

Adhezijsko trošenje tvrdih metala u emulziji za hlađenje i podmazivanje

Martinez, Matteo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:853445>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matteo Martinez

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić, dipl. ing.

Student:

Matteo Martinez

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se profesoru Danku Ćoriću i asistentu Matiji Sakomanu za svu pruženu pomoć i vrijeme tijekom izrade ovoga rada.

Matteo Martinez



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATTEO MARTINEZ**

Mat. br.: 0035211523

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Adhezijsko trošenje tvrdih metala u emulziji za hlađenje i podmazivanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Adhesive wear of hard metals in emulsion for cooling and lubrication**

Opis zadatka:

Tvrđi metal je najrasprostranjeniji predstavnik materijala dobivenim metalurgijom praha. Struktura tvrdog metala sastoji se od karbida volframa, povezanih kobaltom kao vezivom. Kobalt osigurava žilavost, a karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje. Povoljna svojstva ovog materijala omogućuju njegovu primjenu kao reznog alata u obradi odvajanjem čestica pri čemu u se uvjetima visokih temperatura koje se razvijaju tijekom obrade javljaju različiti mehanizmi trošenja koji uzrokuju prijevremeno dotrajavanje reznog alata.

U radu je potrebno:

- opisati postupak proizvodnje tvrdog metala
- istaknuti njegova najvažnija svojstva i područja primjene
- opisati mehanizme trošenja reznih alata s naglaskom na adheziji i formiranju naljepaka na tvrdom metalu
- provesti ispitivanja adhezijskog trošenja na uzorcima od tvrdog metala uz primjenu sredstva za hlađenje i podmazivanje
- statistički obraditi dobivene rezultate
- analizirati rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.

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

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. TVRDI METAL	2
2.1 Postupak proizvodnje	4
2.1.1 Proizvodnja praha.....	5
2.1.2 Priprava smjese	6
2.1.3 Oblikovanje	7
2.1.4 Sinteriranje	8
2.2 Mehanička svojstva tvrdog metala	10
2.3 Područje primjene	13
3. MEHANIZMI TROŠENJA REZNIH ALATA OD TVRDIH METALA.....	15
3.1 Adhezija	16
3.1.1 Naljepak na tvrdom metalu	16
3.2 Abrazija	18
3.3 Umor površine.....	19
3.4 Difuzija.....	20
3.5 Oksidacija.....	21
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ADHEZIJSKOG TROŠENJA	24
4.1. Priprema za ispitivanje	25
4.2. Ispitivanje adhezijskog trošenja	29
4.3. Metalografska priprema prstena.....	36
4.4. Mjerenje tvrdoće prstena	38
ZAKLJUČAK	41
LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1 Rezne oštrice od tvrdog metala [5]	3
Slika 2 Mikrostruktura tvrdog metala [6].....	4
Slika 3 Postupci metalurgije praha: a) konvencionalni; b) postupak teorijske gustoće [6]	5
Slika 4 Vodena atomizacija [6]	6
Slika 5 Kuglični mlin [6].....	7
Slika 6 Shematski prikaz vrućeg izostatskog prešanja [6]	8
Slika 7 Sinteriranje u čvrstom stanju [6].....	9
Slika 8 Faze sinteriranja u rastaljenoj fazi [6].....	10
Slika 9 Utjecaj kobalta na tvrdoću tvrdog metala za različite veličine WC zrna [6]	11
Slika 10 Dijagram naprezanje – istežanje za čelike različitih udjela ugljika [9]	12
Slika 11 Utjecaj kobalta na lomnu žilavost tvrdog metala za različite veličine WC zrna [6]..	13
Slika 12 Formiranje naljepka na tvrdom metalu [15]	17
Slika 13 SEM slika trošene površine kod abrazije dvaju tijela [16]	18
Slika 14 SEM slika trošene površine kod abrazije sa tri tijela [16]	19
Slika 15 Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala [19]	21
Slika 16 Jedinični događaj tribokorozije [14]	22
Slika 17 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje [19].....	23
Slika 18 Uzorak tvrdog metala WC-5Co	24
Slika 19 Izrezani uzorka WC-15Co	25
Slika 20 Emulzija u plastičnoj boci.....	26
Slika 21 Prsteni umočeni u emulziji.....	27
Slika 22 Uređaj za ispitivanje adhezijskog trošenja.....	28
Slika 23 Utezi postavljeni na nosač.....	29
Slika 24 Sučelje programa WFS210 [20].....	30
Slika 25 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-5Co.....	32
Slika 26 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-10Co.....	32
Slika 27 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-15Co.....	33
Slika 28 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-5Co	34
Slika 29 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-10Co	35
Slika 30 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-15Co	35
Slika 31 Uzorak prstena zaliven u polimernu masu	36
Slika 32 Tvrdomjer Indentec	37
Slika 33 Otisak piramide Vickersovog indentora	39
Slika 34 Prikaz površine prstena	40

POPIS TABLICA

Tablica 1 Klasifikacija tvrdih metala prema ISO 513:2012 [6]	14
Tablica 2 Karakteristične vrijednosti sile trenja.....	33
Tablica 3 Karakteristične vrijednosti faktora trenja	36
Tablica 4 Rezultati mjerenja tvrdoće prstena	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	-	Konstanta opruge
d_{sr}	mm	Srednja vrijednost dijagonala
f	Hz	Frekvencija
F	N	Sila utiskivanja
F_N	N	Normalna sila
F_{tr}	N	Sila trenja
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
S	mm	Udaljenost mete od senzora
S_{max}	mm	Maksimalna udaljenost mete
$S_{trenutni}$	mm	Trenutna udaljenost mete
U	V	Napon
u	mm	Pomak
μ	-	Faktor trenja

SAŽETAK

Teorijski dio rada opisuje WC-Co tvrde metale, njihov postupak proizvodnje, mehanička svojstva i područje primjene. Također su opisani i mehanizmi trošenja reznih alata od tvrdog metala s naglaskom na adheziju i formiranje naljepka na tvrdom metalu. Eksperimentalni dio rada opisuje ispitivanja adhezijskog trošenja na uzorcima od tvrdog metala uz primjenu emulzije za hlađenje i podmazivanje. Ispitivanje se provelo na tri uzorka; WC tvrdi metal sa 5% kobalta (WC-5Co), 10% kobalta (WC-10Co) i 15% kobalta (WC-15Co). Protupar za adhezijsko ispitivanje bio je vanjski prsten igličastog ležaja napravljen od čelika za ležajeve oznake 100Cr6. Kroz provedeno ispitivanje određena je sila trenja i faktor trenja za uzorke tvrdog metala različitog sadržaja kobalta.

Ključne riječi: tvrdi metal, adhezijsko trošenje, sredstvo za hlađenje i podmazivanje, sila trenja, faktor trenja

SUMMARY

The theoretical part of this paper describes the WC-Co hardmetals, their manufacturing process, mechanical properties and application area. Moreover, it describes the of wear mechanisms in cutting tools made of hardmetal with emphasis on adhesion and the formation of a Built up edge on hardmetals. The experimental part of this paper describes the testing of adhesion wear on samples made of hard metal with the application of a medium for lubrication and cooling. The testing was conducted on three samples; WC hardmetal with 5% cobalt (WC-5Co), 10% cobalt (WC-10Co) and 15% cobalt (WC-15Co). The counterpart for adhesion test was an outer roller bearing ring made of steel used for bearings designated as 100Cr6. Frictional force and coefficient of friction were measured during testing for hardmetal samples with different content of cobalt.

Key words: hardmetal, adhesive wear, medium for lubrication and cooling, frictional force, coefficient of friction

1. UVOD

Još od prapovijesnog doba ljudi su koristili razna oruđa i alate za zadovoljavanje svojih potreba. Iz tih potreba su nastali izumi poput kotača, stroj na vodenu paru, avion, automobil i slično. Većina tih izuma je nastala oblikovanjem raznih materijala u željeni oblik. Oblikovanje se može postići izvornim oblikovanjem (lijevanjem), oblikovanjem sa ili bez odvajanja čestica, spajanjem, zaštitom materijala i toplinskom obradom. U slučaju reznih alata oni služe za oblikovanje obradom odvajanjem čestica.

Rezni alat je alat kojim ručno ili strojno obrađujemo materijal rezanjem. Oštrica reznog alata za vrijeme obrade razara međusobnu povezanost čestica materijala, te je izložena mehaničkom, toplinskom i kemijskom djelovanju, odnosno trošenju. Postojanost i vijek trajanja oštrice ovisi o materijalu alata i obratka, režimu rada, a posebno o brzini rezanja. Dijelovi reznog alata su: rezni dio koji osigurava proces obrade (klin) i držalo koje služi za prihvat na alatni stroj i prijenos sila rezanja. [1]

Materijali za izradu reznog dijela alata može biti ugljični alatni čelici, legirani alatni čelici, brzorezni čelici, keramika, kubični boron nitrid (eng. *Cubic Boron Nitrid*, CBN) te tvrdi metal koji može biti prevučen ili neprevučen, koji će biti glavna tema ovoga rada. [2]

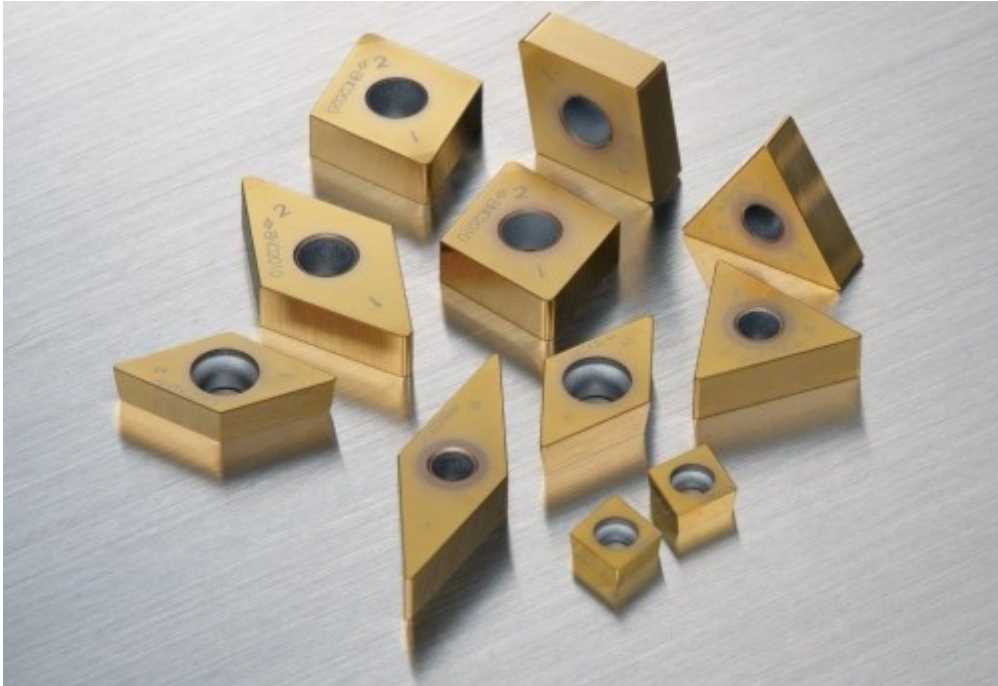
2. TVRDI METAL

Tvrđi metal je ili kompozitni materijal koji se sastoji smjese metala s nemetalnim komponentama visoke tvrdoće kao što su oksidi, boridi i nitridi teško taljivih metala. [3]

Razvoj tvrdog metala je započeo u Njemačkoj tijekom 20-ih godina prošlog stoljeća. Sinterirani volframov karbid je bio razvijen od strane "Osram društva za proučavanje električkog osvjetljenja" da zamijeni dijamante kao materijal za strojnu obradu metala. 1926. godine Krupp, nakon što je otkupio licencu od Osrama, uvodi sinterirani karbid na tržište pod nazivom WIDIA (akronim za *Wie Dimanat*, njemački izraz za "kao dijamant"). Komercijalna upotreba u Sjedinjenim Američkim Državama je krenula 1927./1928. godine. Kasniji razvoj se proširio na druge države. Tijekom 1990-ih, počeli su se koristiti tvrdi metali manje veličine zrna (20-50 nm) nego što je to prije bilo uobičajeno (0.5-3.0. μm)

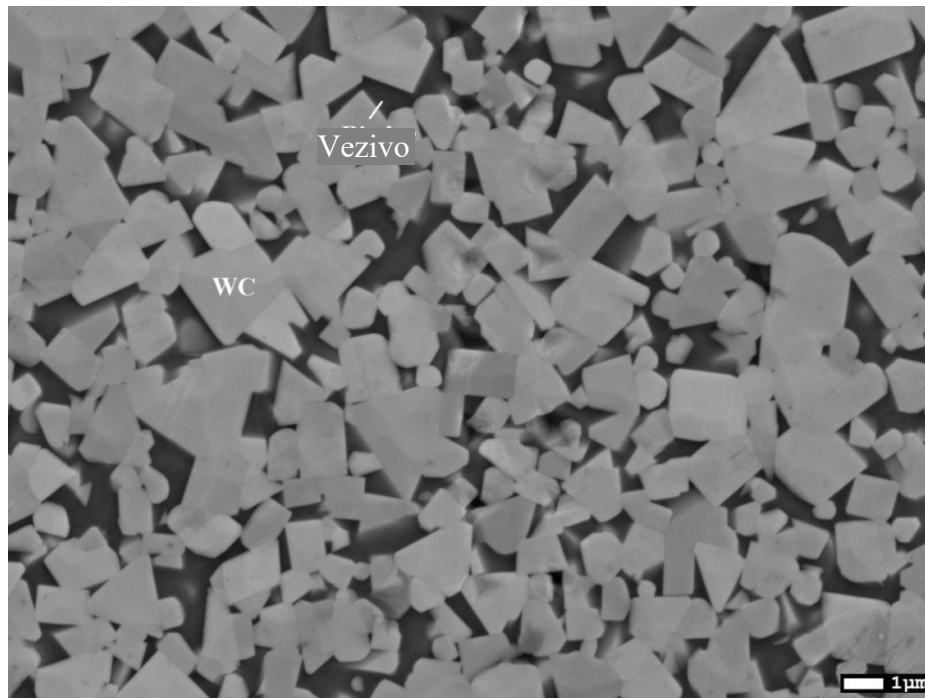
Tvrđi metal se promovirao kao ekvivalent dijamantu da se bolje probije na tržište. Iako to nije bilo potpuno točno, alati od tvrdog metala su unijeli toliko velika unaprjeđenja u obradi materijala da su konstruktori strojeva za strojnu obradu morali promisliti svaki aspekt obrade.

