

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 528/2014

Никола С. Новаковић

Тешки метали, врсте, могућности обраде и примена

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Богдан Недић, редовни професор - ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војно индустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Никола Новаковић**

Број индекса: **528/2014**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Тешки метали, врсте, могућности обраде и примена**

Задатак: У оквиру дипломског рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о тешким металима, врстама, припреми прашкастих материјала, технологијама обраде делова након синтеровања и областима примене делова од тешких метала.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Тешки метали,
3. Технологије обраде делова од тешких метала,
4. Примери примене
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 15.05.2019.

Abstract

This graduation theses analyzes the possibilities of manufacturing heavy metal parts. The theses describes the properties, types, processes of production and application of heavy metals. Theses is also concerned with the processing of heavy metals by cutting, which includes various methods of making parts.

Key words: heavy metals, heavy metal cutting, heavy metal, tungsten, molybdenum

Резиме

У овом дипломском раду се анализирају могућности израде делова од тешких метала. У самом раду су објашњена својства, врсте, процеси добијања и примена тешких метала. Дипломски рад се такође бави обрадом тешких метала резањем, која обухвата различите поступке израде делова.

Кључне речи: тешки метали, обрада тешких метала резањем, примена тешких метала, волфрам, молибден

Садржај

Увод	5
1. ДЕФИНИСАЊЕ ТЕШКИХ МЕТАЛА	6
1.1. Својства тешких метала	6
1.2. Легуре тешког метала и процес добијања.....	7
1.3. Процес добијања тешких метала металургијом праха.....	8
1.3.1. Прах	9
1.3.2. Пример синтеровања волфрам карбида са кобалтом WC – CO.....	16
2. ВРСТЕ ТЕШКИХ МЕТАЛА	20
2.1. Легуре метала са волфрамом.....	20
2.1.1. Добивање волфрам праха	21
2.1.2. Утицај волфрама на челик	22
2.1.3. Процес ојачавања и каљење	22
2.1.4. Фактори у избору волфрама као легирајућег елемента.....	23
2.2. Легуре метала са молибденом.....	24
2.2.1. Производња чистог MoO_3	25
2.3. Легуре метала са танталом	28
2.4. Легуре метала са ниобијумом	30
3. ОБРАДА ТЕШКОГ МЕТАЛА РЕЗАЊЕМ	32
3.1. Резни алати за машинску обраду тешких метала.....	32
3.2. Механички модели обраде тешких метала	34
3.3. Силе резања.....	36
3.4. Снага резања	37
4. ЕЛЕКТРОЕРОЗИВНА ОБРАДА	39
4.1. Принцип рада EDM методе	41
4.2. Диелектричне течности и електроде	42
4.3. Жичана метода ЕДМ – а	42
5. ПРИМЕНА ТЕШКИХ МЕТАЛА	44
Закључак.....	51
Литература	52

Увод

Тешки метали се употребљавају за израду висококвалитетних резних алата, код којих могу да се примене велике брзине резања и добије висок квалитет површине која се обрађује. Због високих температура које се при поступцима резања развијају ($> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), захтев у својствима се пре свега односи на велику тврдоћу, отпорност на трошење и стабилност особина на повишеним температурама.

У раду су објашњена својства тешких метала, процеси добијања, где је посебна пажња посвећена процесу синтеровања. Резни алати израђени од тешких метала имају боља својства од алата израђених од брзорезних челика, посебно боља својства резања на повишеним температурама. Израђују се поступком синтеровања (металургија праха) као на пример тврде легуре на основи волфрамовог карбида, титанијумовог карбида, титанијумовог нитрида (композитни материјал) и поступком ливења као што су стелити, за брзине до 500 m/min и температуре до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Због начина добијања, али и велике тврдоће, тврди метали не могу да се обликују пластичним деформирањем, нити да се термички обрађују.

Тешки метали који се најчешће користе су волфрам, молибден, тантал и ниобијум.

Посебан акценат у раду односи се на обраду тешких метала резањем. Описане су специфичне карактеристике резања, укључујући силе резања и енергију резања, као и начини формирања струготине.

1. ДЕФИНИСАЊЕ ТЕШКИХ МЕТАЛА

Настанак и развој тешких метала почиње са увођењем волфрама у производњу електричних сијалица. Идеја да се жарне нити сијалица производе од волфрама је била добра, али се израда танких нити од волфрама показала тешком, па чак и немогућом. Међутим американац Coolidge који је почетком 20-ог века био запослен у General Electric-у дошао је на идеју да волфраму повећа растегљивост и након тога помоћу дијамантних алата извлачи жицу. С обзиром на то да је у то време израда дијамантних алата била врло тешка, захтевна и скупа, почело се размишљати о замени дијамантних алата са неким другим материјалом. Као добра замена за дијамант показао се волфрам карбид који поседује одговарајућу тврдоћу. Сад је требало наћи начин како произвести алат од волфрам карбида. Прво је се покушало са ливењем, али је се поступак показао неуспешним. Након низа покушаја, немачка фирма Krupp је успела направити смешу праха волфрам карбида и праха кобалта која је синтерована у атмосфери водоника. Тако је 1926. године створен материјал под називом Widia, који је погодан за израду свих врста алата за различиту обраду.

Синтеровани метали се називају тешким металима, јер они нису легуре у правом смислу него су смеша различитих састојака углавном карбида који су убачени у неку мекшу металну масу.

1.1. Својства тешких метала

Једна од најважнијих карактеристика тешких метала је тврдоћа. Поред ове главне особине, тешке метале карактерише добра чврстоћа, која у комбинацији са тврдоћом даје одличне механичке особине. Зато су тешки метали сада неопходни у производњи алата за све врсте обраде и свих врста материјала који се обрађују. Уз одлична механичка својства тешке метале одликује добра топлотна и електрична проводљивост, као и коефицијент топлотног ширења који се разликују од класичних материјала. Као њихова добра својства можемо невести следеће:

- висока температура топљења,
- висока тврдоћа и отпорност на хабање,
- висок модул еластичности, висока чврстоћа на притисак и чврстоћа при повишеним температурама,
- добра отпорност на температурне промене (отпорност на топлотне ударе),
- отпорност на корозију,
- висока топлотна и електрична проводљивост.

У производњи тешких метала користи се технологија металургије праха, која нам омогућава да пројектујемо својства тешког метала према захтевима њихове примене при избору састава појединих компоненти и величине честица карбида.

Величина честица карбидног волфрама је један од параметара који директно утиче на главна својства тешких метала: тврдоћу и жилавост. Постоје тешки метали који имају исти састав и разликују се само по просечној величини зрна волфрам карбида. Већу жилавост и мању тврдоћу имају тешки метали са већом величином карбидног зрна. На тврдоћу и жилавост утиче и састав тешких метала. Као прво, мислимо на проценат кобалта у тешком металу. Повећање процента кобалта у тешком металу типа WC-Co смањује тврдоћу, чврстоћу на притисак, густину, еластичност, истовремено повећавајући чврстоћу на савијање и отпорност на хабање.

1.2. Легуре тешког метала и процес добијања

Тешки метал је најчешће легура волфрама као основног метала и елемената из групе прелазних метала у које спадају никл, гвожђе, кобалт и др. Име легуре потиче, пре свега, од њене велике густине која је скоро 2,5 пута већа од густине челика, захваљујући волфраму који је у овим легурама заступљен са преко 80% масе. Због својих карактеристичних особина (велика густина, висок модул еластичности, мали коефицијент линеарног ширења, висока апсорпција јонизујућих зрачења и др.) у последње време налази велику примену као неупоредива алтернатива до сада познатим материјалима. Главне области примене легура тешког метала су за:

- материјале за израду носача за унутрашње брушење и стругање (борштангле),
- производња обликача за ковање и пресовање на топло и хладно,
- баланс тегове у уређајима за одржавање равнотеже,
- заштиту од јонизујућих зрачења,
- различите примене у војној индустрији, итд.



Слика 1: Упрошћена шема добијања производа од легуре тешког метала [9]

1.3. Процес добијања тешких метала металургијом праха

Металургија праха је технологија производње механичких, конструкцијских и других делова од металних прахова. При томе се одвијају два процеса:

- компактирање – сабијање металног праха у жељени облик;
- синтеровање – повезивање честица праха у чврсту масу.

Механичка својства производа су углавном иста, а у неким случајевима и боља од производа истог хемијског састава који су израђени резањем, ваљањем или ковањем. Основна својства производа прашкасте металургије су: мала површинска храпавост, велика тачност димензија, могућност израде сложених облика, високи трошкови производње.

Постоји доста предности металургије праха, на пример:

- могу да се обликују метали који се тешко обликују другим поступцима,
- могућа је масовна производња делова у коначном облику, без додатне обраде скидањем струготине,
- постижу се тачније димензије делова него код већине поступака ливења,
- мали губици материјала,
- могућа је израда производа од смесе више метала који нису међусобно топиви, као и смесе метала и керамике.
- аутоматизацијом процеса могу се постићи велике продуктивности.

Недостаци металургије праха су:

- висока цена потребне опреме и алата,
- прахови метала су скупи,
- јављају се специфичне потешкоће у складиштењу прахова метала (корозија),
- јављају се промене густоће, нарочито код делова сложених облика.

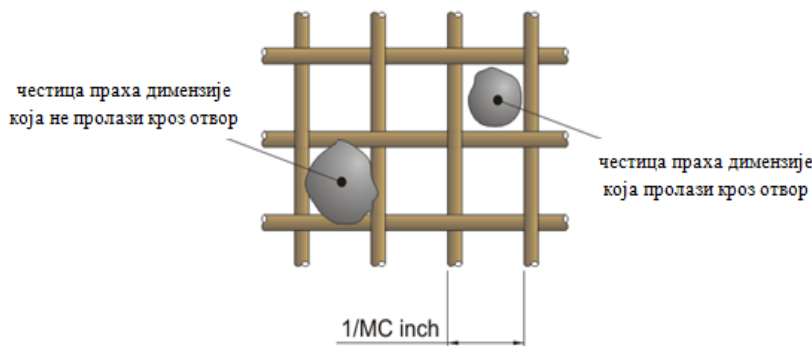
У металургији праха се највише користе прахови челика и алуминијума, бакра и легура бакра, супер легуре (на бази никла и кобалта). Такође се користе ватроотпорни метали као што су молибден и волфрам, а најчешће се користи карбиди метала (волфрам карбид). Производи металургије праха су: зупчаници, ланчаници, лежајеви, плочице за обраду метала резањем.

1.3.1. Прах

Прах је фино уститњена крута честица. Инжењерски прахови обухватају метале и керамику. Основна геометријска својства су димензије честица, облик и унутрашња грађа честица и површина честица.

Димензије честица

При одређивању димензија честица праха, прах се просејава кроз серију сита различитих димензија квадратних отвора. Број „МС“ (mesh count – број отвора) описује број отвора сита по инчу (1 inch – 25,4mm). Према томе, са МС=100 означава се сито које има 100 отвора по инчу. У SI систему је то 4 отвора по милиметру односно 16отвора/mm². Што је већи то су ситнији отвори сита и кроз њих ће пролазити ситније честице, као што је приказано на слици 2.



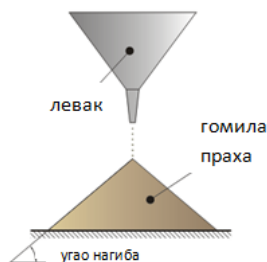
Слика 2: Честица праха и сито за сортирање [18]

Облици и грађа честица у великој мери зависе од технологије њихове производње (слика 3).



Слика 3: Честице праха [18]

Узајамно трење честица (слика 4) може се утврдити према углу нагиба гомиле праха која се формира при изливању праха кроз уски левак. Већи углови указују на веће узајамно трење честица.



Слика 4: *Одређивање узајамног трења честица [11]*

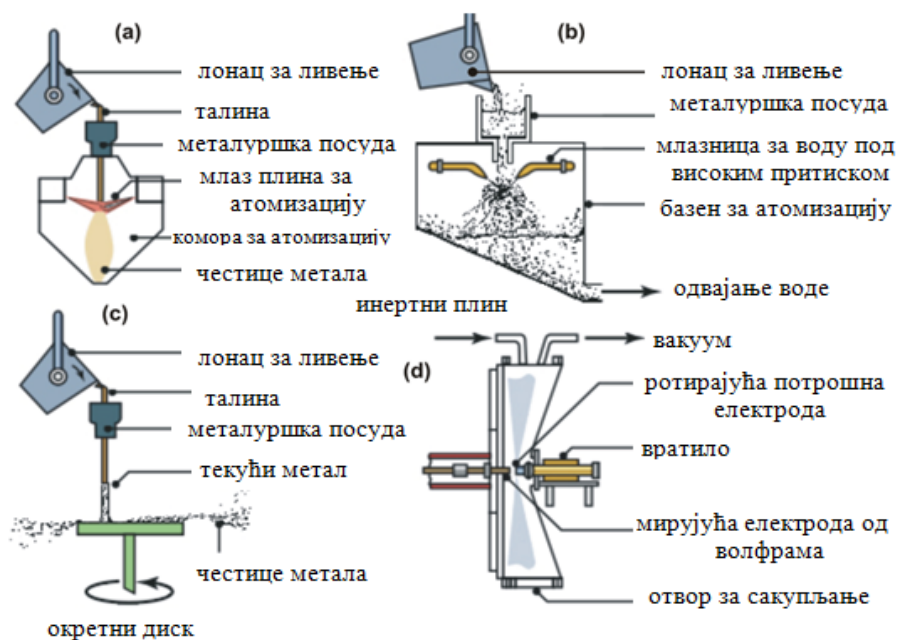
Производња праха

У производњи прахова користе се три основа поступка:

- Атомизација,
- Хемијски поступак,
- Електролитички поступак.

Додатно се честице уситњавају механичким поступцима. Користе се четири поступка атомизације (слика 5):

- а) атомизација плинком;
- б) атомизација водом;
- в) центрифугална атомизација са ротирајућим диском;
- г) атомизација са ротирајућом потрошном електродом.

