

Otpornost na erozijsko trošenje plastično deformiranih Al legura

Lončarić, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:505758>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zvonimir Lončarić

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Zvonimir Lončarić

Zagreb, 2023. godina.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Suzani Jakovljević na izvanrednom mentorstvu, strpljenju i stručnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Najveće hvala mojoj obitelji i najdražim prijateljima koji su me podržavali tijekom cijelog studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Zvonimir Lončarić** JMBAG: 0035215405

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Otpornost na erozijsko trošenje plastično deformiranih Al legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Erosion resistance of plastic deformed Al alloys**

Opis zadatka:

Aluminijeve legure zbog svojih dobrih svojstava imaju sve širu primjenu u industriji. One se zbog poboljšavanja mehaničkih svojstava i zbog što bolje prilagodbe okolini u kojoj će biti primijenjene podvrgavaju različitim tehnologijama obrade. Erozijska česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice. U ovom radu treba ispitati uzorke aluminijskih legura s ciljem ispitivanja utjecaja tehnologije obrade na otpornost na erozijsko trošenje.

U ovom je radu potrebno:

- 1) Opisati tri stanja ispitivanih Al legura: (a) dobavno stanje - toplo valjani materijal, b) materijal oblikovan slobodnim kovanjem (sabijanjem) u hladnom stanju, stupanj deformacije 60% i c) materijal oblikovan postupkom kutne ekstruzije u hladnom stanju (značajna smična deformacija i tlačno naprezanje).
- 2) Opisati mehanizam erozije česticama.
- 3) Odrediti otpornost na erozijsko trošenje odabranih uzoraka u ovisnosti o dva različita kuta upada čestica.
- 4) Provesti prateća ispitivanja.
- 5) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predvideni datumi obrane:
4. svibnja 2023. 6. srpnja 2023. 17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	8
2. ALUMINIJ I NJEGOVA SVOJSTVA.....	9
2.1. Povijest aluminija.....	9
2.2. Prednosti aluminija kao tehničkog materijala	10
2.3. Kemijska i korozijska postojanost aluminija	10
2.4. Oblikovanje deformiranjem	11
2.5. Alumijske legure	11
3. TRIBOLOGIJA	12
3.1. Trošenje.....	13
3.1.1. Abrazija	13
3.1.2. Adhezijsko trošenje.....	14
3.1.3. Umor površine.....	15
3.1.4. Tribokorozija.....	16
3.2. Erozijska krutim česticama	17
3.2.1. Eksperimentalno određivanje otpornosti na eroziju česticama	20
4. VALJANJE.....	22
4.1. Valjanje aluminija i alumijskih legura	23
5. KOVANJE.....	24
5.1. Kovanje aluminija	27
6. ECAP postupak.....	28
6.1. Mikrostruktura nakon ECAP postupka	31
6.2. Mehanička svojstva nakon ECAP postupka.....	33
7. EKSPERIMENTALNI DIO	35
7.1. Ispitivanje erozijskog trošenja.....	35
7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	37
7.3. Rezultati ispitivanja trošenja erozijom.....	38
7.4. Izgled površine	40
7.4.1. Stanje površine uzoraka početnog (osnovnog stanja).....	40
7.4.2. Stanje površine uzoraka kovanog i ECAP postupka pri 200x uvećanja	42
8. ANALIZA REZULTATA	44
8.1. Tvrdoća.....	44
8.2. Erozijsko trošenje i promjena mase	44
8.3. Izgled površine	45
9. ZAKLJUČAK.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz čistog aluminijskog površinskog sloja	9
Slika 2. Prikaz aluminijskog oksidnog sloja	11
Slika 3. Jedinični događaj abrazije	13
Slika 4. Jedinični događaj adhezije	14
Slika 5. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice	15
Slika 6. Površina na koju su čestice spontano „navarene“	15
Slika 7. Jedinični događaj umora površine	15
Slika 8. Površina oštećena umorom	16
Slika 9. Površina oštećena umorom	16
Slika 10. Jedinični događaj tribokorozije	16
Slika 11. Inicijalni događaj erozije	17
Slika 12. Prikaz upada erozijske čestice i odnošenja čestice materijala	17
Slika 13. Prikaz brzine erozije u ovisnosti u kutu udara čestica	18
Slika 14. Prikaz odnosa odnošenog volumena aluminijskog i stakla sa kutom udara čestica	18
Slika 15. Odnos trošenja i kuta udara erozijskih čestica	18
Slika 16. Tri tipa oštećenja površine nastale erozijom	19
Slika 17. Izgled površine nakon erozijskog trošenja	20
Slika 18. Prikaz eksperimentalnih metoda određivanja otpornosti na trošenje erozijom	21
Slika 19. Raspored valjaka kod različitih vrsta valjanja: (a) dva valjka, (b) tri valjka, (c) četiri valjka, (d) složeni oblik	23
Slika 20. Prikaz ovisnosti naprežanja o istezanju uzoraka čistog aluminijskog s različitim stupnjevima redukcije debljine	24
Slika 21. Postupak sabijanja i raspodjela tvrdoće zbog nejednake deformacije usred trenja: A) velika deformacija, B) mala deformacija	25
Slika 22. Postupak iskivanja	25
Slika 23. Probijanje	25
Slika 24. A) Zasijecanje; B) savijanje	26
Slika 25. Shema ECAP postupka sa kvadratnim profilom obradka i kutom 90°	28
Slika 26. Prikaz smičnih ravnina obradka pri prolazu kroz kutni dio	29
Slika 27. Prikaz rotirajućeg kalupa i koraka a, b i c procesa	30
Slika 28. Prikaz bočne ekstruzije	30
Slika 29. Prikaz kalupa sa više prolaza	30
Slika 30. Rute ECAP postupka	31
Slika 31. Mikrostruktura polikristalnog aluminijskog nakon jednog prolaza ECAP-a i SAED uzorci	32
Slika 32. Prikaz orijentacije izduženja mikrostrukture u ovisnosti o broju prolaza	32
Slika 33. Prikaz svojstva 3004 aluminijske legure u hladno valjanom i ECAP stanju u ovisnosti o ekvivalentnom naprežanju i istezanju do pucanja	33
Slika 34. Prikaz čvrstoće u ovisnosti o istezanju bakra, ispitivano na 20 °C sa brzinom promjene naprežanja 10 ⁻³ s ⁻¹	34
Slika 35. Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja	35
Slika 36. Držac uzoraka i sapnica	36
Slika 37. Promjena mase nakon erozijskog trošenja pri kutu od 30 stupnjeva	38
Slika 38. Promjena mase uzoraka pri kutu od 90 stupnjeva	39
Slika 39. Prikaz brazdi (crvene linije) nastalih erozijskim trošenjem početnog stanja pri kutu od 30 stupnjeva	41

