

# Erozijska otpornost tvrdih metala

---

Oršanić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:936969>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Nikola Oršanić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić, dipl. ing.

Student:

Nikola Oršanić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na razumijevanju i stručnoj pomoći prilikom pisanja ovog rada. Posebne riječi zahvale također upućujem asistentu Matiji Sakomanu na organizaciji eksperimentalnog dijela te pomoći u svakom trenutku.

Za kraj se želim zahvaliti svim profesorima i kolegama koje sam upoznao tijekom studija te se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su me cijelo vrijeme podržavali.

Nikola Oršanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NIKOLA ORŠANIĆ** Mat. br.: 0035200874

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Erozijska otpornost tvrdih metala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The erosion resistance of cemented carbides**

Opis zadatka:

Tvrđi metali su keramičko-metalni kompoziti koji sadrže karbide volframa, titana i tantala povezane kobaltom. Karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje dok metalna matrica osigurava žilavost višefaznog materijala. Izrazito visoka tvrdoća je jedno od najvažnijih svojstava ovih materijala i kreće se u rasponu od 700 HV30 pa sve do 2200 HV30, ovisno o kemijskom sastavu, mikrostrukturi i primijenjenom tehnološkom postupku konsolidacije.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

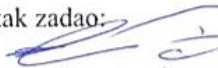
- opisati građu tvrdog metala
- navesti istaknuta svojstva i objasniti utjecaj strukturnih konstituenata na pojedina svojstva tvrdog metala
- navesti karakteristične primjere primjene s naglaskom na rezanje vodenim mlazom i mogućnost primjene reznih sapnica od tvrdog metala
- opisati mehanizam erozijskog trošenja i navesti laboratorijske metode ispitivanja erozije
- na raspoloživim uzorcima, različitog sadržaja kobalta, provesti ispitivanja otpornosti na eroziju česticama uz primjenu dva erodena i različitih kutova upada
- statistički obraditi dobivene rezultate
- analizirati rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:  
28. studenog 2019.

Predvideni datum obrane:  
04. prosinca 2019.  
05. prosinca 2019.  
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Tvrdi metali.....	2
2.1 Mikrostruktura tvrdih metala.....	2
2.2 Mehanička svojstva tvrdih metala .....	3
2.2.1 Tvrdoća i žilavost.....	3
2.2.2 Savojna i tlačna čvrstoća.....	6
2.3 Vrste tvrdih metala.....	7
2.4 WC–Co tvrdi metali .....	7
2.5 Primjena i podjela tvrdih metala .....	9
3. Metalurgija praha .....	12
3.1 Proizvodnja praha.....	12
3.2 Miješanje i mljevenje praha .....	13
3.3 Oblikovanje praha.....	15
3.4 Sinteriranje .....	16
3.5 Primjena metalurgije praha .....	18
4. Obrada vodenim i abrazivnim mlazom .....	20
4.1 Vodeni mlaz.....	20
4.2 Abrazivni vodeni mlaz .....	21
4.3 Prednosti i nedostaci obrade vodenim mlazom .....	23
4.4 Primjena u praksi.....	24
5. Erozijsko trošenje.....	26
5.1 Erozijska česticama.....	27
5.2 Parametri koji utječu na erozijsko trošenje.....	28
5.3 Erozijska kapljevinama .....	33
5.4 Zaštitne prevlake .....	34
6. Laboratorijske metode ispitivanja erozije .....	37
6.1 Ispitivanje erozije suhim pijeskom .....	38
7. Eksperimentalni dio rada .....	40
7.1 Rezultati .....	46
7.1.1 Relativni gubitak mase u ovisnosti o kutu udara erodenta .....	46
7.1.2 Relativni gubitak mase u ovisnosti o vrsti erodenta.....	50
7.1.3 Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala (WC-10Co, WC-15Co) .....	53
8. Zaključak .....	58
Prilozi.....	59
Literatura .....	60

## POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura tvrdih metala .....	3
Slika 2. Utjecaj kobalta na tvrdoću za različite veličine WC zrna.....	4
Slika 3. Metoda određivanja lomne žilavosti po Palmqvistu.....	5
Slika 4. Ovisnost lomne žilavosti o udjelu Co i veličini WC zrna .....	5
Slika 5. Usporedba tvrdoće i lomne žilavosti tvrdih metala s drugim materijalima .....	6
Slika 6. Tlačna i savojna čvrstoća u ovisnosti o sadržaju kobalta .....	6
Slika 7. Dio pseudobinarnog WC-Co dijagrama stanja.....	8
Slika 8. Podijela tvrdih metala prema veličini zrna .....	10
Slika 9. Glodala za izradu navoja .....	10
Slika 10. Alati za obradu metala valjanjem .....	11
Slika 11. Mikrosvrldo.....	11
Slika 12. Postupci atomizacije .....	13
Slika 13. Miješalica za metalne prahove.....	14
Slika 14. Kuglični mlin.....	14
Slika 15. Promjena rasporeda čestica i oblika prilikom oblikovanja .....	16
Slika 16. Mehanizam sinteriranja .....	17
Slika 17. Primjena metalurgije praha .....	18
Slika 18. Obrada vodenim mlazom.....	20
Slika 19. Struktura vodenog mlaza.....	21
Slika 20. Obrada abrazivnim vodenim mlazom .....	22
Slika 21. Suspenzijski vodeni mlaz.....	23
Slika 22. Injekcijski vodeni mlaz.....	23
Slika 23. Primjer rezanja vodenim mlazom.....	24
Slika 24. Opći oblik procesa trošenja .....	26
Slika 25. Tribosustav erozije česticama.....	27
Slika 26. Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom .....	28
Slika 27. Utjecaj kuta udara na erozijsko trošenje krutim česticama .....	29
Slika 28. Poligon sila u slučaju abrazivne erozije.....	30
Slika 29. Poligon sila u slučaju udarne erozije.....	31
Slika 30. Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje.....	32
Slika 31. Ovisnost brzine erozije o veličini čestica .....	32
Slika 32. Utjecaj brzine gibanja na erozijsko trošenje krutim česticama .....	33
Slika 33. Shema procesa erozije kapljevnom .....	33
Slika 34. Relativna otpornost nekih materijala na eroziju kapljevnom.....	34
Slika 35. Sheme opreme za ispitivanje materijala erozijom.....	38
Slika 36. Shema ispitivanja otpornosti na eroziju česticama.....	39

<b>Slika 37. Uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje .....</b>	<b>40</b>
<b>Slika 38. Ultrazvučna kupka za čišćenje uzoraka .....</b>	<b>42</b>
<b>Slika 39. Laboratorijska vaga .....</b>	<b>42</b>
<b>Slika 40. Uzorak WC - 10Co.....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 41. Uzorak WC -15Co.....</b>	<b>44</b>
<b>Slika 42. Kvarcni pijesak (SiO<sub>2</sub>).....</b>	<b>45</b>
<b>Slika 43. Sačma .....</b>	<b>45</b>
<b>Slika 44. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> u ovisnosti o kutu upada .....</b>	<b>46</b>
<b>Slika 45. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> u ovisnosti o kutu upada .....</b>	<b>47</b>
<b>Slika 46. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta sačme u ovisnosti o kutu upada .....</b>	<b>48</b>
<b>Slika 47. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta sačme u ovisnosti o kutu upada .....</b>	<b>49</b>
<b>Slika 48. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 15° .....</b>	<b>50</b>
<b>Slika 49. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 90° .....</b>	<b>51</b>
<b>Slika 50. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 15° .....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 51. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 90° .....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 52. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> pri kutu od 15° .....</b>	<b>53</b>
<b>Slika 53. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> pri kutu od 90° .....</b>	<b>54</b>
<b>Slika 54. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta sačme pri kutu od 15° .....</b>	<b>55</b>
<b>Slika 55. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta sačme pri kutu od 90° .....</b>	<b>55</b>
<b>Slika 56. Površina uzorka WC-10Co prije trošenja .....</b>	<b>56</b>
<b>Slika 57. Površina uzorka WC-10Co nakon trošenja.....</b>	<b>56</b>
<b>Slika 58. Površina uzorka WC-15Co prije trošenja .....</b>	<b>57</b>
<b>Slika 59. Površina uzorka WC-15Co nakon trošenja.....</b>	<b>57</b>



## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1. Svojstva tvrdih metala u ovisnosti o sadržaju kobalta.....</b>	<b>4</b>
<b>Tablica 2. Specifičnosti metalurgije praha prema drugim proizvodnim postupcima.....</b>	<b>19</b>
<b>Tablica 3. Područja primjene vodenog i abrazivnog vodenog mlaza .....</b>	<b>25</b>
<b>Tablica 4. Vrste keramičko oksidnih slojeva .....</b>	<b>35</b>

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$D$	mm	Promjer kućišta uzorka
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$E_g$	-	Erozijsko trošenje
$F_H$	N	Horizontalna komponenta sile
$F_R$	N	Rezultantna sila
$F_V$	N	Vertikalna komponenta sile
$k$	-	Konstanta
$n$	-	Eksponent brzine
$n_{okr}$	Okr/min	Broj okretaja osovine
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
$t$	h	Vrijeme
$t_g$	h	Granično vrijeme
$v$	m/s	Brzina čestica
$v_e$	m/s	Brzina slobodnog pada erodenta
$v_u$	m/s	Brzina uzorka
$\alpha$	°	Kut udara čestice
$\Delta V$	mm <sup>3</sup>	Gubitak volumena
$\Delta V_g$	mm <sup>3</sup>	Granični gubitak volumena

## SAŽETAK

Erozija je vrlo česta pojava koja se susreće u svakom tribosustavu gdje postoji određena interakcija između čestica i čvrstog tijela pri brzinama većim od 1 m/s. Mnogi dijelovi u strojarstvu, prilikom svoga rada, izloženi su erozijskom trošenju, a kada je riječ o tvrdom metalu na njega se može utjecati reguliranjem veličina zrna karbidne faze te sadržajem veziva. U radu se opisuje postupak ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje tvrdih metala s 10% i 15% Co na uređaju kod kojeg erodent u obliku kvarcnog pijeska ( $\text{SiO}_2$ ) te sačme slobodnim padom prolazi kroz sapnicu te pada na uzorak koji se rotira. Nanostrukturirani tvrdi metali podvrgnuti su erozijskom trošenju pod kutovima od  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  i  $90^\circ$ . Ukupno vrijeme ispitivanja je 60 minuta te se prati progresija erozijskog trošenja nakon svakih 15 minuta.

Ključne riječi: tvrdi metal, trošenje, erozija, WC-Co

## **SUMMARY**

Erosion is a real occurrence seen in every tribo-system where interaction between solid particles and a solid body has a speed greater than 1 m/s. Many parts in mechanical engineering in their work are exposed to erosion wear, and when it comes to hard metals, it can be affected by regulating the grain sizes of the carbide phase and the content of the binder. This paper describes the process of testing erosion wear resistance of hard metal with 10% and 15% Co. The test is performed on a special device where the erodent SiO<sub>2</sub> and steel balls, flows in free fall through the system and strikes the rotating samples. Nanostructured hard metals were subject to erosion wear at angles of 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°. The total test time is 60 minutes and the progression of erosion wear is monitored after every 15 minutes.

Keywords: hard metals, cemented carbides, wear, erosion, WC-Co

## 1. Uvod

Oduvijek se kroz povijest težilo razvijanju novih znanja i tehnologija kako bi se olakšao određeni posao, a samim time i cjelokupni život. Razvoj novih materijala i njihove metode ispitivanja imali su veliku ulogu u razvoju novih znanja i procesa. Razvitkom svjetske industrije, pred znanstvenicima se svakodnevno pojavljuju novi izazovi koji su povezani za zahtjevima kvalitete, raznolikošću proizvoda te životnim vijekom.

Primjena tvrdih metala svakodnevno se širi zbog njihovih vrhunskih mehaničkih i triboloških svojstava kao što su visoka tvrdoća i otpornost na trošenje. Upravo zbog tog razloga tvrdi metali se najčešće primjenjuju za obradu drva, kamena, nemetala te za rezanje metala. Tvrdoća tvrdih metala je izrazito visoka i kreće se između 700 HV30 pa sve do 2200 HV30. Upravo je to razlog vrlo široke primjene tvrdih metala jer uz tvrdoću i ostala svojstva WC i WC-Co tvrdih metala se mogu mijenjati u širokom rasponu. Uz navedene prednosti tvrdih metala, kod njih se također javljaju određeni oblici trošenje na koje se promjenom kemijskog sastava može utjecati.

Ovaj rad se bavi ispitivanjem otpornosti tvrdih metala na erozijsko trošenje te istraživanjem utjecaja promjene kemijskog sastava na mehanička i tribološka svojstva.

Prikazuje se utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje te djelovanje kuta udara erodenta u materijal.

## 2. Tvrđi metali

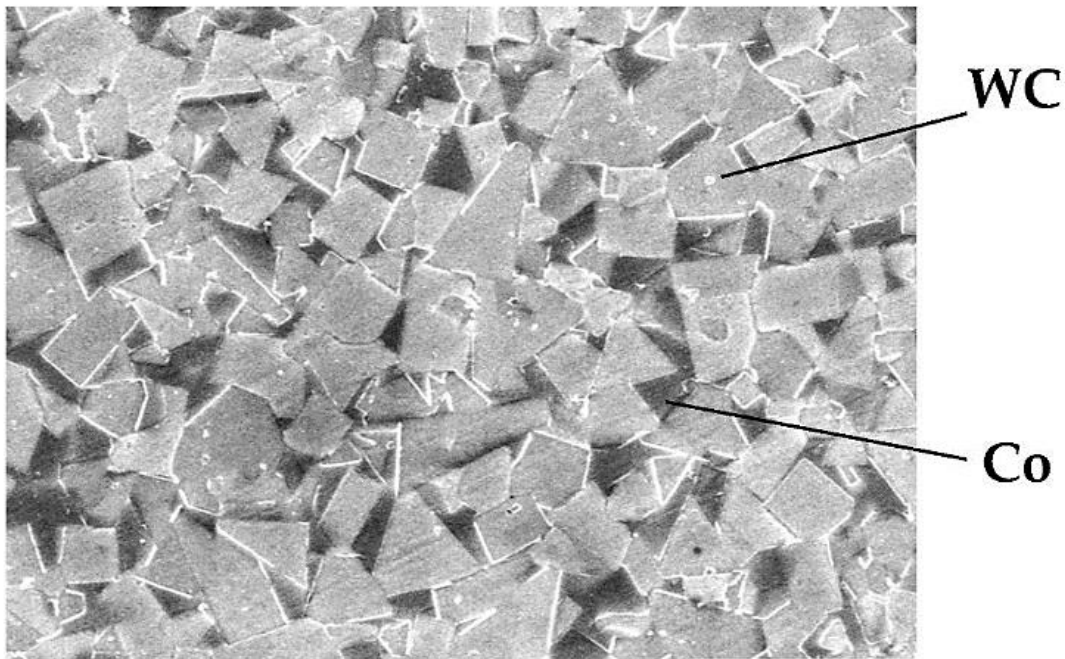
Tvrđi metali su kompozitni materijali dobiveni postupkom metalurgije praha. Svojstva svakog materijala pa tako i tvrdih metala, posljedica su njihove mikrostrukture koja je određena kemijskim sastavom i parametrima tehnološkog procesa metalurgije praha. Najčešće se upotrebljavaju za proizvodnju reznih alata izrazito visoke kvalitete, prije svega alata koji mogu podnijeti visoke temperature. Osim odličnih mehaničkih svojstava, koja proizlaze iz tvrdog i krhkog WC te mekše i žilavije matrice koju u većini slučajeva čini Co u udjelu između 3 i 25 %, odlikuje ih i izrazito dobra električna i toplinska vodljivost, otpornost na toplinske šokove te dobra otpornost na koroziju. Tehnološki napredak u proizvodnim procesima proširio je upotrebu materijala dobivenih postupkom metalurgije praha u gotovo svim granama industrije. Sve se više upotrebljavaju prahovi male veličine zrna te se na taj način postiže homogena mikrostruktura povišene tvrdoće, otpornosti na trošenje i čvrstoće (tlačne i savojne). Upravo takva mikrostruktura i posljedična svojstva rezultiraju izradom sve kvalitetnijih alata, dužeg vijeka trajanja čime se omogućuju primjene pri većim brzinama rezanja.

### 2.1 Mikrostruktura tvrdih metala

Mikrostruktura tvrdih metala je važna jer upravo ona određuje mehanička i sva druga svojstva ovih materijala. Mehanička svojstva tvrdog metala ovise o vrsti i udjelu različitih karbida te sadržaju kobalta. Tvrda komponenta su uglavnom karbidi tipa WC ili TiC, a vezivni metal je najčešće kobalt. Karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje dok vezivni materijal osigurava žilavost i omogućava sinteriranje u tekućoj fazi te stvaranje dvofazne ili višefazne mikrostrukture (slika 1). Zbog postupka proizvodnje, ali i velike tvrdoće, tvrdi metali se ne mogu oblikovati plastičnom deformacijom, niti toplinski obrađivati. Npr. tvrdi metal na bazi volfram karbida izrađuje se vezivanjem WC na temperaturama od 2500 °C te njegovim miješanjem s prahom Co i naknadnim kompaktiranjem i sinteriranjem na temperaturama od oko 1500 °C. [1]

Faze od kojih se sastoji mikrostruktura tvrdih metala su [8]:

- $\alpha$  faza: WC;
- $\beta$  faza: Co, rjeđe Ni ili Fe;
- $\gamma$  faza: TiC ili TaC – karbidi s kubnom kristalnom rešetkom.



**Slika 1. Mikrostruktura tvrdih metala [18]**

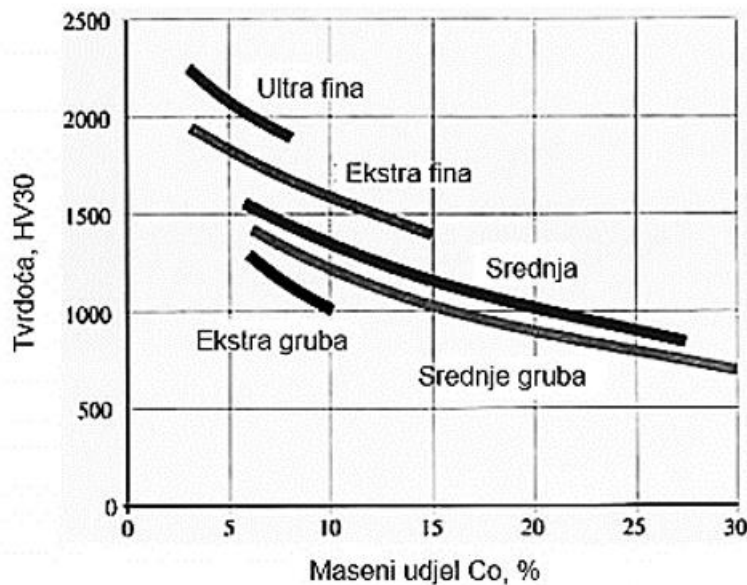
## **2.2 Mehanička svojstva tvrdih metala**

### **2.2.1 Tvrdoća i žilavost**

Vrijednosti tvrdoće tvrdih metala rastu snižavanjem udjela kobaltnog veziva kao i smanjenjem veličine WC zrna (slika 2). Raspon tvrdoća koji se može postići kod tvrdih metala variranjem sastava seže od 700 HV30 pa sve do 2200 HV30. Porastom temperature smanjuje se tvrdoća zbog povećane plastičnosti. Tvrdoća se obično ispituje Vickersovom metodom, ali ponekad se koristi i Rockwell A metoda.

Na tvrdoću značajno utječu parametri sinteriranja kao što su temperatura i vrijeme. Porastom temperature sinteriranja i duljim držanjem na toj temperaturi smanjuje se tvrdoća zbog rasta zrna. Kod nano- i ultra fino- strukturiranih tvrdih metala tvrdoću povećavaju gotovo uvijek prisutni inhibitori rasta zrna. Tvrdi metali imaju tvrdoću iznad 9 na Mohsovoj skali, skoro kao dijamant koji na toj skali ima najveću tvrdoću 10. [8]

Kao što prikazuje tablica 1 porastom udjela Co, mekanije i žilavije faze, smanjuje se modul elastičnosti, gustoća, tvrdoća i tlačna čvrstoća, ali raste žilavost i savojna čvrstoća.