Tijekom Drugog svjetskog rata, zbog nestašice volframa, otkrilo se da volframov karbid reže metal mnogo učinkovitije nego volfram u brzoreznom čeliku. Kako bi se uštedjelo na volframu, karbidi su se koristili za rezanje metala što je više moguće. Kako je vrijeme prolazilo, korištenje tvrdog metala je postalo sve više uobičajeno u industriji, do trenutka gdje tvrdi metal postaje jedan od najzastupljenijih materijala za obradu proizvoda, slika 1. [4]



Slika 1 Rezne oštrice od tvrdog metala [5]

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 duktilnost te smanjuje krhkost, slika 2.



Slika 2 Mikrostruktura tvrdog metala [6]

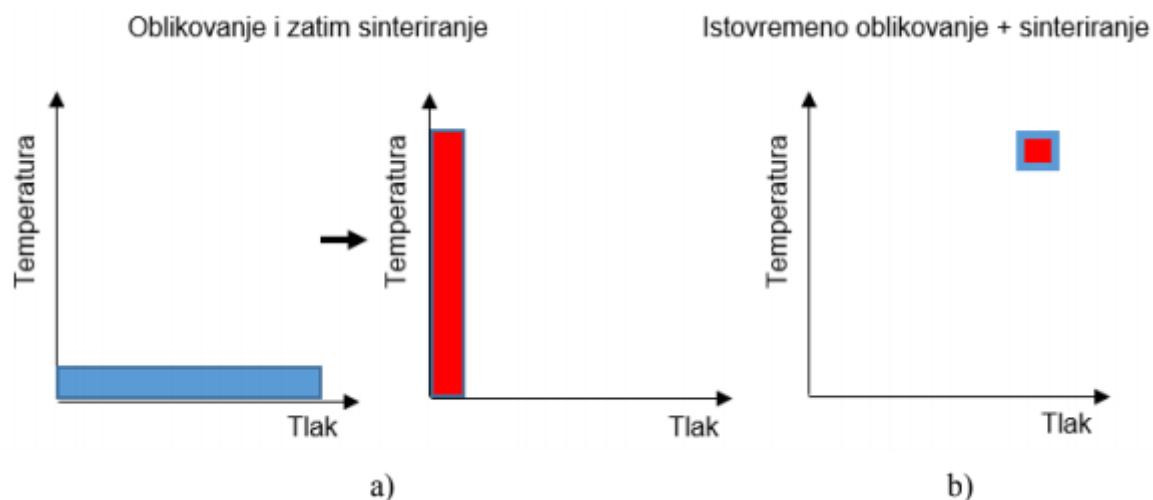
2.1 Postupak proizvodnje

Tvrđi metal se proizvede postupkom metalurgije praha. Metalurgija praha je tehnologija proizvodnje praha i gotovih dijelova zagrijavanjem prethodno kompaktiranog praha malo ispod temperature taljenja glavnog konstituenta. Zagrijavanjem dolazi do sjedinjena čestica što dovodi do stvaranja čvrstog metalnog tijela. Općenito se koristi u proizvodnji visokokvalitetnih dijelova složenih oblika visoke dimenzijske točnosti. Primjenom prahova izuzetne čistoće i male veličine zrna otvaraju se mogućnosti proizvodnje gotovih dijelova izuzetnih karakteristika i mehaničkih svojstava. Glavni nedostaci ovog postupka proizvodnje su relativno visoka cijena proizvoda oblikovanih metalurgijom praha i slabija eksploatacijska svojstva zbog poroznosti dijelova. Zbog toga je metalurgija praha pogodna jedino u velikoserijskoj proizvodnji.

Postupak metalurgije praha se dijeli u dvije skupine:

1. Konvencionalni postupci
2. Postupci s kojima se postiže teorijska gustoća

Razlika između skupina se očituje u toku operacija tijekom procesa konsolidacije. Kod konvencionalnih postupaka imamo početno oblikovanje i zatim sinteriranje dok kod procesa kojima se ostvaruju teorijske gustoće radi se o istovremenom oblikovanju i sinteriranju, slika 3. [6]



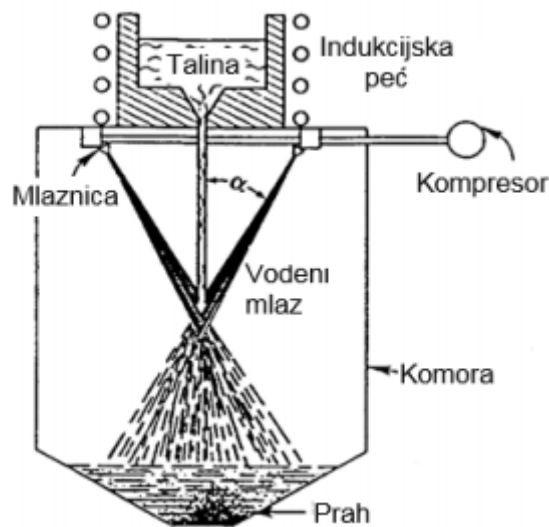
Slika 3 Postupci metalurgije praha: a) konvencionalni; b) postupak teorijske gustoće [6]

Općenito, bez obzira na podjelu, metalurgija praha se dijeli na četiri operacije:

1. proizvodnja praha,
2. priprava smjese,
3. oblikovanje,
4. sinteriranje.

2.1.1 Proizvodnja praha

Proizvodnja praha je moguća mehaničkim, elektrolitičkim, kemijskim tehnikama i atomizacijom praha. Mehanički se prah dobiva utjecajem vanjske sile, elektrolitički taloženjem praha na katodi i kemijskom redukcijom metalnih smjesa no najzastupljenija metoda proizvodnja prahova metala i drugih materijala je atomizacija praha. Atomizacijom se rastaljeni metal pretvara u prah pomoću plinskog, vodenog ili centrifugalnog utjecaja. Kao primjer, može se navesti vodena atomizacija predložena slikom 4.



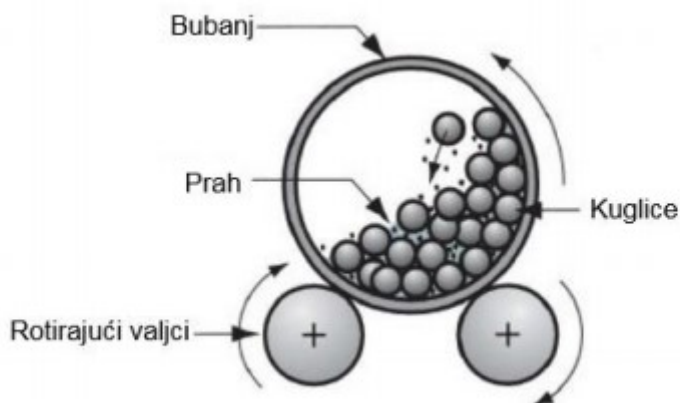
Slika 4 Vodena atomizacija [6]

Mlaz vode pod pritiskom sudara se pod kutom s mlazom rastaljenog metala što rezultira raspršivanjem i brzim skrućivanjem nastalih kapljica. [6]

2.1.2 Priprava smjese

Nakon atomizacije i odabira praškastih komponenti za izradu tvrdog metala određene čistoće, veličine zrna i dodavanjem odgovarajućih aditiva potrebnih za oblikovanje i sinteriranje slijedi proces priprave smjese koji se sastoji od miješanja, mljevenja, sušenja i granuliranja.

Miješanjem se homogeniziraju prahovi različitog kemijskog sastava sa aditivima nužnim u procesu konsolidacije što je preduvjet za stvaranje homogene mikrostrukture. Uz miješanje se često provodi i mljevenje koje uključuje mehaničko oblikovanje čestica praha čime dolazi do njihova lomljenja i hladnog oblikovanja. Mljevanje se može izvesti valjanjem, udarcima (udarno mljevenje) i s pomoću kuglica u rotirajućem bubnju (kuglično mljevanje). Danas prevladava kuglično mljevenje gdje u cilindričnom bubnju, koji rotira oko svoje osi, kuglice za mljevenje djeluju na čestice praha udarnim silama i silama trenja, slika 5.



Slika 5 Kuglični mlin [6]

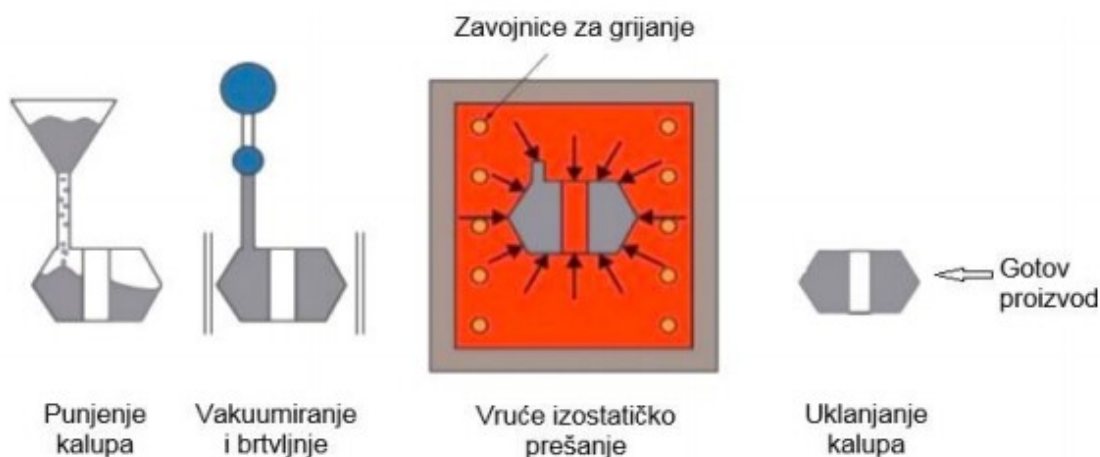
Miješanje i mljevenje može biti mokro i suho. Mokri postupak je kvalitetniji jer se njime postiže finija i jednoličnija mješavina. [6]

2.1.3 Oblikovanje

Oblikovanje ili kompaktiranje je proces povezivanja čestica praha u željeni oblik koji ima dovoljnu čvrstoću za daljnje rukovanje. Postupak se izvodi u kalupima pomoću visokog pritiska koji dovodi do deformacije čestica praha i smanjenja poroznosti. Osnovni ciljevi kompaktiranja su konsolidacija praha u željeni oblik, postizanje određenih konačnih dimenzija, postizanje određenog stupnja i vrste poroziteta i postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za daljnje rukovanje.

Postupci oblikovanja se dijele na hladno prešanje, hladno izostatsko prešanje, injekcijsko prešanje, valjanje praha, ekstrudiranje, kovanje, vruće prešanje i vruće izostatsko prešanje. Izbor postupka ovisi o vrsti polaznog praha, geometriji i veličini proizvoda kao i o broju komada te troškovnima procesa.

Kod tvrdog metala najčešće se koristi postupak vrućeg izostatskog prešanja (engl. *hot isostatic pressing*, HIP) zbog visoke kvalitete i izrazito povoljnih mehaničkih svojstava samog izratka. Postupak spada u skupinu kojom se ostvaruju teorijske gustoće jer se primjenjuje izostatički tlak i visoka temperatura istovremeno u posebno konstruiranom spremniku, slika 6. Nedostaci postupka su visoki troškovi opreme i poteškoće pri postizanju i održavanju istovremeno visokog tlaka i temperature. [6]



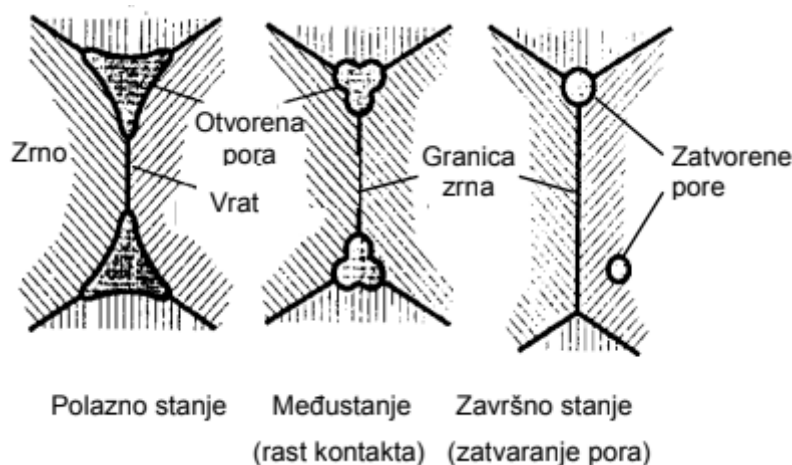
Slika 6 Shematski prikaz vrućeg izostatskog prešanja [6]

2.1.4 Sinteriranje

Sinteriranje je najznačajnija operacija metalurgije praha koja se provodi radi povećanja čvrstoće i tvrdoće kompaktnog komada putem konsolidacije ili spajanja čestica pri visokoj temperaturi. Proces sinteriranja se ostvaruje kroz mehanizme poput densifikacije, difuzije, rekristalizacije i rast zrna. Osnovni parametri su temperatura, vrijeme i atmosfera u peći uz dodatni utjecaj brzine zagrijavanja i hlađenja te prisutnih nečistoća u otpreku. Sinteriranje u vakuumu se koristi u proizvodnji reznih alata za koje se zahtjeva visoka kvaliteta površine, visoka čvrstoća i tvrdoća.

