експлозива и одредили сигурни фактори приликом удара воденог млаза, развијена су два испитивања – (Derringer тест и тест обликованог пуњења). Један од главних проблема је прерада воде како би се рециклирала назад кроз систем за испирање. Нека тела пројектила су чак враћена за поновно пуњење.

5. Експериментално сечење пројектила артиљеријске муниције калибра 100 и 105 mm

5.1 Параметри сечења TRZ – Чачак

Табела 5. Резултати сечења

Испитани узорак	Пречник млаза, mm	Притисак, bar	Проток абразива, g/min	Брзина, mm/min	Растојање млазнице, mm
Пројектил 100 mm:	0,991	3850-3950	350	5	2.8-3
Пројектил 105mm:	0,991	3850-3950	350	5	2.8-3

Коментар:

🚧 Сечење пројектила 105 mm уздужно је 16 минута.



Слика 26. Исечени пројектили 100 mm и 105 mm



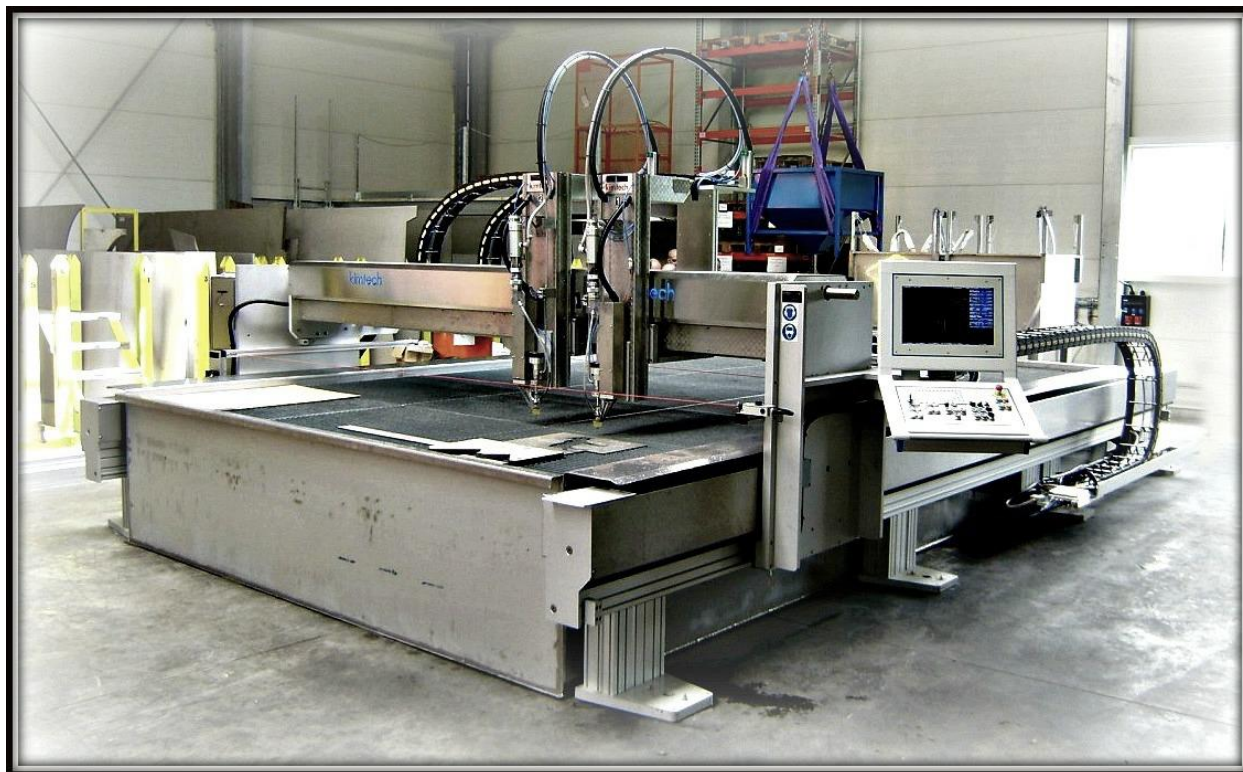
Слика 27. Приказ исеченог пројектила по пречнику



Слика 28. Приказ исеченог пројектила уздужно

5.2 Опрема

У прилогу су фотографије компаније „7. Август“, која у својој понуди има машину за резање абразивним воденим млазом - Watere Jet.



Слика 29. Машина за сечење [5]



Слика 30. Систем за постизање високог притиска и мултипликатор у систему за постизање високог притиска [5]



Слика 31. Изглед резне главе [5]



Слика 32. Резервоар за абразивни материјал



Слика 33. Рачунарска контролна јединица

6. Закључак

Обрада воденим млазом је нова и атрактивна технологија. У многим примерима примене, ова технологија је супериорна, нарочито при контурном резању тврдих материјала великих дебљина, при чему није пожељан термички утицај на материјал.

Како индустрија представља један од значајних извора загађења разумљиви су напори који се, поготово у индустријски развијеним земљама, чине како би се загађења и њихове последице смањиле.

Захтеви који се постављају пред индустријску производњу по питању квалитетне и брзе обраде углавном тешко обрадивих материјала су последњих година значајно порасли. Не тражи се само већа продуктивност, већ и могућност израде комплексних делова високог квалитета обраде.

Технологија обраде воденим млазом одликује се многим јединственим карактеристикама и предностима, што ову технологију издиже изнад осталих по питању потражње. Велика предност ове технологије у односу на друге је остварење хладног реза, што је чини незамењивом у појединим врстама обраде, где термичке технологије не могу дати задовољавајуће резултате.

У раду је представљено ново аутоматизовано коришћење експерименталног сечења противтенковског метка Nk 100 Shk 44 помоћу абразивног система за резање водом (помоћу система резања воденим млазом). На основу ових резултата структура аутоматског сечења AWJ предложен је систем за сечење муниције која ће омогућити повећање ефикасности при обради муниције уз коришћење добијених металних оштрица (комадића). Текуће активности ће се бавити имплементацијом дијагностичких приступа. Ови алати се заснивају на скупу нејасних правила.

Такође у раду се налазе слике и параметри које смо добили приликом сечења пројектила 100 и 105 mm у TRZ Чачак. Пројектиле нам је омогућио TRZ Крагујевац.

7. Скраћенице

AWJ – Abrasive Fluid Jet (абразивни водени млаз),

ASJ – Abrasive Slurry Jet (абразивни брусни (густи) млаз),

CFJ – Cavitating Fluid Jet (кавитациони флуидни млаз),

HE – високо експлозивни пројектили,

AED - Ammunition Equipment Directorate (дирекција за опрему муниције),

RMCS - Royal Military College of Science ,

TNT – тротил/тринитротолуен,

RDX – хексоген,

HMX – октоген.

8. Литература

- [1] Кмеџ , J. et al. Disposal of discarded munitions by liquid stream. //Tehnicki Vjesnik, 17, 3(2010), 383-388.
- [2]https://www.google.rs/search?q=water+jet&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiKxtLrvqTUAhVnC8AKHTltDM4Q_AUICigB&biw=1024&bih=639#imgsrc=HFdoToWxMtjCcM:
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter
- [4] http://www.mf.ucg.ac.me/materijal/1382468944Water_Jet.pdf
- [5]https://www.google.rs/search?q=alat+za+secenje+vodenim+mlazom&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi81pf67KnWAhVDMJoKHXd8AZAQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgsrc=g6quGgzqagpKUM:
- [6] Презентације професора Зорана Бајића.