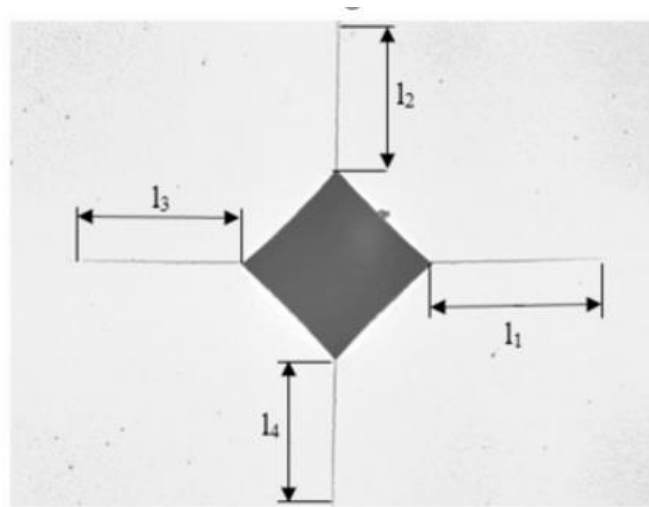
Slika 2. Utjecaj kobalta na tvrdoću za različite veličine WC zrna [3]

Tablica 1. Svojstva tvrdih metala u ovisnosti o sadržaju kobalta. [3]

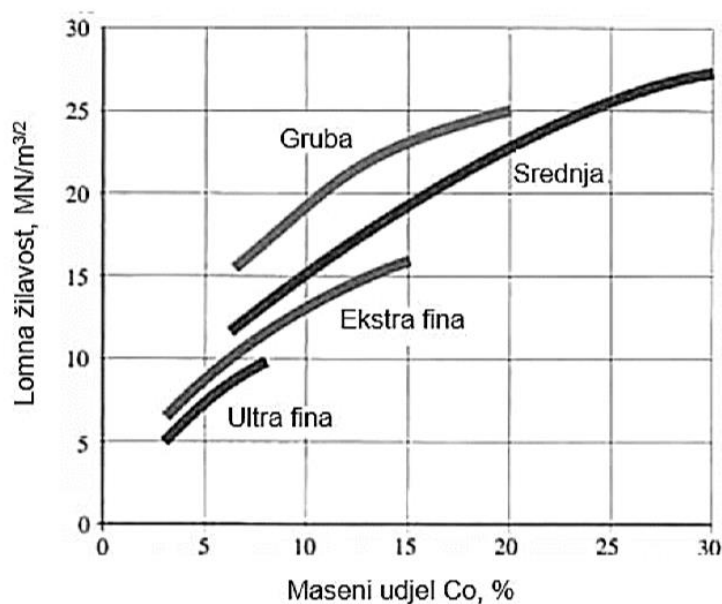
Sadržaj kobalta %	Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Tvrdoća HV	Savojna čvrstoća MPa	Tlačna čvrstoća MPa	Modul elastičnosti GPa
2,5	15,3	1780	1100	-	660
6,0	14,9	1550	1600	5300	620
9,0	14,6	1450	1850	4900	580
12,0	14,3	1300	2000	4400	570
15,0	13,9	1250	2200	4000	530
20,0	13,6	950	2400	3700	490
25,0	13,2	850	2500	3400	460



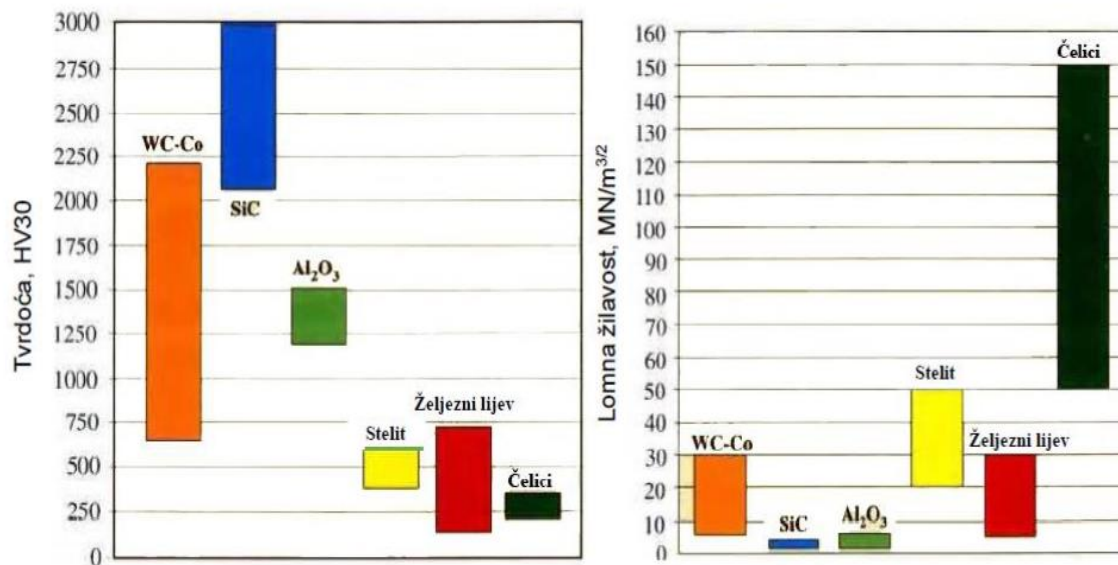
Lomna žilavost ( $K_{IC}$ ) jedan je od najvažnijih parametara za primjenu alata i procjenu dugotrajnosti tvrdih metala. Za razliku od udarnog rada loma, vrijednost lomne žilavosti puno je teže procijeniti, posebice kod krhkih materijala te se mjerenje lomne žilavosti uglavnom provodi indentacijskim metodama kao što je ona po Palmqvistu (slika 3). Metoda se temelji na mjerenju duljine pukotina koje se šire iz vrhova otiska indentacije. Iznosi lomne žilavosti tvrdih metala rastu povećanjem sadržaja Co i pogrubljenjem karbidnog zrna (slika 4). Vrijednosti lomne žilavosti obrnuto su proporcionalne tvrdoći materijala. Slika 5 prikazuje usporedbu tvrdoće i lomne žilavosti tvrdih metala s drugim materijalima. [3]



Slika 3. Metoda određivanja lomne žilavosti po Palmqvistu [3]



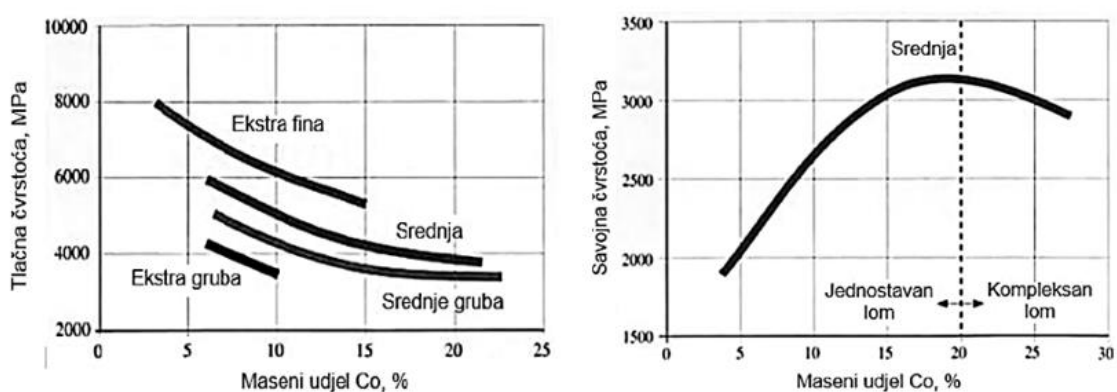
Slika 4. Ovisnost lomne žilavosti o udjelu Co i veličini WC zrna [3]



Slika 5. Usporedba tvrdoće i lomne žilavosti tvrdih metala s drugim materijalima [3]

## 2.2.2 Savojna i tlačna čvrstoća

Tvrđi metali imaju izrazito visoke vrijednosti tlačne čvrstoće ( $R_{mt}$ ) koja raste smanjenjem udjela veziva. Savojna čvrstoća ( $R_{ms}$ ) tvrdih metala je najveća kod sadržaja veziva između 15 i 20 % Co te se smanjuje porastom temperature. Slika 6 prikazuje ovisnost savojne i tlačne čvrstoće o sadržaju kobalta.



Slika 6. Tlačna i savojna čvrstoća u ovisnosti o sadržaju kobalta [3]

### 2.3 Vrste tvrdih metala

Tvrđi metali se dijele prema komponentama od kojih su napravljeni te se razlikuju dvije vrste: klasični i specijalni tvrdi metali. Klasični tvrdi metali se mogu podijeliti u skupine [8]:

- tvrdi metali na bazi WC-Co;
- tvrdi metali na bazi WC-TiC-Co;
- tvrdi metali na bazi WC-TiC-Ta(Nb)C-Co,

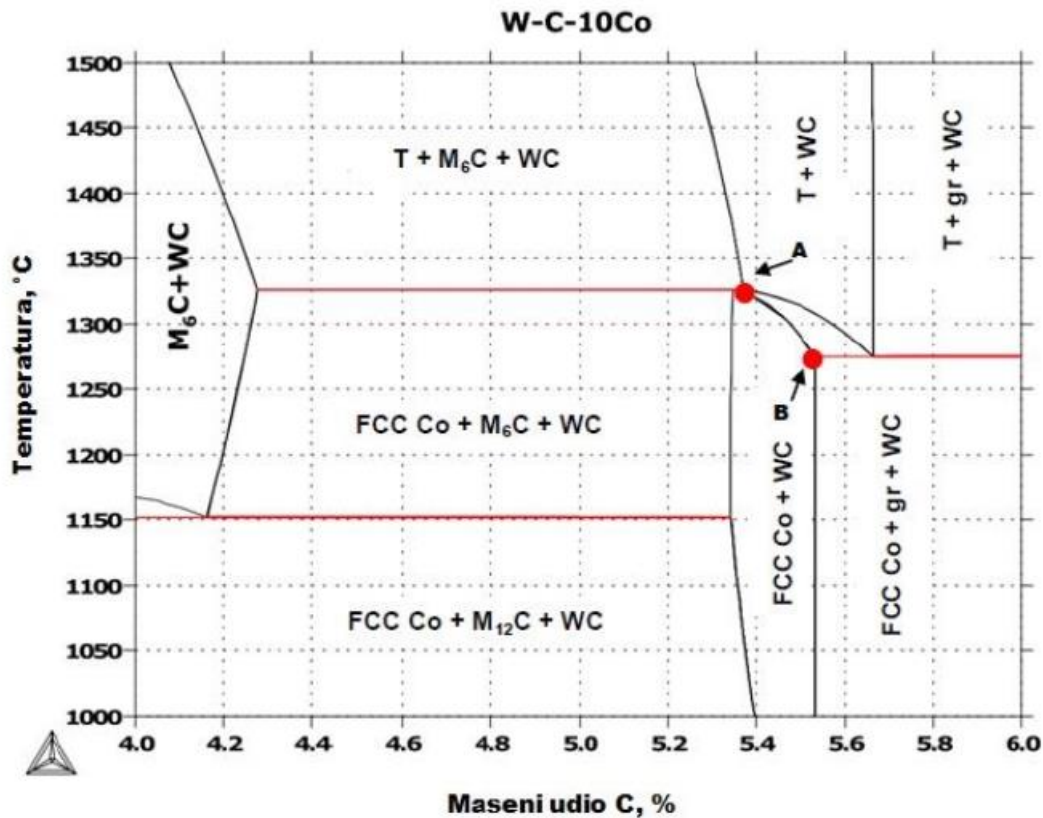
dok se specijalni tvrdi metali dijele u sljedeće skupine [8]:

- tvrdi metali na bazi WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni;
- tvrdi metali na bazi WC-TiC-Ni-Mo.

Specijalni tvrdi metali imaju izrazito visoku otpornost na koroziju te se iz tog razloga koriste u uvjetima gdje je potrebna odlična kemijska postojanost kao što je npr. industrija za preradu hrane. Kako izrazito veliki udio danas proizvedenih komercijalnih tvrdih metala pripada skupini klasičnih tvrdih metala na bazi WC – Co daljnja razmatranja odnosit će se na ovu skupinu metala. Prednost kobalta pred drugima materijalima je, prije svega, mogućnost oblikovanja prilikom procesa mljevenja i miješanja te veća topivost WC na temperaturama sinteriranja. [8]

### 2.4 WC–Co tvrdi metali

Svojstva WC-Co tvrdog metala proizlaze iz njegovih komponenata, tvrdog i krhkog WC i mekše i žilavije Co matrice. Upravo variranjem tih udjela mogu se „projektirati“ tražena svojstva gdje Co može varirati u rasponu od 3 do 30 %. Slika 7 prikazuje pseudobinarni dijagram za 10 % Co.



Slika 7. Dio pseudobinarnog WC-Co dijagrama stanja [8]

A i B su točke minimalnog i maksimalnog udjela ugljika koji će rezultirati nastankom dvofazne strukture koja se sastoji od Co s FCC kristalnom rešetkom i WC nakon skrućivanja. Područje između točaka A i B predstavlja područje sa zadovoljavajućim svojstvima i mikrostrukturom (WC jednoliko raspoređen u FCC Co matrici). Uvjet za postizanje takve mikrostrukture je stehiometrijski odnos WC (5,5% C). Ukoliko se postotak ugljika promijeni u odnosu na idealni, to može dovesti do nastanka grafitu ili pojave eta ( $\eta$ ) faze u obliku metalnih karbida  $M_{12}C$  i  $M_6C$ .  $M_{12}C$  karbid ima konstantan sastav ( $Co_6W_6C$ ) i nastaje prekrizacijom čvrste faze, dok  $M_6C$  karbid ima promjenjiv sastav od  $Co_{3,2}W_{2,8}C$  do  $Co_2W_4C$  koji je u ravnoteži sa rastaljenom fazom, a javlja se tijekom sinteriranja na visokim temperaturama.  $M_6C$  djeluje tako da zamjenjuje dio matrice i dio WC i tako mijenja mehanička svojstva (smanjuje žilavost i čvrstoću).  $M_{12}C$  također smanjuje žilavost, ali u manjoj mjeri nego  $M_6C$  karbid. Iz pseudobinarnog dijagrama proizlazi da udio ugljika značajno utječe na svojstva gotovog proizvoda te iz tog razloga mora se strogo kontrolirati tijekom postupka sinteriranja.[8]

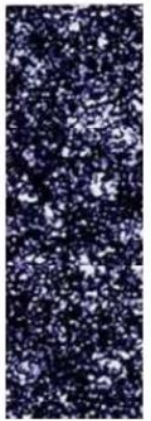


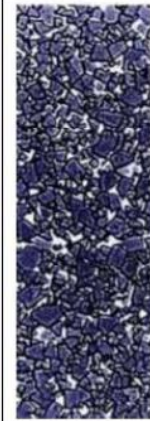



## 2.5 Primjena i podjela tvrdih metala

Tvrđi metali se zbog visoke tvrdoće te dobrih mehaničkih svojstava upotrebljavaju u različitim postupcima obrade metala, plastike, drva i kamena. Područje njihove primjene se neprestano širi zahvaljujući sve višim zahtjevima tržišta i cijelom nizu povoljnih svojstava poput visoke otpornosti na abraziju, visoke savojne i tlačne čvrstoće, visokog modula elastičnosti, otpornosti pri povišenim temperaturama i otpornosti na koroziju. Također, područje primjene sve se više širi razvojem i primjenom prahova sve manje veličine zrna, kao i napretkom tehnologije i postupaka konsolidacije. Ultra fini i nano prahovi koriste se za proizvodnju mikroalata, posebice mikrosvrđala (slika 11) za matične ploče u mini elektroničkoj opremi, kao što su pametni mobilni telefoni. Najveći udio tvrdih metala se danas koristi za izradu alata za odvajanje čestica (slika 9) te alata za obradu metala (slika 10) iz razloga visoke tvrdoće i visoke otpornosti na trošenje. [8]

Tvrde metale također možemo podijeliti prema veličini zrna karbidne faze kao što prikazuje slika 8.

Podjela tvrdih metala prema obrađivanom materijalu [3]:

- P – prikladni za obradu materijala s dugom strugotinom;
- M – prikladni za obradu korozijski postojanih čelika;
- K – prikladni za obradu materijala s kratkom strugotinom poput ljevova na bazi željeza, porculana, kamena, drva i polimernih materijala;
- N – prikladni za obradu keramike i legura aluminijske i magnezijске;
- S – prikladni za obradu superlegura, titana i njegovih legura;
- H – prikladni za obradu tvrdih materijala.

Vrsta i veličina zrna karbidne faze, $\mu\text{m}$						
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
						

Slika 8. Podijela tvrdih metala prema veličini zrna [3]



Slika 9. Glodala za izradu navoja



**Slika 10. Alati za obradu metala valjanjem [14]**



**Slika 11. Mikrosvrldo [19]**

### 3. Metalurgija praha

Metalurgija praha je tehnologija proizvodnje prahova i gotovih dijelova tako što se prethodno kompaktirani prah zagrijava na temperaturu tek nešto ispod temperature taljenja glavnog konstituenta. Temelji se na sjedinjavanju čestica praha jednog ili više metala odnosno nemetala kojim se proizvode čvrsti metalni i nemetalni proizvodi. Tehnologija proizvodnje prahova se neprestano širi i razvija te se proizvode nove i kvalitetnije vrste prahova koji omogućavaju proizvodnju većih i čvršćih materijala. Dakle, metalurgija praha je ekološki prihvatljiva grana moderne industrije kojom se proizvode komponente visoke kvalitete, gotovo konačnog oblika, ujednačenih svojstava bez gubitka materijala. Tijek procesa proizvodnje tvrdih metala odvija se kroz sljedeće faze:

- proizvodnja praha;
- miješanje ili mljevenje praha;
- oblikovanje praha;
- sinteriranje.

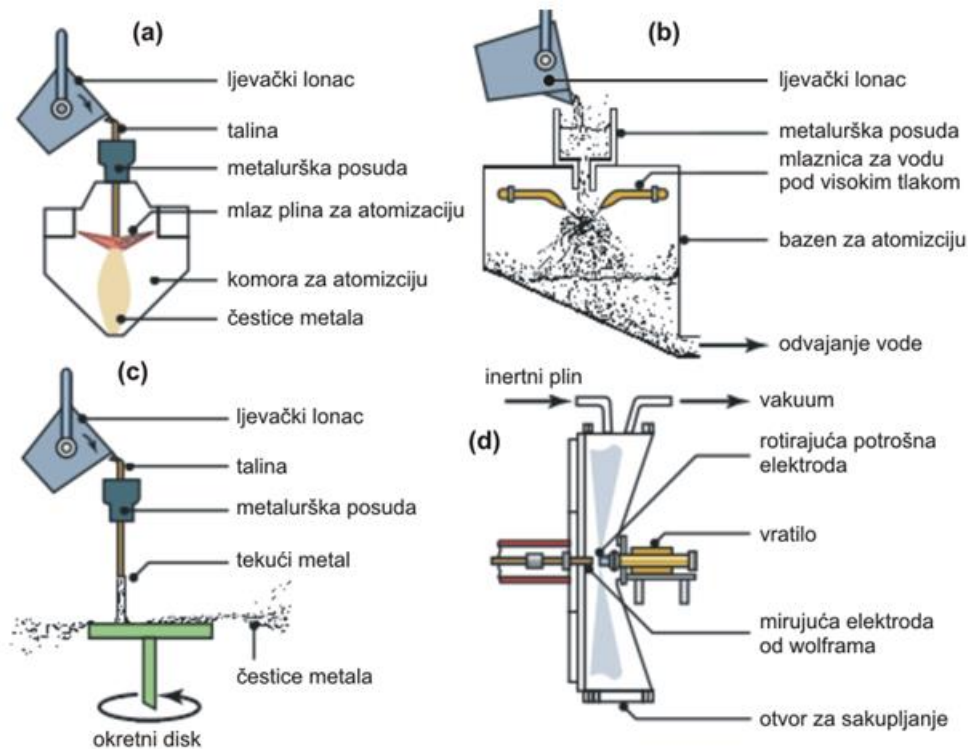
#### 3.1 Proizvodnja praha

Prahovi se mogu proizvesti iz tekućeg ili krutog stanja kemijskim, elektrolitičkim i mehaničkim postupcima te atomizacijom praha. Najčešći način proizvodnje praha je postupak fizikalne atomizacije gdje dolazi do raspršivanja rastaljenog metala u sitne kapi pod djelovanjem struje fluida. Postupci atomizacije mogu se podijeliti na sljedeće:

- plinska atomizacija (slika 12a);
- vodena atomizacija (slika 12b);
- centrifugalna atomizacija rotirajućim diskom (slika 12c);
- atomizacija rotirajućom elektrodom (slika 12d).