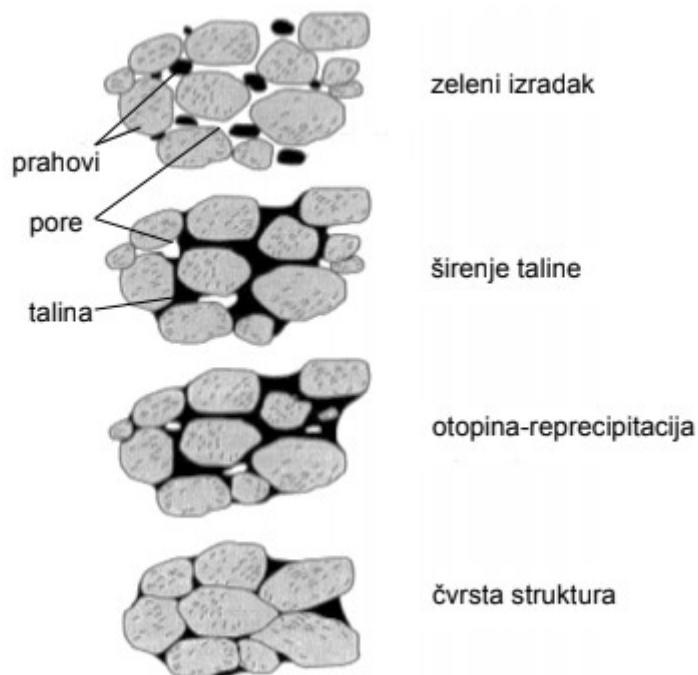
Sinteriranje se može obavljati pomoću dva mehanizma; sinteriranje u čvrstom stanju i sinteriranje u rastaljenoj fazi. Odabir postupka sinteriranja značajno utječe na konačna svojstva gotovog proizvoda.

Sinteriranje u čvrstom stanju karakterizira jaka difuzija u krutom stanju koja doprinosi zgušnjavanju. Čestice praha se povezuju formiranjem vrata na mjestu dodira te raste kontaktna površina između zrna i zgušnjavaju se otvorene pore, slika 7. Difuzijskim gibanjem atoma u oba smjera formiraju se granice zrna čime dolazi do maksimalno mogućeg očvršnuća.



Slika 7 Sinteriranje u čvrstom stanju [6]

Sinteriranje u rastaljenoj fazi je najrašireniji postupak koji karakterizira veća brzina zgušnjavanja zbog pojačane difuzije u rastaljenoj fazi. Nakon taljenja jednog od konstituenata rastaljena faza kapilarnim djelovanjem struji u pore, a kapilarne sile privlače čestice što rezultira brzim skupljanjem, slika 8. Daljnje zgušnjavanje se ostvaruje redistribucijom malih čestica među velikima. Tijekom faze otopina – reprecipitacija dodatno se zgušnjava, zbog nedovoljno rastaljene faze koja ispunjava sve pore, čime se mijenja oblik i veličina čestica što u konačnici rezultira porastom gustoće. U ovoj fazi otapaju se mala zrna i reprecipitaciju u veća. Konačnu fazu sinteriranja karakterizira vrlo sporo zgušnjavanje kao posljedica formiranja čvrste strukture. [6]

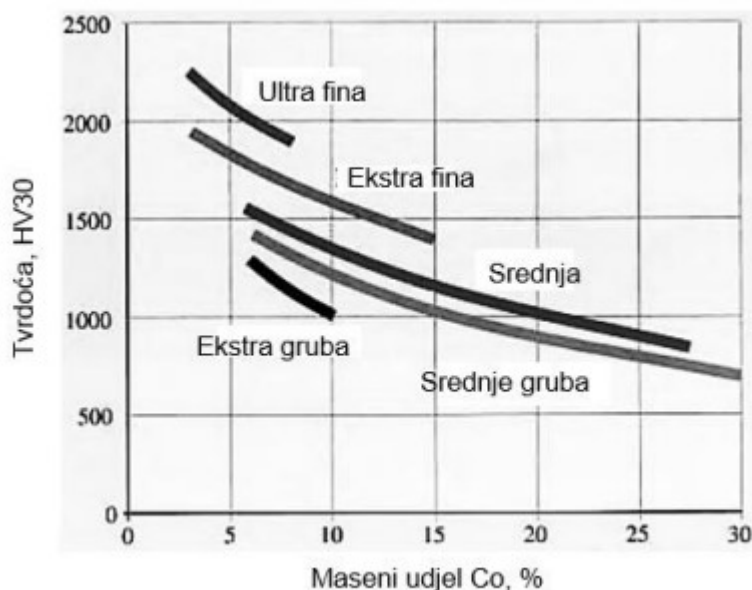


Slika 8 Faze sinteriranja u rastaljenoj fazi [6]

2.2 Mehanička svojstva tvrdog metala

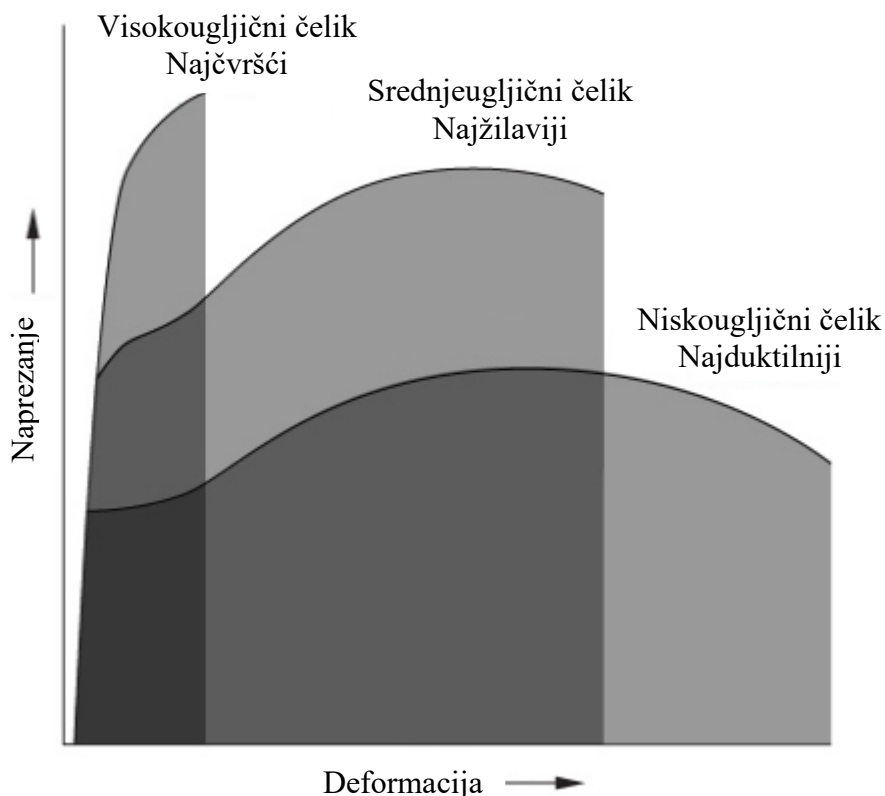
Na primjeru ranije spomenutog volframovog karbida proizlaze izrazito dobra svojstva tvrdometalnih izradaka. Oni imaju visoku čvrstoću i tvrdoću, nekoliko puta veću od nelegiranog čelika. Zbog visoke tvrdoće i čvrstoće tvrdi metali su izrazito otporni na trošenje, ali i postojani prema koroziji i otporni na visoke temperature. Volframov karbid je do 100 puta otporniji na trošenje od čelika u uvjetima abrazije i erozije. Pored svega toga, najbitnije obilježje tvrdih metala za primjene u obliku reznih alata je izrazito velika tvrdoća i relativno povoljna žilavost što nije moguće postići kod drugih materijala. [7]

Tvrdoća metala, keramike i nekih polimera se općenito definira kao otpornost materijala na lokalnu plastičnu (nepovratnu) deformaciju odnosno otpornost prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg tijela. Za elastomere i neke druge polimere, tvrdoća se definira kao otpornost na elastičnu deformaciju na površini materijala. Nedostatak konkretne definicije za sve materijale pokazuje da tvrdoća nije jednoznačno definirano svojstvo nego ovisi o granici razvlačenja, temperaturi, hladnoj obradi, vlačnoj čvrstoći, modulu elastičnosti i o drugim faktorima. Kod tvrdih metala bitan utjecaj na tvrdoću ima sadržaj kobalta te veličina WC zrna, slika 9 [8].



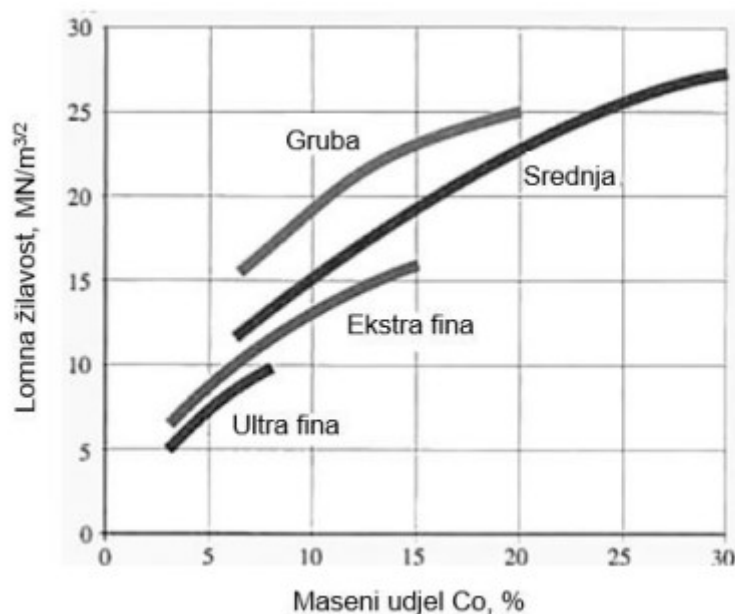
Slika 9 Utjecaj kobalta na tvrdoću tvrdog metala za različite veličine WC zrna [6]

Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom apsorbira što veću energiju prije loma. Još se može opisati kao i sposobnost odupiranja krhkom lomu. Žilavost materijala međuostalim ovisi i o njegovoj duktilnosti koja također određuje sposobnost materijala da se odupre značajnoj plastičnoj deformaciji prije pucanja i izražava se postotnim produljenjem ili postotnim smanjenjem površine presjeka kod ispitivanja razvlačenjem. No ako je materijal samo duktilan to ne mora značiti i da je žilav. Na žilavost utječe i čvrstoća materijala. U pravilu materijali niske čvrstoće i tvrdoće pokazuju visoku duktilnost i žilavost, dok su visokočvrsti materijali relativno krhki, male duktilnosti i niske žilavosti. Jedan od načina mjerenja žilavosti u uvjetima statičkog opterećenja je proračunavanje površine ispod krivulje u dijagramu naprezanja – istezanje, slika 10.