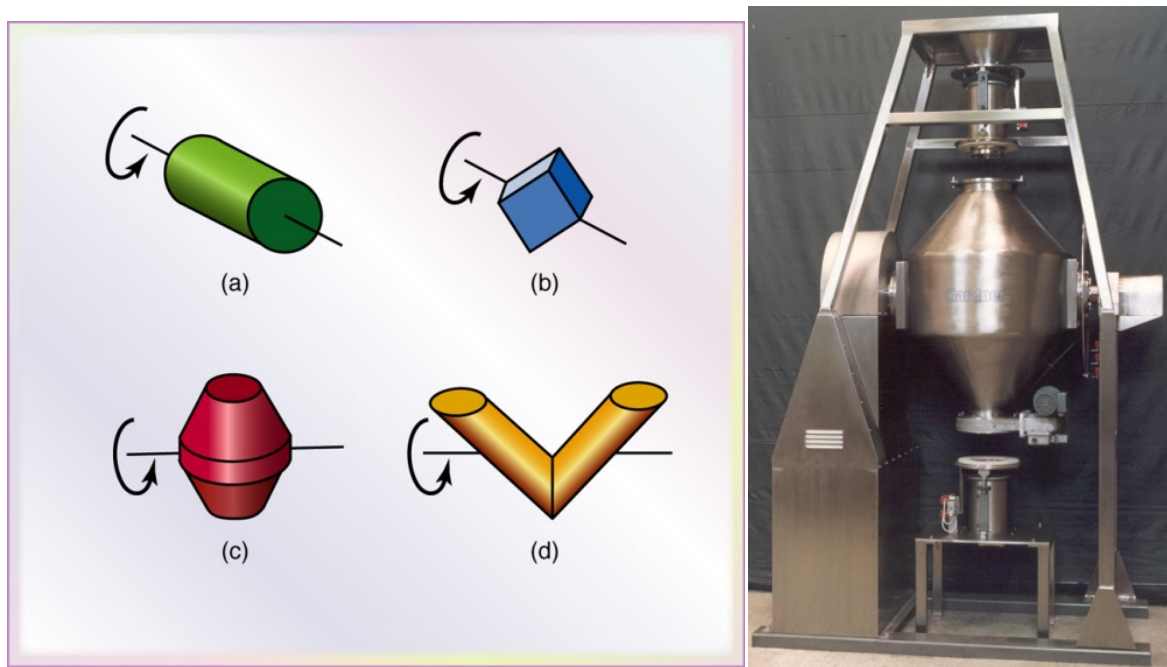


Слика 5: *Поступци атомизације [11]*

Поступци механичког мрвљења су приказани сликовитим шемама

- међу обртним ваљцима,
- у млину са куглама,
- у млину са чекићем.

Због јаког абразивног деловања прахова, за њихово мешање се не користе мешалице са ротирајућим пропелерима него само ротирајуће или претурајуће коморе. На слици 6 су приказани облици ротирајућих комора у којима се мешају прахови и мешалице са куглама.

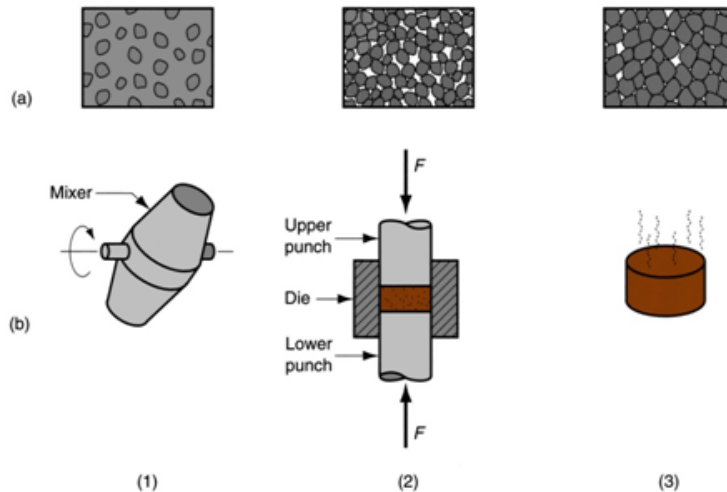


Слика 6: Опрема за мешање прахова [12]

Када се заврши производња прахова, спроводе се три корака (слика 7):

- Мешање – формирање хомогене мешавине прахова (мешавина обухвата прахове различите крупноће зрна, као и прахове различитих хемијских састава),
- Компактирање – сабијање мешавине прахова уз обликовање задате геометрије,
- Синтеровање – загревање компактног комада до температуре испод тачке топљења како би се успоставила крута веза честица и тиме очврснуо комад.

По потреби, обављају се додатне операције којима се повећава тачност, густоћа или пак неко друго својство.

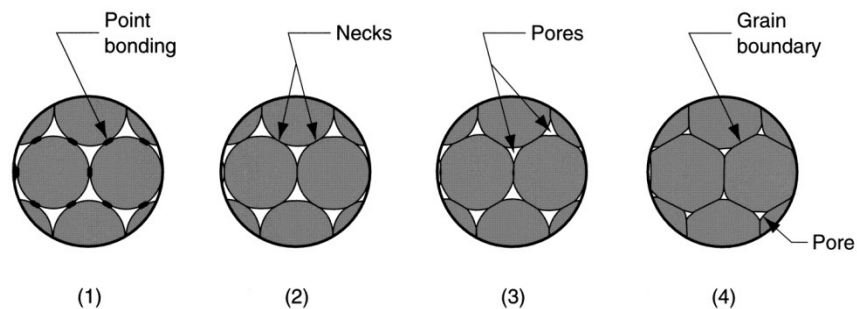


Слика 7: редови: (а) стање честица, (б) операције; колоне: (1) мешање, (2) компактирање, (3) синтеровање [12]

Код компактирања се под високим притиском сабија и обликује жељена геометрија. То је операција код кога наспрамни жигови сабијају прах који се налази у калупу. Комад након пресовања се назива „зелени комад“, при чему се „зеленим“ наглашава како поступак није довршен. Чврстоћа зеленог комада је довољна да би се њиме могло руковати али је далеко мања од оне која се постиже након синтеровања.

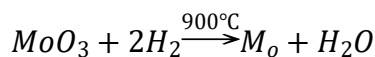
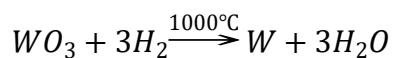
Зелени комад се ставља у пећ, па се у контролисаној атмосфери загрева до температуре мало испод тачке топљења праха. Уобичајено је загревање зеленог комада до 70-90% апсолутне температуре топљења метала. До синтеровања и спајања зрна праха долази услед смањивања површинске енергије честица праха, и брзог кретања садржаних атома при високим температурама у зони контакта са честицама. До смањивања волумена комада током синтеровања долази услед смањивања димензија пора (слика 8).

Што је време синтеровања дужи, прах постаје све чвршће металуршки везан, док не постигне својства ливених или кованих материјала истог хемијског састава.



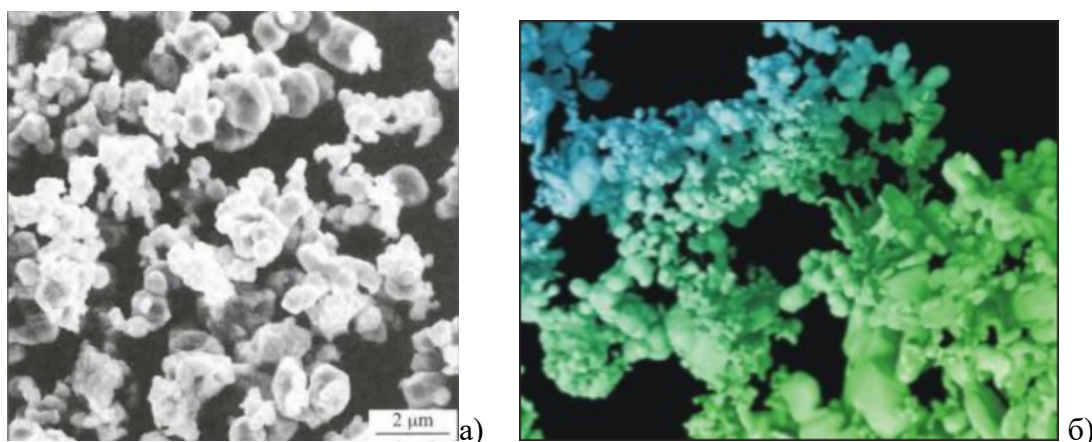
Слика 8: Фазе операције синтеровања металног праха [12]

Прахови тешкотопивих метала се углавном добијају редукцијом оксида у водонику:



или редукцијом соли (флуориди најчешће) металним натријумом у случају тантала и ниобијума.

Полазни прахови одговарајућих метала за примену у металургији праха добијају се најчешће редукцијом оксида у водонику (W, Mo) или редукцијом неких од соли металним натријумом (Ta, Nb). Могући су и други начини, као што је механичко уситњавање кртог отпадног материјала. Већина ових полазних прахова има карактеристичан полиедарски облик зрна као што је приказано на слици 9.



Слика 9: Прахови тешких метала, а) волфрам, б) молибден [14],[15]

Полазне карактеристике праха утичу на процес пресовања и синтеровања. То се пре свега односи на величину честица праха, расподелу величине честица, облик честица и специфичну површину. Насипна густина и течљивост праха су изузетно важне карактеристике за процес пресовања (пуњење матрица – посебно при аутоматизованим операцијама). Од изузетне важности је и садржај нечистоћа у полазном праху, с обзиром да исте не утичу само на понашање при синтеровању већ у значајној мери и на каснију могућност прераде синтерованог материјала. Процес синтеровања тешких метала и легура је сложен процес и често се изводи у две или више фаза. Волфрам и молибден се углавном синтерују у водонику, а тантал и ниобијум у вакууму.

Тешки метали се добијају технологијом металургије праха, то јест производе се синтеровањем смеше компонената у облику праха. Основна компонента тврдог метала је волфрам карбид (WC), то је компонента која тешком металу даје тврдоћу. Проценат WC се креће од 70 – 96%. Везивни елементи који тешком металу дају жилавост су кобалт или

никл, проценат везивног метала се креће од 30 – 40%.Често се у тешки метал додају компоненте за легирање како би се побољшала нека својства или да се балансирају процеси синтеровања. Компоненте које се користе за легирање су:

- танталниобијум карбид (TaNb)C,
- титанијум карбид TiC,
- молибден карбид Mo₂C,
- ванадијум карбид VC,
- хром карбид Cr₃C₂.

Према R. Kiefferu, дефиниција поступка синтеровања гласи: „Довођење металног праха, металоида, металних или неметалних спојева у чврсту и компактну материју подутицајем топлоте, уз услов да при поступку остане бар једна компонента делимично неистопљена.“¹ Поступак синтеровања обухвата следеће фазе:

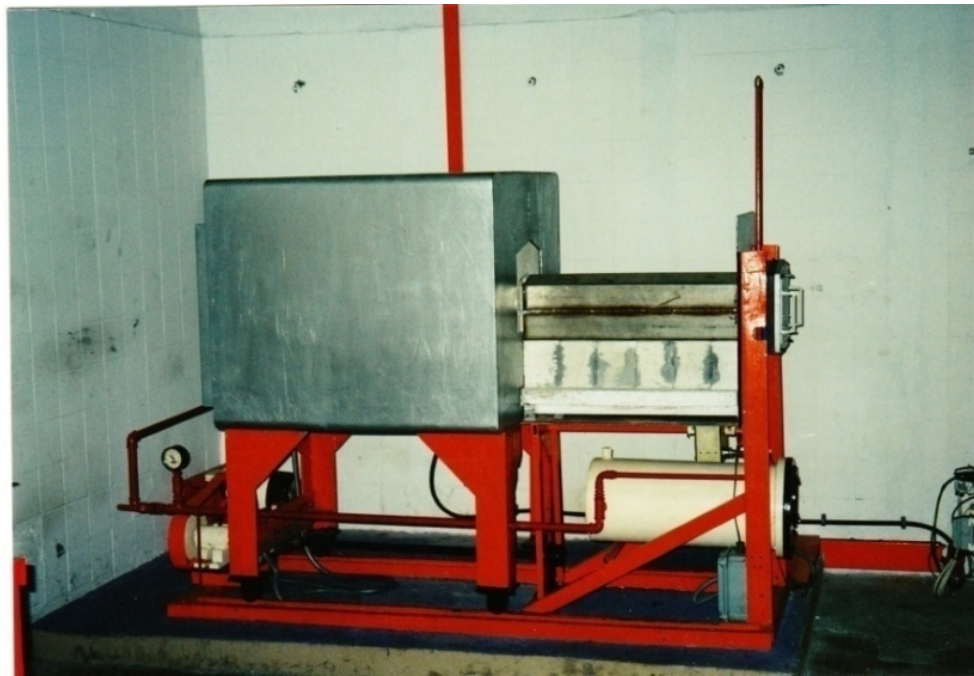
- производња карбида и мешање са кобалтом као везивом,
- пресовање смеше у приближан или коначан облик,
- предсинтеровање,
- накнадно обликовање,
- завршно високотемпературно синтеровање,
- наношење превлака.

Производња волфрамовог карбида се одвија путем реакције волфрамовог праха и чађи у атмосфери водоника и температури од 1400 - 1700°C. При том масени удео угљеника мора бити од 6 – 6,2%. На величину и расподелу честица праха утичу радни услови, то јест чистоћа водоника и температура.Остали карбиди се производе путем реакције металних оксида и чађи у вакууму или у атмосфери водоника.Титанијум карбид (TiC) производи се при температури већој од 2000°C, а тантал карбид (TaC) се производи при температури већој од 1600°C.

Смеша за производњу тешких метала се састоји од једног или више карбида, финог кобалтног праха и помоћног средства које је потребно за пресовање.Као помоћно средство се користи парафин, поливинил – алкохол и др. Да би се постигла једнака расподела кобалта између карбидних честица, смеша се уз присуство органске течности меље до величине честица од 0,1 – 0,3mm. Након млевења, смеша се суши етанолом и тада је погодна за пресовање.Окретне резне плочице и други алати од тврдих метала производе се пресовањем у матрицама, аутоматским пресамa, под условом да величина и облик то допуштају.На њих делује притисак од 200 – 400МПа, при брзини од 20 – 60 комада у минути.Након пресовања потребно је отпреске које треба обликовати депарафинирати и предсинтеровати, да се добије потребна механичка чврстоћа за механичку обраду.

¹ Инжењерски приручник 4 – Производно стројарство, Школска књига Загреб 1998,

Депарафинирање и предсинтеровање обављају се у вакуумским пећима или у пећима са заштитном атмосфером. За заштитну атмосферу користи се водоник који има редукујуће својство. На слици 10 је приказана пећ за депарафинирање и предсинтеровање у вакууму и заштитном гасу.



Слика 10: Пећ за депарафинирање и предсинтеровање у вакууму и заштитном гасу [4]

Предсинтеровање се изводи при температури од 600 – 1000°C где се уклањају помоћна средства додата при пресовању. Температуру треба одредити према типу и конструкцији сваке пећи. Након што су отпресци предсинтеровани приступа се обликовању резањем, стругањем, брушењем и глодањем. Ови отпресци се већином обрађују са дијамантним алатима због абразивности тврдог метала у предсинтерованом стању. Код посебних облика користе се брусне плоче од силицијум карбида.

Синтеровање отпресака одвија се у пећима за синтеровање у заштити редуцирајућег гаса или у вакууму. Отпресци за синтеровање слажу се на графитну подлогу. Ако су подлоге нове или нису биле у употреби више од 20 дана потребно их је загрејати на 1100°C. Подлоге морају бити премазане суспензијом етилног алкохола или бензина и цинк оксида у праху да би се отпресци заштитили од дифузије угљеника из подлоге. Тако премазане плоче треба сушити 2 – 3 сата. Температуре и време синтеровања зависе од врсте тврдог метала, односно о уделу везивне компоненте као што можемо да видимо из табеле 1.