Svi oni uključuju taljenje, raspršivanje taline u sitne kapljice, njihovo skrućivanje i hlađenje. Na taj se način visoko čisti prahovi dobivaju izravno iz taline čime se znatno smanjuje cijena daljnje obrade prahova. Proizvodnja prahova najvažnija je osnova za cijelo područje metalurgije praha iz razloga što za dobivanje sinteriranih proizvoda željenih karakteristika presudan značaj ima upravo kvaliteta praha elementarnog metala ili legure.





Slika 12. Postupci atomizacije [15]

### 3.2 Miješanje i mljevenje praha

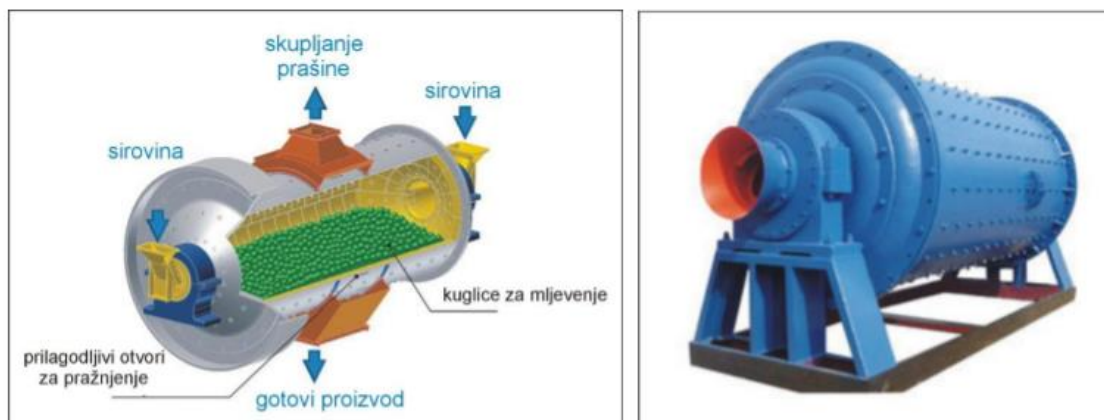
Miješanje je proces spajanja prahova koji nemaju isti kemijski sastav (elementarne mješavine metalnih prahova ili mješavine metala i nemetala), a može biti mokro i suho. Mješavinama se dodaju razni aditivi koje je također potrebno homogenizirati. Preduvjet nastanka homogene mikrostrukture je upravo stvaranje homogene mješavine. Slika 13 prikazuje miješalicu za metalne prahove.

Mljevenje s vremenom postaje sve bitniji postupak u metalurgiji praha iz razloga što su sve veći interesi za prahove male veličine zrna. Koristi se za promjenu veličine i oblika čestice nekog praha i promjenu fizikalnih i mehaničkih svojstava praškastog materijala. Najpoznatiji postupci mljevenja su valjanje, kuglično mljevenje i udarno mljevenje. Najčešći postupak mljevenja je

kuglično mljevenje koje se provodi u kugličnom mlinu koji rotira oko svoje osi i pritom je ispunjen prahom i kuglicama za mljevenje (slika 14). Tijekom mljevenja može doći do kontaminacije praha trošenjem kuglica pa je poželjno da su materijali kuglice i praha isti. Sukladno navedenom, najčešći materijali kuglica za mljevenje su: keramika, tvrdi metal, alatni i nehrđajući čelici.



Slika 13. Miješalica za metalne prahove [15]



Slika 14. Kuglični mlin [15]

### 3.3 Oblikovanje praha

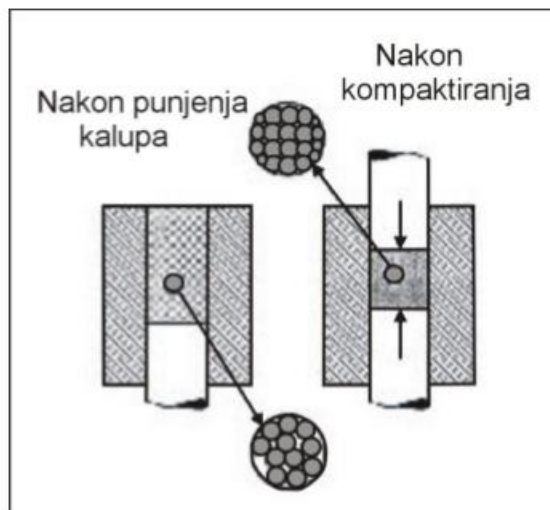
Oblikovanje ili kompaktiranje praha je postupak povezivanja čestica praha u željeni oblik čija čvrstoća je dovoljna za daljnje rukovanje (slika 15). Proces se izvodi u kalupima primjenom visokog pritiska te dolazi do deformacije čestica praha i smanjenja poroznosti. Razlikuje se prema temperaturi (toplo i hladno), smjeru pritiska (jednoosno, dvoosno, izostatičko), postizivoj gustoći otpreska (konvencionalni postupci, postupci za teorijske gustoće). Koji će se postupak oblikovanja odabrati ovisi o vrsti praha, geometriji, veličini proizvoda, zahtjevima koji se postavljaju te o broju komada i troškovima procesa.

Postupci oblikovanja su [3]:

- hladno prešanje;
- hladno izostatičko prešanje;
- ekstrudiranje;
- valjanje;
- injekcijsko prešanje;
- kovanje praha;
- vruće prešanje;
- vruće izostatičko prešanje.

Osnovni ciljevi oblikovanja praha su [3]:

- konsolidacija praha u željeni oblik;
- postizanje određenih konačnih dimenzija;
- postizanje određenog stupnja i vrste poroziteta;
- postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za daljnje rukovanje.



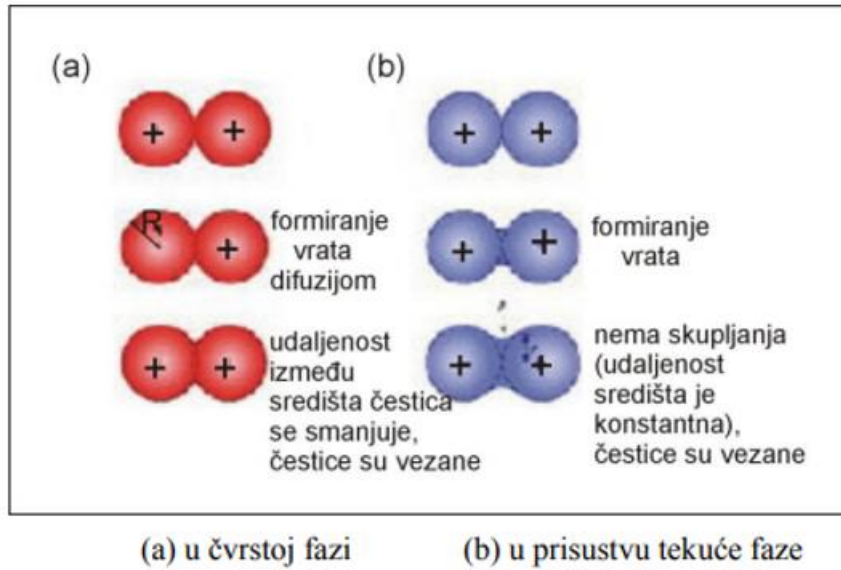
**Slika 15. Promjena rasporeda čestica i oblika prilikom oblikovanja [3]**

### 3.4 Sinteriranje

Sinteriranje je proces metalurgije praha koji se provodi zagrijavanjem kompaktiranog komada na temperaturu koja je niža od tališta glavnog konstituenta s ciljem povećanja čvrstoće i tvrdoće kroz spajanje čestica praha. Pri tome dolazi do transformacije mehaničkih veza u mnogo čvršće metalne veze. Obično se provodi pri temperaturama između 70 i 90 % temperature taljenja glavnog konstituenta, a budući da sinteriranje vrlo često izaziva rast zrna koji je nepoželjan, proces mora biti što kraći jer zrna najbrže rastu tijekom prvih nekoliko minuta. Postoji sinteriranje u čvrstom stanju i sinteriranje u rastaljenoj fazi (slika 16).

Sinteriranje u čvrstom stanju sastoji se od tri faze. U polaznom stanju na mjestu dodira čestica nastaje vrat koji ih povezuje, ali pore su i dalje otvorene i velike. Rastom dodirne površine između zrna smanjuju se pore. Difuzijom atoma na dodirnim površinama nastaju granice zrna (očvršnuće), pore se zatvaraju i postiže maksimalna gustoća. [3]

Sinteriranje u rastaljenoj fazi je puno češći i zastupljeniji postupak sinteriranja. Zbog jače difuzije u rastaljenoj fazi veća je brzina zgušnjavanja te bez korištenja vanjskog pritiska dolazi do potpunog zgušnjavanja. [3]



**Slika 16. Mehanizam sinteriranja [16]**

Proces sinteriranja ovisi o sljedećim parametrima [16]:

- temperatura i vrijeme – što je viša temperatura sinteriranja, kraće je vrijeme sinteriranja potrebno za postizanje željenog stupnja povezanosti čestica praha;
- geometrijska struktura čestica praha – u određenim uvjetima sinteriranja prahovi koji se sastoje od finih čestica ili čestica s visokom unutarnjom poroznošću sinteriraju se brže od prahova s velikim česticama;
- sastav smjese praha – komponente smjesa prahova odabiru se s ciljem postizanja željenih fizikalnih svojstava;
- gustoća kompakta – što je veća gustoća kompakta, veća je ukupna dodirna površina između čestica praha, te je efektivnije vezivanje kao i proces legiranja tijekom sinteriranja;
- sastav zaštitne atmosfere u peći za sinteriranje – zaštitna atmosfera štiti materijal koji se sinterira od oksidacije i smanjuje mogućnost pojave zaostalih oksida, također sprečava nepoželjne procese poput pougljičenja i razugljičenja materijala.

### 3.5 Primjena metalurgije praha

Neki od razloga primjene postupaka metalurgije praha jesu sljedeći [3]:

- Oblikovanje metala visokog tališta (kao što su npr. W, Mo, Ta) koje je vrlo teško ljevati, a često su i krhki u lijevanom stanju (slika 17);
- Proizvodnja kompozitnih materijala koji se sastoje od dva ili više metala koji su međusobno netopivi u čvrstom ili tekućem stanju ili mješavine metala s nemetalnim materijalima (kao što su npr. oksidi ili vatrootporni materijali);
- Proizvodnja konstrukcijskih dijelova s jednakim ili čak boljim mehaničkim svojstvima od dijelova jednakog kemijskog sastava dobivenih valjanjem ili kovanjem. Najveći dio ovih dijelova dobiva se iz željeznog praha, ali značajne količine se proizvode također iz prahova bronce, bakra, mjedi i aluminija.
- Oblikovanje poroznih materijala kontroliranog stupnja poroznosti koji služe za neku specifičnu namjenu (npr. filteri, prigušivači buke, samopodmazujući ležajevi);
- Proizvodnja dijelova gotovog oblika bez potrebe za naknadnom mehaničkom obradom;
- Postizanje jednolične sitnozrnate mikrostrukture koja rezultira boljom otpornošću na trošenje i duljim vijekom trajanja;
- Proizvodnja dijelova poboljšanih magnetskih svojstava.



Slika 17. Primjena metalurgije praha [17]

Metalurgija praha se primjenjuje kada se zahtijevaju otpornost na trošenje, čvrstoća, rad na visokim temperaturama koje premašuju mogućnosti lijevanih legura. Pruža veću preciznost uz eliminaciju većine ili svih naknadnih strojnih obrada potrebnih kod odljevaka. Isto tako, primjenom metalurgije praha izbjegavaju se različiti defekti koji nastaju kod lijevanja. Tablica 2 prikazuje obilježja metalurgije praha u odnosu na druge tehnologije.

**Tablica 2. Specifičnosti metalurgije praha prema drugim proizvodnim postupcima [3]**

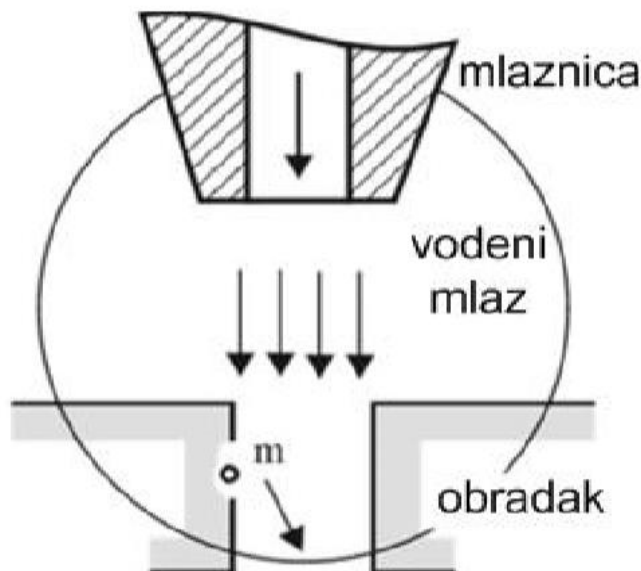
Postupak	Prednosti pred PM	Ograničenja u usporedbi s PM
Lijevanje	Širok raspon oblika i veličina proizvoda, niska cijena kalupa i samog postupka	Priličan gubitak materijala u procesu; potreba za završnom obradom; nije primjenjivo za legure visokog tališta
Kovanje (toplo)	Visoka produktivnost širokog raspona veličina i oblika dijelova; odlična mehanička svojstva reguliranjem rasta zrna	Potreba za završnom obradom; priličan gubitak materijala u procesu; trošenje kalupa; relativno loša obrada površine i otežana kontrola dimenzija
Ekstruzija (topla)	Visoka produktivnost za dugačke dijelove	Mogućnost proizvodnje dijelova ujednačenog poprečnog presjeka; trošenje kalupa; loša kontrola dimenzija
Strojna obrada	Širok raspon oblika i veličina dijelova; fleksibilnost postupka; dobra kontrola dimenzija i površinska obrada	Gubitak materijala u obliku strugotine; relativno niska produktivnost

## 4. Obrada vodenim i abrazivnim mlazom

Opažanje snage vode dovelo je do razmišljanja o vodi kao mogućem mediju za obradu. Čovjek oduvijek iskorištava vodu za dobivanje energije (mehaničke, kemijske, toplinske). Vodeni mlaz je svestrano oruđe koje se danas upotrebljava pri raznim tehnološkim operacijama kao što su rezanje, bušenje, odstranjivanje boje, fragmentacija i dr. Postupak obrade materijala vodenim mlazom lako se primjenjuje s ili bez dodatka abraziva, ovisno o materijalu koji se obrađuje. Neprestana želja za razvojem tehnologije, svestranost postupka i ekološka prihvatljivost, neki su od razloga zbog kojih navedena metoda ima sve veću primjenu.

### 4.1 Vodeni mlaz

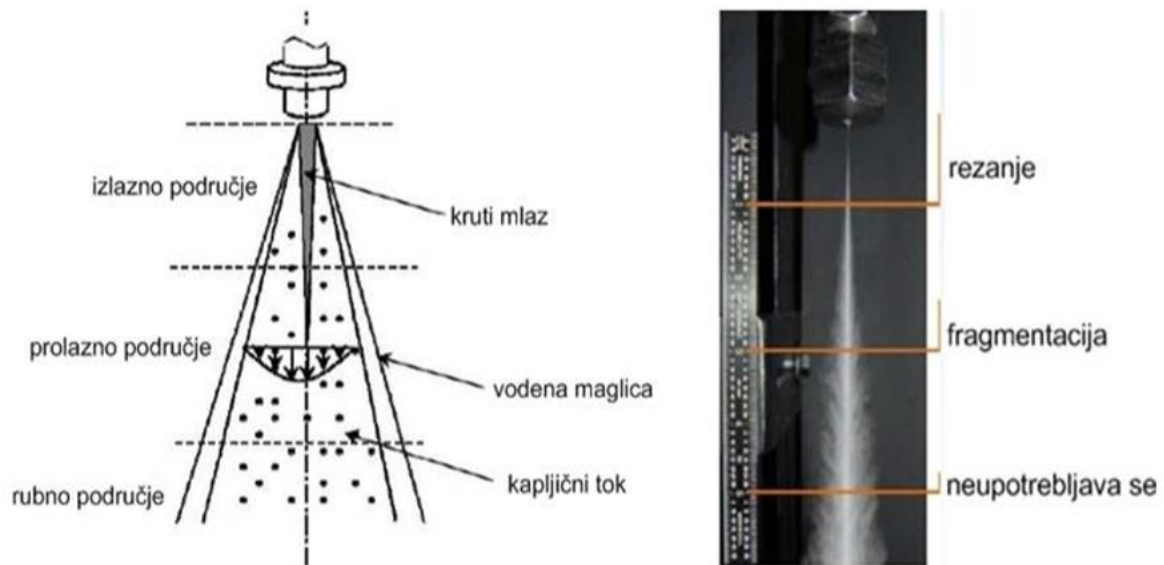
Postupak obrade materijala vodenim mlazom spada među mehaničke postupke obrade. Visokotlačni vodeni mlaz udara o površinu obradka, pri čemu inicira i povećava pukotine u materijalu istovremeno odnašajući otpadni materijal (slika 18). Voda pod visokim tlakom (2000 – 4000 bar) se preko visokotlačne cijevi dovodi do rezne glave u kojoj se nalazi mlaznica s malim promjerom otvora (0,1 mm do 0,4 mm). Pri istjecanju vode iz mlaznice formira se uzak mlaz vode velike brzine (do 1000 m/s). Materijal za izradu mlaznice može biti tvrdi metal, dijamant ili različiti kristalni oblici aluminijevog oksida poput safira ili rubina. [13]



Slika 18. Obrada vodenim mlazom [13]



Što se tiče strukture (slika 19), vodeni mlaz se dijeli na izlazno područje gdje ima krutu srž koja se upotrebljava za rezanje te prolazno područje gdje nastaje vodena maglica. Kada vodeni mlaz prijeđe rubno područje njegov oblik prelazi u kapljični tok, gubi snagu i više nije upotrebljiv u tehnološkom procesu. Vodenim mlazom bez dodataka abrazivnih sredstava mogu se rezati razni organski i anorganski materijali, a najčešće se koristi kod rezanja mekših materijala kao što su papir, tekstil, koža, guma. [13]



Slika 19. Struktura vodenog mlaza [13]

#### 4.2 Abrazivni vodeni mlaz

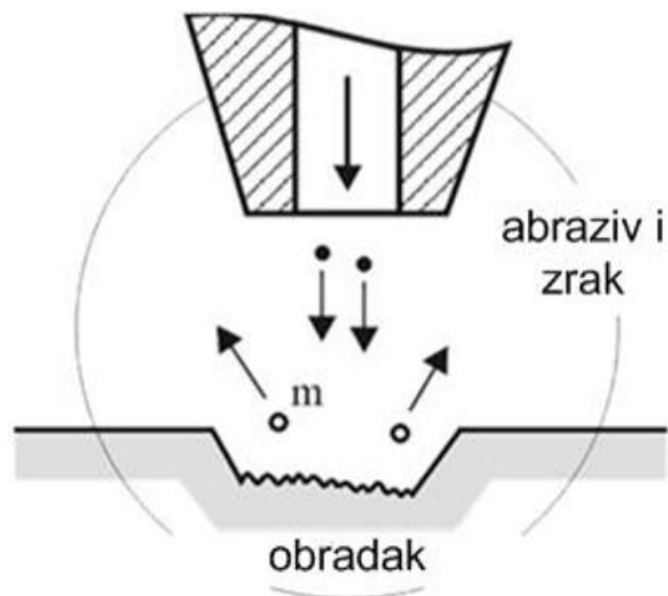
Mlaz je sastavljen od vode, abraziva i zraka, koji na površini obratka radi točnu i usku liniju (slika 20). Spada među mehaničke postupke obrade, pri kojem čestice abraziva velikom brzinom napuštaju mlaznicu u reznoj glavi i udaraju o obradak. Zbog svoje tvrdoće i brzine na obratku izazivaju pukotine, a voda još dodatno širi pukotine i odnosi materijal. Postoje dvije vrste dobivanja abrazivnog vodenog mlaza:

- suspenzijski abrazivni vodeni mlaz (slika 21);
- injekcijski abrazivni vodeni mlaz (slika 22).