Slika 10 Dijagram naprezanje – istežanje za čelike različitih udjela ugljika [9]

Lomna žilavost opisuje ponašanje materijala, pod djelovanjem opterećenja, koji već sadrži neku pukotinu ili mikrostrukturnu pogrešku i pokazuje koliko je naprežanje potrebno da postojeća pukotina počine nestabilno propagirati u materijalu. Greška može biti u obliku pukotine, provrta, metalurških uključaka, diskontinuiteta konstrukcije i greška nastalih tijekom strojne obrade ili oblikovanja plastičnim deformiranjem. Budući da je nemoguće napraviti idelan materijal idealne građe, uvijek se može očekivati postojanje većih ili manjih grešaka u njegovoj strukturi. Mjera za njihov utjecaj je lomna žilavost materijala koja predstavlja kritičnu vrijednost faktora intenzivnosti naprežanja pri kojoj dolazi do nadkritičnog širenja pukotine u uvjetima ravninskog stanja deformacije. Lomna žilavost je veličina koja ovisi o naprežanju, veličini pukotine i geometriji konstrukcije kao i vrsti materijala odnosno njegovoj mikrostrukтури i kemijskom sastavu. Kao i kod tvrdoće, lomna žilavost tvrdog metala također je ovisna o udjelu kobalta te veličini zrna volframovog karbida, slika 11. [10]



Slika 11 Utjecaj kobalta na lomnu žilavost tvrdog metala za različite veličine WC zrna [6]

2.3 Područje primjene

Tvrđi metali zbog svoje velike tvrdoće i relativno dobre žilavosti služe za obradbu metala, kamena, plastike i drva. Rabe se u širokom rasponu, od praha za brušenje i poliranje do kompaktnih materijala od kojih se izrađuje alat za tokarenje, bušenje, rezanje navoja, skidanje strugotine, blanjanje i dr. Pločica od tvrdoga metala može se zalemiti na nosač tokarskog alata, ali se uglavnom rabe izmjenjive rezne pločice koje se mehanički pričvršćuju na držač alata. One mogu biti okruglog oblika, trokutaste, romboidne, kvadratne i sl., a njihove se oštrice mogu okretanjem redom dovoditi u radni položaj nakon što se prethodna oštrica istroši. Tvrđi metali se primjenjuju u izradi reznih pločica za tokarske noževa, glodala, svrdla, za oštrice rezača, strugača i sl. Osim toga, tvrdim metalom se oblažu mehanički i toplinski izrazito opterećena mjesta i dijelovi strojeva kao što su ventilska sjedišta ili se od njega izrađuju prsteni na pločicama za izvlačenje, sapnice za pijesak ili sačmu, matrice za preše i sl. [11] Zahvaljujući navedenom tvrdi metali danas nalaze primjenu u velikom broju industrijskih grana kao što je obrada metala, rudarstvo, metalurgija, građevina, industrija naftne i plina, zrakoplovna, vojna, automobilska i pomorska industrija te drvni sektor. [12] Tvrđi metali od kojih se izrađuju rezne pločice dijele se u nekoliko skupina ovisno o vrsti obrađivanog materijala, tablica 1.

Tablica 1 Klasifikacija tvrdih metala prema ISO 513:2012 [6]

tvrdi metali skupine P	prikladni za obradu materijala s dugom strugotinom
tvrdi metali skupine M	prikladni za obradu korozijski postojanih čelika
tvrdi metali skupine K	prikladni za obradu materijala s kratkom strugotinom poput ljevova na bazi željeza, porculana, kamena, drva i polimernih materijala
tvrdi metali skupine N	prikladni za obradu Al i Mg legura, keramike
tvrdi metali skupine S	prikladni za obradu superlegura, titana i njegovih legura
tvrdi metali skupine H	prikladni za obradu tvrdih materijala

3. MEHANIZMI TROŠENJA REZNIH ALATA OD TVRDIH METALA

Trošenje je progresivan gubitak materijala s površine čvrstog tijela zbog dinamičkog dodira s drugim tijelom, fluidom ili česticama. Trošenje je razlog smanjenja radnog vijeka i umanjenih performansi stroja i strojnih dijelova poput velikih postrojenja i malih elektronskih dijelova. Oštećenja kao rezultat trošenja materijala imaju dvostruki efekt:

- Prvo, gubitak materijala, kao rezultat dinamičnog dodira s drugim tijelom, smanjuje dimenzije komponente koja se troši. To često vodi do povećane zračnosti između pokretnih dijelova što dovodi do povećanih vibracija, povećane buke, smanjenja efikasnosti i u konačnici do zastoja i kvara sistema. Ako se radi o promjenjivom cikličkom opterećenju, smanjene dimenzije komponente mogu dovesti i do loma zbog umora materijala čije posljedice mogu biti katastrofalne.
- Drugo, materijal koji je odvojen s trošene površine, poznat kao krhotina ili strugotina, također je štetan. Može uzrokovati zagađenje kod postrojenja za proizvodnju hrane i pića. Također može djelovati kao abraziv koji se nalazi unutar kontaktne površine i uzrokuje povećanu stopu trošenja što rezultira umanjenim vijekom trajanja. Osim toga može blokirati ventile, cijevovode, uljne filtre ili blokirati električne komponente u kontaktu sa ostalim komponentama u sustavu što može spriječiti normalan rad sustava. Stoga trošenje materijala uzrokuje ogromne troškove i mnogo se ulaže u njegovom sprečavanju i to još od samih početka moderne industrije.

Postoje razni oblici trošenja u industriji i u našim svakodnevnim životima. Trošenje se može podijeliti na podmazano i nepodmazano, kritično i umjereno te na klizno, kotrljajuće i udarno trošenje. No ta podjela obuhvaća jedan ili više mehanizama trošenja poput abrazije, adhezije, umora, oksidacije i tribokorozije. Kako bi se riješio problem trošenja, potrebno je razumjeti mehanizme trošenja. Ako ga se ne može riješiti, promjena mehanizma trošenja može uveliko smanjiti stopu trošenju. Kod tvrdih metala koji se koristi za izradu reznog alata javljaju se sljedeći mehanizmi trošenja: adhezija, abrazija, umor površine, difuzija i oksidacija. [13]

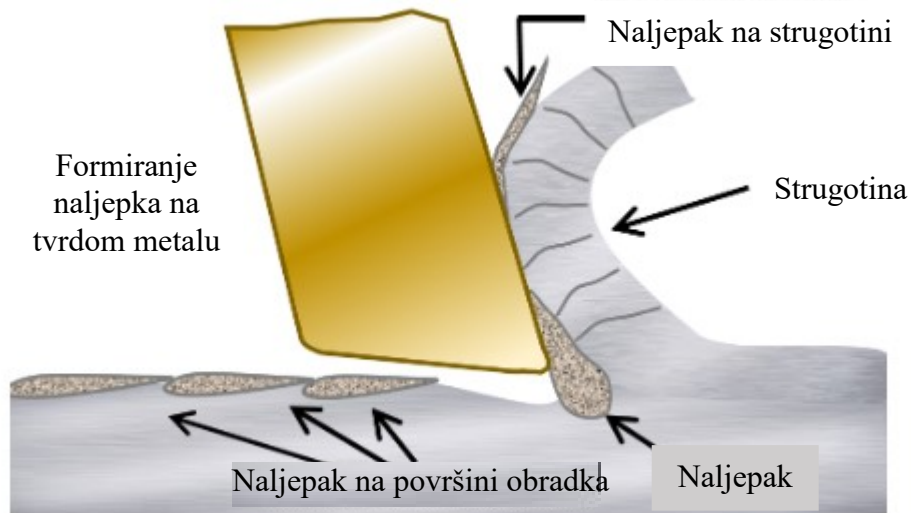
3.1 Adhezija

Adhezijsko trošenje nastupa kada su dva nominalno ravna čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, bez ili sa podmazivanjem, gdje je ključna adhezija (ili međusobno spajanje). Adhezija uslijed smicanja pojavljuje se na neravninama u kontaktu na međupovršini. Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine - izbočine smiču uslijed kontaktnog klizanja, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne površine i dodatnim "naljepljivanjem" na drugu površinu. Kako napreduje klizanje preneseni fragmenti mogu otpasti s površine na koju su "naljepljeni" i ponovo se prenjeti na originalnu površinu, ili se može formirati čestice trošenja.

Adhezijsko trošenje nastaje kao rezultat smicanja spojeva koji se formiraju pod djelovanje trenja (eng. *friction junction*). Adhezijski proces trošenja uključuje dakle stvaranje adhezijskih veza, njihov rast kao i prekid kada se prenosi materijal s jedne površine na drugu. Pri tome je važno ponoviti da je trošenje obično rezultat ne samo jednog mehanizma već kombinacije raznih mehanizama. [14]

3.1.1 Naljepak na tvrdom metalu

Od svega spomenutog, najbitnija pojava kod tvrdometalnih reznih alata je formiranje naljepka kao posljedica adhezijskog trošenja. Naljepak na tvrdoj površini (eng. *Built up edge*) je problem koji se javlja prilikom strojne obrade metala poput niskougljičnog čelika, nehrđajućeg čelika i aluminija. To je materijal sa radnog komada koji se nakuplja na reznoj površini alata, slika 12.



Slika 12 Formiranje naljepka na tvrdom metalu [15]

Naljepak mijenja geometriju reznog alata i kut rezanja. Materijal naljepka je hladno obrađen i abrazivan. Kada se dio naljepka odlomi sa reznog alata zalijepi se na površinu radnog komada i uzrokuje štetu. Veći naljepak će dovesti do grublje površine na radnom komadu. Sa naljepkom, rez zna biti dublji nego što bi bio sa normalni vrhom reznog alata. Svaki put kada se dio naljepka odlijepi uklanja dio reznog alata. To dovodi do preuranjenog trošenja alata.

Kako bi se izbjeglo formiranje naljepka na tvrdom metalu, mogu se poduzeti sljedeće mjere:

- povećati brzinu rezanja ukoliko se koriste rezne pločice od tvrdog metala; Kad se reže visokim brzinama, vrijeme potrebno za adheziju će biti manje što će rezultirati manjom šansom stvaranja naljepka.
- smanjiti brzinu rezanja kad se koriste rezni alati od brzoreznog čelika; Manja brzina rezanja će rezultirati manjom toplinom, a time i manjim nakupljanjem materijala.
- smanjiti trenje pravilnim odabirom lubrikanta za rezanje; Smanjeno trenje će rezultirati manjom toplinom i time opet manjim nakupljanjem materijala.
- povećati kut rezanja materijala,
- ostvariti plići rez na materijalu. [15]

3.2 Abrazija

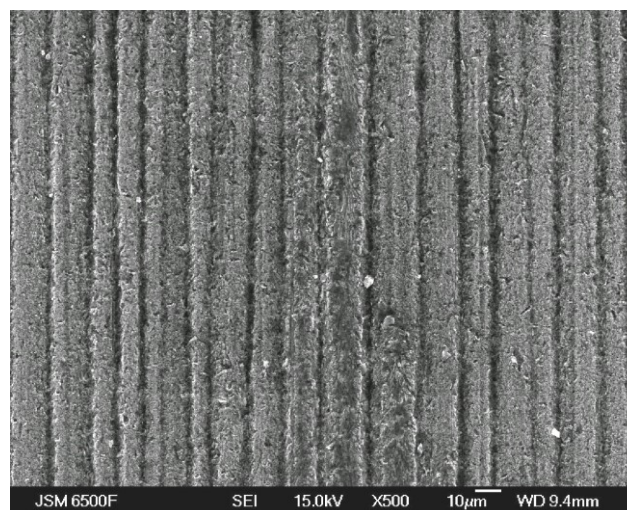
Abrazijsko trošenje nastaje kada neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice klize po mekšoj površini i oštećuju površinu pomoću plastične deformacije ili loma. Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama.

Mehanizmi adhezijskog i abrazijskog trošenja djelotvorni su za vrijeme direktnog fizičkog kontakta između dviju površina. Ako su površine odvojene kapljevitim filmom (isključene su abrazijske čestice) ti mehanizmi trošenja su smanjeni ili u potpunosti eliminirani.

Kod abrazijskog trošenja u većini situacija dolazi do grebanja i opažaju se brazde na mekšoj površini, koje se vide kao serije utora-žljebova paralelnih sa smjerom klizanja. [14]

Kod abrazije razlikujemo dvije vrste mehanizma: abrazija dvaju tijela i abrazija sa tri tijela.

Kod abrazijskog trošenja dvaju tijela tvrdi materijal je zaglavljen na mekšoj površini što dovodi do brazdanja te površine. Primjer tog trošenja je brusni papir koji sa svojim zrnima uklanja materijal s druge površine, slika 13.



Slika 13 SEM slika trošene površine kod abrazije dvaju tijela [16]

Kod abrazijskog trošenja sa tri tijela prisutno je slobodno kretanje abrazivnih čestica i to dovodi do mnogo udubljenja kad su tvrde čestice utisnute na površinu drugog materijala, slika 14. [16]



Slika 14 SEM slika trošene površine kod abrazijske sa tri tijela [16]

3.3 Umor površine

Umor površine uočen je za vrijeme cikličkih promjena napreznja: ponovljenog kotrljanja odnosno ponovljenog klizanja. Ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja kojima se materijal podvrgava mogu izazvati stvaranje potpovršine ili površinskih pukotina, koje na kraju, nakon kritičnog broja ciklusa, mogu rezultirati u prekidu površine i stvaranju velikih fragmenata, ostavljajući za sobom velike jamice. Prije te kritične točke trošenje je zanemarivo, što je suprotno od mehanizama adhezijskog ili abrazijskog trošenja, gdje intezitet trošenja postupno raste.

Količina materijala koja se ukloni trošenjem umorom površine nije korisni parametar za procjenu ovog mehanizma, već je relevantniji faktor broj ciklusa ili vrijeme do pojave rupica na površini uslijed cikličkog kotrljanja ili klizanja.

Mehanizam zamora očituje se na međupovršini. Površine u kontaktu doživljavaju velika napreznja koja se prenose na međupovršinu s time da se maksimalna tlačna napreznja javljaju na samoj površini dok su smične napreznja maksimalnog inteziteta ispod površine.

Kemijski potpomognute deformacije i lom rezultiraju u porastu trošenja površinskih slojeva u statičkim i dinamičkim uvjetima kotrljanja i klizanja. Kemijski potpomognut rast pukotina, koji se javlja najčešće kod keramika, uobičajeno se naziva statički zamor. U prisustvu dodatnih vlačnih naprezanja i vodene pare dolazi do brzog pucanja veza između atoma na lomnoj površini što rezultira brzim, nestabilnim širenjem pukotine, a time i većim intenzitetom trošenja mehanizmom umora.