Табела 1: Температуре и времена синтеровања тврдых метала са различитим процентом везивне компоненте

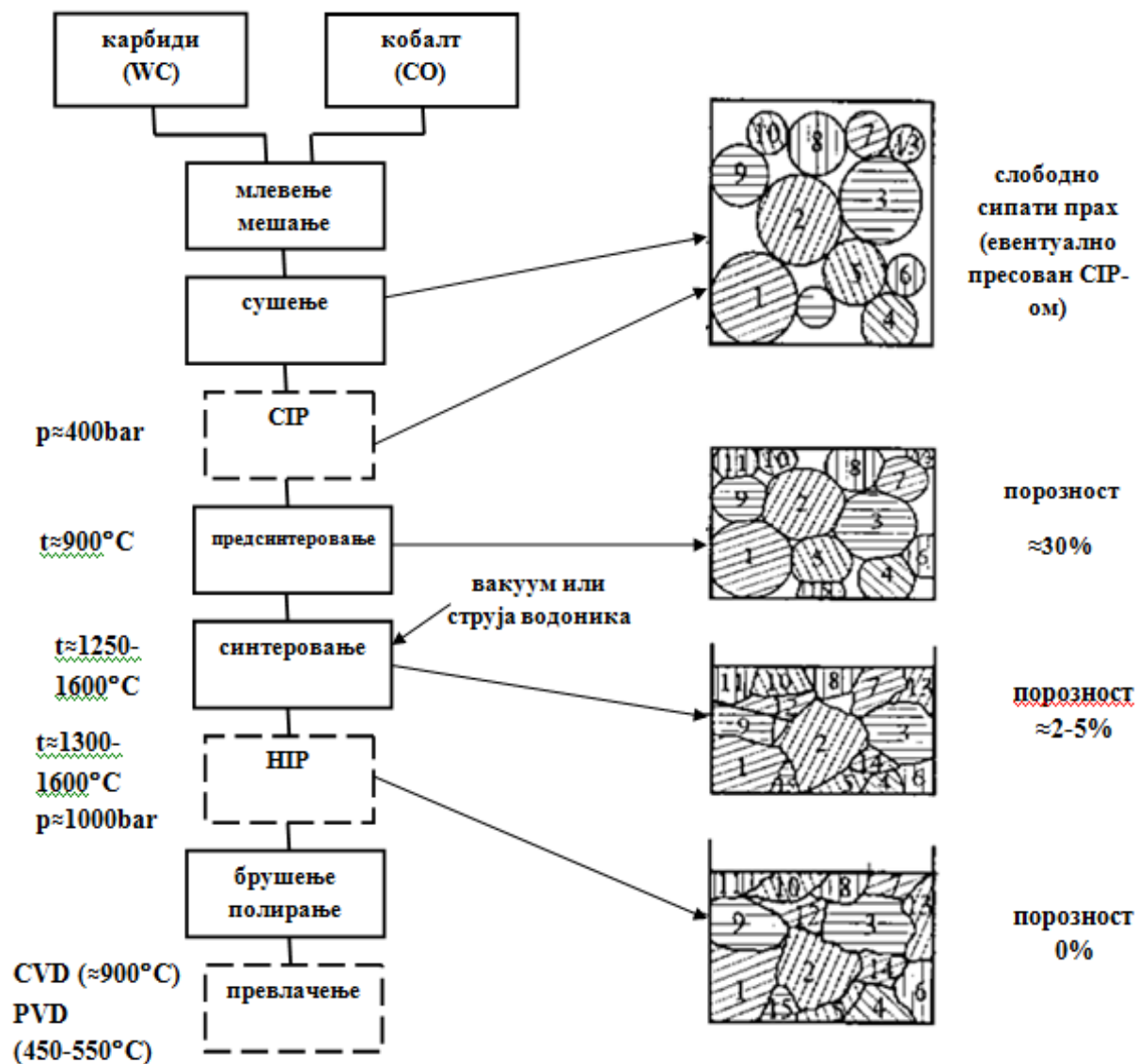
Температура (°C)	Време (min.)	% везивне компоненте
1215	15	25 – 30
1310	45	15
1350	60	10
1400 - 1450	60	4 – 6

1.3.2. Пример синтеровања волфрам карбида са кобалтом WC – Co

Приликом загревања предсинтерованог отпреска на температуру синтеровања 1400°C, кобалт почиње отапати у чврстом стању слободни C и WC већ изнад 600°C. На температури од 1000°C отопљено је у кобалту око 0,5% C и око 2% WC. Топљење легираног кобалта смањује се при прекорачењу еутектичке температуре од 1280°C. На тај начин је сва везна фаза, састава 81% Co и 19% WC, растопљена на 1400°C. Током синтеровања на температури од 1400 долази до отапања остале количине WC. У равнотежном стању истопљени метал достиже састав од око 52% WC и 48%Co. Та течна фаза опкољава карбидне честице и продире у поре и капиларе тако да укупна попуњеност након синтеровања износи око 95-98%, а порозност је око 2-5%. Током хлађења долази до поновног излучивања највећег дела отопљене фазе WC из кобалта, па ће се тај део прекристализовати уз постојеће кристале WC. Тако неће доћи до настајања еутектичке структуре под условом да се хлађење одвијало пребрзо. При 20°C γ -фаза (легирана везна фаза) садржаће мање од 1% WC. На тај начин је легирањем постигнута чвршћа везна фаза, а истовремено није утицало на жилавост. Овај поступак је описан на слици 11.

Дифузија има важну улогу у процесу синтеровања. Код предсинтеровања она омогућава привремено млевење честица. Тиме се постиже обликовање производа у такав облик да се он може преносити до уређаја за синтеровање, где ће постићи бољу компактност и отпорност на трошење. Укупни волумен се смањује, јер се у процесу синтеровања попуњавају шупљине. Код тврдых метала који садрже WC, TiC и TaC уз везану кобалтову масу знатно је компликованији процес синтеровања. Приликом тог процеса синтеровања долази до стварања различитих мешавина чији састав зависи од температуре синтеровања, трајања држања на тој температури и условима хлађења. Због повишења температуре и продужења трајања синтеровања долази до повећања кретања честица атома. На овај начин, многе честице привлаче суседне честице, које расту на рачун те суседне честице. У згушњавању честица праха такође је укључена и рекристализација, која мења облик и величину додирне површине честице.

Синтеровани метални производи имају многе предности. Велика предност је што се према потреби може бирати зрно, тип и удео тврдих честица. То су све носиоци отпорности на хабање. Такође могу да се бирају носиоци жилавости и везивног материјала тврдих честица, а то су састав и структура основне масе. Због тога није увек потребно посматрати стехиметријске односе појединачних присутних елемената.



Слика 11: Поступак производње тврдог метала WC-Co: а) поступци; б) промена структуре стратешких производа [5]

Према томе, за тврде метале можемо узети на пример, карбиде WC и карбиде TiC у произвољним уделима и основну масу Co (тачка топљења 1490°C) или Ni (тачка топљења 1455°C) и извести синтеровање од $1250-1455^\circ \text{C}$ без топљења основне масе или уз њено

топљење. У почетним компонентама WC и Co треба да знамо да они стварају еутектички састав, тј. да се тачка топљења Co снижава уз присуство WC. Притом, кобалтна маса отапа до 19% WC при 1280°C.

Обично, код синтеровања не долази до постизања потпуне структурне равнотеже, па за синтеровани метал, који се састоји из два или више типа честица, не може се рећи да се ради о легури, него о смеши. Још једна предност синтерованих тврдих метала је максимално смањење потребе за накнадном обрадом одвајања честица, јер се након процеса синтеровања постиже готово завршни облик синтерованог метала. На овај начин штедимо новац и време. Синтеровани метали имају и лошу страну, а то је мала жилавост, високи трошкови сировина и производње.

Површинска обрада тешких метала развијена је ради постизања што веће жилавости и што веће отпорности на хабање. Средином 60-их година прошлог века развијени су процеси превлачења тешких метала. Под превлачењем се мисли на наношење танког слоја тврдог материјала на тешки метал у циљу постизања што бољих особина. За превлаке од тврдог метала најчешће се користе CVD (Chemical Vapour Deposition) и PVD (Physical Vapour Deposition). CVD је хемијско, а PVD физикално превлачење тврдог метала титановим карбидом, нитридом или боридом. У табели 2 су приказана својства која се постижу CVD поступком.

При наношењу тврдих слојева на тешке метале, потребно је спречити губитак угљеника са површине тврдог метала. Ако се то не уради, може доћи до стварања крхког међуслоја η -фаза састава W_3Co_3C , која значајно смањује чврстоћу на савијање. Да би се спречило формирање овог међуслоја, потребно је да се испод слоја титанијум карбида дифузијом добије смеша мешаног карбидног волфрама и титана.

Табела 2: Својства тврдих превлака који су добијени поступком CVD

Својство	TiC	TiN	Al ₂ O ₃
Тврдоћа, HV 0,1	3200	2450	2500-3000
Тачка топљења, °C	3160	2950	2050
Коефицијент топлотног растезања 25-1000°x10 ⁻⁶ K ⁻¹	7,4	9,4	8,3
Оксидацијска постојаност	Умерена	Добра	Врло добра
Структура	Кубна, центрирана решетка		Хексагонална

Превлачење се одвија у реактору где делови од тврдог метала висе или леже на носачима. Реактор се загрева на потребну температуру, а равномерно наношење слојева се

постиже увођењем гасне смеше или ротирањем делова.Микроруптуре знатно смањују чврстоћу и могу да проузрокују лом материјала, па их због тога нанесени слој не сме имати.Једињења TiC и TiN имају нижи коефицијент трења од необрађеног алата, тако да је стварање топлоте при раду мање, а температура оштрице алата нижа. Због тога се алати обложени од тврдог метала добро понашају код резања и код обликовања деформисањем.

Осим једнослојне превлаке, могућа је и вишеслојна превлака.Вишеслојна превлака постиже се комбинацијом TiC и TiN . Прво се облаже TiC , а затим се постепено прелази у TiN преко међуслоја $Ti(C,N)$. TiN је посебно отпоран на корозију и има мању ломљивост од TiC , који има бољу адхезију на тврде површине.Сличан поступак је и код слоја Al_2O_3 , прво се наноси TiN , па тек онда Al_2O_3 .

Термохемијска обрада и поступци облагања не би требали да се користе за резне плочице од тешког метала које треба да се леме или заварују на држач алата, јер лем не обухвата површину обложене плоче, а средство за заштиту лема нагриза настали спој TiC , TiN , Al_2O_3 .

2. ВРСТЕ ТЕШКИХ МЕТАЛА

Тешки метали који имају највећу примену у металургији су:

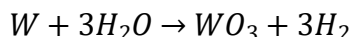
- волфрам,
- молибден,
- тантал,
- ниобијум, и др.

2.1. Легуре метала са волфрамом

Волфрам има највећу тачку топљења од свих метала, 3422°C и другу највишу тачку кључања 5930°C. Са густином од 19,28 g/cm³, волфрам је такође један од најтежих метала. Због тога се производи металургијом праха. Открио га је 1791. године шведњанин Scheele (руда шелит). Удео волфрама у Земљиној кори је око 1,5 g/t.

У индустријском облику се производи од краја 19-ог века, када је откривено да је добар за легирање челика, затим за жарећу нит у сијалицама. Тридесетих година 20-ог века откривен је металокерамички поступак производње ковког волфрама из волфрамовог праха, па касније и производња тврдох легура из волфрамовог карбида. Од 50-тих година прошлог века волфрам се користи и у ракетној техници. На собној температури је ломљив као стакло. Механичке особине зависе од обраде, не може се обрађивати на хладно него само на топло.

На ваздуху је стабилан, оксидација почиње на 400-500°C када се ствара заштитни слој оксида плаве боје. Са азотом реагује изнад 2000°C када се ствара нитрид WN₃. На 600-700°C оксидира га водена пара уз стварање WO₃:



На 800-1000°C реагује са C, CO, CH₄ стварајући карбиде WC и W₂C. Карбиди у кристалу смањују електричну проводљивост и чине га кртим. Волфрам се раствара у смеси HF и HNO₃.

Највећа светска налазишта волфрама налазе се у Кини, Перуу, САД-у, Кореји, Боливији, Русији, Аустрији и Португалу. Доказане и вероватне светске резерве чистог волфрама износе око 29 милиона тона. У Европи најпознатије налазиште волфрама налази се у долини Фелбертал у аустријској савезној покрајини Салцбург. Око 90% светске производње волфрама се користи да производњу фероволфрама односно волфрамовог челика. Волфрамов челик је основни материјал за алатне челике. Волфрам у њима се користи за стварање волфрам-карбида како би се повећала њихова секундарна чврстоћа

током употребе. Користи се у неким светским војскама за производњу језгра пројектила у облику волфрама карбида уместо осиромашеног уранијума који је у војнотехничком погледу смртоноснији, али уједно и радиоактиван и отрован. Хемијска једињења волфрама примењују се и у текстилној и хемијској индустрији.

Тврде легуре на бази волфрамових карбида важне су због високе тачке топљења и високе тврдоће коју не губе ни изнад 1000°C . Позната је легура која садржи 85-95% WC и 5-15% C_O (тврде легуре осим WC садрже и карбиде других метала: титана, ниобијума...). Израђују се металургијом праха.

Ватросталне легуре су материјали на бази волфрама, кобалта и хрома, а осим ватросталности јако су тврде, издржљиве и антикорозивне. Легуре са бакром (10-40%) служе за електроконтакте, а легуре из групе (W-Ni-Cu) служе за заштиту од γ зрачења.

Најпознатије руде волфрама су:

FeWO_4 – Ферберит

MnWO_4 – Губнерит

$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ - Волфрамит

CaWO_4 - Шелит

WS_2 – Тунгстенит

Највише се употребљавају волфрамит и шелит. У процесу добијања волфрама прво се мора произвести WO_3 , затим волфрамов прах или волфрамов карбид, па се тек тад може добити ковки метал или његове легуре.

2.1.1. Добијање волфрама праха

Волфрам прах се иницијално производи од руде волфрама – волфрамита (Wolframite/Scheelite), која се хемијски третира како би се добио амонијум – паратунгстат (Ammonium Paratungstate – АРТ). Затим се АРТ преводи у волфрам оксид, да би се након тога редуковао до чистог праха волфрама. Добијени волфрам прах се меша са праховима легирајућих елемената док се не добије хомогена легура тешког метала. Свака серија праха се прегледа и испитује како би се утврдило да ли су постигнуте прописане механичке особине материјала.

2.1.2. Утицај волфрама на челик

Када се дода у челик, волфрам ствара волфрам – карбиде или комплекс карбида са другим елементима као што су хром, молибден, ванадијум, али такође и гвожђе. То повећава количину неотопљених и сувишних карбида у каљеном челику. Еутектичка тачка се помера ка нижим концентрацијама угљеника. Последица је равномерно таложење финих и ситнозрних карбида који су размештени у челичној матрици. Хемијски састав ових крабида зависи од концентрације угљеника и присутних легирајућих елемената, као и од примењене топлотне обраде. Комплексни карбиди одговорни су за задржавање фино зрнасте челичне матрице успоравањем раста зрна током термичке обраде. Додатком волфрама ће се повећати волумен карбида у односу на друге легирајуће елементе који имају исту количину угљеника.