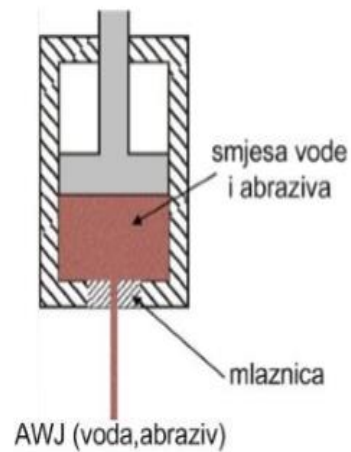
Suspenzijski abrazivni vodeni mlaz je mlaz koji nastaje kada se kroz mlaznicu istiskuje već pripremljena smjesa vode i abraziva dok se kod injekcijskog vodenog mlaza voda pod visokim

pritiskom u Venturijevoj cijevi miješa s abrazivom. Mješavina vode i abrazivnih čestica izlazi iz cijevi za miješanje kao koherentni mlaz koji je sposoban vršiti obradu.

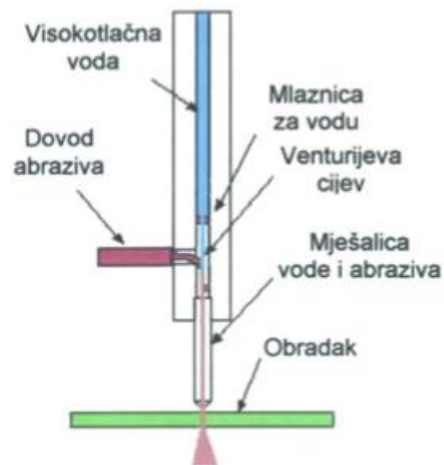
Obrada vodenim mlazom najvećim dijelom uzrokuje erozijsko trošenje obrađivanog materijala. Količina odnošenog materijala pri obradi abrazivnim vodenim mlazom ovisi o brzini abrazivnog zrna, kutu upada zrna na materijal, tvrdoći abrazivnog zrna, tvrdoći obrađivanog materijala i obliku abrazivnog zrna. Rezanje materijala vodenim mlazom s dodatkom abraziva koristi se za rezanje materijala kao što su: staklo, keramika, kamen i kompozitni materijali. [13]



Slika 20. Obrada abrazivnim vodenim mlazom [13]



Slika 21. Suspenzijski vodeni mlaz [13]



Slika 22. Injekcijski vodeni mlaz [13]

#### 4.3 Prednosti i nedostaci obrade vodenim mlazom

Prednosti obrade vodenim mlazom [13]:

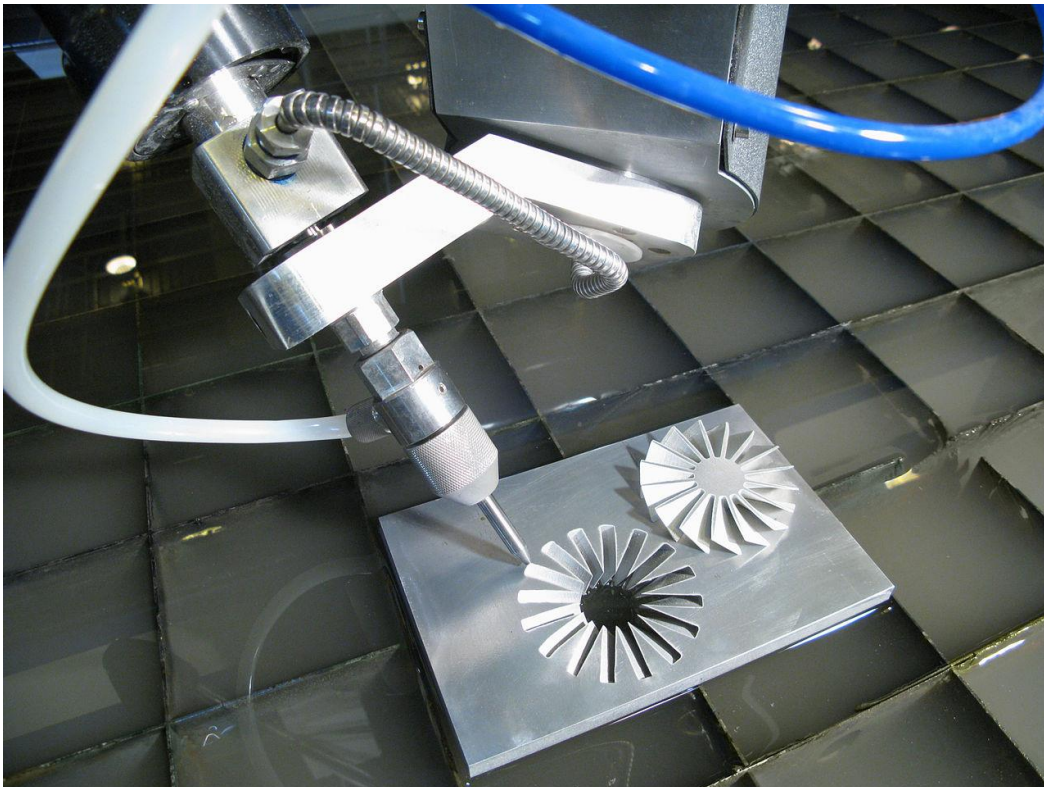
- nema zagrijavanja materijala u zoni obrade;
- kratko vrijeme pripreme stroja;
- jednostavna automatizacija postupka;
- ekološki prihvatljiv postupak;
- jedan alat koristi se za rezanje materijala različitog sastava i debljine;
- nije potreban početni provrt za obradu;
- moguće je izraditi gotovo sve 2D oblike.

Nedostatci obrade vodenim mlazom [13]:

- materijali skloni koroziji moraju se nakon rezanja zaštititi od korozije;
- postoje ograničenja u obradi 3D oblika;
- obrada vrlo tvrdih materijala je vrlo teška ili gotovo nemoguća;
- kod brzog rezanja unutarnjih kutova mogu nastati urezi u materijalu;
- velika buka koja se razvija prilikom obrade (do 100 db).

#### 4.4 Primjena u praksi

Postoji vrlo široko područje primjene vodenog i abrazivnog vodenog mlaza, a neki primjeri primjene su prikazani u tablici 3. Slika 23 prikazuje rezanje metala vodenim mlazom.



Slika 23. Primjer rezanja vodenim mlazom [20]

**Tablica 3. Područja primjene vodenog i abrazivnog vodenog mlaza [20]**

<b>Primjena vodenog mlaza</b>	<b>Područje primjene</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezanje plastike</li> <li>• Rezanje papira i celuloze</li> <li>• Rezanje vlakana i tekstila</li> <li>• Rezanje gume i kože</li> <li>• Rezanje hrane</li> <li>• Rezanje drveta</li> <li>• Rezanje krutog goriva i leda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plastična industrija</li> <li>• Industrija papira</li> <li>• Tekstil i odjeća</li> <li>• Šumarstvo</li> <li>• Prehrambena industrija</li> <li>• Industrija gume</li> </ul>
<b>Primjena abrazivnog vodenog mlaza</b>	<b>Područje primjene</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezanje titanija, aluminijske, čelika visoke čvrstoće i dr. metalnih legura</li> <li>• Rezanje stakla</li> <li>• Rezanje kompozitnih materijala, keramike</li> <li>• Rezanje betona i građevinskog materijala</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zrakoplovstvo</li> <li>• Automobilska industrija</li> <li>• Brodogradnja</li> <li>• Elektronička industrija</li> <li>• Građevinska industrija</li> </ul>

## 5. Erozijsko trošenje

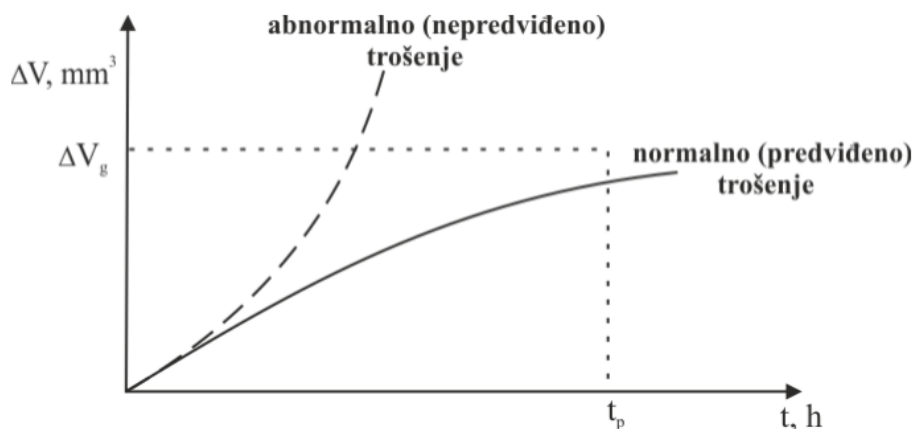
Trošenje se općenito može definirati kao progresivni gubitak materijala uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom ili česticama. Osnovni mehanizmi trošenja su [4]:

- abrazija;
- adhezija;
- umor površine;
- tribokorozija.

Svaki proces trošenja sastoji se od dva ili više osnovnih mehanizama. Prema vrsti tribosustava, vrsti dodira, načinu opterećenja i obliku relativnog gibanja razlikujemo sljedeće slučajeve trošenja [4]:

- erozija česticama;
- erozija kapljevnom;
- abrazija;
- klizno trošenje;
- kotrljajuće trošenje;
- udarno trošenje;
- izjedanje;
- kavitacija.

Cilj tribologije je, određenim tribološkim mjerama, postići da sustav prilikom svoje eksploatacije funkcionira u režimu normalnog trošenja (slika 24).



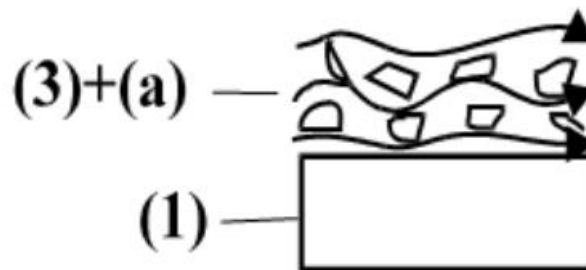
Slika 24. Opći oblik procesa trošenja [4]

## 5.1 Erozijska česticama

Erozijsko trošenje može se definirati kao skidanje materijala s čvrste površine uslijed mehaničke interakcije same površine i udarajućih čestica. U pravilu je neželjan i štetan oblik trošenja, ali se može primijeniti i kao metoda za obradu (pjeskarenje).

Na slici 25 prikazan je karakterističan tribosustav prilikom erozijskog trošenja s osnovnim dijelovima:

- funkcionalni dio (1);
- fluid (3);
- čestice (a).

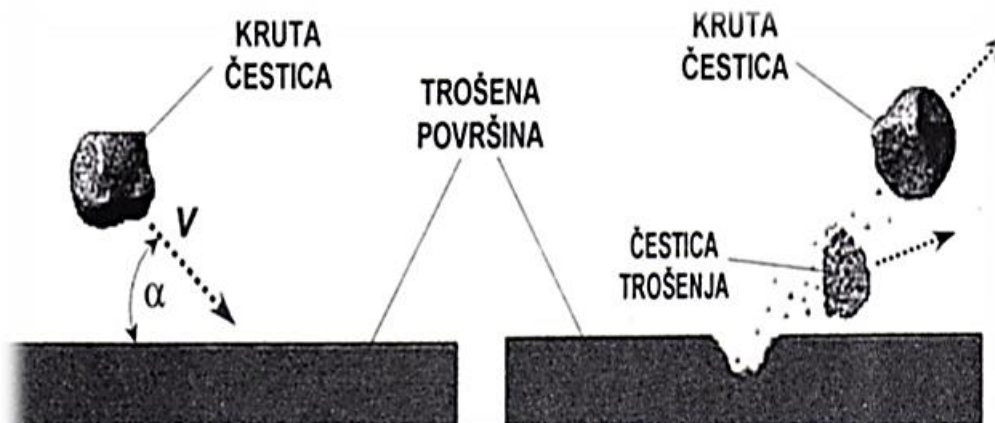


Slika 25. Tribosustav erozije česticama [4]

Najznačajniji mehanizmi koji se javljaju kod erozije česticama su abrazija i umor površine te se njihov učinak opisuje na razini jediničnog sudara čestice s trošenom površinom, prikazanog na slici 26.

Dvije faze jediničnog sudara [4]:

- „Upad“ krute čestice određenom brzinom gibanja i pod određenim kutom, te njezin trenutni sudar s trošenom površinom materijala;
- Odbijanje krute čestice od trošene površine uz prateće razaranje površine otkidanjem djelića materijala u obliku čestice trošenja.



**Slika 26. Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom [4]**

Erozija kod koje je strujanje pod malim kutom u odnosu na površinu naziva se abrazivna erozija, a kad čestice udaraju o površinu gotovo okomito to je udarna erozija.

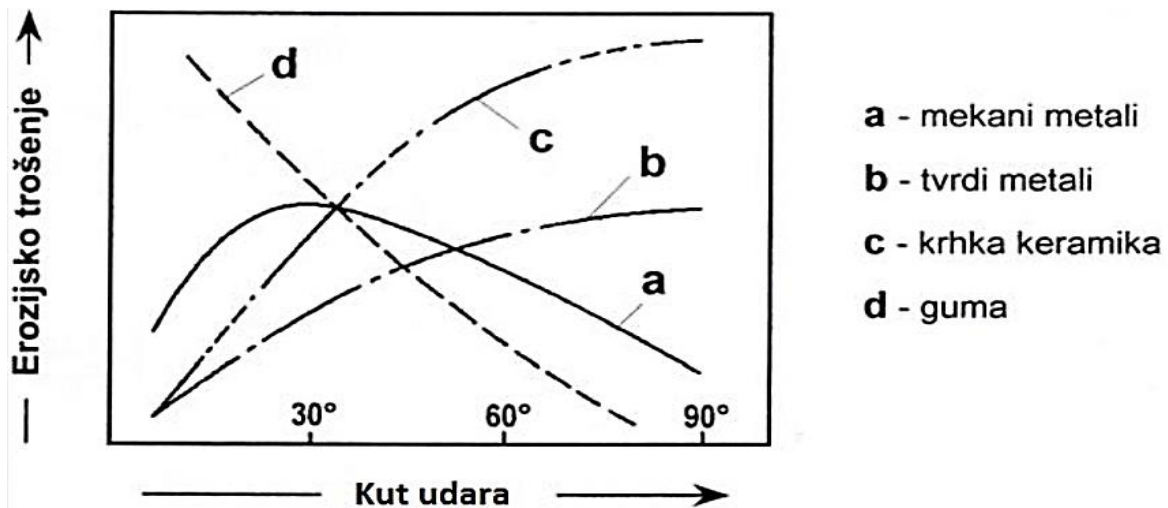
Karakteristični primjeri erozije česticama su: pumpe za mulj, pjeskarilice, cjevovodi za transport zrnate ili praškaste robe. [4]

## 5.2 Parametri koji utječu na erozijsko trošenje

Erozijsko trošenje u velikoj mjeri ovisi o kutu upada čestice na osnovni materijal. Ti kutovi mogu uključivati vrijednosti od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  u odnosu na ravninu ispitivane površine. Pri manjim kutovima upada čestica, dominantan mehanizam trošenja materijala s površine je izbijanje zrna iz površinskog sloja te plastična deformacija. S povećanjem kuta upada čestica prema  $90^\circ$ , dominantan mehanizam postaje samo izbijanje zrna erodirane površine, bez utroška kinetičke energije na plastičnu deformaciju [5].

Na slici 27 prikazano je erozijsko trošenje nekih materijala u odnosu na kut udara čestica. Kod duktilnijih materijala kao što je npr. guma, erozijsko trošenje je veće što je manji kut udara čestica dok kod materijala poput tvrdih metala i keramike proces erozijskog trošenja je najveći prilikom kuta udara od  $90^\circ$ .





Slika 27. Utjecaj kuta udara na erozijsko trošenje krutim česticama [4]

Gubitak materijala izazvan erozijom ( $E_g$ ) može se prikazati kao [10]:

$$E_g = k \cdot v^n, \quad (1)$$

gdje je :

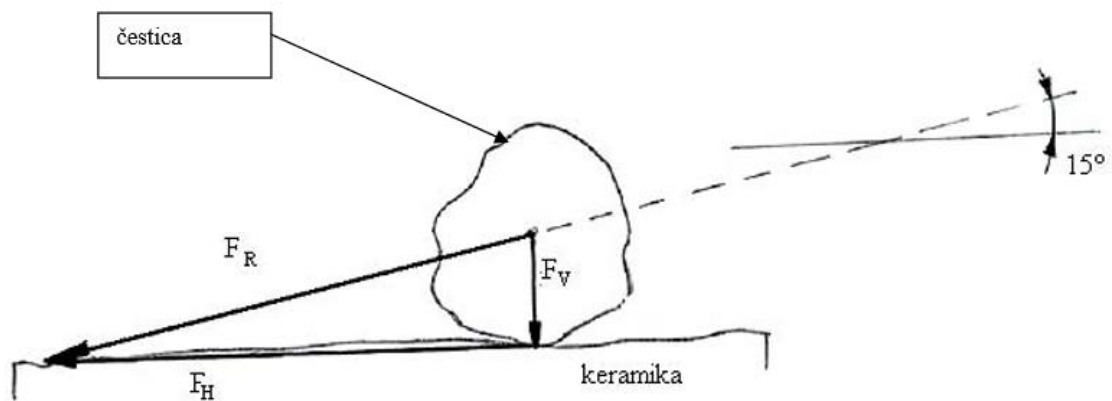
$k$  – konstanta;

$v$  – brzina čestica [m/s];

$n$  – eksponent brzine (za metale je najčešće u rasponu od 2 do 2,5 dok je za keramiku od 2,5 do 3).

Kad su kutevi upada manji, kinetička energija čestica uglavnom izaziva efekt brazdanja površine (abrazivna erozija), dok tek vrlo mali dio te energije djeluje u smjeru normale na dotičnu površinu, izazivajući tek slabija ponavljajuća udarna opterećenja. Jedine vidljive pukotine nastale abrazivnom erozijom su one na samim vrhovima brazdi.

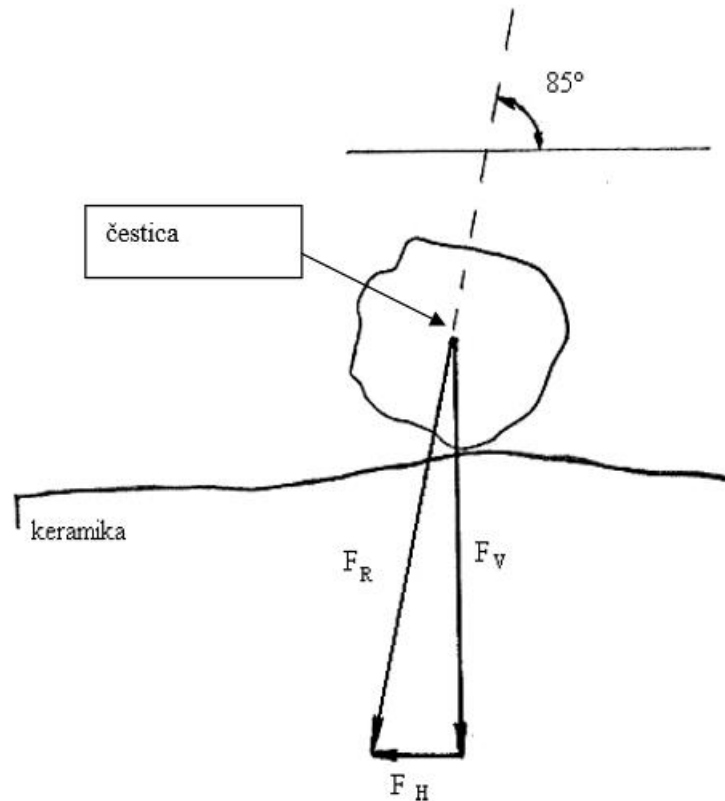
Na slici 28 je vidljivo kako dominantna horizontalna komponenta sile ( $F_H$ ) uzrokuje struganje čestice površinom (abraziju), dok je za nastanak pukotina odgovorna mnogo manja vertikalna komponenta sile ( $F_V$ ).