Vrijeme do stvaranja podpovršinskih pukotina ovisi o amplitudi smičnih naprezanja, uvjetima podmazivanja međupovršine, i svojstvima materijala koji se klizu ili kotrljaju jedan po drugome. Male pukotine postepeno se povećavaju i izbijaju na površinu čime se stvara čestica trošenja koja iza sebe ostavlja rupicu na trošenoj površini. [14]

3.4 Difuzija

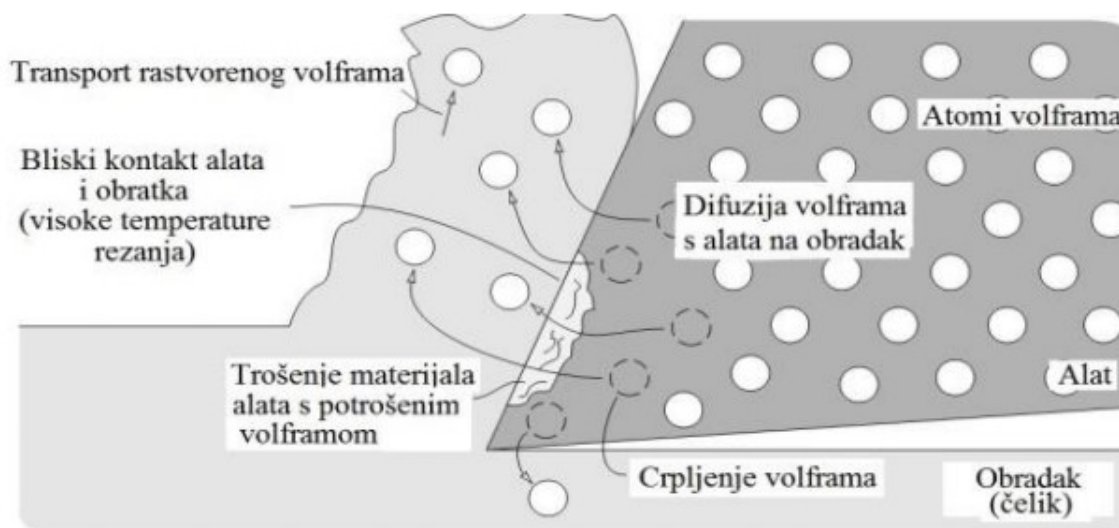
Prijenos tvari u plinovima, kapljevinama i čvrstim tvarima; nastaje zbog razlike u koncentracijama koje se spontanim toplinskim gibanjem čestica izjednačuju. Za razliku od plinova i kapljevine, gdje toplinsko gibanje čestica uzrokuje međusobno miješanje dviju ili više tvari, u čvrstim tvarima atomi i ioni difuzijom mijenjaju mjesta u kristalnoj rešetki.

Difuzija je najbrža u plinovima, sporija u kapljevinama, a najsporija u čvrstim tvarima. Brzina difuzije neke tvari u danom smjeru proporcionalna je njezinu koncentracijskom gradijentu, a općenito se povećava s porastom temperature i vremena (čestice se brže gibaju) i smanjuje s porastom gustoće tvari. Kapljevine različitih molekularnih masa koje se međusobno mogu miješati difundirat će jedna u drugu. Ioni ili molekule čvrstih tvari otopljenih u otapalu difundirat će dok se ne postigne njihova jednolika koncentracija u otopini.

Dva metala u dodiru pokazuju malu ali jasnu tendenciju međusobne difuzije. Difuzija je vrlo važna za odvijanje mnogih bioloških i kemijskih reakcija. Brzina kemijske reakcije često je određena brzinom difuzije reagirajućih čestica, posebno u reakcijama čvrstih tvari. Na difuziji se temelje i mnoge tehnološke operacije, proizvodnja elektroničkih elemenata u mikroelektronici i poluvodičkoj tehnici, modificiranje svojstava površinskih slojeva u metalurgiji, stvaranje legura od čistih metala i sl. [17]

Difuzija se može spriječiti nepropusnim slojem tantala, nikla i nikal – kroma. Prisutnost čestica koje mogu tvoriti razne spojeve u dodatnom materijalu također mogu smanjiti stopu difuznosti. Također se sa slojem filma može smanjiti stopa difuznosti. [18]

Na slici 15 prikazan je mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala.

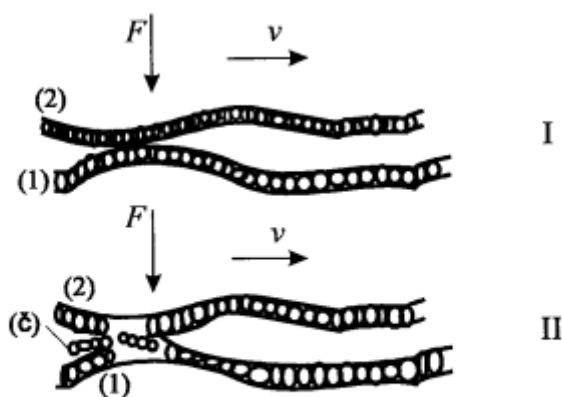


Slika 15 Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala [19]

Prilikom obrade čelika velikom brzinom rezanja, čime se razvijaju visoke temperature, može doći do međudifuzije između alata i radnog komada što rezultira stvaranjem kratera na površini samog alata. Krater na površini tvrdo-metalnog alata nastao je kao rezultat difuzijskog gibanja atoma volframa iz alata u obradak.

3.5 Oksidacija

Oksidacija (elektrokemijsko trošenje ili tribokorozija) je trošenje pod utjecajem visokih temperatura i kisika čime se na površini materijala formira krhki oksidni sloj. Njegovo razaranje i ponovno formiranje ima za posljedicu trošenje materijala, slika 16.



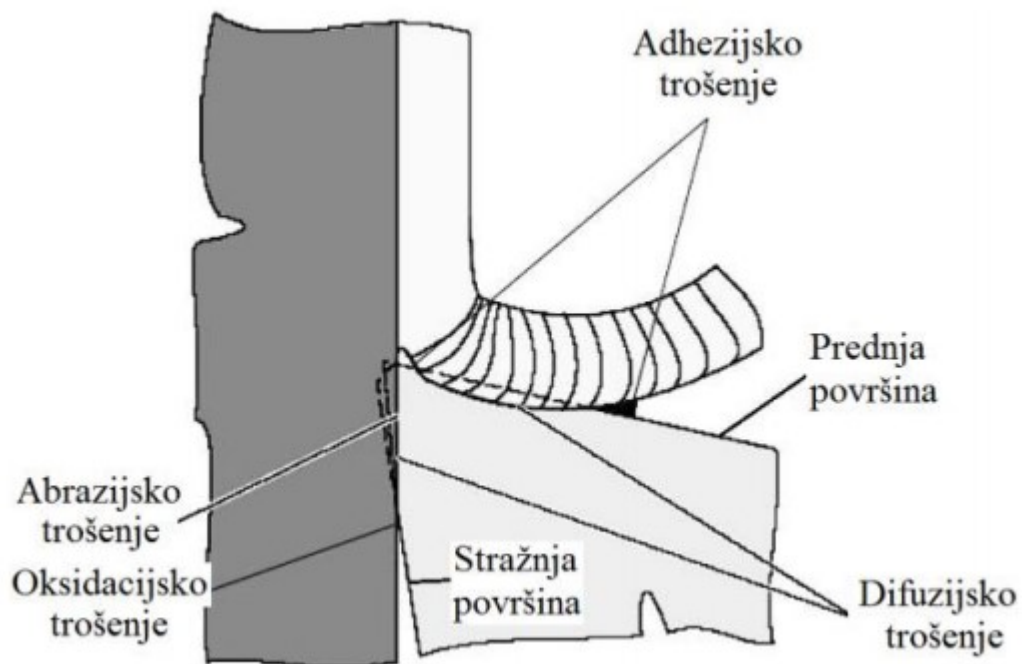
I - stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije
 II - mjestimično razaranje sloja produkata korozije

Slika 16 Jedinični događaj tribokorozije [14]

Sposobnost obrade alata se najviše smanjuje zbog trošenja stražnje površine pa se širina pojasa trošenja na stražnjoj površini često koristi kao kriterij trošenja. Kada širina pojasa trošenja dosegne kritične dimenzije potrebno je zamijeniti alat.

Niz faktora utječe na iznos trošenja kao što su parametri obrade, materijal obratka, sredstvo za hlađenje i podmazivanje, geometrija alata i materijal alata. Trošenje je intenzivno u početnom periodu obrade odvajanjem čestica. Kada se formira pojas trošenja određene širine, iznos trošenja se naglo smanjuje. Određen period vremena intenzitet trošenja je nizak sve dok ne počne naglo rasti. [19]

Na slici 17 prikazani su različiti mehanizmi trošenja na prednjoj i stražnjoj površini alata. Vidljivo je kako adhezijsko i difuzijsko trošenje nastupa na površini alata koja odvaja česticu obratka dok se abrazijsko i oksidacijsko trošenje javlja na stražnjoj površini alata.



Slika 17 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje [19]

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ADHEZIJSKOG TROŠENJA

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja u svrhu određivanja adhezijskog trošenja uzoraka tvrdog metala. Ispitivanje su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje adhezijskog trošenja je provedeno na tri uzorka tvrdog metala različitog sadržaja kolbalt: WC-5Co (5% Co), WC-10Co (10% Co) i WC-15Co (15% Co). Svaki od tih uzoraka je proizveden sinter/HIP postupkom metalurgije praha koji uključuje sinteriranje i toplo izostatsko pređanje u jednom cilusu primjenom visoke temperature i tlaka. Nakon miješanja čistih prahova volfram karbida i kobalta, smjesa prahova je komaptirana u uzorak određenog oblika (zeleni izradak). Zatim je sirovac sinter/HIP-an u zaštitnoj atmosferi inertnog plina pri temperaturi 1450 °C kako bi se dobio čvrsti tvrdometalni izradak, slika 18.



Slika 18 Uzorak tvrdog metala WC-5Co

Adhezijsko trošenje ispitano je metodom „prizma po prstenu“. Prsteni koji su se koristili za ispitivanje su vanjski prsteni igličastog ležaja oznake 1R30X35X17 napravljeni od čelika za ležajeve oznake 100Cr6. Tvrdoća ispitnog prstena mjerena je metodom po Vickersu uz opterećenje 1 x 9,81 N (metoda HV1).

4.1. Priprema za ispitivanje

Adhezijsko ispitivanje zahtjeva određene dimenzije uzorka te čistu, glatku i kvalitetnu površinu. Budući da su uzorci bili preveliki za ispitivanje metodom prizma po prstenu, svaki od tri uzorka prvo je izrezan na debljinu od 17 mm, slika 19. Kako bi rezultati bili valjani, ispitne površine uzoraka tvrdog metala morale su se metalografski pripremiti brušenjem i poliranjem.



Slika 19 Izrezani uzorka WC-15Co

Faze brušenja i poliranja jesu sljedeće:

1. brušenje površine pločicom MD-Piano 120 (dijamantni abraziv) uz vodeno hlađenje.
2. fino brušenje površine uzorka pločicom MD-Allegro (dijamantna pasta veličine zrna 9 μm) uz hlađenje vodom ili alkoholom.
3. fino brušenje površine pločicom MD-Largo (dijamantna pasta veličine zrna 3 μm) uz hlađenje vodom ili alkoholom.
4. poliranje površine pločicom MD-Dac (dijamantna pasta veličine zrna 3 μm) uz hlađenje vodom ili alkoholom.
5. završno poliranje površine uzorka pločicom MD-Chem (koloidna slikatna pasta).

Prsteni igličastog ležaja su prije ispitivanja umočeni u sredstvo za hlađenje i podmazivanje (emulzija). Emulzija se sastoji od vode i ulja, s većim udjelom ulja nego vode, slika 20. Te dvije komponente se ne miješaju i čestice vode se raspršuju po ulju.



Slika 20 Emulzija u plastičnoj boci

Kako samo ime govori ova emulzija se koristi za podmazivanje i hlađenje kod strojne obrade, što znači da bi trebala smanjiti trenje i trošenje između prstena i uzorka. Također će djelomično i hladiti prsten i uzorak tijekom ispitivanja i time spriječiti mikrostrukturne promjene u jednom i drugom materijalu i degradaciju njihovih svojstava. boce se ulijeva emulzija u posudicu. Na slici 21 prikazani su prsteni umočeni u posudicu punu emulzije i tako pohranjeno ostaju sve do početka ispitivanja.



Slika 21 Prsteni umočeni u emulziji

Adhezijsko trošenje ispitivano je metodom prizma po prstenu. Ispitni uzorak oblika prizme postavlja se u držač. Zatim se stavlja uteg određene mase koji preko poluge djeluje normalnom silom F_N na ispitni uzorak u kontaktu s rotirajućim prstenom. Prilikom trošenja površina u kontaktu mjeri se progib savojne opruge tijekom vibriranja uzrokovanog silom trenja. Ova metoda pri mjerenju koristi računalo, induktivni senzor II5917 tvrtke IFM, digitalni Wi-Fi osciloskop, metu s ticalom i napajanje senzora, slika 22. Vrtložne struje na meti, koja se približava i udaljuje zbog promjene induktiviteta zavojnice, uzrokuju vanjsko magnetsko polje koje uzrokuje promjene magnetskog polja unutar senzora što se na računalu obrađuje u svrhu izračuna sile trenja odnosno faktora trenja.