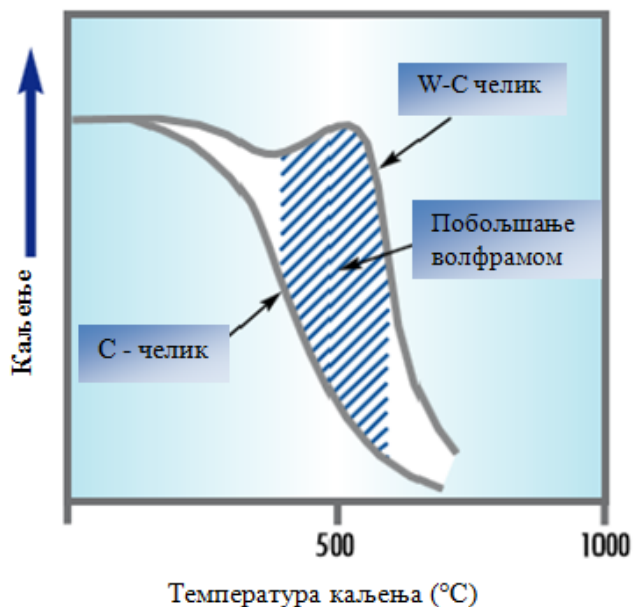
Волфрам, поред ванадијума је најефикаснији елемент за формирање карбида за повећање отпорности на хабање. Најважније својство алатних челика је добра отпорност на хабање. Волфрам значајно повећава тврдоћу и чврстоћу челика при високим температурама и доводи до повећања границе топљења и затезне чврстоће и без неповољних утицаја утиче на растегљивост и жилавост лома. Ефекти волфрама на својства челика у односу на запремину и облик карбида су:

- више карбида повећава тврдоћу и отпор на хабање,
- фини крабиди и фино зрнаста структура резултирају већом жилавошћу за одређени ниво тврдоће.

2.1.3. Процес ојачавања и каљење

Челик који садржи волфрам захтева одређени ниво угљеника и даље пажљив третман топлотом. Каљење се постиже високом температуром аустенитизације, да се растопе легирајући елементи, након чега следи трансформација током гашења и темперирања до мартензита са убрзањем финим карбидима (тзв. Секундарно каљење). Тиме се добија материјал који ће задржати већину своје тврдоће до око 550 °C и поново га вратити на хлађење на собну температуру. Веће температуре очвршћавања резултирају повећаном тврдоћом након каљења. Температура мора бити изабрана на такав начин да се довољно карбида растопи, али не сме да дође до прегревања и грубости зрна. Величина зрна треба да се контролише како би се оптимизовала жилавост и смањило изобличење током накнадног темперирања. Финији и што равномерније распоређени карбиди отпорни на раствор остају што је боља отпорност на хрупавост зрна. При вишим температурама, фини карбиди се спајају и ефекат се губи.

Ефекат легирања волфрама на тврдоћу током каљења је шематски приказан на слици 12. Током каљења при релативно високим температурама, таложе се карбиди величине nm који генеришу „секундарно каљење“.



Слика 12: Утицај волфрама на тврдоћу челика након каљења [13]

Код врло тврдых алатних челика, на пример код челика за хладни рад који су пригушени на ниским температурама, отпорност на хабање је углавном узрокована примарним карбидима који нису каљени. Ови карбиди су мали и равномерно распоређени и веома чврсти (тешки радни алати). Томе доприноси и ситнозрнасти мартензит.

2.1.4. Фактори у избору волфрама као легирајућег елемента

Постоји низ фактора који одређују избор специфичног елемента за производњу челика. Поред потребе да се у највећој могућој мери задовоље технички захтеви за одређену примену челика (тврдоћа црвене боје, отпорност на хабање, жилавост), други фактори заједно одређују економичност производње челика, као што су трошкови сировине и расположивост као и трошкови производње (за топљење, ливење, прераду, ковање, ваљање, термичку обраду итд.). Дужи век трајања алата компензира повећане трошкове.

У прошлости, доступност волфрама као стратешког материјала имала је снажан утицај на волфрамове челике и њихову замену, нарочито током Другог светског рата, када

су за индустрију наоружања били потребни висококвалитетни челици и чврсти метали на бази волфрам карбида и недостатак снабдевања је изазвало велике проблеме у производњи. У кратком временском периоду, волфрам је био делимично замењен молибденом, уз предност да је само половина масеног процента потребна за секундарно каљење у односу на волфрам. Рани проблеми са лакшом декарбурацијом таквих "нових челика" у току топлотне обраде ускоро су решени софистициранијим уређајима за термичку обраду, као што је употреба солних купки. Данас, сви волфрамови алатни челици имају еквивалентне типове молибдена, у неким областима В-легирани челици су чак изгубили своју важност за сорте које садрже молибден. Осим тога, волфрам као легирајући адитив је потпуно нестao са велике површине конструкционих челика.

2.2. Легуре метала са молибденом

Молибден је 1778. године открио Швеђанин Scheele. Десет година касније добијен је нечисти молибден редукцијом молибден – оксида (MoO_3) са угљеником, а чисти молибден добијен је почетком 19-ог века редукцијом молибден – оксида са водоником. Крајем 19-ог века откривен је његов утицај на легирање челика, па му се примена повећава.

По изгледу и особинама сличан је волфраму. Тачка топљења је 2623°C , а кључања 4639°C . Густина му је $10,28 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. На ваздуху и при нормалној температури не корозира. Оксидира тек изнад $400 - 500^\circ\text{C}$ а изнад 600°C оксидација је врло брза уз настајање MoO_3 . Са водоником реагује тек код тачке, а са азотом изнад 1500°C уз стварање MoN , са угљеником код $1100 - 1200^\circ\text{C}$ уз стварање Mo_2C , а са силицијумом изнад 1200°C уз стварање молибденовог дисилицида, MoSi_2 . Са хлорном и сулфатном киселином не реагује на хладно, а при $80 - 100^\circ\text{C}$ се у њима топи.

Од једињења најпознатији су:

- молибден – оксид, MoO_3 , светло зеленкасти прах и главна је сировина за добијање метала,
- молибдатна киселина, H_2MoO_4 , бели талог. При температури од $80 - 120^\circ\text{C}$ испарава вода и настаје MoO_3 ,
- молибдати – од којих се неки јављају као минерали (PbMoO_4 – вулфренит).

Молибден се примењује и као чисти метал и као легура. Служи као конструкцијски материјал у нуклеарним реакторима због малог попречног пресека топлотних неутрона. 75% молибдена употребљава се за легирање челика. Додатак молибдена побољшава механичке особине челика на повишеним температурама (израђују се делови за турбине и ракете). Ватросталним и конструкцијским челицима (за аутомобилску и авионску индустрију) додаје се 0,15% Мо уз Cr и Ni. Висока антикорозивност се добија

додатком 2,5 – 3% молибдена Cr-Ni челицима. Служи и за легирање гвожђа, 3,5 – 4% Мо даје отпорност гвожђу од HCl. Чист молибден служи за израду анода ренгенских цеви и исправљача високог напона. Молибденска жица служи као грејач код високотемпературних електропећи (1800°C). MoS₂ служи као мазиво (товатна маст) код температура од – 45 до +400°C.

Руда молибдена има двадесетак, а најважније су:

MoS₂ – Молибденит

PbMoO₄ – Вулфенит

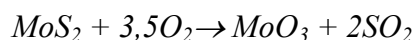
CaMoO₄ – Повелит

Fe₂O₃ · 3MoO₃ · 7H₂O – Феромолибденит

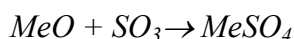
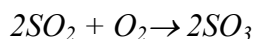
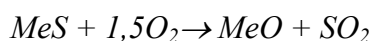
Уз молибден се увек јављају руде гвожђа, бакра, волфрама, олова, цинка, бизмута па чак злата и сребра, а посебно ренијума. Ренијум не долази као минерал, већ се изоморфно меша посебно у молибдену.

Молибденитни концентрати:

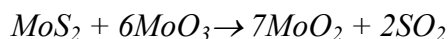
Циљ је превести молибденит у технички МоО₃. Оксидација се изводи на ваздуху у ротационим вишеетажним пећима и у флуидном слоју изнад 450-500°C до 700°C (не на већој, да не би дошло до губитака испаравањем):



Примесе сулфида бакра, гвожђа, арсена, цинка и других метала у молибдениту такође се оксидирају уз стварање оксида и делимично сулфата:



Ако нема довољно ваздуха реакцијом између сулфида и насталог МоО₃, настаје и МоО₂:



што може изазвати слабије искориштење молибдена, јер се МоО₂ не отапа у раствору амонијака у следећој фази рада.

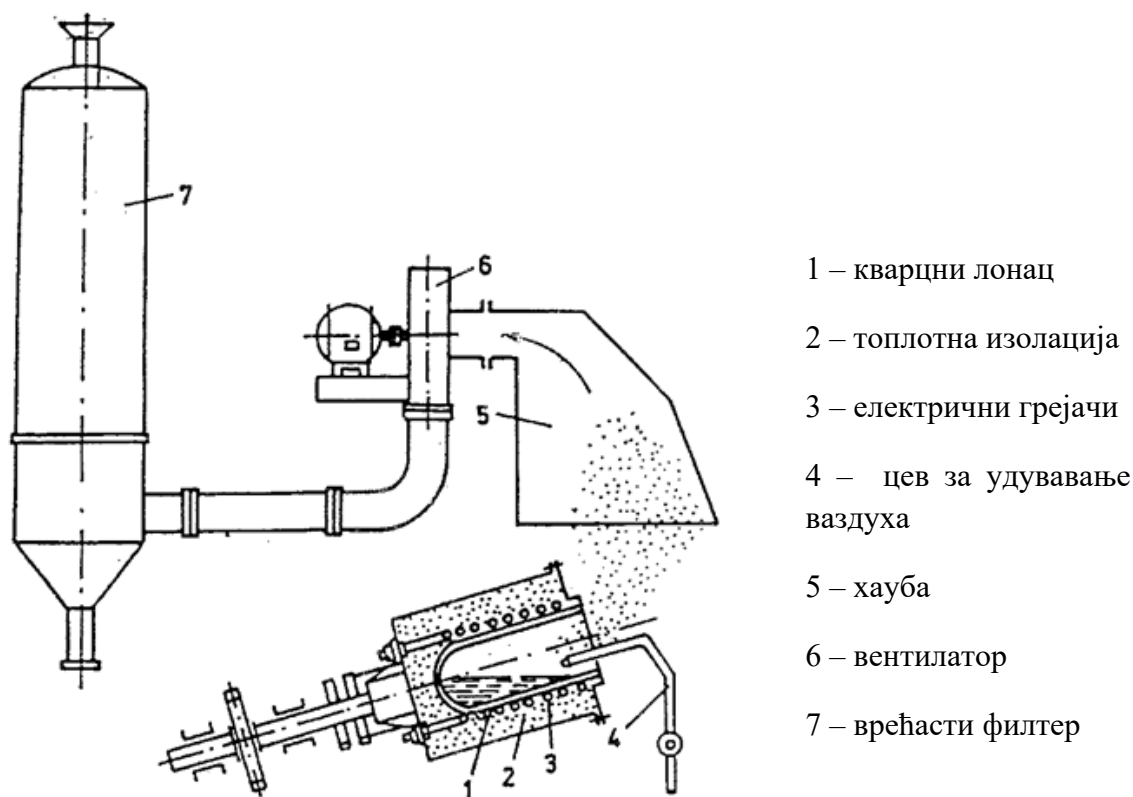
2.2.1. Производња чистог МоО₃

Чистоћа МоО₃ за производњу молибдена треба да буде бар 99,95%. То се постиже на два начина:

1. испаравањем МоО₃ (сублимацијом)
2. хемијском прерадом МоО₃

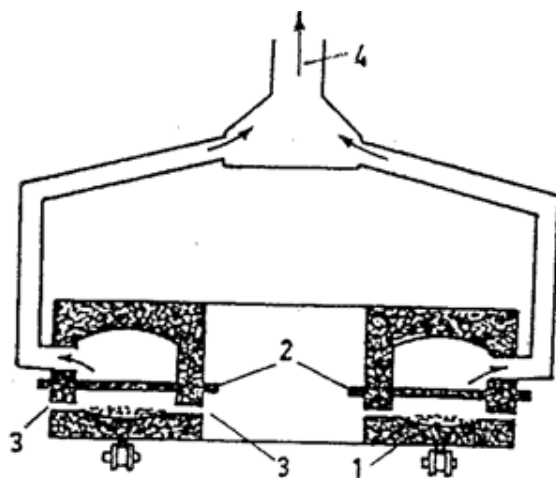
Испаравање MoO_3

MoO_3 почиње споро да испарава испод температуре топљења ($600 - 795^\circ\text{C}$), а брзина је повољна код $900 - 1100^\circ\text{C}$. Брзина процеса се повећава одвођењем насталих пара са ваздушном струјом или вакуумом. Температура процеса дестилације подешава се према присутним примесама које у тим условима мање или више испаравају. Смеша се налази у кварцном лонцу чији коси положај повећава површину испаравања MoO_3 . У лонац се стално уводи ваздух и одводе настале паре MoO_3 у врећасте филтере. Искориштење MoO_3 је $60 - 70\%$, а остатак остаје у изгорелом стању. Поступак сублимације је приказан на слици 13.



Слика 13: Сублимација MoO_3 у ротационим пећима [2]

У новије време се користе пећи са ротирајућим дном и силиконским грејачима како је приказано на слици 14. Чистоћа добијеног MoO_3 је $99,95\%$, али је јако дисперзан па се кваси са дестилованом водом ради слегања. Затим се суши и пакује.

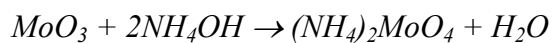


- 1 – ротирајуће дно
- 2 – силиконски грејачи
- 3 – отвор за довод ваздуха у пећ
- 4 – пут МоО₃ према филтерима

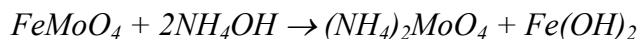
Слика 14: Сублимација МоО₃ у пећима са ротирајућим дном [2]

Хемијска прерада МоО₃

То је хидрометалуршки поступак, најчешће примењиван на раствор NH₄OH, који се после пречишћава. При томе се МоО₃ топи и прелази у раствор као диамонијаков молибдат или киселина:



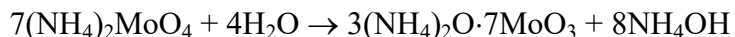
Примесе МоО₃ се понашају различито: калцијум молибдат остаје нерастворен у талогу, бакарни и цинков молибдат и сулфат прелазе у раствор, а челични молибдат се споро отапа због настанка слоја нетопивог Fe(OH)₂:



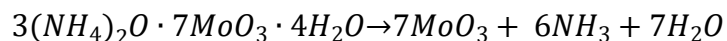
и Fe²⁺ иде само делимично у раствор. МоО₂ се не топи и остаје у неиздвојеном раствору заједно са калцијум молибдатом. Издвајање се изводи на хладном са 8 – 9% NH₄OH уз резерву од 10 – 15 % а добијени пепео садржи 140 – 190 g МоО₃/dm³. Добијени пепео се пречишћава од непожељних примеса, а најважније је уклањање бакра и гвожђа. Таложе се са амонијак-сулфатом као бакар(II)-сулфид и гвожђе(II)-сулфид. Из тако пречишћеног раствора таложе се једињења молибдена на два начина:

- Неутрализацијом раствора амонијаковог молибдата издвојиће се талог различитог састава и структуре, што зависи од температуре при којој се неутрализација врши, рН раствора и средства за неутрализацију. Ако се неутрализација врши на пример са HCl, код 60 - 70°C и рН 3,5 – 4, издвајају се кристали амонијак полимолибдата, а код рН 2 – 3 издваја се смеша полимолибдата и молибдатне киселине. Код 80 - 90°C и код рН 2–3, талог је претежно молибдатна киселина. Процес се понавља неколико пута да би коначан продукт имао 99,9% МоО₃; 0,05% NaCl; 0,02% FeO и 0,03% SiO₂.