**Slika 28. Poligon sila u slučaju abrazivne erozije [10]**

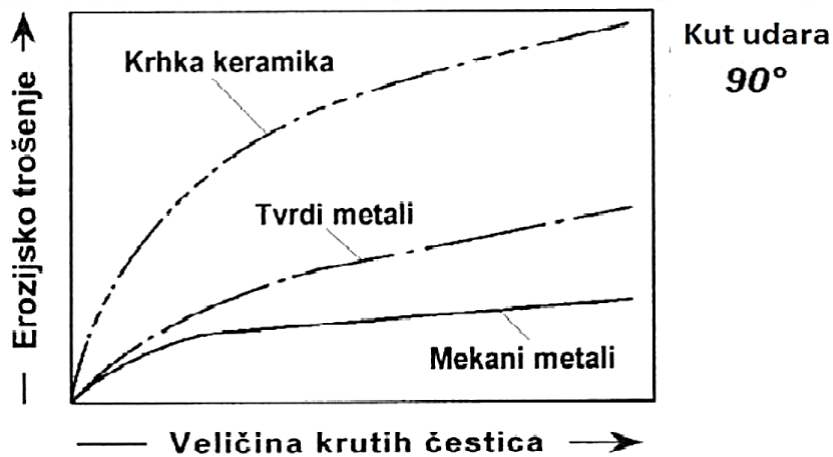
Mnogo je izraženiji gubitak materijala erozijom česticama pri većim kutevima upada (udarna erozija). Čestice koje o površinu materijala udaraju okomito, ili gotovo pod pravim kutom, prenose površini svu kinetičku energiju u vidu udarnih opterećenja.

Slika 29 pokazuje kako je za nastanak pukotina u površinskim slojevima zaslužna dominantna vertikalna komponenta sile ( $F_V$ ).

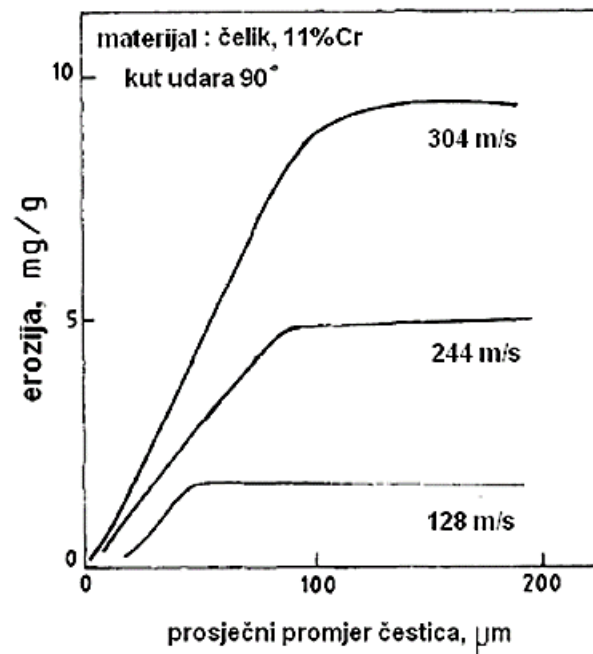


Slika 29. Poligon sila u slučaju udarne erozije [10]

Izrazito veliki utjecaj na proces erozijskog trošenja također ima i veličina čestica koje udaraju u osnovni materijal. Slika 30 prikazuje utjecaj veličine čestice na proces erozijskog trošenja te se vidi da kod svakog materijala proces trošenja raste povećanjem veličine čestica što se može objasniti većom udarnom energijom koja se prenosi na trošenu površinu u trenutku udara. Međutim, neka istraživanja su pokazala da povećanje erozije s veličinom čestica vrijedi za neke materijale samo do određene vrijednosti (50 do 100  $\mu\text{m}$ ), nakon koje brzina erozije prestaje biti ovisna o veličini čestice (slika 31).

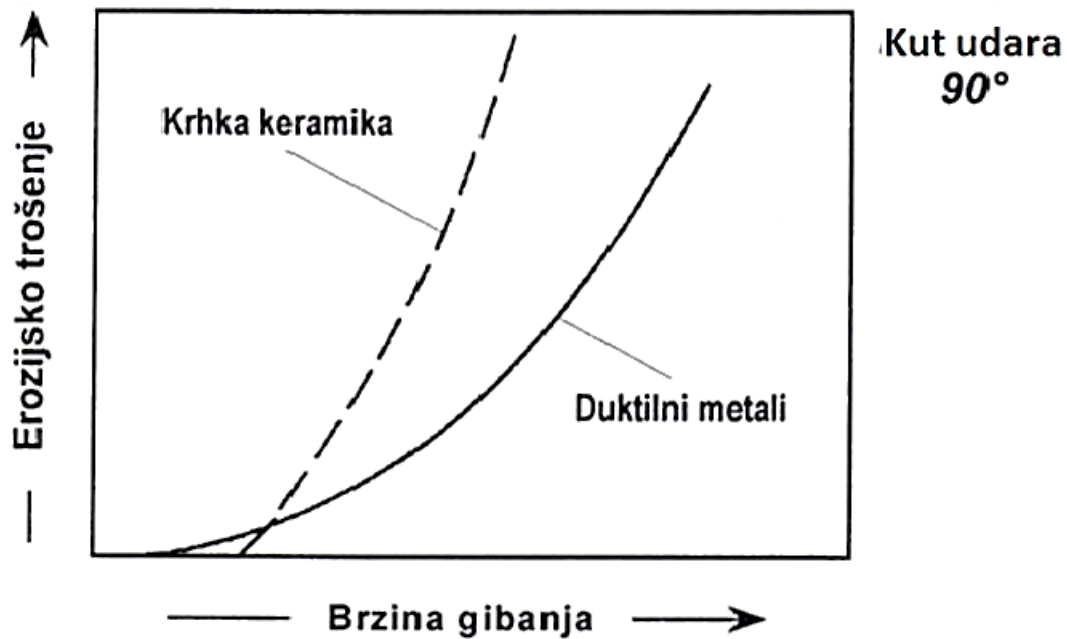


Slika 30. Utjecaj veličine krutih čestica na erozijsko trošenje[4]



Slika 31. Ovisnost brzine erozije o veličini čestica [4]

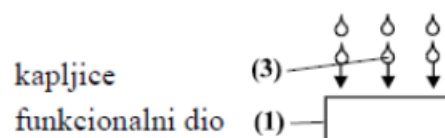
Erozijsko trošenje značajno ovisi i o svojstvima trošene površine jer je za početak erozijskog trošenja tvrdih i krhkih materijala potreban niži minimum udarne energije nego kod duktilnih materijala. Udarne energija određena je brzinom gibanja krutih čestica. Slika 32 prikazuje utjecaj brzine gibanja na erozijsko trošenje krutim česticama pri kutu udara čestica od  $90^\circ$ .



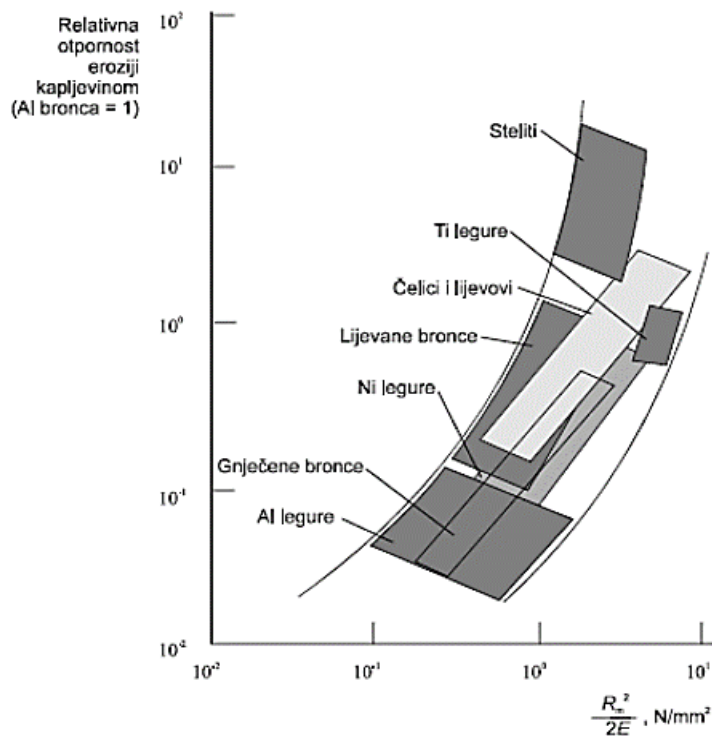
Slika 32. Utjecaj brzine gibanja na erozijsko trošenje krutim česticama [4]

### 5.3 Erozijska kapljevina

Erozijska kapljevina je trošenje izazvano strujanjem kapljevine ili plina s kapljicama. U usporedbi s erozijom česticama razlikuje se u nedostatku krute faze te je zbog toga isključen abrazijski mehanizam trošenja, a ostaje umor površine kao najopasniji oblik trošenja. On postaje problem tek kod brzine sudara iznad 100 m/s. Također, ukoliko se radi o agresivnom mediju prijeti opasnost i od intenzivne tribokorozijske. Shema procesa erozije kapljicama prikazana je na slici 33. Mjera za izbjegavanje erozije kapljicama je izbor materijala dovoljne dinamičke izdržljivosti. Slika 34 prikazuje usporedbu materijala prema otpornosti na eroziju kapljevina. [4]



Slika 33. Shema procesa erozije kapljevina [4]



Slika 34. Relativna otpornost nekih materijala na eroziju kapljevnom [4]

#### 5.4 Zaštitne prevlake

Oksidni keramički slojevi zbog specifičnih svojstava nude niz potencijalnih prednosti za industrijsku uporabu. Keramički materijali u usporedbi s metalima općenito imaju bolju otpornost na koroziju, oksidaciju i trošenje. Većina tih materijala podnosi više temperature procesa te su većinom dobri toplinski i električni izolatori. Najčešće primjenjivani oksidno-keramički materijali slojeva i glavna područja njihove primjene prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Vrste keramičko oksidnih slojeva [1]

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Zaštita od trošenja, električna izolacija
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$	Zaštita od trošenja
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$	Zaštita od trošenja, električna izolacija
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Zaštita od trošenja, zaštita od korozije
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$	Zaštita od trošenja, niski faktor trenja
$\text{TiO}_2$	Umjerena zaštita od trošenja, niska električna vodljivost
$\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$	Zaštita od trošenja i korozije, toplinska postojanost
$\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$	Toplinska izolacija, otpornost na visoke temperature, otpornost na eroziju
$\text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$	Otpornost na visokotemperaturnu koroziju urokovanu vrućim plinovima, otpornost na promjene temperature, toplinska izolacija
$\text{ZrO}_2 - \text{MgO}$	Toplinska izolacija, otpornost na abraziju

Također sklonost erozijskom trošenju smanjuje se dodatkom TiC ili TaC iz razloga što su ti karbidi prevučeni otpornim oksidima. Oksidi nastaju mljevenjem osnovne sirovine i mogu se naknadno vrlo teško reducirati u struji vodika. Svi sustavi tvrdih metala imaju svoje prednosti i nedostatke, tako da su danas razvijeni višekomponentni tvrdi metali WC-TiC-TaC-Co. Titanov karbid povisuje čvrstoću na povišenim temperaturama, tvrdoću i otpornost na oksidaciju, ali zbog loše prionjivosti s kobaltom smanjuje unutarnju čvrstoću vezivanja. Tantalov karbid povisuje žilavost i čvrstoću bridova alata nasuprot titanovom karbidu. Udio kobalta se kreće od 5 do 17%. Bolja eksploatacijska svojstva poput povećanja otpornosti na trošenje, trajnosti i istovremeno bolje žilavosti, postižu se nanošenjem tankih slojeva TiC, TiN, TiCN. [1]

TiCN prevlaka je poznata po boljoj otpornosti prema oksidaciji i tvrdoći pri visokim temperaturama od TiC prevlake, a također i po puno boljoj mehaničkoj otpornosti i toplinskoj stabilnosti u odnosu na TiN prevlaku. Sive je boje te tvrdoće oko 3200 HV 0,01. Ono po čemu

je stvarno prepoznatljiva je to da kada je prevučena preko druge prevlake, kao što je TiN prevlaka, ima nizak faktor trenja u kontaktu s čelikom te visok koeficijent toplinske vodljivosti [12].

TiBN tvrde prevlake imaju veoma dobra svojstva kao što su visoka tvrdoća, dobra stabilnost pri povišenim i visokim temperaturama, odlična otpornost prema koroziji [16]. Tvrdoća prevlake iznosi oko 4000 HV 0,05. TiBN prevlaka je višeslojna koja se sastoji od TiN, TiB i TiB<sub>2</sub> kristala. Kombinacijom TiN slojeva koji imaju nizak koeficijent trenja i nanokompozitnih TiBN slojeva dolazi do porasta tvrdoće i vlačnih naprezanja, a dobivaju se i nova strukturna i funkcionalna svojstva.



## 6. Laboratorijske metode ispitivanja erozije

Postoji mnogo metoda i načina ispitivanja otpornosti na eroziju česticama. Na slici 35 prikazani su neki od najraširenijih oblika ispitivanja.

Shema s cjevastim uzorcima (slika 35a) simulira proces erozije strujanjem zraka s pepelom u kotlu. Ovakva konstrukcija je pogodna samo za istraživanje erozije u kotlovskim cijevima.

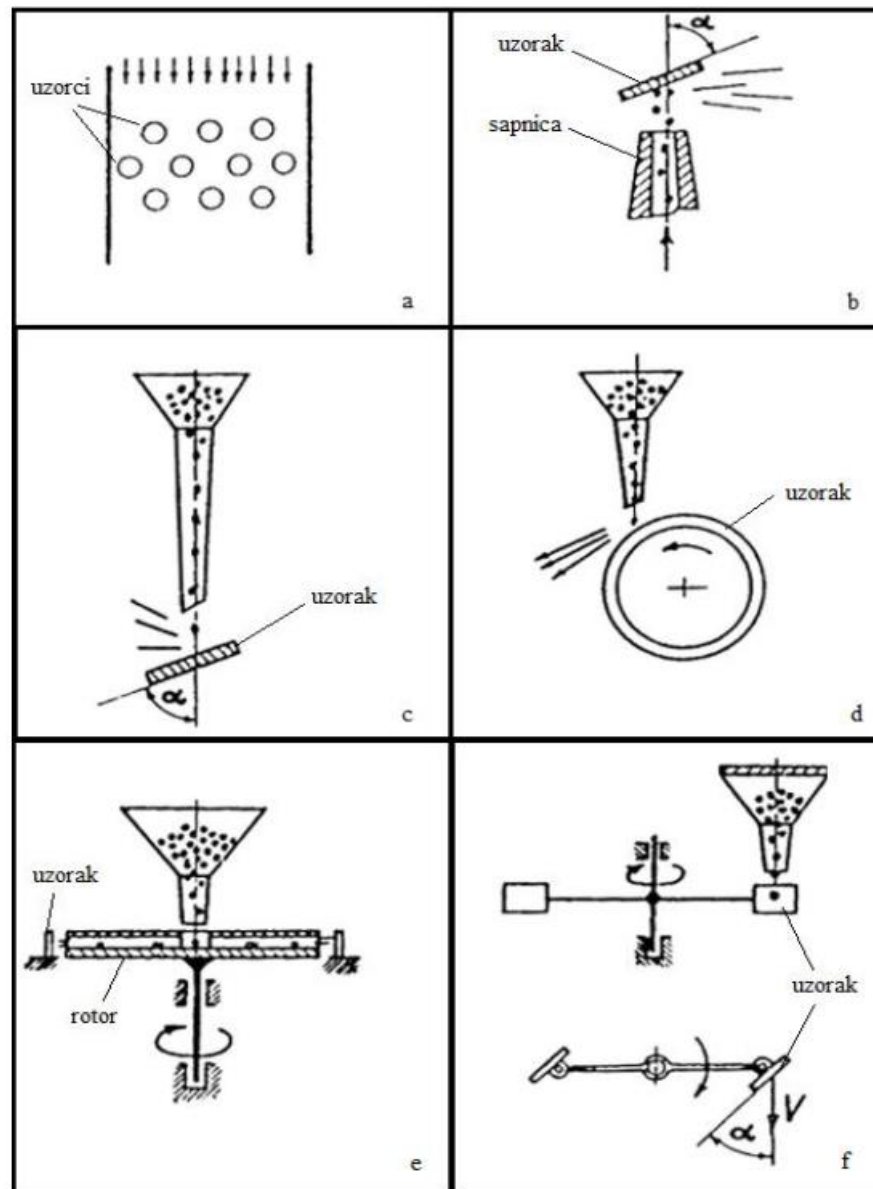
Jedna od najpoznatijih i najraširenijih oprema za ispitivanje otpornosti materijala na trošenje erozijom je prikazana na slici 35b. Omogućuje ispitivanje uzoraka jedan po jedan bombardirajući ih erozivnim česticama koje se nalaze u struji plina. Brzina čestica odgovara brzini strujanja plina.

Konstrukcija prikazana na slici 35c bazirana je na slobodnom padu čestica i omogućuje samo ograničenu udarnu brzinu čestice (oko 10 m/s) pa se zato prvenstveno koristi za ispitivanje erozije prevlaka.

Kod konstrukcije prikazane na slici 35d, uzorci koji se ispituju rotiraju se oko horizontalne osi. Ova oprema ima veliku manu što se tiče brzine čestica i kuta udara čestica koji su međusobno ovisni. Takva konstrukcija uređaja ne dopušta korištenje većih kutova udara.

Slika 35e prikazuje konstrukciju centrifugalnog akceleratora gdje čestice prolaze kroz radijalne otvore rotora nasuprot ispitnim uzorcima koji mogu biti pod bilo kojim kutom ispitivanja. Najveća prednost ovog uređaja je mogućnost istovremenog ispitivanja nekoliko uzoraka i standardno ispitivanje uzoraka u istim uvjetima. Na taj način omogućuje se dobivanje relativne otpornosti prema eroziji različitih materijala u kratkom vremenu.

Slika 35f prikazuje ispitivanje erozije suhim pijeskom gdje pijesak curi iz mlaznice pod određenim kutom i uzrokuje erozijsko trošenje uzorka. [6]

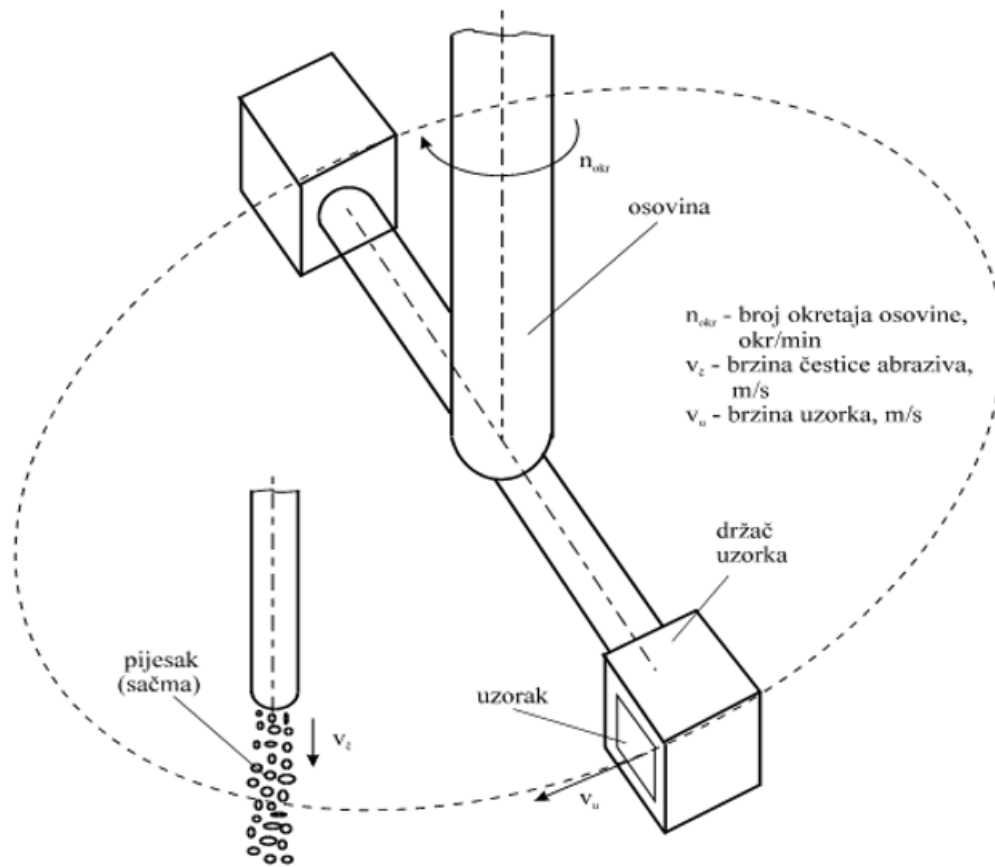


Slika 35. Sheme opreme za ispitivanje materijala erozijom [6]

### 6.1 Ispitivanje erozije suhim pijeskom

Ispitivanje se odvija na uređaju čija je shema prikazana na slici 36. Postupak započinje stavljanjem ispitnih uzoraka u držače uzoraka koji se nalaze na osovini koja se vrti konstantnim brojem okretaja. Uređaj ima mogućnost istovremenog ispitivanja dva uzorka pri jednakim ili različitim uvjetima tj. kutovima trošenja. Stavljanjem uređaja u pogon, pijesak počinje curiti iz sapnice te kroz ovaj mlaz prolaze uzorci pod zadanim kutom. Vaganjem uzorka prije i poslije

ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Za svaki novi ispitivani kut mlazu se izlaže neerodirana površina uzorka.