Slika 22 Uređaj za ispitivanje adhezijskog trošenja

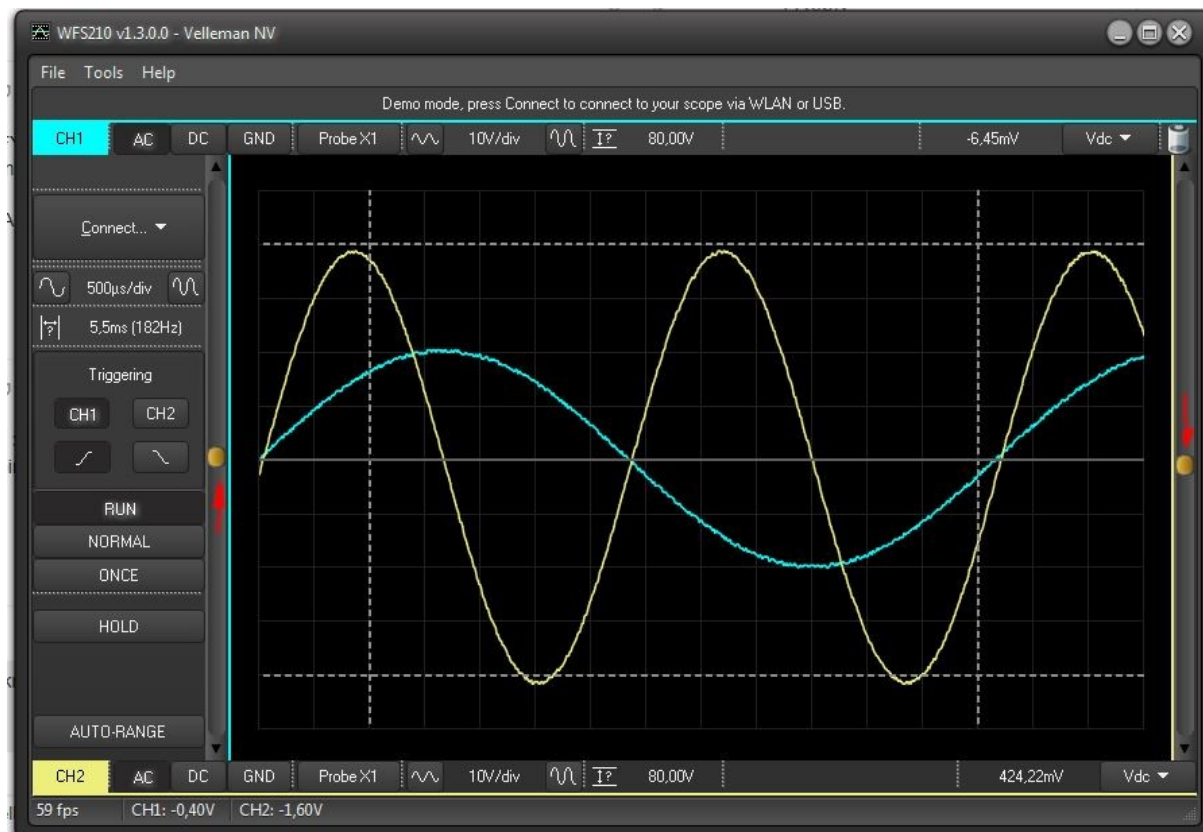
Prije otpočimanja ispitivanja potrebno je postaviti senzor i metu na uređaj za ispitivanje i povezati ih s računalom, napajanjem i digitalnim osciloskopom. Nakon povezivanja se pokreće računalni program WFS210 te se namještaju parametri ispitivanja. Pri ispitivanjima svih triju uzoraka korišteni su utezi mase 5 kg (slika 23) što je rezultiralo normalnom komponentom sile iznosa $F_N = 250$ N. Utezi ukupne mase 5 kg proizvode normalnu silu iznosa 50 N a budući da je krak omjera 5, dolazi se do navedenog iznosa normalne komponente sile od 250 N.



Slika 23 Utezi postavljeni na nosač

4.2. Ispitivanje adhezijskog trošenja

Faktor trenja se dobiva iz vrijednosti napona pomoću programa WFS210 (slika 24) koji se koristi za pohranu podataka o naponu unutar raspona od 0 do 10 V. Frekvencija mjerenja pri ispitivanju iznosila je 50 Hz što znači da je program bilježio napon svakih 0,02 sekunde. Ispitivanje je vremenski trajalo 30 sekundi tako da je za svaki uzorak snimljeno ukupno 1500 podataka o naponskom odzivu i pohranjeno u "Excel" datoteku. Svaki podatak o naponskom odzivu ima određenu udaljenost mete od senzora. Raspon u kojem senzor detektira podatke je od 0 do 10 mm te se za svaki milimetar napon mijenja za 1,111 V. Pomoću programskog paketa *Excel* i pohranjenih 1500 podataka, jednostavno se izračunavaju udaljenosti.



Slika 24 Sučelje programa WFS210 [20]

Za izračun udaljenosti mete koristi se sljedeća jednadžba:

$$S = \frac{U}{1,111} \quad (1)$$

gdje je:

- S – udaljenost mete od senzora [mm],
- U – napon [V],
- 1,111 –konstanta napona po jednom mm udaljenosti [V/mm].

Nakon izračunate udaljenosti za svaki iznos napona potrebno je pronaći maksimalnu udaljenost mete od senzora S_{max} jer je to zapravo referentni položaj za sva ostala mjerenja. Kada je udaljenost maksimalna tada je djelovanje mete na magnetsko poslije senzora najslabije pa je zbog toga napon najveći pri maksimalnoj udaljenosti. Kako bi se izračunala sila trenja potrebna za dobivanje faktora trenja potrebno je izračunati pomak korištenjem jednadžbe:

$$u = S_{max} - S_{trenutni} \quad (2)$$

gdje je:

- u – pomak [mm]
- S_{max} – maksimalna udaljenost mete od senzora [mm]
- $S_{trenutni}$ – trenutna udaljenost mete od senzora [mm]

Pomoću pomaka se izračuna sila trenja F_{tr} :

$$F_{tr} = u \cdot c + 0,0321 \quad (3)$$

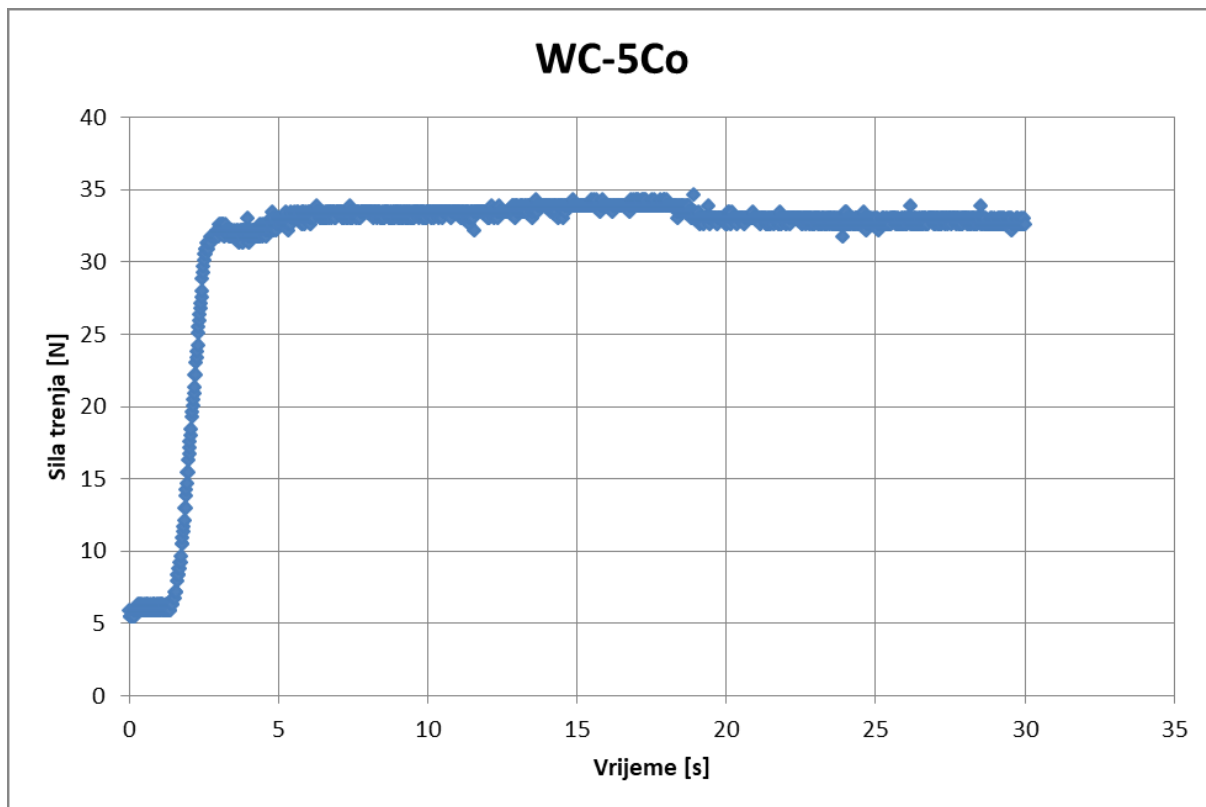
gdje je:

- F_{tr} – sila trenja [N]
- u – pomak [mm]
- c – konstanta opruge ($c = 5,7965$)

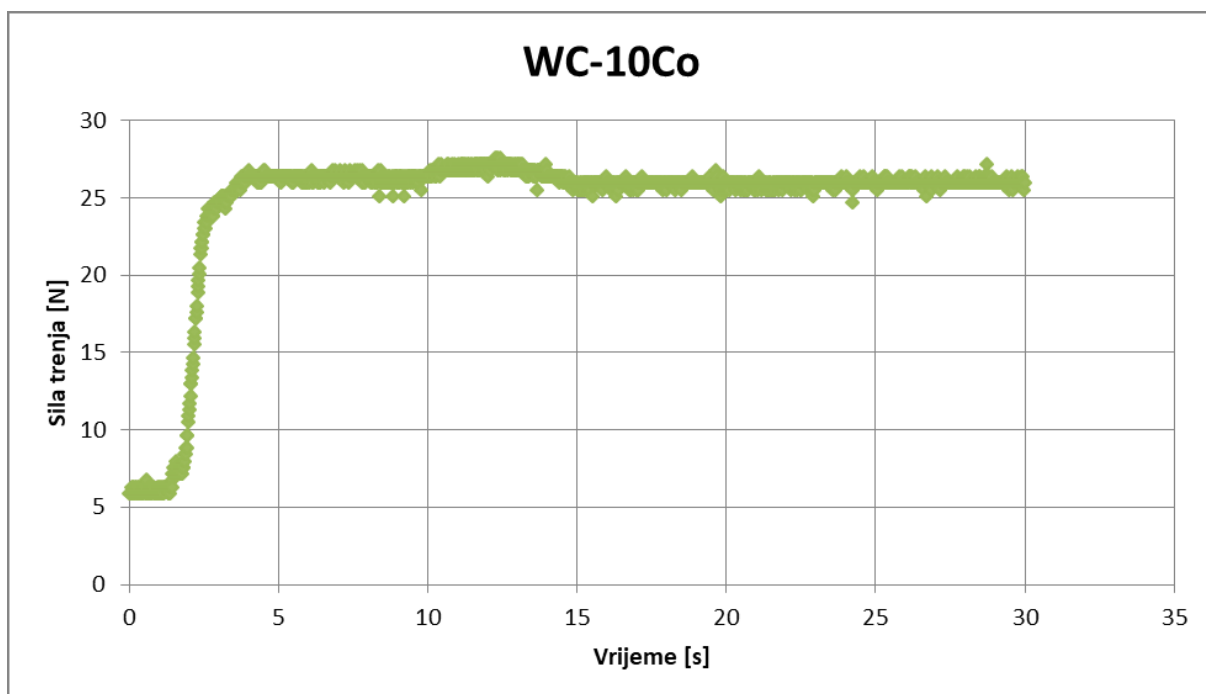
Faktor trenja μ se računa dijeljenjem sile trenja F_{tr} sa normalnom komponentom sile F_N :

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} \quad (4)$$

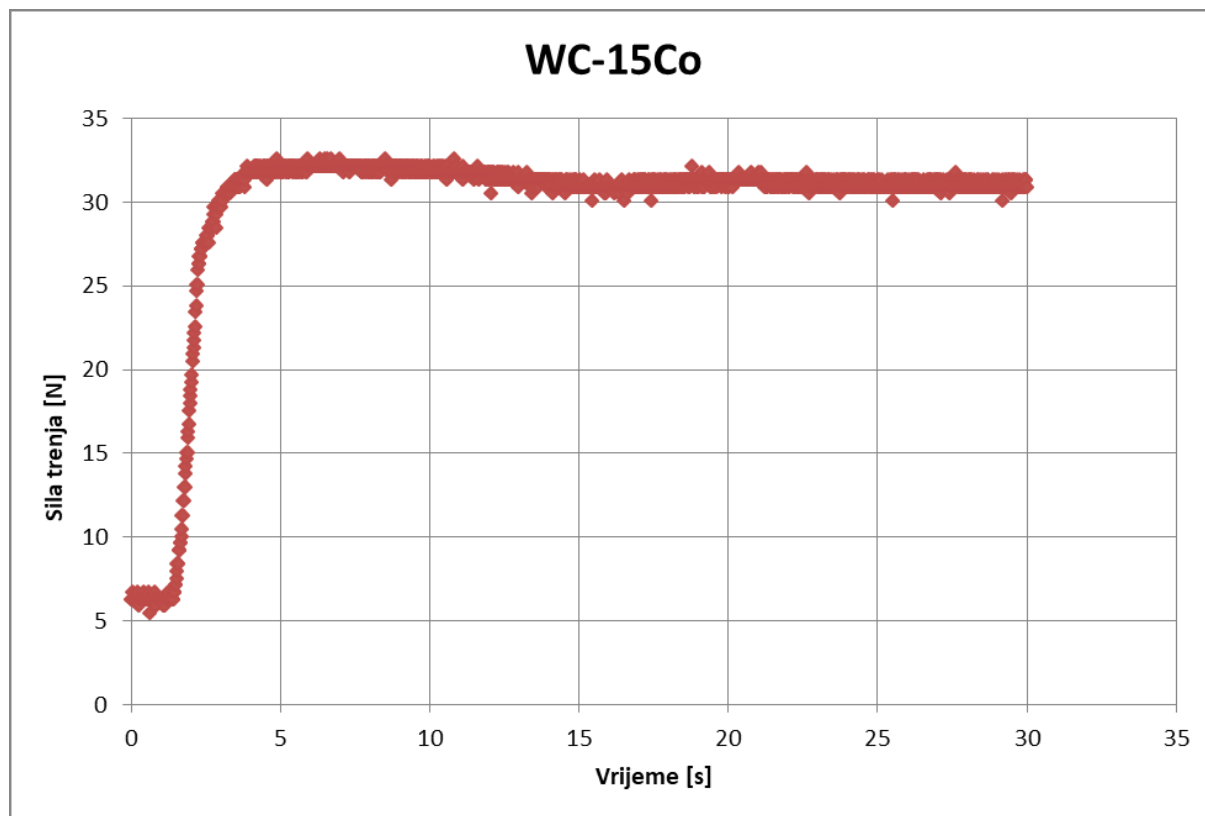
Dobiveni podaci o sili trenja i faktoru trenja grafički su predloženi na slikama koje slijede.