- Таложeње амонијак парамолибдата испаравањем. Испаравање разблаженог раствора амонијевог молибдата $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$, који је стабилан уз додатак NH_4OH , на 80°C се одстрањује амонијак и настаје амонија парамолибдат, а амонијак рециклира:



Кристализација пара соли иде у хлађеним кристализаторима. Кристализација раствора понавља се пет пута. При прве две кристализације добијени кристали су чисти, а код осталих нечисти. Загревањем на $450-500^\circ\text{C}$ кристали парамолибдата прелазе у MoO_3 :



2.3. Легуре метала са танталом

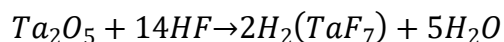
Тантал је хемијски елемент са симболом Та и атомским бројем 73. Тантал је редак, тврди, плаво-сиви, сјајни прелазни метал, изразито отпоран на корозију. Спада у групу ватросталних метала, који су доста кориштени као споредне компоненте у легурама. Хемијска инертност тантала чини га врло вредном супстанцом за израду лабораторијске опреме и замену за платину. Данас се овај метал користи за танталске кондензаторе у електронској опреми као што су телефони, двд уређаји, системи видео игара и рачунара. Тантал се јавља у минералима танталиту, колумбиту као и колтану (мешавина колумбита и танталита).

Тантал је веома тврд метал, лако обрадив и изузетно добро проводи топлоту и електричну струју. Метал је познат по својој отпорности на корозију поћу киселина, заправо на температурама испод 150°C , тантал је готово у потпуности „имун“ на напад, обично врло агресивне царске воде. Може се растварати у флуороводоничној киселини или киселим растворима који садрже флуоридне јоне сумпор триоксида, као и у растворима калијум – хидроксида. Висока тачка топљења тантала од 3017°C , а тачка кључања 5458°C , премашује већину елемената осим волфрама, ренијума, осмијума. Овај метал постоји у две кристалне фазе: алфа и бета. Алфа фаза је релативно дуктилнија и мекша, има просторну центрирану кубну структуру, тврдоћу по Кнопу 200 – 400HN. Бета фаза је тврђа и ломљивија, њена кристална симетрија је тетрагонална, тврдоћа по Кнопу 1000 до 1300HN. Међутим, бета фаза је нестабилна те прелази у алфа фазу након загревања на $750 - 775^\circ\text{C}$. Тантал у већим комадима готово у потпуности се састоји из алфа фазе, док се бета фаза појављује обично у виду танких слојева добијених процесима катодног распршавања хемијске диспозиције паром или електрохемијском диспозицијом из раствора истопљених соли. Као и код већине других ватросталних метала, најјача позната танталова једињења су стабилни нитриди и карбиди. Танталов карбид, је веома тврд материјал, који се такође користи за израду алата за резање. Тантал(III)-нитрид се користи

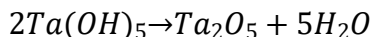
као танки филм изолатор у неким процесима за производњу микроелектронских компоненти.

За издвајање тантала из танталита потребно је извршити неколико процеса и фаза. Прво од њих је дробљење минерала, па затим његово концентрирање путем гравитационе сепарације. Ово се претежно обавља у близини рудника.

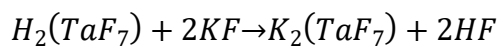
Развијен је велики број хемијских процедура и метода за разлагања приматних извора. Неке од тих метода су усвојене за комерцијалну производњу док су неке тестиране само у релативно мањим обимима. Такође неке процедуре су испорбане само у лабораторијским условима. Све оне се углавном деле на редукцију на метални облик или добијање спојева, затим хлоринацијом, спајање база или растварање у киселинама. Издвајање почиње испирањем, фазом у којој се руда третира са флуороводоничном и сумпорном киселином да би се добили хидрогенфлуориди растворљиви у води. Тиме се омогућава да се ови метали издвоје из разних неметалних нечистоћа садржаних у руди.



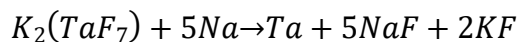
Након тога се тантал издваја из воденог раствора помоћу течне екстракције са органским растварачима као што су циклохексанон. Ова фаза омогућава једноставно уклањање различитих металних нечистоћа које остају у течној фази у облику флуорида. Одвајање тантала од ниобијума постиже се подешавањем рН вредности. Ниобијум захтева виши ниво киселости да остане растворљив у органској фази па се може селективно издвојити екстракцијом у мање киселој води. Чисти раствори тантал-хидроген флуорида се неутрализују течним амонијаком стварајући $(Ta(OH)_5)$, а који се даљим загревањем добија тантал-пентоксид Ta_2O_5 .



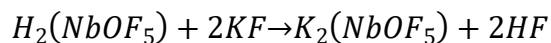
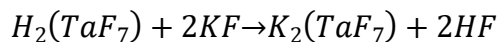
Другим начином, тантал флуорид се може третирати калијумом флуоридом чиме се добија добија калијум-хептафлуортанталат $K_2(TaF_7)$:



Он се даље користи за добијање металног тантала путем редукције са натријумом при температури од приближно $800^\circ C$ у истопљеним солима.



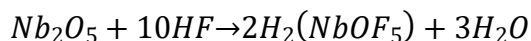
Старијом методом названој по Charles Galissard (Мариганцов процес), одвајао се тантал од ниобија тако што је почетна водена смеша водород флуорида третирао калијумом флуоридом.



2.4. Легуре метала са ниобијумом

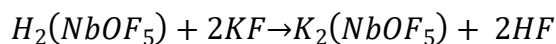
Ниобијум је хемијски елемент са симболом Nb, и атомским бројем 41. То је меки прелазни метал. Ниобијум се јавља првенствено у два минерала, колумбиту и пирохлору. Физичка и хемијска својства ниобијума су прилично слична као и особине елемента тантала, па је релативно тешко разликовати ова два метала. Све до почетка 20-ог века ниобијум се није много комерцијално користио. Бразил је водећи произвођач ниобијума. Ниобијум се углавном користи у легурама, од којих је већина у специјалним челицима за гасове. Иако ове легуре не садрже више од 0,1% овог елемента, мала количина ниобијума повећава чврстоћу челика. Температурна стабилност супер легура са ниобијумом важно је због њихове примене у ракетним и млазним моторима. Ниобијум је редак, сиво-бели метал. Има кубну кристалну структуру усредсређену на тело, и по својим физичким и хемијским својствима подсећа на тантал. Мора се ставити у заштићену атмосферу када се обрађује на уједначеним температурама, јер има тенденцију да реагује са кисеоником, угљеником, азотом и сумпром. Тачка топљења ниобијума је 2468°C, а кључања од 4927°C. његова густина износи 8,57 kg/m³. При нижим температурама овај метал постаје суперпроводник. Када се на дужи период изложи ваздуху при собној температури, метал поприма плавасте нијансе. И поред високе тачке топљења, ниобијум има релативну малу густину у односу на друге ватросталне метале. Хемијска својства овог елемента су екстремно слична танталу, који се налазе непосредно испод ниобијума на периодном систему елемената. Иако отпорност на корозију код тантала, ниска цена и лакша доступност ниобијума чини га пожељнијим за мање захтевне сврхе попут облагања у хемијским постројењима.

Након одвајања од других одвајања добија се смеша оксида тантала Ta₂O₅ и ниобијума Nb₂O₅. Први корак у преради јесте реакција тих оксида са флуороводоничном киселином:

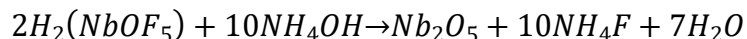


Прву методу за издвајање ниобијума у индустријском облику развио је Charles Galissard, искористивши различите степене растворљивости комплекса ниобијумових и танталових флуорида (K₂(NbOF₅) · H₂O) и (K₂(TaF₇)) у води. Новији процеси користе течну екстракцију флуорида из воденог раствора помоћу органских растварача попут

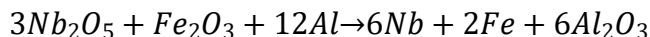
циклохексанона. Комплекси ниобијумових и танталових флуорида се издвајају одвојено од органских растварача са водом па се, или таложе додавањем калијум-флуорида да би се добили комплекси калијум-флуорида, или се исталоже помоћу амонијака као пентоксида:



Следи реакција:



Користи се неколико метода за редукцију до металног ниобијума. Електролиза истопљене смеше $K_2(NbOF_5)$ и натријум хлорида је једна од њих. Друга је редукција флуорида на натријумом. Помоћу ове методе може се добити ниобијум релативно високе чврстоће. У индустријској производњи већег обима користи се редукцијом Nb_2O_5 са водоником или угљеником. Тај процес укључује алуминотермичку реакцију смеше гвожђе-оксида и ниобијум-оксида који реагују са алуминијумом.



Да би се убрзала реакција, додаје се малена количина средства за оксидацију попут натријум-нитрата. Као производњу добијају се алуминијум-оксид, легура гвожђа и ниобијума која се употребљава у производњи челика. Да би се достигао степен легуре потребан за суперпроводнике неопходна је даља прерада и пречишћавање. Два највећа произвођача ниобијума користе методе топљења помоћу електричног лука у вакуумском окружењу.

3.ОБРАДА ТЕШКОГ МЕТАЛА РЕЗАЊЕМ

У овом поглављу је описан процес обраде тешких метала, који имају тврдоћу 45-70 HRC (Роквела) и који се обрађују машински са алатима израђеним од керамике, цермета или најчешће од кубног нитрида бора. Описане се специфичне карактеристике резања, укључујући силе резања и енергију резања, као и начини формирања струготине.

3.1. Резни алати за машинску обраду тешких метала

Машинска обрада тешких метала (Hard machining) се обично дефинише као процес у коме се обрађују материјали са тврдоћом преко 45 HRC, али најчешће у опсегу од 58 – 68 HRC. Материјали се секу користећи специјално прављене алате са геометрички дефинисаним ивицама за сечење. Материјали за резне алате су обично поликристални кубни нитрид бора или дијаманта (PCBN), мешана Al_2O_3 -TiC керамика и понекад цермет. Међутим, CBN је најдоминантнији избор за захтевније примене величине и завршне обраде, а посебно оних компоненти које су прешле из брушења. Добро је познато да се у таквим екстремним захтевима могу побољшати перформансе алата користећи геометрију са негативним угловима нагиба, али конфигурација ивице за сечење и њена припрема такође игра доминантну улогу у успеху машинске обраде.

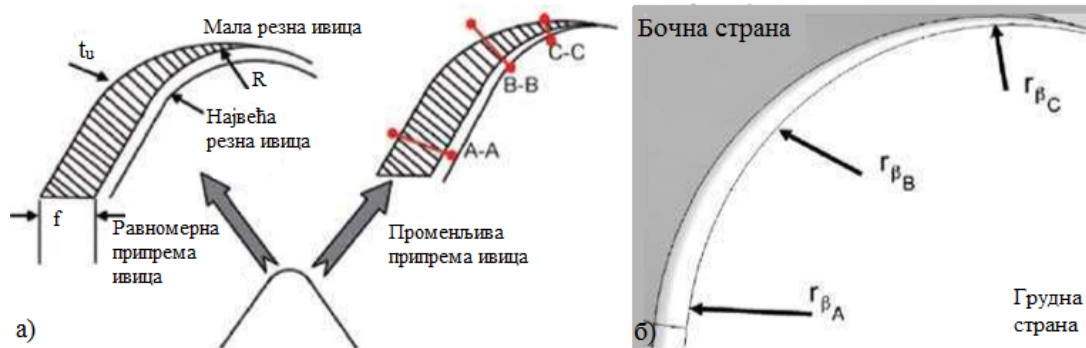
Генерално, геометрија резне оштрице је критична у тешкој машинској обради, зато што алати са јачом ивицом морају да издрже велика напрезања. Као резултат, ивице на алатима за сечење које су дизајниране за сечење легираних челика су обично опремљене са удубљењем (понекад са дуплим удубљењем) између грудне и леђне површине алата. Обично се узима удубљење од 0,1 (0,2) mm и угао удубљења од -20° . Да би се заштитиле ивице за сечење од струготине, урађено је додатно брушење као што је приказано на слици 15.



Слика 15: Профили са брушеним резним угловима за тешку машинску обраду [3]

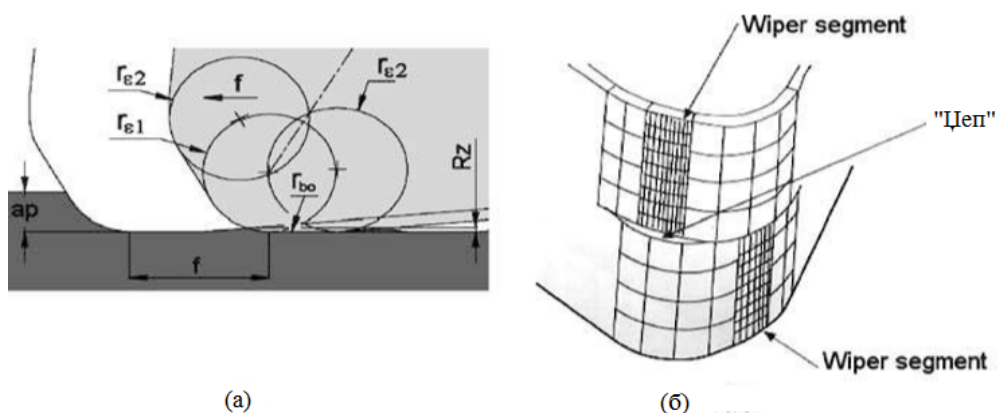
Због тога што исте микро геометрије ивице дуж радијуса угла проузрокују прекомерно хабање на мањој резној ивици (веома мали радијус ивице до дебљине

струготине као што је приказано на слици 16а, примењују се PCBN алати са променљивим резним ивицама. Као што се може видети у CAD моделу променљивог облика резне ивице, радијус ивица у тачкама А, В, С једнако се смањује од највећих до најмањих ивица сечења, тј. $r_{\beta A} > r_{\beta B} > r_{\beta C}$. Ово доводи до одржавања константног односа радијуса дебљине и необрезане струготине дуж активног дела угла.



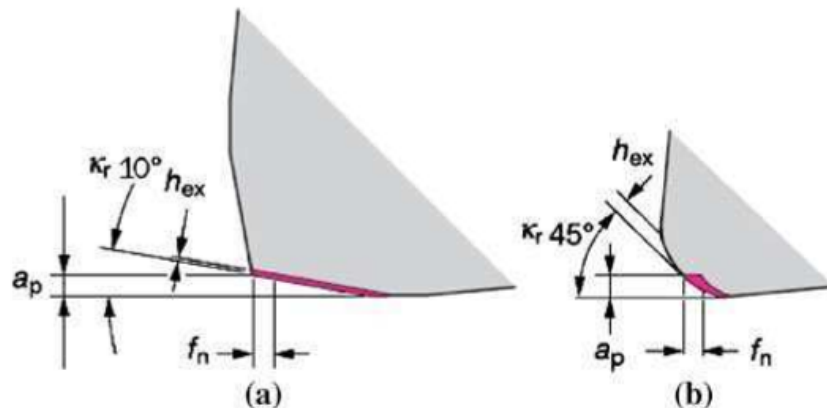
Слика 16: а) Поређење равномерне и променљиве микро-геометрије, б) CAD модел променљивог дизајна угла [3]

Клизни уметци, који комбинују високу способност пуњења и висококвалитетну фину обраду површине произведени су од великих округлих уметака, стекли су популарност у применама са тешком обрадом. Као што је приказано на слици 17а, угао алата са више радијуса садржи мали део за изравнавање полупречника r_{b0} , који је паралелан са правцем кретања. Додатно, слика 17б приказује универзалнији облик угла клизача са сегментима и за леву и за десну страну. Применом таквог чврстог уметка клизача, могуће је машински обрадити перфектан радијус без одступања од нормалног радијуса заједно са аксијалним окретањем, који користи пун ефекат клизача.