Slika 36. Shema ispitivanja otpornosti na eroziju česticama [11]

## 7. Eksperimentalni dio rada

Postupak ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje proveden je na uređaju koji je prikazan slikom 37, smještenom u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivani materijali podvrgnuti su trošenju strujanjem mlaza krutih čestica pri različitim kutovima upada erodenta. Rezultati ispitivanja prikazani su kao relativni gubici mase u vremenskom periodu od 60 minuta s naznakom praćenja ispitivanja svakih 15 minuta.



**Slika 37. Uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje**

Osnovni dijelovi uređaja za ispitivanje:

- spremnik erodenta i dovodna cijev;
- zaštitni bubanj sa sustavom za odvod erodenta;
- elektromotor s prekidačem;

- sustav za podizanje i spuštavanje bubnja;
- spremnik za odlaganje korištenog erodenta;
- držač uzoraka.

Prilikom postupka ispitivanja uzorci su pričvršćeni u držačima za uzorke koji rotiraju kako bi se osigurala dovoljna brzina udara čestica, s time da istovremeno mogu biti ispitana dva uzorka pod istim ili različitim kutom. Osim broja okretaja elektromotora i brzine vrtnje uzoraka bitni su i parametri: trajanje ispitivanja (60 minuta) te kut udara erodenta. Za potrebe ovog rada kut udara je varirao između  $15^\circ$  i  $90^\circ$  u rasponu od po  $15^\circ$ .

Brzina vrtnje uzoraka,  $v_u$ , određena je prema sljedećoj formuli:

$$v_u = \frac{D \cdot \pi \cdot n_{okr}}{60} = 24,27 \text{ m/s} , \quad (2)$$

gdje je:

D - promjer na kojem su pričvršćeni uzorci, mm (D = 322 mm);

$n_{okr}$  - broj okretaja osovine, okr/min ( $n_{okr} = 1440$  okr/min).

Prije početka ispitivanja potrebno je očistiti površinu uzorka iz razloga što svaka nečistoća koja se nalazi na uzorku može utjecati na rezultate ispitivanja. Čišćenje je provedeno pomoću digitalnog ultrazvučnog čistača koji je prikazan na slici 38. Prilikom postupka ultrazvučnog čišćenja uzorak u potpunosti mora biti prekriven vodom. Postupak čišćenja temelji se na kavitaciji tj. procesu brzog nastanka plinskih mjehurića pod utjecajem ultrazvučnih valova koji prolaze kroz tekućinu u ultrazvučnom čistaču. Kavitacija se javlja zbog promjena u visokom i niskom tlaku valova uzrokovanih ultrazvučnim pretvaračima. Nakon završetka čišćenja uzorci se vade i suše na zraku.



**Slika 38. Ultrazvučna kupka za čišćenje uzoraka**

Nakon provedenog čišćenja, uzorke je potrebno izvagati kako bi se dobila početna masa te kako bi se mogao pratiti relativni gubitak mase prilikom ispitivanja. Vaganje je provedeno na preciznoj vagi rezolucije 0,001g (slika 39) koja je smještena u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Početne mase uzoraka iznosile su:

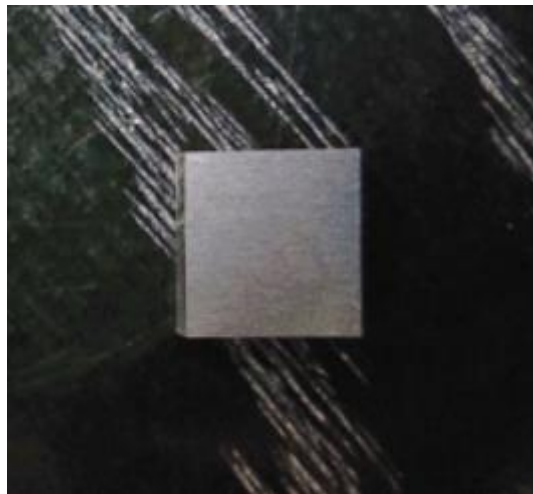
- 10,7062 g (WC-10Co);
- 10,2936 g (WC-15Co).



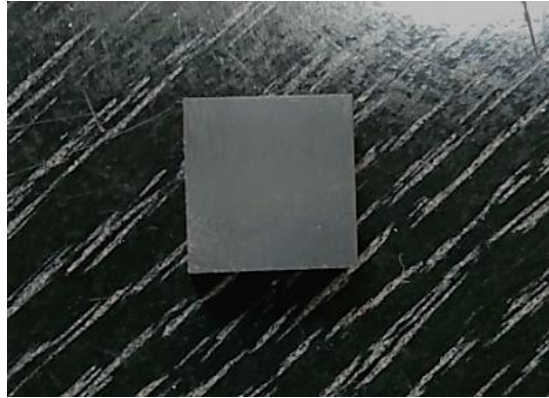
**Slika 39. Laboratorijska vaga**

Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja ima mogućnost istovremenog ispitivanja dva uzorka koji mogu, ali i ne moraju biti pod istim kutom. Prije početka ispitivanja potrebno je odabrati odgovarajući kut udara erodenta u uzorak te pričvrstiti uzorak za držače. U ovom slučaju potrebno je koristiti gumene obloge za uzorke kako uzorci prilikom ispitivanja nebi ispali iz držača iz razloga što su isti nešto manjih dimenzija od predviđenih. Nakon što su podešeni parametri ispitivanja podiže se zaštitni bubanj sa sustavom za odvod erodenta te se stavlja odgovarajući erodent u spremnik. Tijekom ispitivanja bitno je ostvariti kontinuirani protok erodenta kroz mlaznicu.

Ispitivanju erozijskog trošenja podvrgnuta su dva uzorka nanostrukturiranih tvrdih metala sustava WC – Co sadržaja kobalta 10 % i 15 % (slika 40 i slika 41). Uzorak s 10 % Co označen je kao WC-10Co, dok onaj s 15 % Co nosi oznaku WC-15Co.



**Slika 40. Uzorak WC-10Co**



**Slika 41. Uzorak WC-15Co**

Svaki od uzoraka ispitan je pod kutovima upada erodenta koji su redom iznosili 15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°. Trajanje ispitivanja pod svakim kutom iznosilo je 60 minuta, pri čemu je nakon svakih 15 minuta uređaj zaustavljen kako bi se uzorak izvagao nakon provedenog ultrazvučnog čišćenja. Za potrebe ispitivanja korištena su dva erodenta:

- kvarcni pijesak ( $\text{SiO}_2$ ) (slika 42);
- čelična sačma (eng. *steel balls*) (slika 43).

Zbog velikog broja ispitivanja oba erodenta su se upotrebljavala više puta što također donekle može utjecati na rezultate ispitivanja iz razloga onečišćavanja erodenta. Sačma je veće granulacije od kvarcnog pijeska. Promjer kuglice sačme iznosi 0,7 mm dok granulacija kvarcnog pijeska iznosi 0,1 mm. Tijekom ispitivanja vodilo se računa da posuda za skupljanje erodenta bude stalno zatvorena kako ne bi došlo do nakupljanja vlage što bi otežalo protok erodenta kroz mlaznicu.





**Slika 42. Kvarcni pijesak ( $\text{SiO}_2$ )**

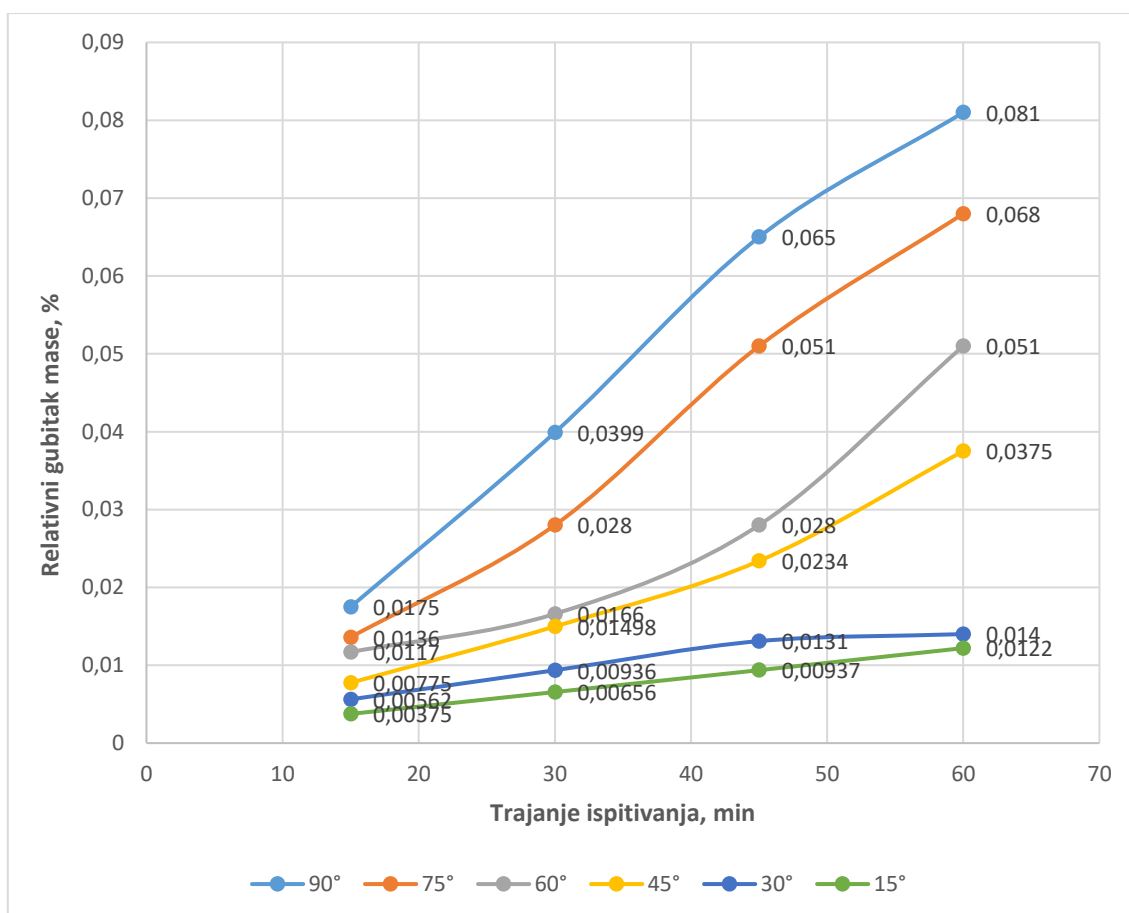


**Slika 43. Sačma**

## 7.1 Rezultati

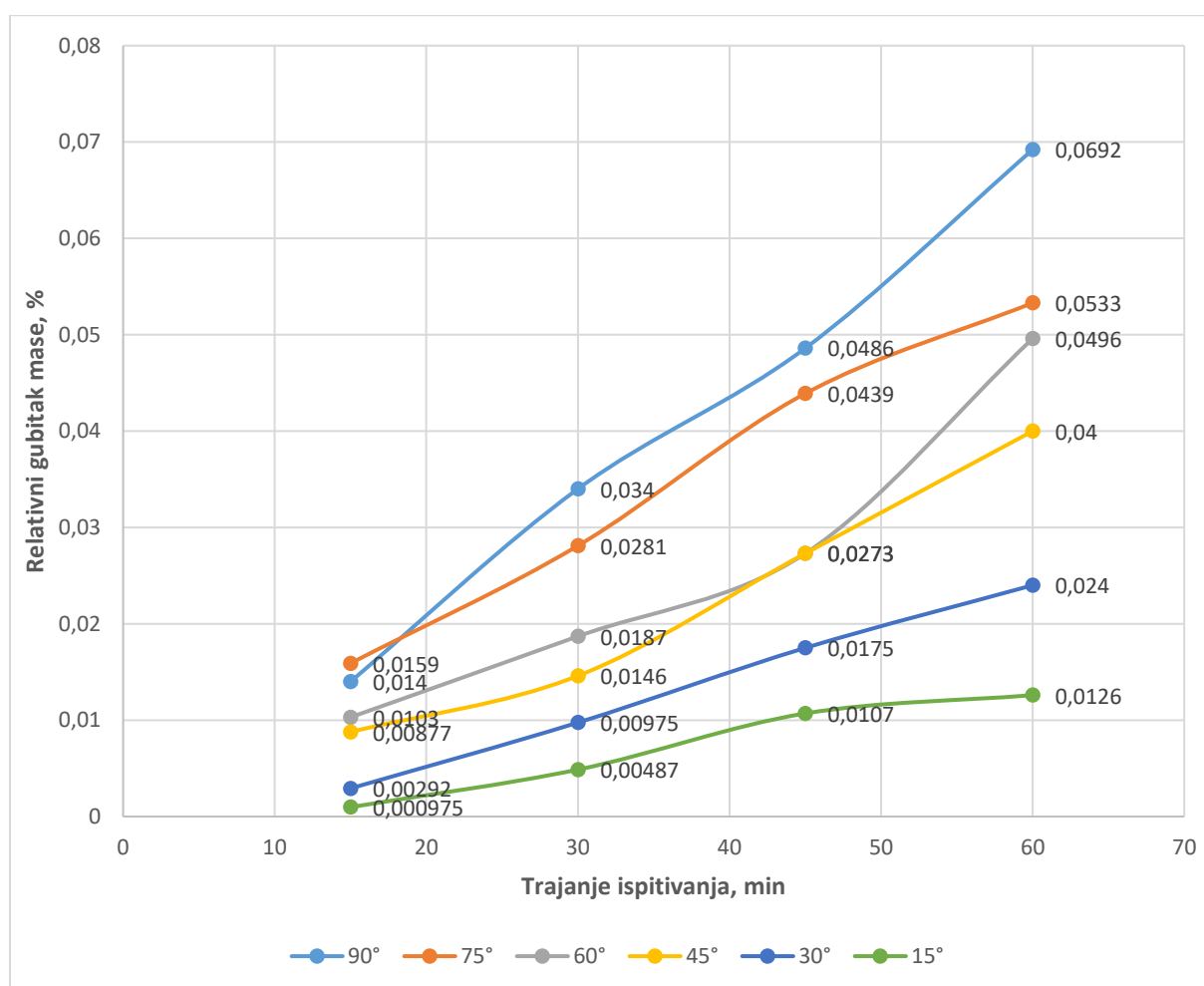
### 7.1.1 Relativni gubitak mase u ovisnosti o kutu udara erodenta

Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta  $\text{SiO}_2$  u ovisnosti o kutu udara prikazuje slika 44. Iz rezultata je vidljivo kako je najveći relativni gubitak mase tvrdog metala (WC-10Co) kod kuta od  $90^\circ$ . Smanjenjem kuta udara erodenta dolazi i do smanjenja relativnog gubitka mase. Razlog tomu je različitost mehanizma odnošenja materijala kod krhkih i duktilnih materijala te će krhki materijali imati veće relativne gubitke mase kod velikih kuteva udara, a duktilni će materijali veći relativni gubitak mase pokazivati kod manjih kutova udara erodenta. Kod većih kutova udara erodenta dominantna je vertikalna komponenta sile koja puno štetnije djeluje na tvrdi i krhki WC od horizontalne komponente sile koja je u tim slučajevima značajno manja. Smanjenjem kuta udara dominantna vertikalna komponenta ima sve manji utjecaj na trošenje, a horizontalna komponenta sile preuzima sve veću ulogu.



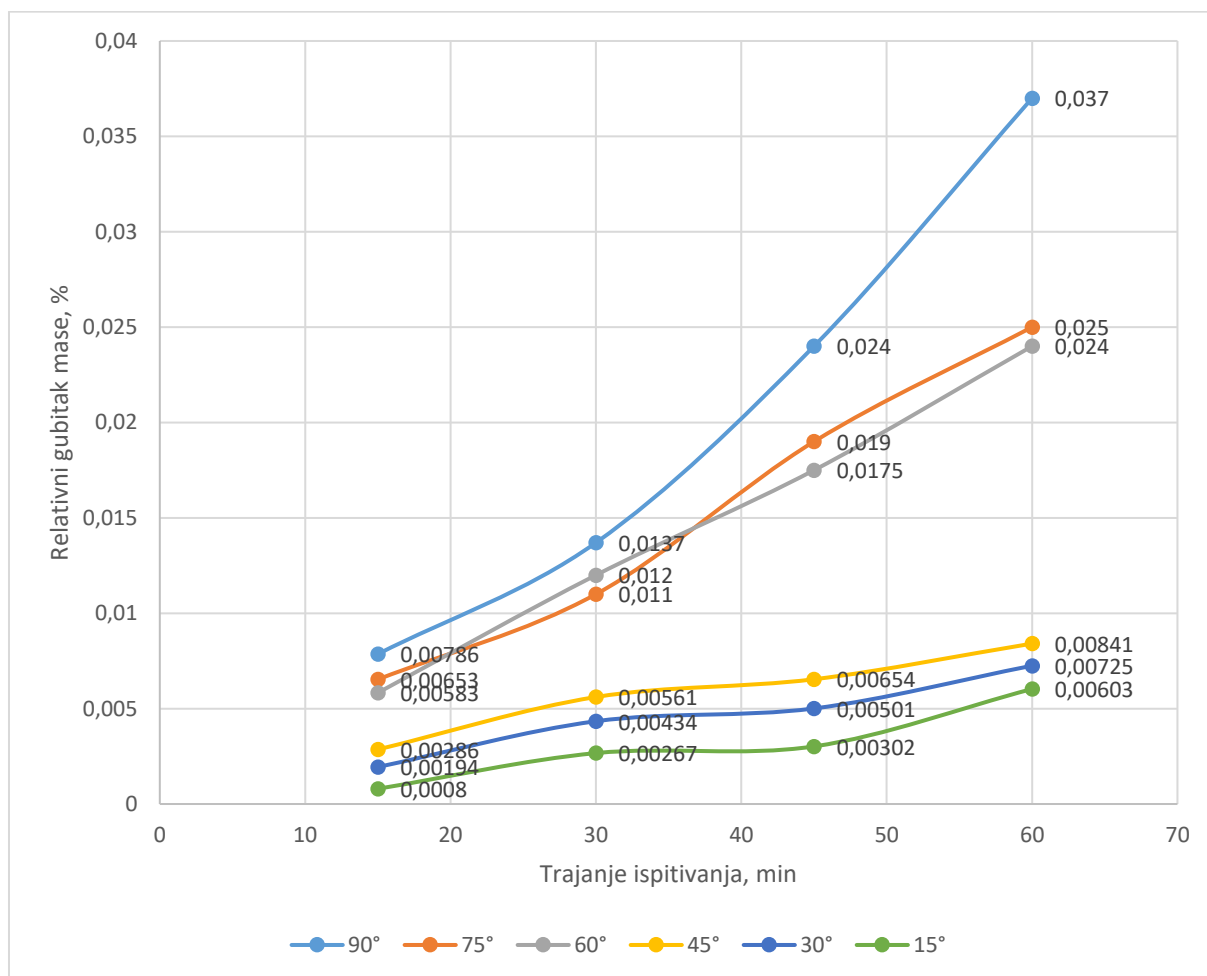
**Slika 44. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta  $\text{SiO}_2$  u ovisnosti o kutu udara**

Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> u ovisnosti o kutu upada prikazan je na slici 45. I ovdje se može uočiti isti trend trošenja koje je intenzivnije pri većim kutovima upada, dok je pri manjim kutovima i manje odnošenje materijala, a time i relativni gubitak mase. Iznimka je jedino trošenje u prvih 15 minuta kod kuta od 75° koje je nešto izraženije nego za kut od 90°. Mogući razlozi tomu su pogreške prilikom vaganja uzorka prije i nakon ispitivanja kao i eventualna prisutnost stranih čestica kod erodenta. Usporedi li se intenzitet trošenja uzorka WC-15Co s uzorkom manjeg sadržaja Co evidentno je da uzorak s 15 %Co pokazuje manje trošenje pri većim kutovima upada zbog većeg udjela žilavije matrice.