Slika 25 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-5Co



Slika 26 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-10Co



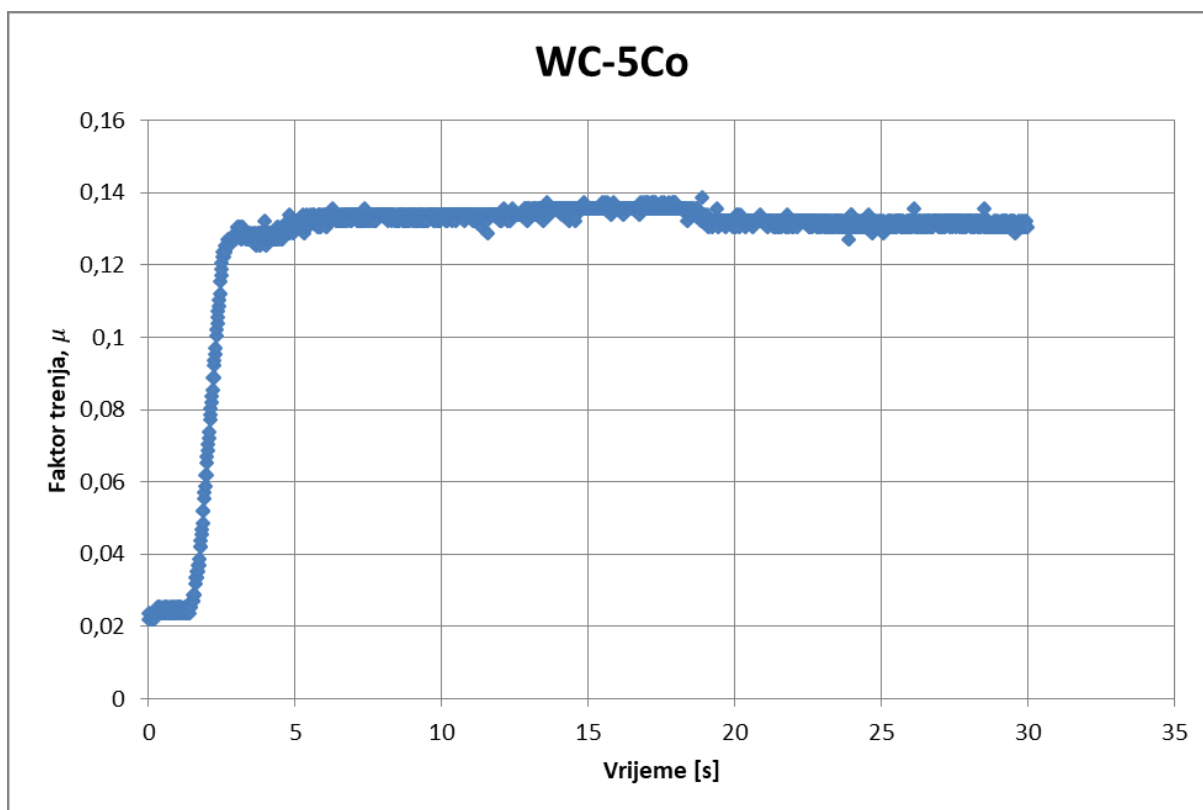
Slika 27 Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-15Co

Tablica 2 predočava statistički obrađene rezultate koji uključuju najmanji i najveći iznos sile trenja, njenu srednju vrijednost kao i standardno odstupanje za svaki od tri ispitivana uzorka.

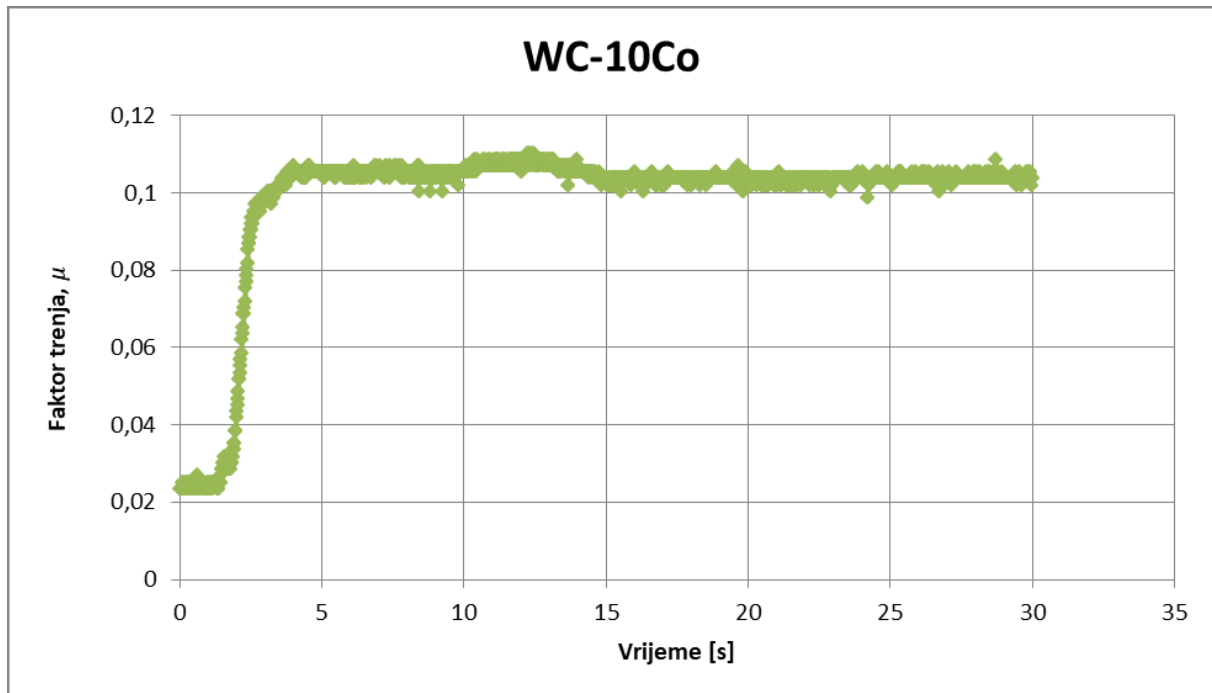
Tablica 2 Karakteristične vrijednosti sile trenja

Uzorak	WC-5Co	WC-10Co	WC-15Co
Minimalna sila trenja [N]	30,502	22,989	25,075
Maksimalna sila trenja [N]	34,675	27,580	32,589
Srednja vrijednost sile trenja [N]	33,121	26,073	31,292
Standardno odstupanje [N]	0,557	0,512	0,750

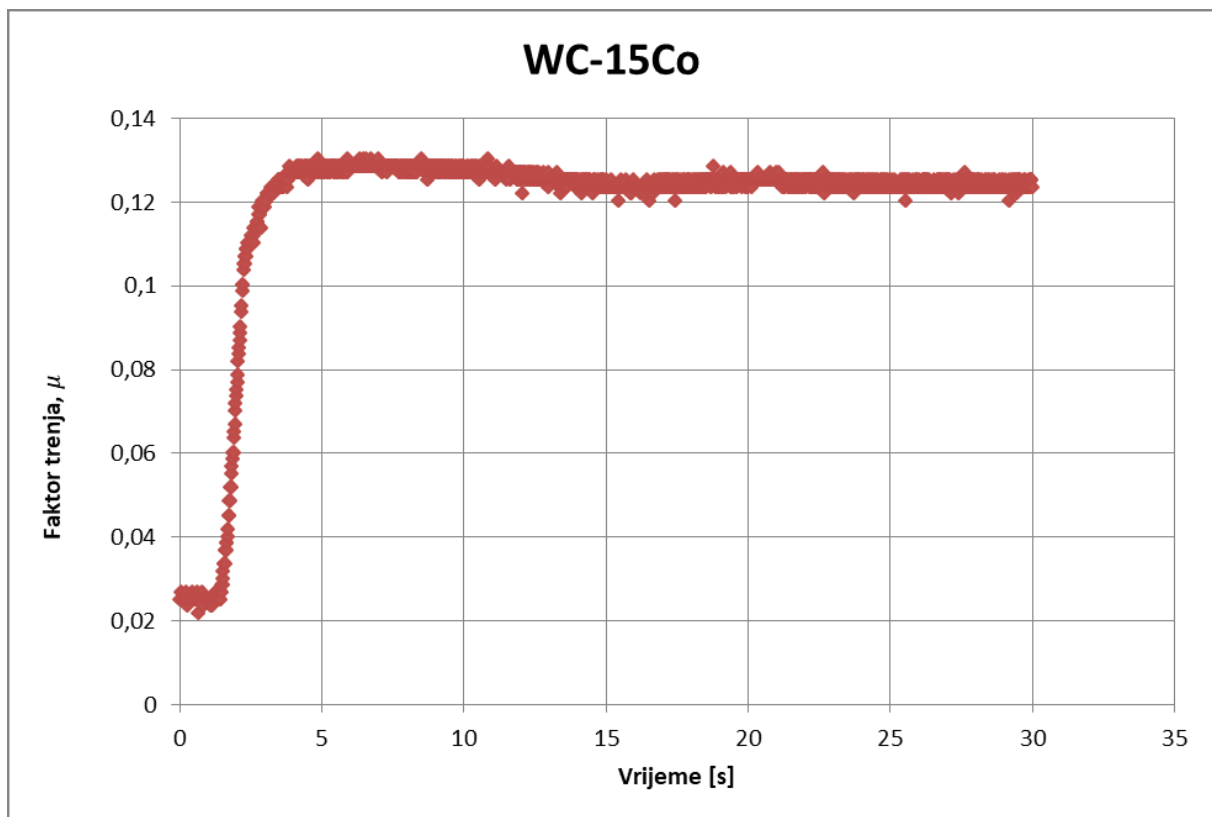
Iako bi sila trenja u pravilu trebala rasti s povećanjem udjela kobalta u tvrdo metalnom uzorku, očigledno to nije slučaj. Suprotno očekivanjima uzorak WC-5Co s 5% Co pokazuje najveću silu trenja dok je kod uzorka WC-10Co sila trenja najmanja. Uzorak s 15% Co (WC-15Co) karakterizira sila trenja koja je niža nego za uzorak WC-5Co, a viša od uzorka s 10% Co. To ukazuje na mogući utjecaj debljine sloja emulzije koja očito nije jednaka za sve uzorke kao i utjecaj rasporeda i veličine karbidne faze. Kod sva tri dijagrama je vidljivo da nakon postizanja maksimalne sile u prvih nekoliko sekundi u daljnjem tijeku ispitivanja sila trenja samo neznatno varira što ukazuje na konzistentno trošenje uzorka. To znači da se primjenom sredstva za hlađenje i podmazivanje može ostvariti jednoliko trošenje u uvjetima djelovanja adhezijskog mehanizma. Budući da je faktor trenja proporcionalan sili trenja, krivulje na dijagramima 28 do 30 koji slijede, kvalitativno su istog oblika, ali se odnose na promjenu faktora trenja.



Slika 28 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-5Co



Slika 29 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-10Co



Slika 30 Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-15Co

Karakteristične vrijednosti faktora trenja sažeto su prikazane tablicom 3.