Слика 17: CBN клизни додаци, а) дизајн са једним делом (f – посмак, a_p – дубина реза, r_{e1} , r_{e2} – радијус закривљености клизача, б) дводелни дизајн [3]

Слика 18а приказује нови дизајн чврстог CBN уметка са равним делом сечива који се спајају у клизаче. Као резултата тога, мањи угао приступа κ_r смањује дубину резања и обезбеђује сталну дебљину струготине, тако да се могу применити веће брзине померања до 0,4mm/o (посмак). Слика 18б приказује микро геометрију неколико уметака уз увећање од 50 пута добијено коришћењем скенирајућег електронског микроскопа.

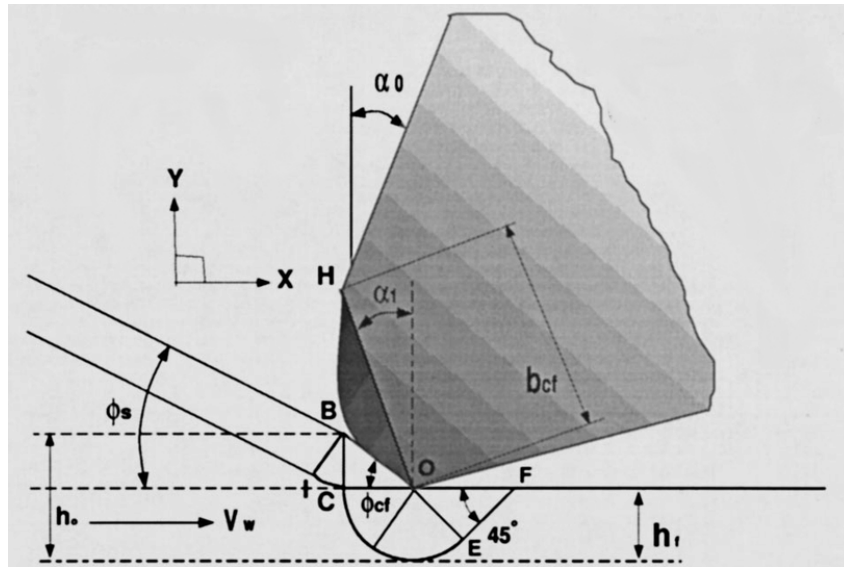


Слика 18: Поређење дебљина струготине за модификовани клизач (а) и конвенционални угао (б) [3]

3.2. Механички модели обраде тешких метала

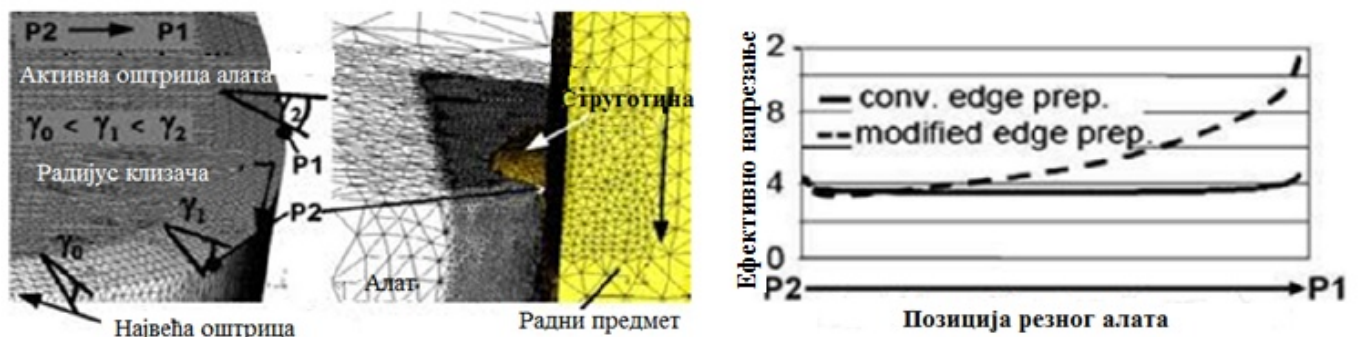
Обрада тешких метала је специфичан процес који се изводи под посебним технолошким и термомеханичким условима, и као што је и очекивано, механизми процеса резања (формирање струготине, стварање топлоте, хабање алата) значајно се разликују од оних код мекших материјала машинске обраде. Тешка машинска обрада се такође изводи као процес суве обраде при великим брзинама. Посебно, док се користе мале дубине резања (0,05-0,3mm) и брзине померања (0,05-0,2mm/o) и мала дебљина недеформисане струготине. Ови геометријски односи воде до ефективног угла нагиба од -60° до -80° , и као резултат, генерише се изузетно висок притисак за уклањање материјала у близини резне ивице. Штавише, велики радијус угла узрокује повећање компоненти резултирајући силе резања, упоредо са великом променом температуре.

На слици 19 приказан је главни модел ортогоналног процеса резања са косим алатом који су предложили Рен и Алтинитас. Прво треба да уочимо да овај модел има малу извесну металну зону ОВН коју је створио угао. Као резултат тога, пластични ток испод косе ивице прати у супротном смеру од кретања алата, како би се избегло расипање негативне енергије у зони резања. Предложени модел који користи одговарајуће клизно решење је у стању да генерише оптимални угао нагиба, брзину резања и гарантује најмање хабање алата и релативно мале силе сечења.



Слика 19: Модел ортогоналне обраде са заобљеним алатима [1]

Ивице за резање PCBN алата за тешке метале имају константну вредност негативног угла нагиба на предњој грудној страни алата. У случају приказаном на слици 20а, клизни уметци су припремљени на такав начин да међусобно повезана ивица алата комбинује микро делове округлих и ромбоидних сегмената алата и обезбеђује променљиву ширину брзину континуалног варирања угла нагиба, $\gamma_2 = -60^\circ$. Резултат тога, дебљина струготине се смањује на положају радијуса клизача где периферно поље одговара најтупљем нагибу. Ефективна пластична деформација повећава се унутар тачака P_1 и P_2 , и као резултат тога, резна ивица је у узајамној вези са степеном пластичне деформације обрађене површине.



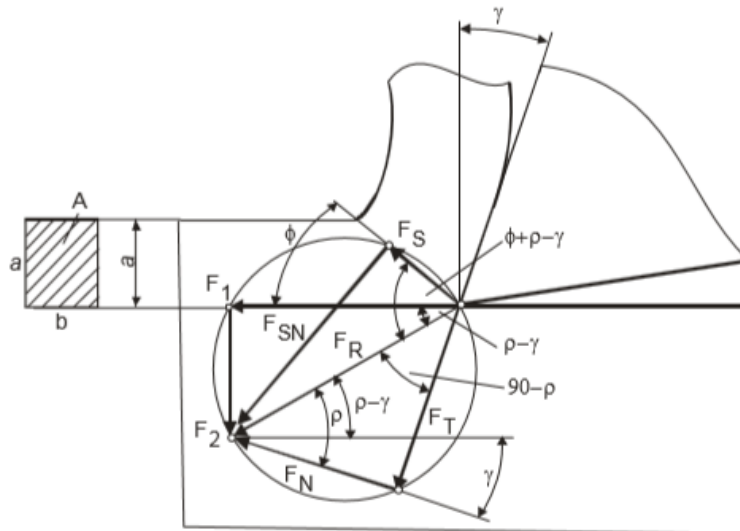
Слика 20: Ивица за резање PCBN алата [3]

3.3. Силе резања

Продирању резног клина у материјал предмета обраде (слика 21) супротстављају се отпори резања. Њихово одређивање има значајну улогу у поступку дефинисања обрадљивости материјала, хабања резних елемената алата, погонске снаге машине и сл.

Код ортогоналног резања резултујућа сила резања F_r се може разложити на:

- тангенцијалну силу (силу трења) F_T , која делује у равни грудне површине и нормалну силу F_N , која делује у равни нормалној на грудну површину резног клина,
- силу у равни смицања F_S , и нормалну силу F_{SN} , која делује у равни нормалној на раван смицања,
- главну силу F_1 и силу продирања F_2 , која делује нормално на обрађену површину предмета обраде.

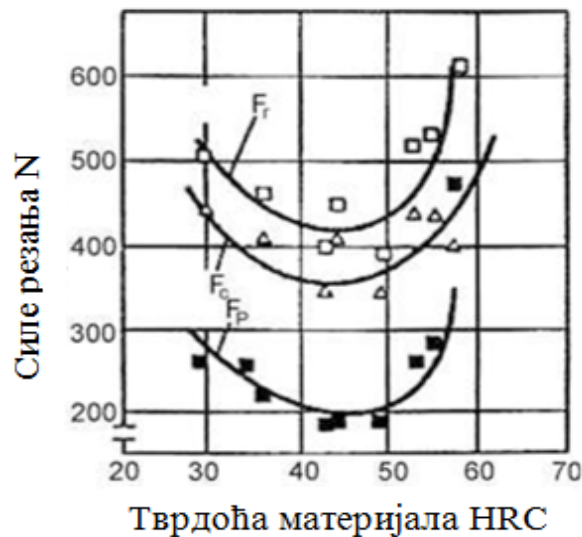


Слика 21: Компоненте резултујуће силе резања при ортогоналном резању [1]

У случају косог резања јавља се и отпор помоћном кретању F_3 . Однос силе смицања и силе нормалне на раван смицања $\frac{F_S}{F_{SN}} = \mu_S = \tan \rho_S$, дефинише коефицијент унутрашњег трења μ_S , односно угао унутрашњег трења ρ_S . За праксу је значајнији однос силе трења и нормалне силе $\frac{F_T}{F_N} = \mu = \tan \rho$, којим се утврђује коефицијент трења μ , односно угао трења ρ , јер омогућује израчунавање појединих компоненти резултујућег отпора резања.

Вредност компоненти сила и односа између њих треба да се разликују од оних који се добијају при машинској обради меких материјала. Прво, на слици 22 се може приметити да се силе резања драстично повећавају приликом обраде материјала са тврдоћом већом од

45 HRC (ова вредност се често наводи као доња граница тврдоће при обради делова од тешког метала). Конкретно, већи негативни угао нагиба и радијус угла алата који утичу на пасивну силу F_r значајно се повећавају и овај ефекат значи да се мора обезбедити апсолутно стабилан и крут процес обраде. Овог захтева се мора посебно придржавати када се користе супер тешки алати са изравнавајућом геометријом.



Слика 22: Утицај тврдоће челика на силу резања [3]

3.4. Снага резања

У процесу резања потребно је савладати отпоре резања и трења у обрадним систему. То значи да се снага погонског електромотора обрадног система састоји од снаге празног хода P_0 и снаге потребне за савладавање:

- главног отпора резања P_{F1} ,
- отпора продирања P_{F2} и,
- отпора помоћног кретања P_{F3} .

Снага P_0 је снага празног хода неоптерећене машине заједно са допунским губицима изазваним оптерећењима при раду (отпори трења и други отпори у обрадном систему). Њена вредност је променљива и зависи од оптерећења, јер са оптерећењем расту притисци у лежајевима, а услед загревања мења се и коефицијент трења.

Снага главног отпора резања зависи од вредности главног отпора резања и брзине резања.

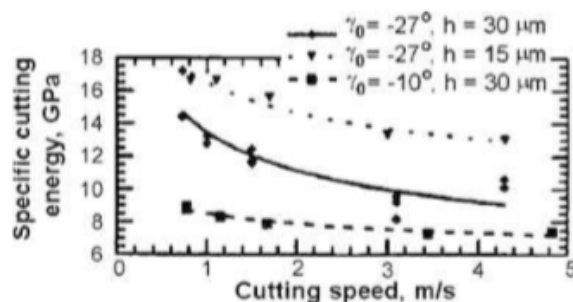
$$P_{F1} = \frac{F_1 \cdot V}{6 \cdot 10^7}, kW$$

Снага отпора продирања је снага потребна за савладавање отпора продирања. Како је брзина продирања једнака нули или приближно једнака нули, па је и снага $P_{F2} = 0$.

Снага помоћног кретања зависи од отпора и брзине помоћног кретања.

$$P_{F3} = \frac{F_3 \cdot V_p}{6 \cdot 10^7}, kW$$

Специфична енергија резања је један од важних индикатора процеса који квантификују ниво потрошње енергије и утичу на индустријску примену датог машинског рада. На слици 23 приказана је специфична енергија резања у односу на брзину резања за ортогонално окретање носећег челика (60HRC) коришћењем алата са малим садржајем кубног нитрида бора (70%) за различите геометрије алата и сечења, тј. за променљиви угао нагиба и дебљине струготине.