**Slika 45. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta SiO<sub>2</sub> u ovisnosti o kutu upada**

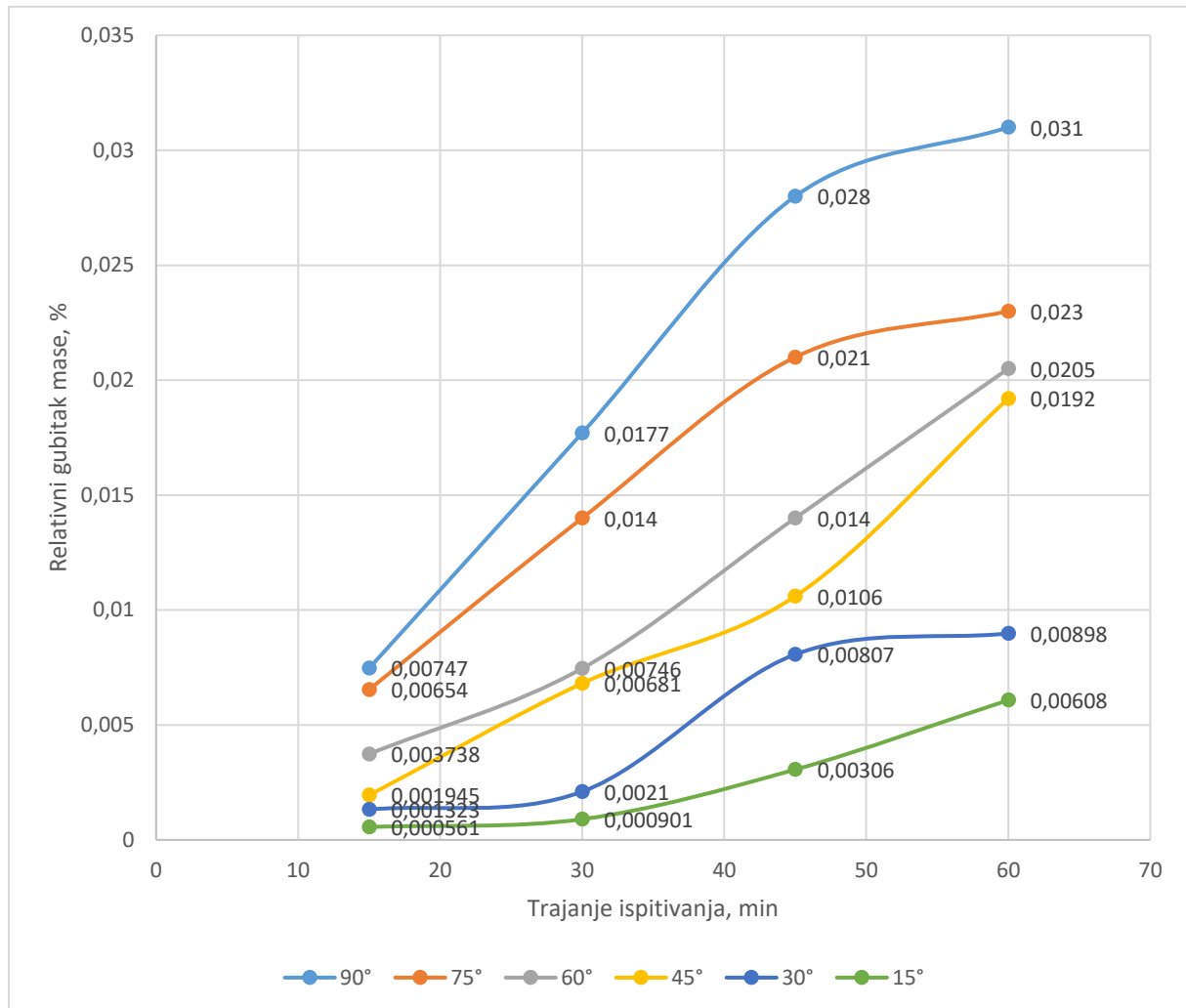
Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta sačme pod različitim kutovima upada predočava slika 46. U ovom slučaju nakon drugog mjerenja (30 minuta) veće trošenje je zabilježeno za kut od 60° nego ono za 75°. Mogući razlozi su identični kao u prethodnom primjeru. Kod ostalih mjerenja smanjenjem kuta udara erodenta smanjuje se i relativni gubitak mase tvrdog metala i to kod svih vremenskih intervala (15, 30, 45 i 60 min) u kojima je praćen tijek ispitivanja.



**Slika 46. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co prilikom udara erodenta sačme u ovisnosti o kutu upada**

Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta sačme u ovisnosti o kutu upada prikazan je na slici 47. Iz rezultata je vidljivo kako je najveći relativni gubitak mase ovog uzorka zabilježen za kut od 90° te smanjenjem kuta udara erodenta usporava se intezitet erozijskog odnošenja materijala. I ovdje je veće trošenje pokazao uzorak s 10 % Co pri

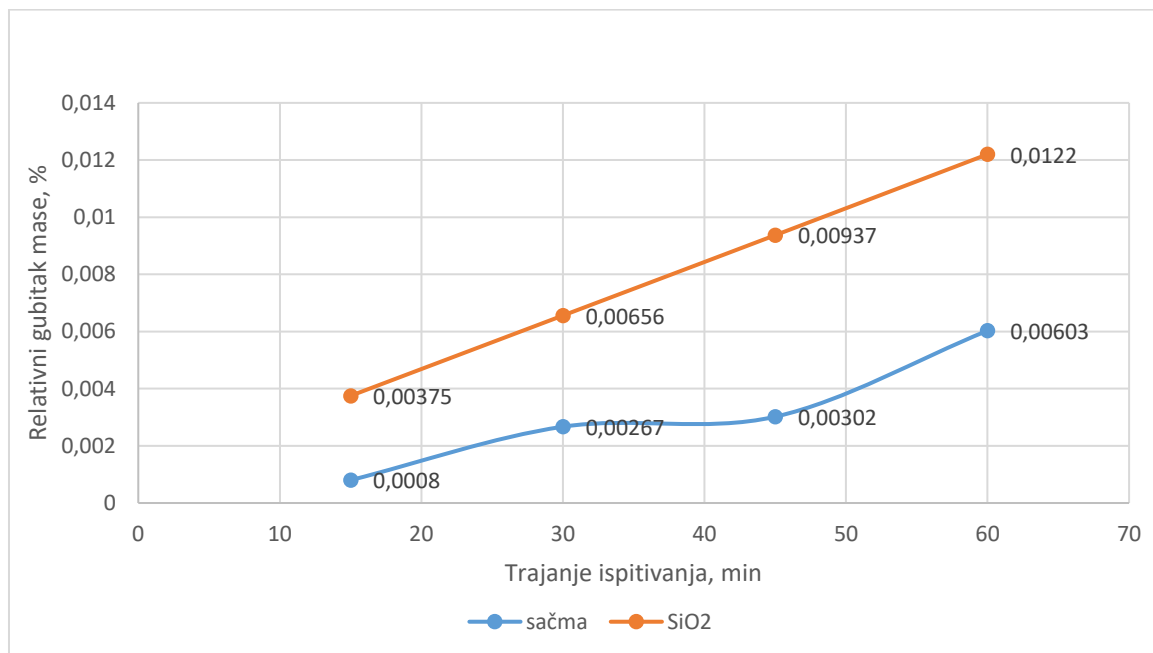
kutovima upada erodenta 60°, 75°, i 90°, dok za manje kutove 30° i 45° intenzivnije se troši uzorak s 15 % Co. Ovakvo ponašanje može se pripisati različitom udjelu Co matrice koja svojom žilavošću i duktilnošću značajno utječe na tvrdoću i otpornost tvrdog metala prema trošenju.



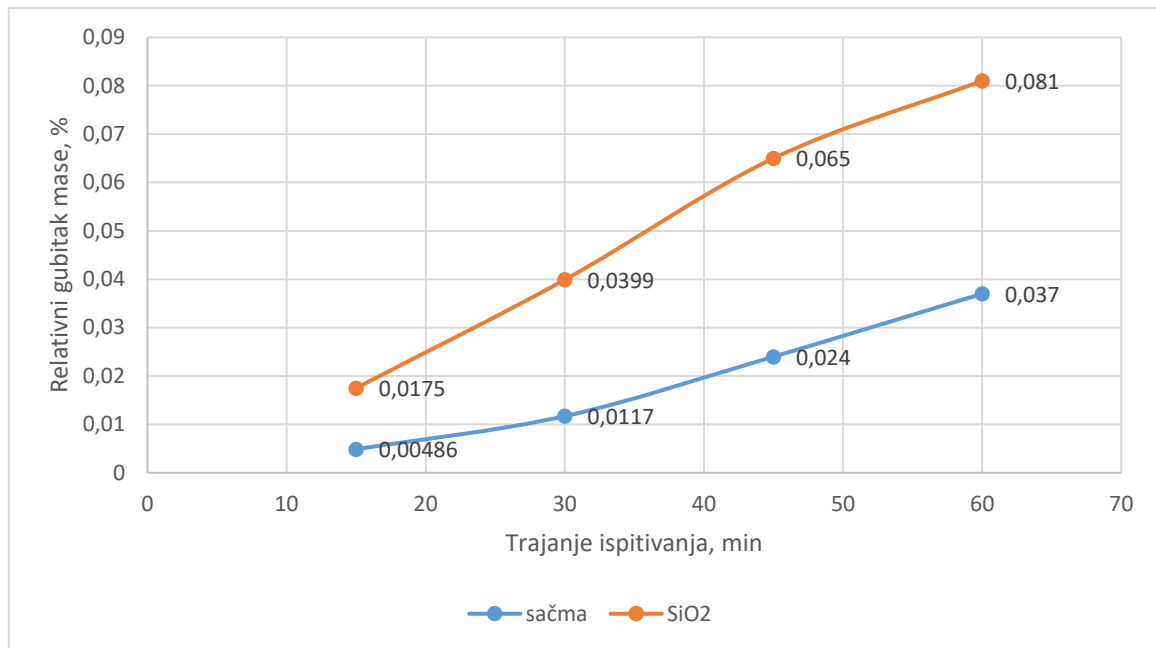
**Slika 47. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co prilikom udara erodenta sačme u ovisnosti o kutu upada**

### 7.1.2 Relativni gubitak mase u ovisnosti o vrsti erodenta

Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co u ovisnosti o vrsti erodenta ( $\text{SiO}_2$ , sačma) pod kutovima od  $15^\circ$  i  $90^\circ$  (granični kutovi ispitivanja) prikazani su na slikama 48 i 49. Iz dijagrama se vidi kako veće trošenje tvrdog metala uzrokuje kvarcni pijesak i to za oba kuta udara erodenta. Razlog zbog kojeg sačma uzrokuje manje trošenje tvrdog metala (WC-10Co) je njena veća granulacija zbog koje djeluje manje agresivno iz razloga što se energija udara raspršuje na veću površinu materijala.

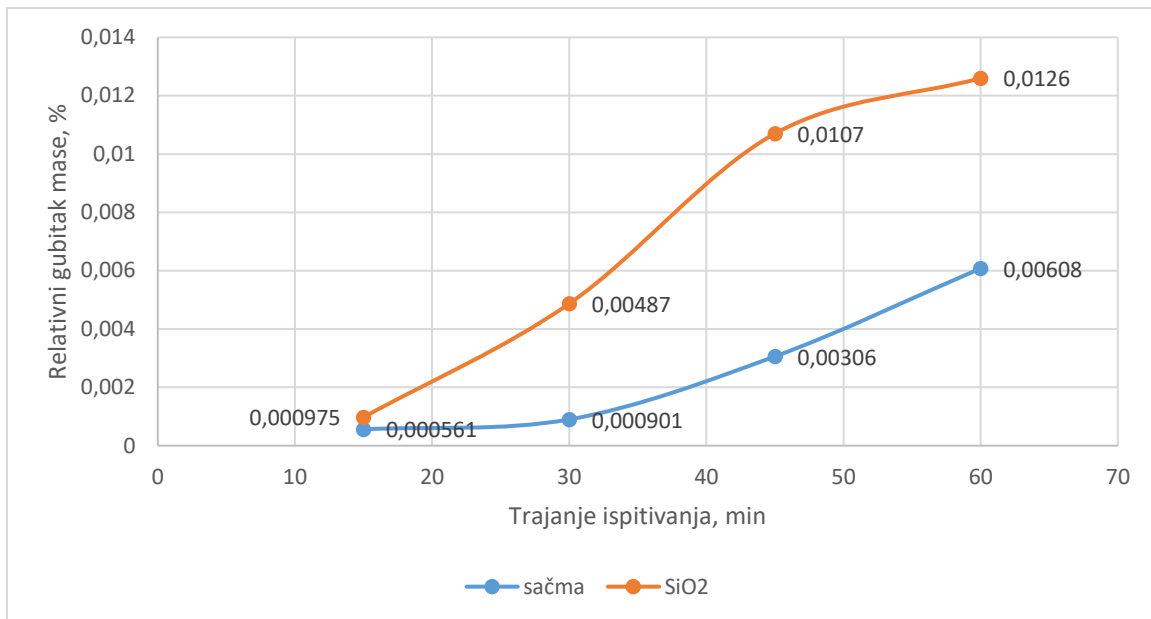


**Slika 48. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od  $15^\circ$**

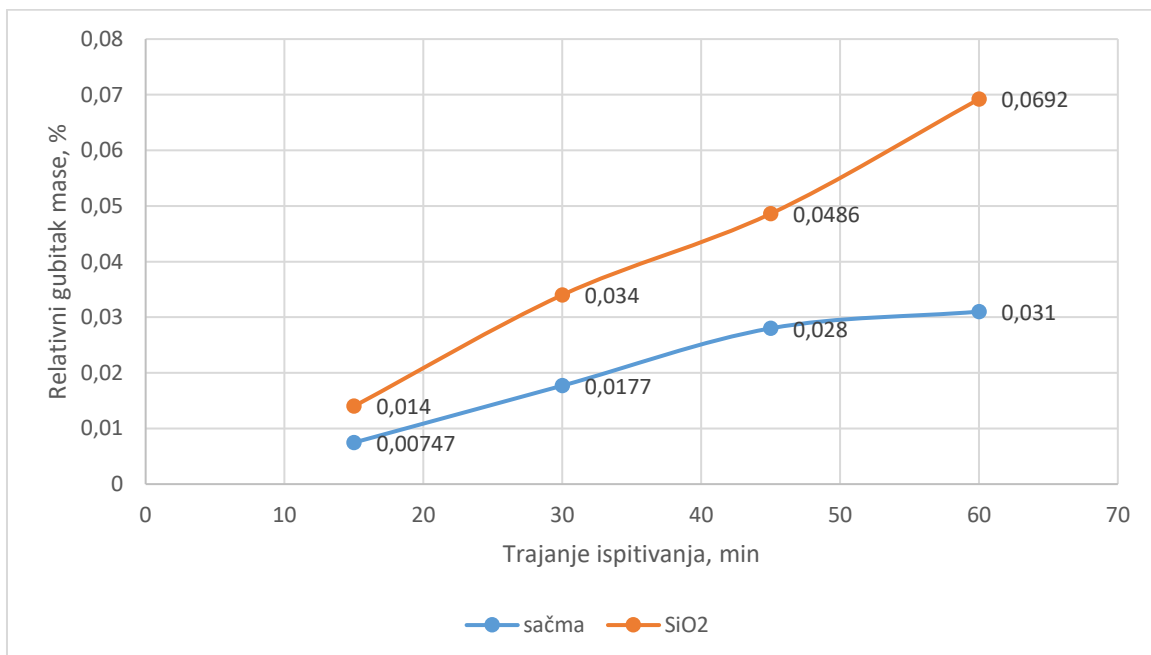


**Slika 49. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-10Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 90°**

Na slikama 50 i 51 predložen je relativni gubitak mase drugog uzorka s 15% Co (WC-15Co) za dva različita erodenta i kutove udara od 15° i 90°. Kao i u prethodnom primjeru, također dolazi do većeg relativnog gubitka mase pod djelovanjem SiO<sub>2</sub> erodenta u usporedbi s čeličnom sačmom.



**Slika 50. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 15°**

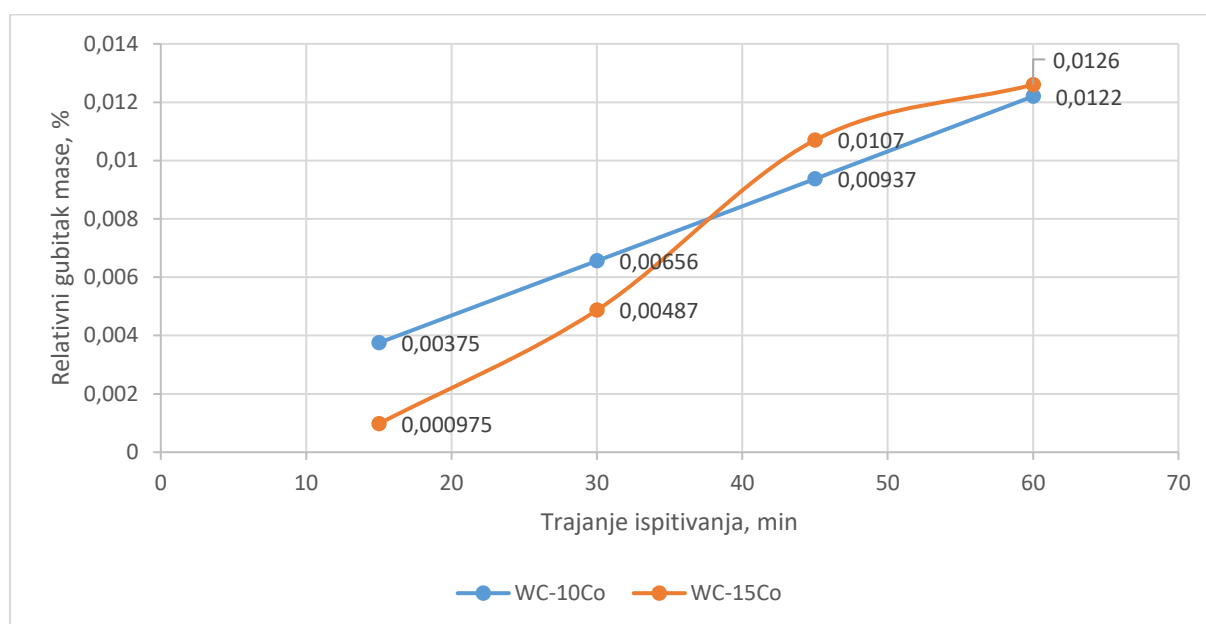


**Slika 51. Relativni gubitak mase tvrdog metala WC-15Co u ovisnosti o vrsti erodenta pri kutu od 90°**

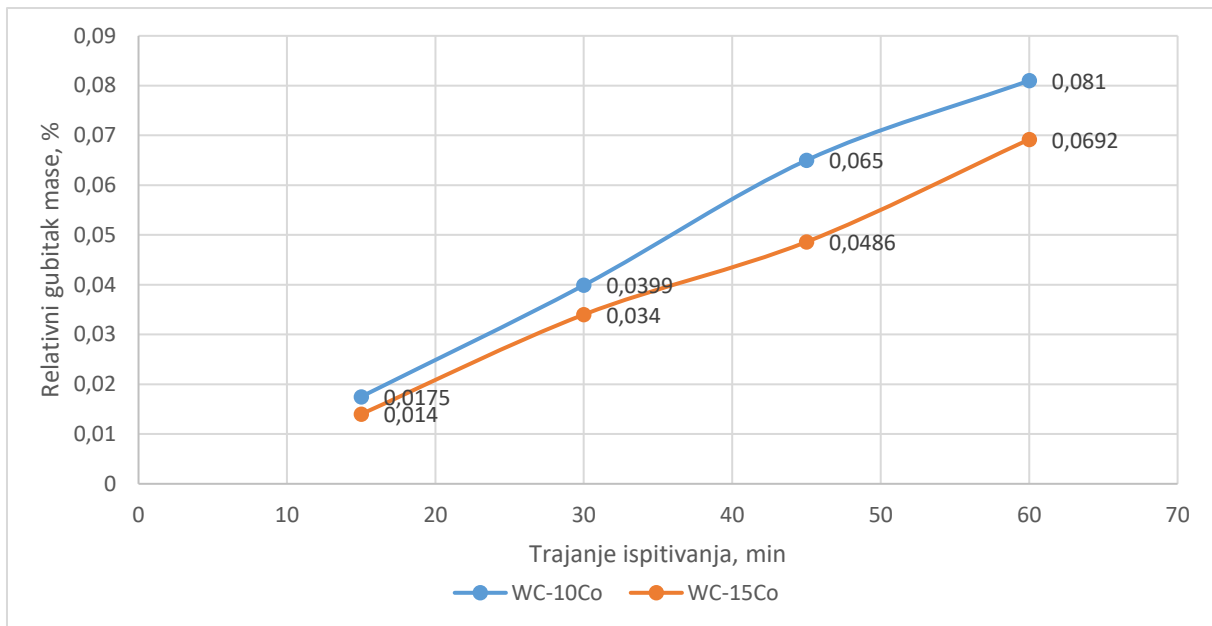


### 7.1.3 Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala (WC-10Co, WC-15Co)

Slike 52 i 53 prikazuju usporedbu otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta  $\text{SiO}_2$  pod najmanjim ( $15^\circ$ ) i najvećim kutom upada ( $90^\circ$ ). Iz slike 53 se vidi kako djelovanje erodenta  $\text{SiO}_2$  pod kutem od  $90^\circ$  izaziva veće trošenje kod uzorka WC-10Co. Razlog tomu je što je WC-10Co tvrdi i krhkiji materijal te je kod njega dominantnija udarna erozija tj. vertikalna komponenta sile ima puno veći utjecaj od horizontalne komponente sile. Kod kuta od  $15^\circ$  čiji su rezultati prikazani na slici 52 se vidi kako nakon 60 minuta ispitivanja veće trošenje pokazuje uzorak WC-15Co. Razlog tomu je što je on duktilniji te je kod njega dominantnija abrazivna erozija tj. horizontalna komponenta sile ima veći utjecaj od vertikalne komponente sile. Kao što se vidi iz navedenih primjera trošenje prilikom udara od  $15^\circ$  je izrazito malo te je vrlo lako moguća pogreška pogotovo kod kraćih trajanja ispitivanja. Upravo je to mogući razlog što je nakon 15 i 30 minuta ispitivanja veće trošenje pokazao uzorak WC-10Co, ali s duljim trajanjem ispitivanja odnos trošenja kod ova dva uzorka se mijenja.