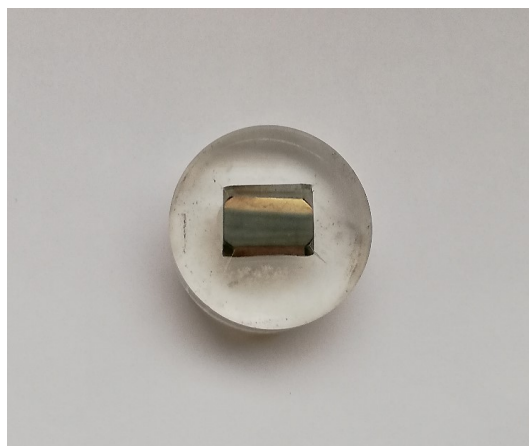
Tablica 3 Karakteristične vrijednosti faktora trenja

Uzorak	WC-5Co	WC-10Co	WC-15Co
Minimalni faktor trenja	0,122	0,092	0,100
Maksimalni faktor trenja	0,139	0,110	0,130
Srednja vrijednost faktora trenja	0,132	0,104	0,125
Standardno odstupanje	0,002	0,002	0,003

Kao što je već spomenuto promjena faktora trenja ovisno o sadržaju kobalta u tvrdometalnom uzorku istovjetna je promjeni sile trenja.

4.3. Metalografska priprema prstena

Nakon provedenih ispitivanja adhezijskog trošenja napravljena je karakterizacija ispitnog prstena. Za potrebe mjerenje tvrdoće izrezan je dio prstena i zaliven u polimernu masu, slika 31. Nakon toga pristupilo se metalografskoj pripremi koja se sastojala od brušenja i poliranja ispitne površine.



Slika 31 Uzorak prstena zaliven u polimernu masu

Faze metalografske pripreme površine jesu sljedeće:

1. brušenje površine brusnim papirom veličine zrna 320 μm , 500 μm , 1000 μm , 2400 μm i 4000 μm uz vodeno hlađenje i podmazivanje pri brzini od 300 okr/min,
2. poliranje površine dijamantnom pastom veličine zrna 3 μm uz hlađenje i podmazivanje lubrikantom pri brzini 150 okr/min,
3. poliranje površine SPM pastom veličine zrna 0,03 μm , uz nepromijenjeno hlađenje i podmazivanje pri istoj brzini od 150 okr/min.

Tvrdoća prstena izmjerena je na tvrdomjeru Indentec (slika 32) primjenom opterećenja 1 x 9,81N. Na tvrdomjeru se nalazi ispitni stolić vezan za vreteno. Okretanjem vretena stolić se podiže i tako približava uzorak vrhu indentora. Na tvrdomjeru se odabire željena metoda te se automatski, ovisno o odabranoj sili, stavljaju ili uklanjaju utezi. Operacija prodiranja indentora u površinu i njegovo uklanjanje je također potpuno automatizirano. Na tvrdomjeru se nalazi i optički mjerni mikroskop te se na njemu odmah mogu očitati duljine dijagonala otiska i izmjerena tvrdoća.



Slika 32 Tvrdomjer Indentec

4.4. Mjerenje tvrdoće prstena

Tvrdoća vanjskog prstena ležaja oznake 1R30X35X17 izmjerena je metodom HV1. Napravljeno je 5 otisaka na uzorku prstena te su na svakom otisku izmjerene dijagonale d_1 i d_2 . Budući da je sila utiskivanja samo 9,81 N otisci su jako mali. Povećanje optičkog sustava tvrdomjera je premalo da bi se dijagonale mogle izmjeriti sa zadovoljavajućom točnošću te su stoga one mjerene pri povećanju od 1000 puta na optičkom mikroskopu spojenom na računalo.

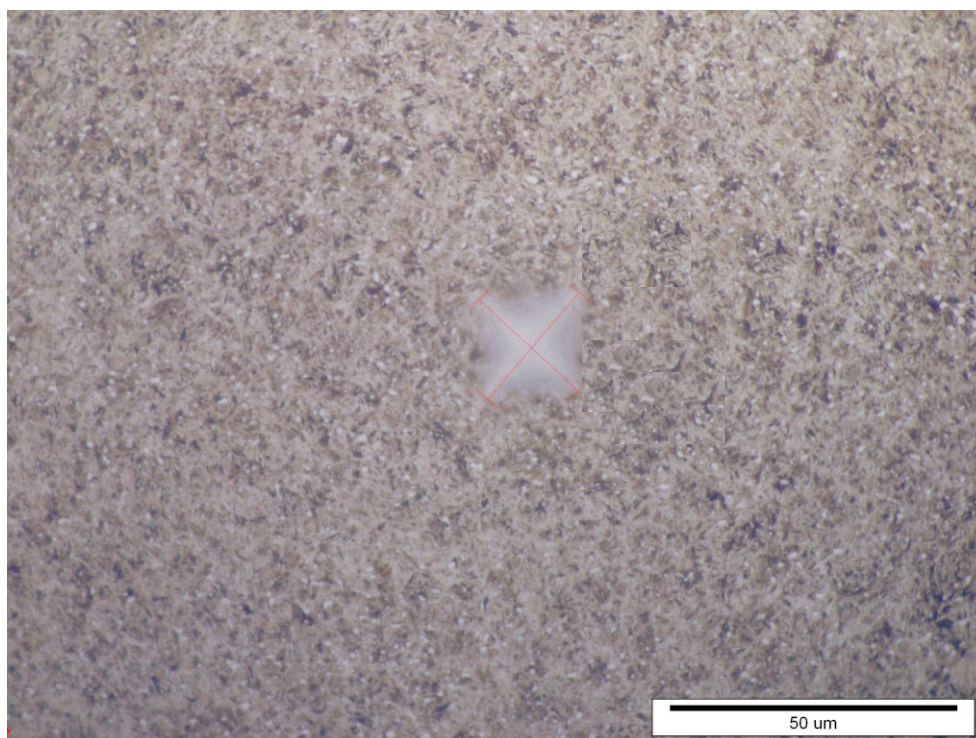
Vrijednosti tvrdoće po Vickersu (HV) računaju se primjenom sljedeće jednadžbe:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d_{sr}^2} \quad (5)$$

gdje je:

- F – sila utiskivanja [N]
- d_{sr} – srednja vrijednost dijagonala otiska [mm].

Na slici 33 prikazan je otisak nastao utiskivanjem Vickersove četverostrane dijamantne piramide. Slika prikazuje otisak pri povećanju od 1000 puta koji ima kvadratnu bazu, a zapravo se radi šupljoj piramidi utisnutoj u materijalu. U tablici 4 prikazane su vrijednosti izmjerenih dijagonala, srednje vrijednosti tih dijagonala te izračunate tvrdoće.

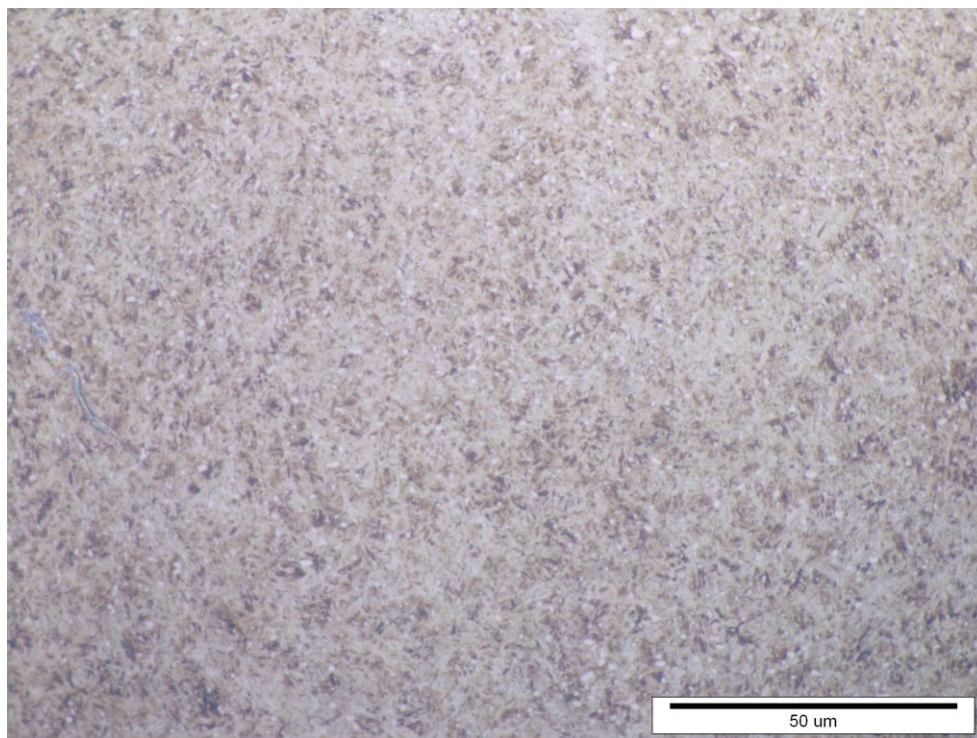


Slika 33 Otisak piramide Vickersovog indentora

Tablica 4 Rezultati mjerenja tvrdoće prstena

Broj otiska	d_1, mm	d_2, mm	d_{sr}, mm	F, N	HV1
1	0,0452	0,0457	0,0455	9,81	898
2	0,0459	0,0445	0,0452		908
3	0,0447	0,0453	0,0450		916
4	0,0456	0,0454	0,0455		896
5	0,0455	0,0451	0,0453		904
Srednja vrijednost	0,0454	0,0452	0,0453	9,81	904
Standardno odstupanje	0,0005	0,0005	0,0002	-	8,057

Na ispitnim prstenima nisu vidljivi nikakvi tragovi trošenja, slika 34. To je zbog toga jer je ispitivanje bilo vrlo kratko (30 sekundi) tako da nije ni moglo doći do formiranja izraženijih tragova trošenja.



Slika 34 Prikaz površine prstena

ZAKLJUČAK

Iz rezultata ispitivanja otpornosti tvrdih metala WC-5Co (5% kobalta), WC-10Co (10% kobalta) i WC-15Co (15% kobalta) na adhezijsko trošenje mogu se donjeti sljedeći zaključci:

- Modernizirana metoda „prizma po prstenu“, uz korištenje računala i senzora, je kvalitetna i vrlo precizna jer se za 30 sekundi očitava velika količina podataka, njih čak 1500. Pomoću ove metode se mogu uočiti i najmanje razlike između faktora trenja zabilježene tijekom ispitivanja.
- Primjenom sredstva za hlađenje i podmazivanje može se ostvariti jednoliko trošenje u uvjetima djelovanja adhezijskog mehanizma.
- Iako bi se porastom sadržaja kobalta u tvrdom metalu trebala smanjiti adhezijska otpornost i povećati intezitet trošenja adhezijskog trošenja rezultati ispitivanja nisu jednoznačni u tom pogledu. Uzorak WC-5Co s najmanjim udjelom kobalta (5% Co) pokazuje najveći faktor trenja dok je kod uzoraka s većim sadržajem kobalta (WC-10Co i WC-15Co) koeficijent trenja niži. Uzorak s 15% Co (WC-15Co) karakterizira faktor trenja koji je manji nego za uzorak WC-5Co, a viši od uzorka s 10% Co. To bi značilo da debljina emulzijskog sloja na svakom od tri ispitivana prstena nije bila jednaka odnosno da određenu ulogu svakako ima raspored i veličina karbidne faze.
- Nakon ispitivanja, na uzorcima tvrdog metala kao i na ispitnim prstenima koji su bili uronjeni u emulziju nisu pronađeni nikakvi vidljivi tragovi trošenja.

LITERATURA

- [1] "Tehnička enciklopedija", glavni urednik Hrvoje Požar, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [2] <http://www.ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/27/4.%20Rezni%20alati.pdf>, dostupno na dan 1.2.2020.
- [3] <http://www.alfatim.hr/proizvodni-program/tvrdi-metal/d6/>, dostupno na dan 1.2.2020.
- [4] Erik Oberg, Franklin D. Jones, Machinery's Handbook, 1996., str. 744
- [5] [https://machines4sale.com/de/News/1/33330/Sumitomo-Electric-Hardmetals-latest-developments-BNC2010-and-BNC2020-cubic-boron-nitride-\(CBN\)-inserts](https://machines4sale.com/de/News/1/33330/Sumitomo-Electric-Hardmetals-latest-developments-BNC2010-and-BNC2020-cubic-boron-nitride-(CBN)-inserts), dostupno na dan 2.2.2020.
- [6] D. Ćorić, Posebni metalni materijali – III dio, Fakultetski udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] Properties of Tungsten Carbide, 1328 Research Park Drive Dayton, Ohio 45432 USA
- [8] <http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Hardness.htm>, dostupno na dan 3.2.2020.
- [9] <http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Toughness.htm>, dostupno na dan 3.2. 2020.
- [10] <http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm>, dostupno na dan 3.2.2020.
- [11] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2009.
- [12] <https://enciklopedija.fandom.com/bs/wiki/Industrija>, dostupno na dan 3.2.2020.
- [13] C.X. Li: Wear and Wear Mechanism, The University of Birmingham, UK
- [14] V. Kovačević, S. Lučić Blagojević, M. Leskovac: Nastavni materijal „Inženjerstvo površina“, Zagreb, 2011.
- [15] <https://blog.miragemachines.com/metal-machining-insight-avoiding-built-up-edge>, dostupno na dan 4.2.2020.

- [16] <https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/facilities/360/nCATS>, dostupno na dan 4.2.2020.
- [17] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=15048>, dostupno na dan 5.2.2020.
- [18] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/diffusion-barrier>, dostupno na dan 5.2.2020.
- [19] Z. Dadić: Tribološki principi i mjere za smanjenje trošenja alata kod obrade odvajanjem čestica, International conference “Mechanical Technologies and Structural Materials”, Split, 2013
- [20] <https://forum.vellemanprojects.eu/t/wfs210-tested-and-this-product-has-issues-request-for-support-comment/27511/12>, dostupno na dan 9.2.2020.