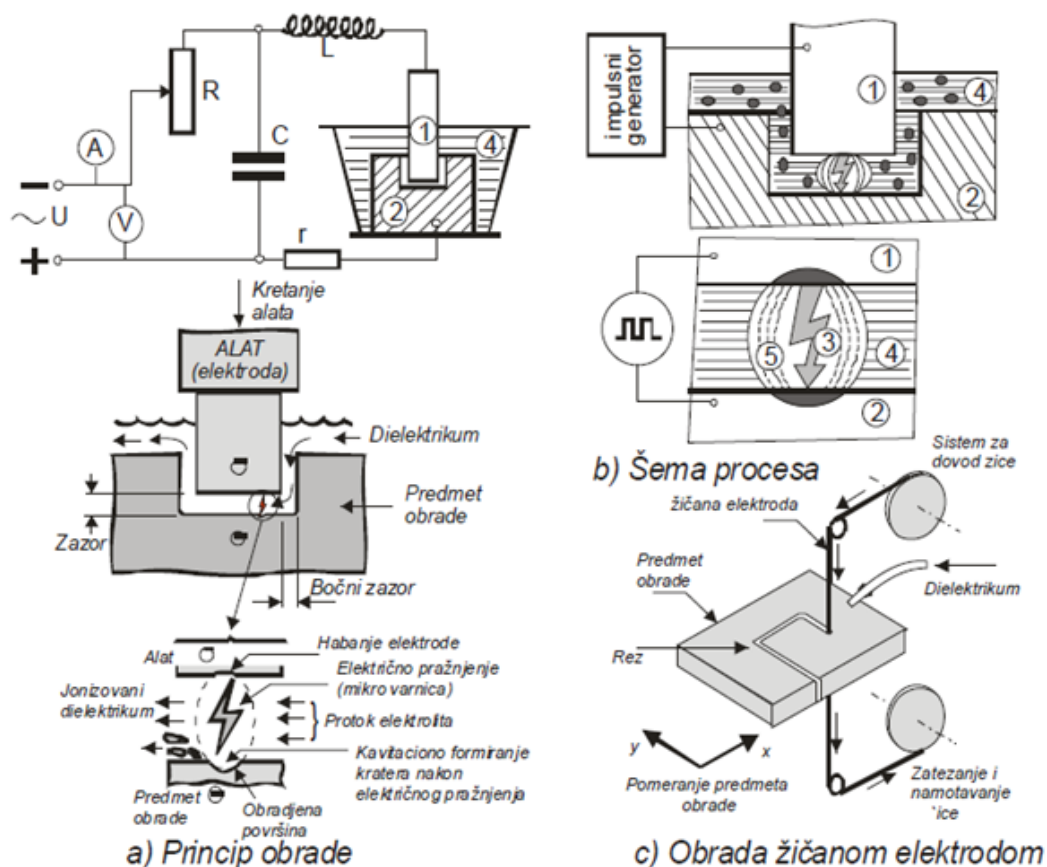


Слика 23: Специфична енергија резања у односу на брзину резања [3]

Према подацима приказаним на слици, енергија за ову операцију тврде обраде креће се од 6 до 11 GPa, што је знатно више него код обраде конвенционалних, мекших челика. Штавише, специфична енергија резања опада са порастом брзине сечења, али претежно за алате са већим негативним угловима нагиба. Према уобичајеној пракси тешке механичке обраде, високи СЦЕ који је потребан за машинске очврснуте челике смањује критичну дубину (или ширину) резања. Стога, да би се одржала висока стабилност при разумним стопама обраде метала, крутост и пригушење система алатних машина морају бити одговарајуће високе. Код врло ниског напајања, дебљина струготине је знатно мања од радијуса на врху алата и ефективни угао нагиба постаје углавном негативан. Материјал испред предње стране је у интензивном притисном стању. У таквом случају, велика количина материјала постаје потпуно пластична пре него што се формира врло танка струготина. Ово узрокује експоненцијално повећање специфичне енергије са мањим вредностима дебљине струготине.

4. ЕЛЕКТРОЕРОЗИВНА ОБРАДА

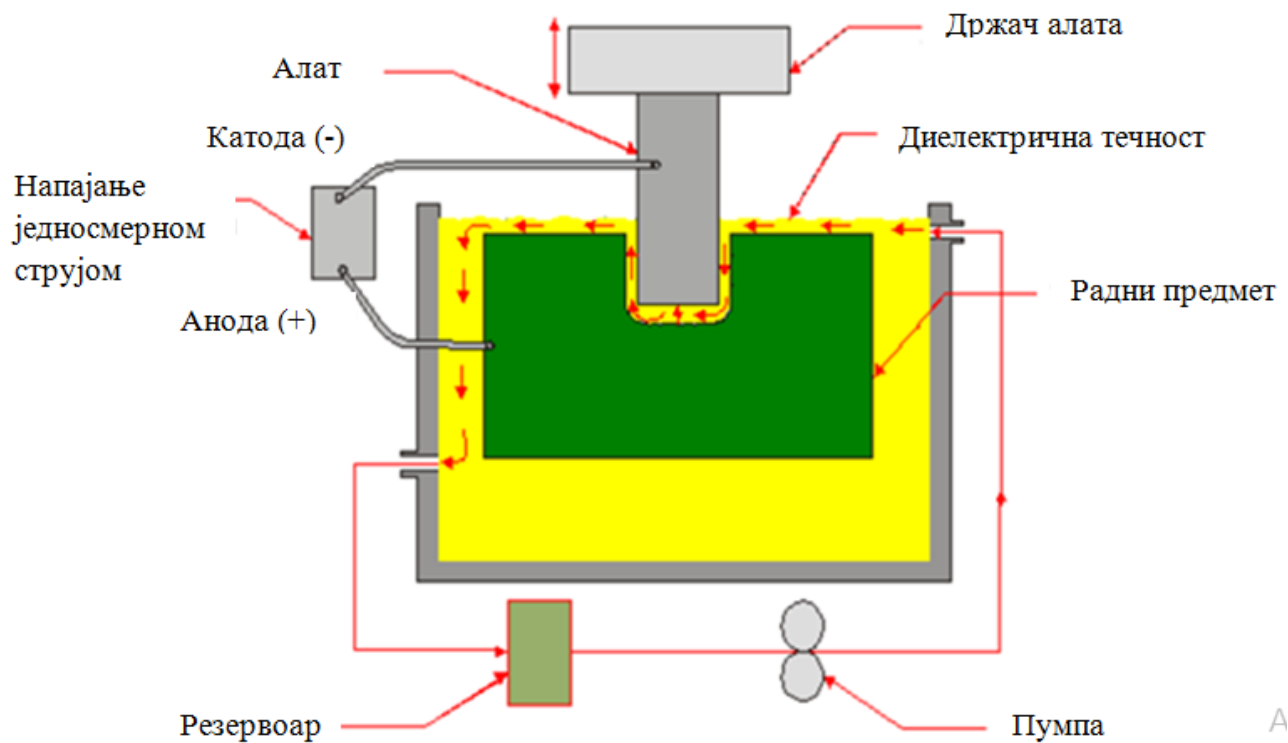
Електроерозивна обрада (енг. *Electric Discharge Machining* – EDM), је једна од најраспрострањенијих нетрадиционалних метода машинске обраде. Главни разлог из ког се ова метода више бира од традиционалних, као што су сечење метала коришћењем разних алата, јесте што она користи термоелектричне процесе да еродира непожељан вишак материјала из обратка и то чини серијом дискретних електричних пражњења, тачније стварањем варница, које се стварају између радног предмета и алата. При одговарајућем растојању алата и предмета обраде (0,005 - 0,5mm) успоставља се електрични лук или искра. Појава лука или искре доводи до јонизације радне течности, формирања стуба пражњења, топљења и испаравања честица материјала предмета обраде, као што је приказано на слици 24. Прекидом пражњења, тачније прекидањем струјног кола, долази до пуцања јонизујућег стуба, затим избацивања растопљеног материјала и његовог одношења из зоне обраде. Хлађење материјала се врши диелектрикумом (минерална уља, дејонизована вода, петролеј итд.), који циркулише. А само наизменично импулсно пражњење обезбеђује разарање материјала, продирање алата и формирање модела који одговара профилу алата.



Слика 24: Основни елементи електроерозивне обраде [1]

Овом методом машинске обраде могуће је остварити висок степен производних операција коришћењем профилисаног или непрофилисаног алата који се огледа у пуној или жичаној електроди. Дужно томе ова метода обраде се дели на поступке обраде пуним и жичаним електродама. Обликовање материјала врши се копирањем алата или узајамним кретањем предмета и алата, као и непрофилисаног алата тј. жичане електроде.

Електроерозивна метода обраде се користи посебно у оним ситуацијама када је механичка обрада неког машинског елемента немогућа или крајње отежана, или при обради тврдих материјала (материјала отпорних на високе температуре, корозију итд.), такође се примењује у изради отвора веома малих пречника и производа сложених контура, као и при изради ваздушно-космичких и медицинских алата. Како тврдоћа материјала више не представља проблем, ова метода је постала веома распрострањена и популарна. На слици 25 приказана је шема EDM процеса где су алат и радни предмет потопљени у диелектричну течност.



Слика 25: Шема EDM процеса [7]

Електрична енергија која се користи у EDM процесу се уобичајено акумулира у тзв. банци кондензатора. Јачина струје која се користи је око 50V до 10A.

4.1. Принцип рада EDM методе

На почетку операције, висока волтажа се примењује преко уског међупростора између електроде и радног предмета. Ова волтажа индукује електрично поље у изолационој диелектричној течности која се такође налази између електроде и радног предмета. Ово узрокује спровођење честица суспендованих у диелектричној течности да се концентришу у тачкама највећег електричног поља.

Када је потенцијална разлика између електроде и радног предмета довољно велика долази до пражњења створене варнице кроз диелектричну течност, и тако се мали део материјала отклања са површине радног предмета. Количина материјала који се отклони са радног предмета по једном пражњењу варнице је уобичајено око 10^{-6} mm^3 .

Ефикасност отклањања материјала (MRR), у EDM процесу се рачуна преко следеће формуле:

$$\text{MRR} = 40I / T_m^{1,23} (\text{cm}^3/\text{min}),$$

Где је:

- I - тренутна јачина струје
- T_m – температура топљења радног предмета у $^{\circ}\text{C}$

Предности ЕДМ метода су:

- Овом методом материјал било које чврстоће може бити обрађиван;
- Нема неравнина које остају на површини радног предмета;
- Једна од главних предности ове методе јесте да могу бити обрађивани ломљиви/крти материјали без икакве дистрозије;
- Комплексне унутрашње површине елемената могу бити обрађиване.

Ограничења ЕДМ метода:

- Овај процес може бити примењиван само код материјала који имају способност спровођења електричне енергије;
- Ефикасност скидања материјала је ниска, и целокупна метода је јако спора у односу на традиционалне методе;
- Може доћи до непожељне ерозије и одсецања материјала преко жељене мере;
- Са све већим степеном отклањања материјала површинска хрпаваост је пропорционално све већа.

4.2. Диелектричне течности и електроде

Диелектричне течности које се користе у ЕДМ процесима јесу угљоводонична уља, керозин и дејонизована вода. Улога диелектричних течности јесте:

- Делује као изолатор између алата и радног предмета;
- Врши улогу расхладне течности;
- Има улогу течности за испирање, тј. уклања опилке изрезаног материјала.

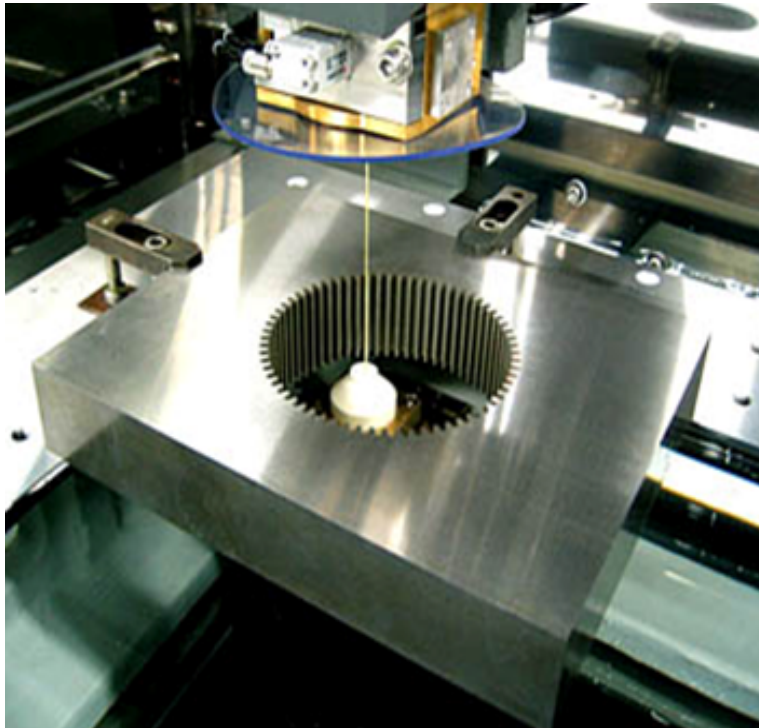
Електроде које се користе у ЕДМ процесима су уобичајено направљене од графита, месинга, бакра, и легуре бакра и волфрама.

Одлуке које морају бити предмет разматрања конструктора при одлуци да се се користи овом методом јесу:

- Дубоки прорези и уски отвори се требају избегавати;
- Не треба задавати превише захтеван степен глаткоће површине;
- Груба одсецања требају претходно бити одрађена другим методама резања, само фазе завршне обраде се раде ЕДМ методом услед малог степена МРР-а;

4.3. Жичана метода ЕДМ – а

ЕДМ метода постоји, примарно, комерцијално у форми машине за сечење жице (енг. Wire EDM). Коцепт рада ове методе је приказан на слици 26. Ова метода функционише тако што жица која се малом брзином креће, путањом која је претходно прописана, исеца материјал са радног предмета. Метода користи електро-термичке механизме за вршење обраде материјала који су проводници електричне енергије. Материјал се отклања серијом електричних пражњења између жичане електроде и радног предмета, све то у присуству диелектричне течности која креира пут сваком пражњењу услед тога што течност постаје јонизована у сваком усеку. Области у којима се пражњење дешава се загрева до екстремно високе температуре, и долази до топљења материјала и тако његовог уклањања. Уклоњене честице се испирају путем текуће диелектричне течности. Жичана ЕДМ метода се показала као веома корисном, до сада већ и неизбежном, методом за исецање веома комплексних машинских делова за електричне и ваздушно-космичке индустрије. Ова неконвенционална метода машинске обраде је широко распрострањена за израду челичних алата у неким гранама производње.



Слика 26: Концепт рада жичане методе ЕДМ [19]

Жице које се користе у овој методи се праве од месинга, бакра, волфрама и молибдена. Цинком или месингом пресвучене жице се такође интензивно користе. Ове жице морају да поседују високу затезну чврстоћу и добру електричну проводљивост. Жичана ЕДМ метода се такође може применити на сечење цилиндричних делова са високом прецизношћу.

5. ПРИМЕНА ТЕШКИХ МЕТАЛА

Због својих веома добрих својстава (првенствено због високе тврдоће), тешки метали имају широк спектар примене. Употребљавају се у разним методама обраде метала, камена, пластике и обраде дрвета. Резне плочице од тешког метала причвршћују се на челичне ручке лемљењем, заваривањем или механичким путем. Резне плочице се углавном не бресе, али истрошене плочице су важна секундарна сировина за издвајање волфрама, кобалта и других карбида.

Тешки метали на бази WC-Co, са масеним уделом карбида од 3 до 11% и величином зрна волфрам карбида од 0,5 до 5 μm , употребљавају се за обраду одвајањем честица обрадка са кратком струготином (сиви лив, полимери). Такође, примењују се за израду калупа за обликовање метала и неметала. Нису прикладни за обраду материјала са дугачком струготином, зато што постоји могућност заваривања честица обрадка на оштрицу алата. За израду ваљака, матрица и других делова веће масе, углавном се употребљава ова врста тврдих метала.

Материјали са дугом струготином обрађују се вишекарбидном тешким металима (нпр. WC-TiC-Co), при чему ниобијум, који је често повезан са танталом, не смета до масеног удела од 30%. Ови чврсти метали су отпорнији на топлоту и постојани на оксидацију, а имају и већу отпорност на заваривање честица струготине. TiC се теже дисоцира па и мање дифундира у кобалтну везивну масу, тако да се та маса ипак легира само волфрамом и угљеником, а TiC и WC заједно стварају мешани карбид. На слици 27 је приказана кружна тестера од тешког метала.



Слика 27: Кружна тестера од тешког метала [21]

Смањењем удела титанијум карбида у односу на наведене тврде метале, добијамо тврде метале погодне за обраду материјала који се тешко обрађују (високолегирани челици и неки обојени метали). Они су погодни за обраду материјала и са кратком и са дугом струготином, али су мање издржљиви. На слици 28 је приказана круна за бушење пресвучена тврдим металом.