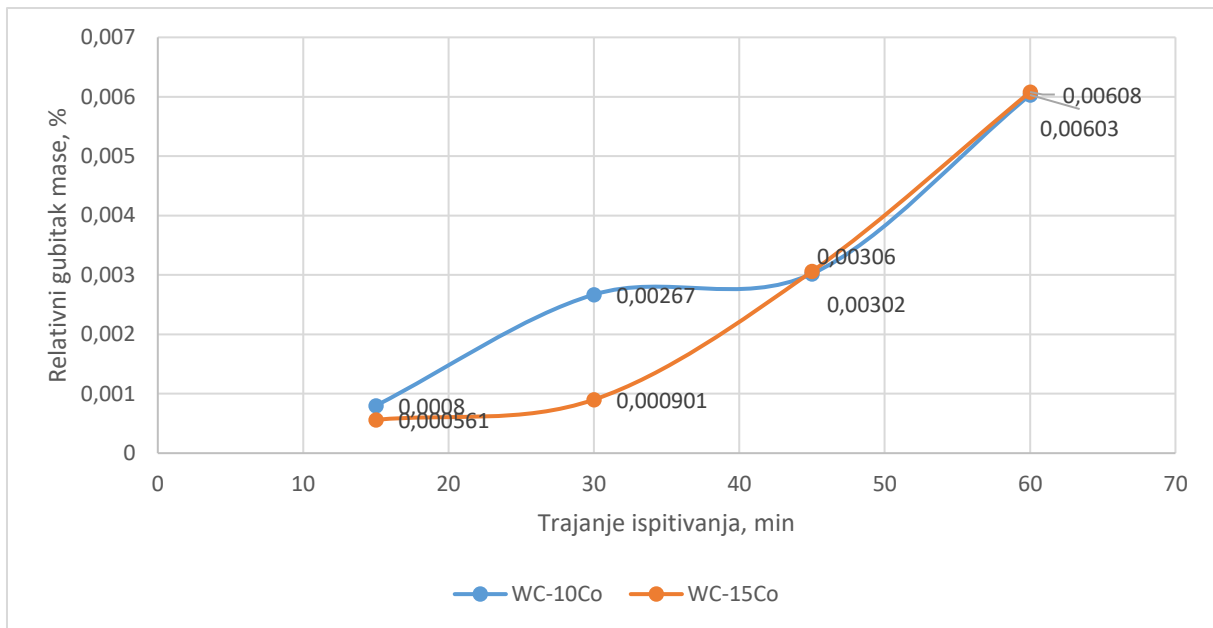


**Slika 52. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta  $\text{SiO}_2$  pri kutu od  $15^\circ$**

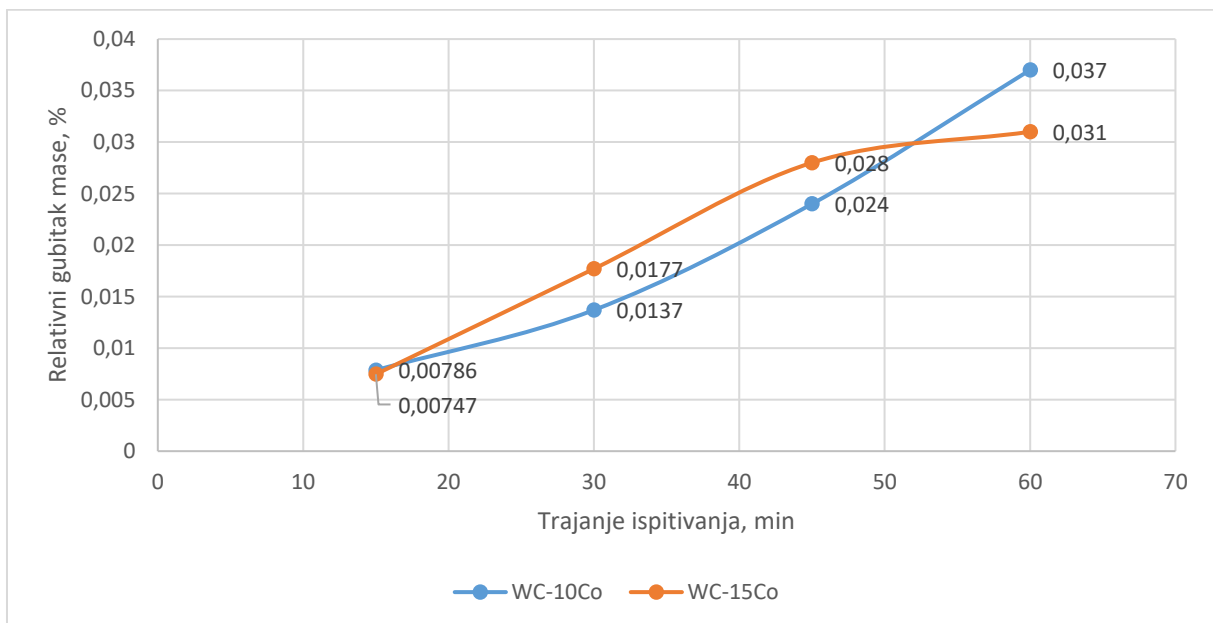


**Slika 53. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta  $\text{SiO}_2$  pri kutu od  $90^\circ$**

Slike 54 i 55 prikazuju usporedbu otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta sačme pod kutom od  $15^\circ$  i  $90^\circ$ . Kao i u prethodnom primjeru, nakon 60 minuta erodiranja površine pod kutom od  $90^\circ$ , veće trošenje pokazuje uzorak WC-10Co dok su za kut udara od  $15^\circ$  inteziteti trošenja podjednaki. Iako se za oba kuta udara erodenta prilikom kraćih vremena ispitivanja vidi odstupanje rezultata, ukoliko se ispitivanje razmatra dovoljno dugo vremena (60 min) jasno proizlazi da udarna erozija dominira kod uzorka WC-10Co.

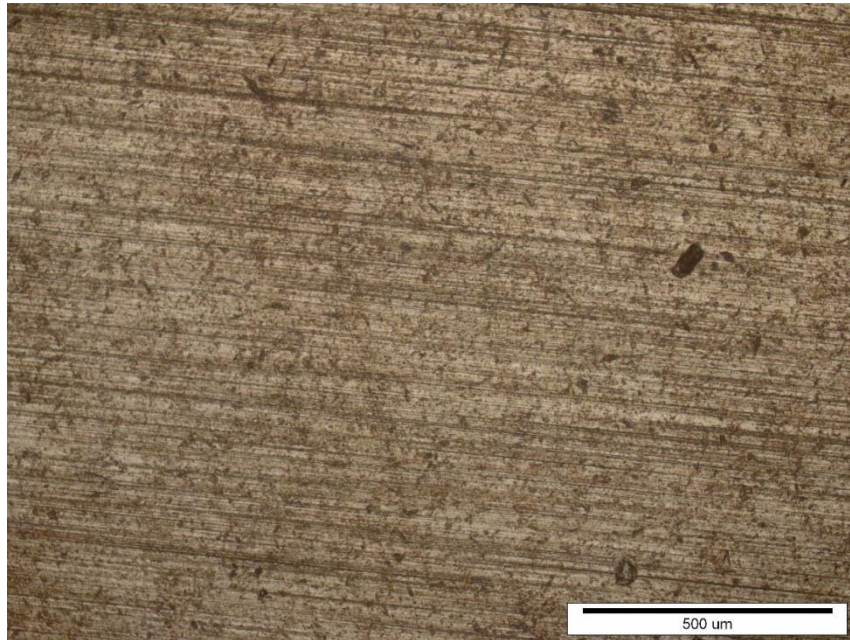


**Slika 54. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta sačme pri kutu od 15°**

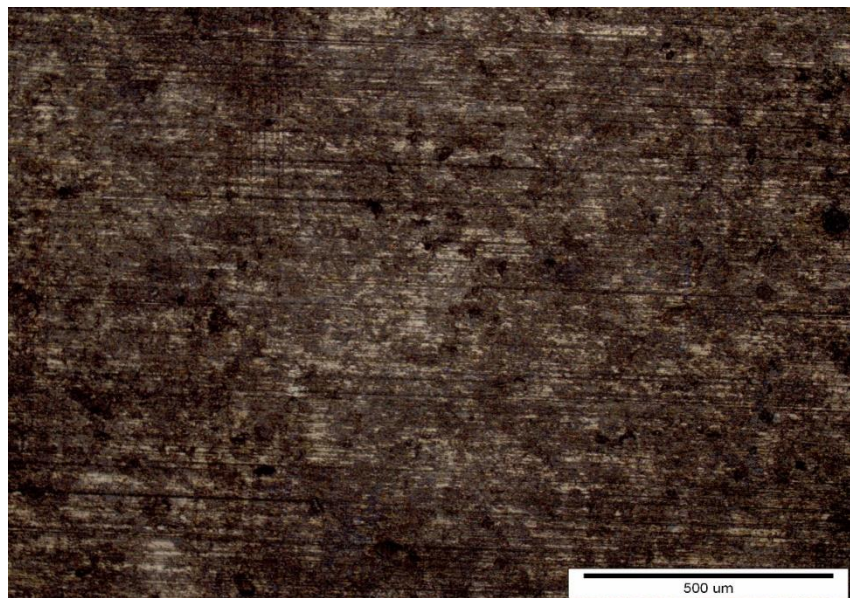


**Slika 55. Usporedba otpornosti na trošenje dvaju tvrdih metala prilikom udara erodenta sačme pri kutu od 90°**

Slike 56 i 57 prikazuju uzorak WC-10Co snimljen na svjetlosnom mikroskopu (povećanje 100x) prije i nakon trošenja. Na slici 57 jasno se vide oštećenja materijala nastala udarom erodenta o površinu.



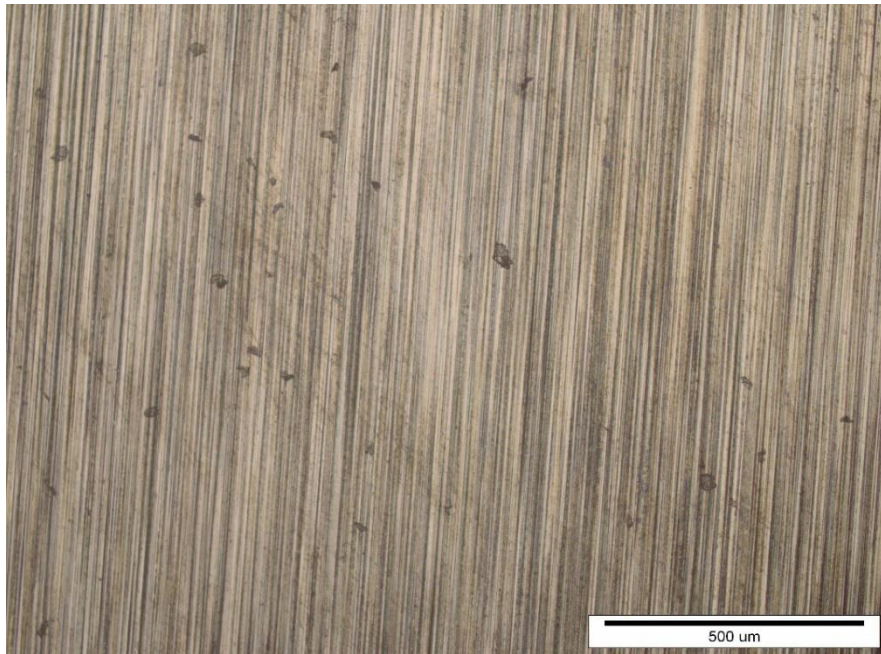
**Slika 56. Površina uzorka WC-10Co prije trošenja**



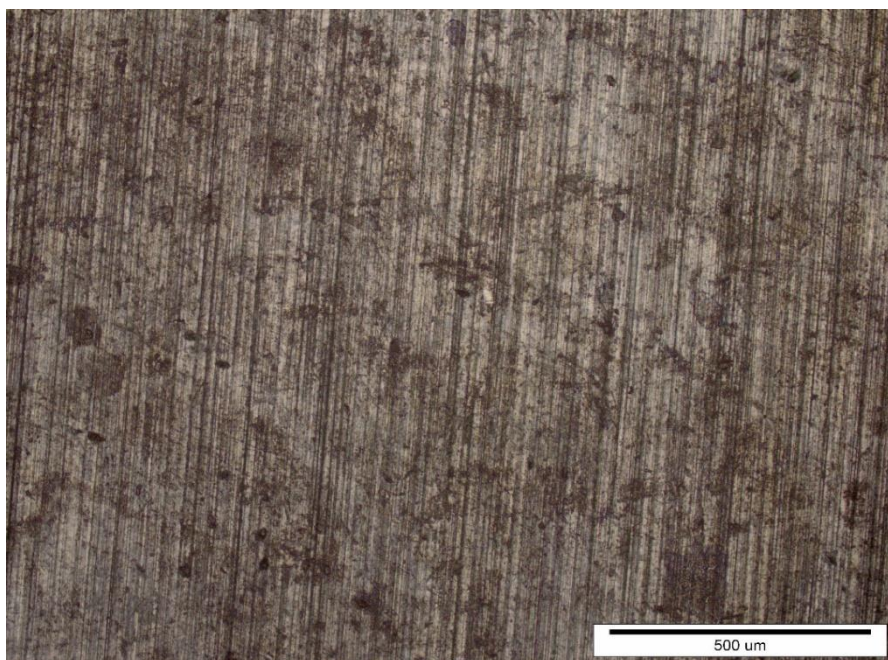
**Slika 57. Površina uzorka WC-10Co nakon trošenja**



Površinu uzorka s 15 % Co (WC-15Co) prije i nakon erozijskog trošenja prikazuju slike 58 i 59 snimljene uz povećanje od 100x. Na slici 59 jasno se uočavaju oštećenja materijala kao rezultat cikličkih udara erodenta o površinu.



**Slika 58. Površina uzorka WC-15Co prije trošenja**



**Slika 59. Površina uzorka WC-15Co nakon trošenja**

## 8. Zaključak

U ovom radu razmatrano je erozijsko trošenje tvrdih metala različitog sadržaj kobaltne matrice (10 % i 15 % Co). Trošenje je ispitano primjenom dva različita erodenta ( $\text{SiO}_2$ , čelična sačma) koji su erodirali površinu pod različitim kutovima upada u rasponu od  $15^\circ$  do  $90^\circ$ . Intezitet trošenja praćen je u vremenskim intervalima od 15 minuta u ukupnom trajanju od 60 minuta. Sva ispitivanja su provedena na specijalnom uređaju prilagođenom laboratorijskim ispitavanjima gdje erodent slobodno pada kroz sapnicu i udara o uzorak pod određenim kutom. Ova metoda omogućuje ispitivanje trošenja ne samo tvrdih metala već i drugih skupina materijala.

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

Na intezitet erozijskog trošenja tvrdih metala utječe:

1. sadržaj kobaltnog veziva;
2. kut upada erodenta;
3. vrsta erodenta.

Tvrđi metal s manjim udjelom Co matrice pokazuje veći gubitak mase pri većim kutovima upada erodenta ( $60^\circ$  -  $90^\circ$ ) iz razloga što je krhkiji te je kod njega dominantnija udarna erozija. Kod manjih kutova udara ( $15^\circ$  -  $45^\circ$ ) veće trošenje je pokazao uzorak WC-15Co iz razloga što je duktilniji i podložan abrazivnoj eroziji. Prilikom ispitivanja erozijskog trošenja pri malim kutovima udara erodenta ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ) relativni gubici mase izmjereni nakon 15 minuta ispitivanja su vrlo mali te nije moguće sa sigurnošću donijeti jednoznačni zaključak o otpornosti na trošenje ispitivanih tvrdih metala, ali ako se trajanje ispitivanja produlji na 60 minuta jasno proizlazi da prilikom manjih kutova udara veću otpornost na erozijsko trošenje ima uzorak sa nižim sadržajem Co (WC-10Co).

Što se tiče veličine i oblika čestica erodenta proizlazi da veće trošenje uzrokuje kvarcni pijesak ( $\text{SiO}_2$ ) jer sadrži čestice puno nepravilnijeg oblika u usporedbi s kuglicama sačme kod kojih se energija udara rasprši na veće područje materijala te uzrokuje manje oštećenje površine, a time i manje trošenje materijala.

## **Prilozi**

1. CD-R disc

## Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [2] Grupa autora.: Tehnička enciklopedija – 13. svezak, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb 1997.
- [3] D.Ćorić: Posebni metalni materijali, fakultetski udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, rujan 2017.
- [4] K. Grilec, S. Jakovljević: Autorizirana predavanja iz kolegija Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] [www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1733](http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1733), preuzeto na dan 17.4.2018
- [6] I. Kleis, P. Kulu: Solid Particle Erosion, Springer, Ehitajate tee 5, Tallinn University of Technology, Estonia, 2008.
- [7] V.K.Sarin, D.Mari, L.Llanes: Comprehensive hard materials, London, Elsevier, 2014.
- [8] Tamara Aleksandrov Fabijanić: Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [9] B.Matijević: Autorizirana predavanja iz kolegija metalurgija praha, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] ASM Handbook Vol 18 - Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International,1992.
- [11] M.Sakoman: Mehanizam erozijskog trošenja kompozitne keramike na bazi  $Al_2O_3-ZrO_2$  oblikovane lijevanjem suspenzije, Rektorova nagrada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [12] Y.L. Su, W.H. Kao: Optimum multilayer TiN–TiCN coatings for wear resistance and actual application, Wear, 223, 1998, 119 – 130.
- [13] T. Glatki, M. Lacković, S. Kos, J. Lončar: Obrada vodenim i abrazivnim mlazom, Tehnički glasnik, 8(3), 2014, 245 - 251
- [14] <http://tvrdimetal.com/portfolio/alati-za-obradu-metalna-valjanjem/>, preuzeto na dan 18.10.2019
- [15] B. Matijević: Napredne tehnologije materijala, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [16] Ljerka Slokar, Metalurgija praha i sinter materijali, Autorizirana predavanja, Sisak, 2015.
- [17] <https://hr.mjptv.com/powder-metallurgy-parts-steel-spur-gear-handset-parts.html>, preuzeto na dan 19.10.2019



[18] Mikado H., Ishira S., Oguma N., Kawamura S., On the Short Surface Fatigue Crack Growth Behavior in a Fine-Grained WC-Co Cemented Carbide, *Metals* 7(7),2017.

[19]<https://www.google.com/search?q=mikro+svrdlo+tvrdi+metali>, preuzeto na dan 27.10.2019

[20] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje\\_vodenim\\_mlazom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje_vodenim_mlazom), preuzeto na dan 2.11.2019