Слика28: Круна за бушење [22]

Важна примена тврдих метала је у производњи матрица за извлачење (нпр. за жице, шипке, профиле). У производњи ових производа потребна је већа чврстоћа на притисак и отпорност на трошење, као и минимална храпавост површине у вучној шупљини. Због свега тога, чврсти метали типа WC-Co се користе са мањим садржајем кобалта (око 2,5%) и малим карбидним зрном. Слика 29 приказује алат за стругање са окретном плочицом од тешког метала.



Слика 29: Стругарски алати са окретном плочицом од тешког метала [23]

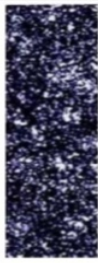
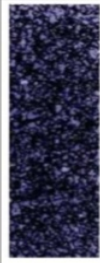
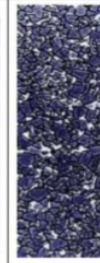
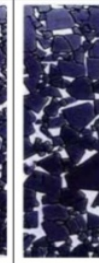
Оптерећења при деформисању су много већа него при производњи финијих производа, тако да су за производњу шипки и профила погодније жилавије врсте тешких метала до 25% кобалта. Пресе за пресовање које имају до 25% кобалта су јако оптерећене на пукотине, ударе и притисак. Такви материјали су прилично скупи и користе се само када могу постићи барем десет пута дуже време употребе од оних који се користе код алатних челика. Тешки метали високе чврстоће примењују се за израду матрица за хладно ковање вијака. У њима је масени удео везног метала и до 30 %, а величина карбидног зрна и до 10µm. Такве матрице за хладно ковање вијака постижу двадесет до сто пута дуже време употребе. Термичком обрадом након синтеровања понекад се може продужити време употребе. Сви јако оптерећени алати од тврдог метала постављају се у челична кућишта. То се ради због тога што ако се допуштено напрезање прекорачи, може доћи до лома наместима случајних дефеката. Ту се посебно мисли на алате високог притиска у синтези дијаманта, где су познати радни притисци већи од 5 GPa.

Тешки метали имају широку примену у изради алата за дубоко бушење Земљине коре. Користе се у рудницима при копању угља и рударству, и при обради камена. Користе се различите врсте тврдо-металних типова WC-Co, најчешће са масом кобалта од 6-17% и карбидом величине зрна до 10 µm. Тврди метали за примену у рударству приказани су у табели 3.

Табела 3: *Тешки метали за примену у рударству*

Ознака	Састав %		Својства			Примери примене
	Co	WC	Густина kg/m ³	Тврдоћа HV 30	Чврстоћа на савијање R _m	
B05	6-7	Остатак	14700	1600	1400 - 1800	Бургија за бушење при најјачем абразивном деловању минерала (камена)
B15	7-8		14400	1350	1600 - 2000	Бургија за камен средње јачине на хабање, за камен са малим уделом кварца, пирит (прикладан и за ударно бушење)
B25	9-10		14200	1200	1800 - 2200	Ударна бушилица већих промера за тврди и жилави камен
B40	13-15		13900	1140	1900 - 2500	Ударне бургије, дубинске бургије за камен (гранит са додацима кварца)

Тешке метале можемо поделити и према величини зрна карбида, као што је приказано на слици 30.

Vrsta i veličina zrna karbidne faze, μm						
Nano	Ultra fina	Submikron	Fina	Srednja	Gruba	Ekstra gruba
< 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,3	1,3 - 2,5	2,5 - 6,0	> 6
						

Слика 30: Подела тешких метала према величини зрна [5]

Највећи удео тешких метала у свету, око 70%, односи се на алате за обраду метала, и у мањој мери, на алте за бушење нафте и гаса, рударства, грађевинарства, обраду дрвета, камена, и производњу конструкцијских елемената отпорних на хабање. Област примене тешких метала је константно у порасту због њихових веома повољних својстава, као што су: велика чврстоћа, тврдоћа, велика отпорност на савијање и притисак, отпорност на хабање, висок модул еластичности, отпорност на корозију и отпорност при високим температурама. Како се развија технологија и користе прахови са све мањом величином зрна, опсег примене се повећава. Тако се нано и ултра фини прахови примењују у производњи микроалата (слика 31) за обраду микрочестица за матичне плоче у мобилним телефонима.



Слика 31: Микроалати [20]

Употреба волфрама у војној индустрији:

Од почетка развоја топа основни начин пробоја било чега јесте било коришћење чисте кинетичке енергије – у почетку је то било камено или касније метално округло ђуле

које је експлозија барута лансирала кроз ваздух како би уништило камене или дрвене тврђаве, бродове и слично. Међутим, крајем 19 века људи долазе на идеју да бродове оклопе металним плочама како би их ђулад теже пробијала и тада креће по први пут развој armor-piercing (AP, односно панцирне) муниције. Оваква граната мора да издржи притисак ударца и пробијања оклопа и зато у почетку ове гранате имају ојачане врхове и уопште цело кућиште гранате.

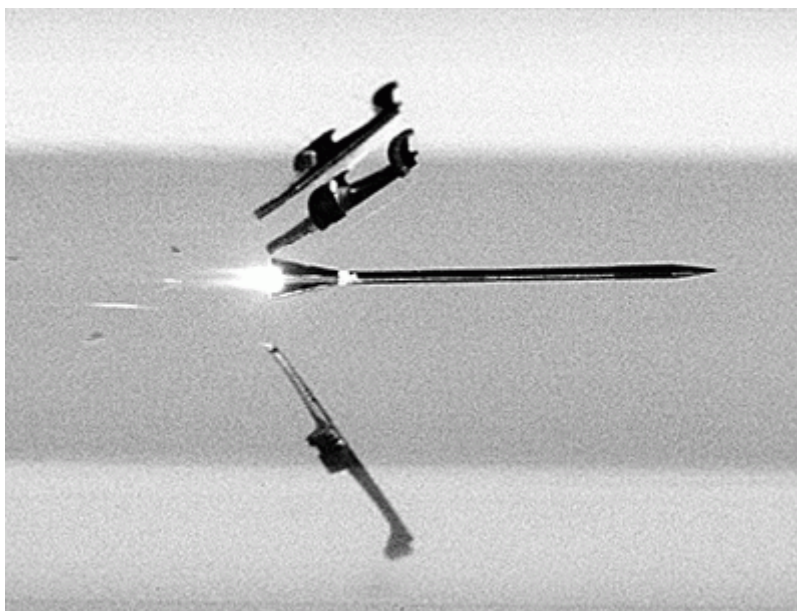
Током Другог светског рата долази до врло брзог развоја тенковског оклопа и онда и саме гранате морају постати пробојнице да би успеле у својој основној намени. Идеја је да се граната из топа избаци што је могуће већом излазном брзином што ће јој обезбедити већу пробојност чак и на већим удаљеностима. То је оно што бисмо назвали класичном AP гранатом. У раним фазама рата гранате су могле да пробију отприлике два пута дебљину оклопа у односу на свој калибар са удаљености од око 100 метара – дакле граната калибра 30mm је могла да пробије око 60mm ефективног оклопа. Како су се у каснијим фазама рата даље развијали топови калибра 75-128mm могли су да пробију отприлике два ипо пута дебљину оклопа на блиским растојањима док су на удаљености од 1.500-2.000 метара, што је и најчешћа удаљеност на којој су се одвијале борбе, могли да пробију око 1.75 пута свој калибар.

У каснијим фазама све нације почињу да размишљају о томе да им треба јаче језгро гранате које ће успети да пробије већу дебљину оклопа и у почетку се окрећу пресовању легура челика и олова под високим притиском како би добили већу густину легуре. Немци крећу да експериментишу са различитим легурама и материјалима међу којима се најбоље показује волфрам (енг. Tungsten).

Међутим долази и до развоја другог типа граната – High-Explosive Anti-Tank (HEAT), односно кумулативне гранате, које користе гранату која експлодира приликом удара у оклоп а онда креира млаз ужареног метала који практично топи оклоп и то много веће дебљине него AP пројектили. Ово је генерално био омиљени тип граната непосредно након Другог светског рата, пре свега код совјетских возила Т-54/55, Т-62, Т-64 и другима јер је могао да без проблема пробије Западне средње тенкове као што су Центурион или Патон, па чак и тешке тенкове као што су Conqueror или М103. Наравно како напредују гранате тако напредују и системи за одбрану од њих па се долази до идеје о слојевитом оклопу – ако кумулативна граната погоди прво неки мекши део оклопа онда долази до преране детонације и млаз ужареног метала не стиже до самог оклопа који треба да топи.

Војни инжењери се поново враћају на идеју гранате која ће имати у средини изузетно јако језгро и поново се актуелизује прича о волфраму – као концепт настаје ArmorPiercing Composite Rigid (APCR) граната. У суштини то је спољна чаура у чијој средини се налази изузетно тврдо језгро од волфрама или волфрам – карбида. Даљим развојем се креира спољашња чаура која се одмах по изласку из цеви одбацује – такозвани сабот. У питању је једна врста пампура који омогућава да се активира велико експлозивно пуњење које

гурапампур и његово чврсто језгро огоромном брзином напоље, а одмах по изласку из цеви се одбацује вишак и ка противнику лети само иглица од изузетно јаког материјала што је додатно добро јер се смањује отпор ваздуха и постиже већа брзина којом део који пробија удара у противнички оклоп. Овакве гранате се називају Armor Piercing Discarding Sabot (APDS). Коначно да би се додатно повећала прецизност закључено да је да је боље да иглица добије крилца која ће јој држати правац у лету и долазимо до граната које се и данас користе у тенковима –Armor-Piercing Fin-Stabilized Discarding Sabot (APFSDS), слика 32.



Слика 32: Сабот који отпада са APFSDS гранате непосредно након испљивања из цеви [24]

Материјал од кога се прави та иглица која треба да пробије противнички оклоп – материјали који су се користили за израду олово и челик, колико год високом притиску да буду изложени како би се повећала густина више не могу адекватно одговорити на захтеве за великом пробојношћу. Опет се прибегава Волфраму који се ставља у легуре са никлом, гвожђем или кобалтом и који достиже око 70% већу чврстоћу од олова. Немачки DM63 метак, који је саставни део стандардног НАТО топа дебљине 120mm има оклопни штап израђен од легуре волфрама. Тежина метка је 21,4kg, тежина пројектила је 8,35kg, тежина оклопно-штапне шипке је 5кг. Дужина метка је 982mm, дужина пројектила је 745mm, дужина језгра је 570mm, а промер је 22mm. Када се испаљује из топа са дужином цеви од 55 калибара, почетна брзина је 1730m/s, пад брзине на путу лета износи 55m/s на сваких 1000m. Продор у оклоп на удаљености од 2000m дуж нормале процењује се на 700mm хомогеног челика.

У данашње време легура волфрама се све више користи као сировина у војној индустрији. Како би се смањило коришћење опасних материјала по животну средину у

области војне индустрије, употреба волфрама користи се као нетоксична алтернатива за олово и осиромашени уранијум у пројектилима. Циљ војне индустрије је стварање функционалних нетоксичних пројектила са контролисаним ударним понашањем. Посебна својства легура волфрама чине га готово идеалним материјалом за војне потребе. Захваљујући великој тврдоћи и отпорности на високе температуре, употреба волфрама се стално повећава.

Метак са волфрамом (слика 33) има велику почетну брзину, кратко време лета, високу прецизност гађања и високу продорну моћ. Односи се на језгро артиљеријске гранате која продире у непријатељски тенковски оклоп начињен легуром волфрама.



Слика 33: Метак са језгром од волфрама [13]

Закључак

На основу проучене литературе, долазимо до закључка да су тешки метали најчешће легуре волфрама као основног метала и елемената из групе прелазних метала у које спадају никл, гвожђе, кобалт и др. Тешки метали се добијају технологијом металургије праха, то јест производе се синтерованем смеше компонената у облику праха. Основна компонента тврдог метала је волфрам карбид (WC), то је компонента која тешком металу даје тврдоћу. Тешки метали имају веома добра својства као што су: висока тврдоћа, висока отпорност на хабање, висока топлотна и електрична проводљивост, отпорност на корозију, висок модул еластичности, висока чврстоћа на притисак, чврстоћа при повишеним температурама, добра отпорност на температурне промене, итд.

Данас обрада тешких метала све више добија на значају у изради резних алата, такође ова добра својства пружају широко подручје примене у изради резних алата, делова машина, алата за пробијање.

Тешки метали због своје високе тврдоће користе се за обраду метала, камена, пластике и дрвета. Користи се у широком спектру примена, од брушења и полирања до компактних материјала од којих се израђују алати за стругање, бушење, израду навоја, глодање, итд. Плочице од тешког метала могу се залемити на носач стругарског алата, али се углавном производе ротирајуће резне плочице, које се механички причврћују на алатни држач. Оне су обично округле, троугласте, ромбоидне, квадратне, и сл, и њихове се оштрице могу ротирањем доводити у радни положај пошто се претходна оштрица истрошила.

Литература

- [1] Б. Недић, М. Лазић, Обрада метала резањем, Крагујевац, 2007
- [2] М. Митков, Д. Божић, З. Вујовић, Металургија праха, БМГ, Београд, 1998
- [3] J. Paulo Davim, *Machining of hard materials*, Springer, London, 2011
- [4] Инжењерски приручник 4 – Производно стројарство, Школска књига, Загреб, 1998
- [5] Б. Ђурковић, А. Ђурковић, Металургија ретких метала, ТМФ, Београд, 1991
- [6] Dr H. N. Dhakal, *Non Traditional Manufacturing Processes*, University of Plymouth, 2008
- [7] V. Sarin, D. Mari, L. Miguel, C. Nebel, *Comprehensive Hard Materials*, Elsevier Science, Бостон, САД, 2014
- [8] *Heavy Alloy Material* – Каталогске стране фабрике *PLANSEE*, Француска
- [9] *KMT Tungsten Military Brochure* – Каталогске стране фабрике *KENNAMETAL*, Немачка
- [10] *English Final Military Brochure* – Каталогске стране фабрике *T&D Materials manufacturing LLC*, САД
- [11] M.P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processes and Systems*, Johns Wiley & Sons, 4th edition, USA, 2010
- [12] Др Д. Ђорић, Посебни метални материјали, Школска књига, Загреб, 2015
- [13] https://www.itia.info/assets/files/Newsletter_2008_12.pdf
- [14] <https://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/HCStarckFabricatedProductsGroup/MolybdenumMetalPowders/212520/0>
- [15] <https://www.xiamen-honglu.com/En/Productdetail.aspx?ProductsID=80&CateID=68&ProductsCaseID=68>
- [16] <http://www.tungsten-corp.com/category/military/>
- [17] <https://podarilove.ru/hr/podkalibernye-boeprirasy-snaryady-i-puli-princip-deistviya/>
- [18] https://www3.nd.edu/~manufact/MPEM_pdf_files/Ch11
- [19] <http://www.industrialtool.net/edm.html>
- [20] <http://www.indiancuttingtools.net/products.htm>
- [21] <https://alat.co.rs/shop/alati-za-obradu-drвета/kružne-vidija-testere/kružna-vidija-testera-tm-350x3-6x30-84-wz/>
- [22] <https://supergoldy.eu/proizvodi/set-volfram-kruna>
- [23] https://sim-technik.biz/katalozi/Alati_za_tokarenje_HR_2017
- [24] <https://www.klanrur.rs/2018/03/26/wot-istorijski-kutak-razvoj-tenkovskih-granata-od-pocetaka-do-osiromasenog-uranijuma/>