Slika 40. Prikaz područja „usnica“ (crveni krug) na uzorku početnog stanja pri kutu od 30 stupnjeva.....	41
Slika 41. Prikaz područja zaglađenosti (crveni kvadrat) površine na uzorku početnog stanja pri kutu od 90 stupnjeva	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz tvrdoće aluminija različitih čistoća u žarenom i hladno kovanom stanju ...	27
Tablica 2. Prikaz mehaničkih svojstava čistog aluminija u ovisnosti o broju prolaza ECAP-a	33
Tablica 3. Tvrdoća uzoraka (K – hladno kovano stanje, E - ECAP)	37
Tablica 4. Rezultati promjene mase uzoraka pri kutu od 30 stupnjeva.....	38
Tablica 5. Promjena mase uzoraka pri kutu od 90 stupnjeva.....	39
Tablica 6. SEM slike površina uzoraka; crvene linije – brazde, crveni krug – neravnine (valovitost), zeleni kvadrat - nepravilnosti.....	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m/ρ	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg}$	Specifična čvrstoća
FCC		engl. <i>Face centered cubic</i> ; plošno centrirana kubična
F_n	N	Normalna sila
F_t	N	Tangencijalna sila
ECAP		engl. <i>Equal Channel Angular Pressing</i> ; kutna ekstruzija
SAED		engl. <i>Selected area electron diffraction</i> ; elektronski ogib u odabranom području
YS	MPa	engl. <i>Yield strength</i> ; granica razvlačenja
UTS	MPa	engl. <i>Ultimate tensile strength</i> ; vlačna čvrstoća
EL	mm/mm	engl. <i>Elongation</i> ; istezljivost
HV _{SR}		Srednja tvrdoća po Vickersu
HV		Tvrdoća po Vickersu
Δm	g	Promjena mase

SAŽETAK

Aluminij i njegove legure nalaze mnoge primjene u strojarstvu zbog svojih prikladnih svojstava kao što su povoljna specifična čvrstoća i korozijska postojanost. Aluminij se podvrguje različitim tehnologijama obrade kako bi dobili bolja svojstva te prilagodili materijal okolišu u kojem će biti eksploatiran. Materijali u eksploataciji podvrgnuti su različitim vrstama trošenja, a jedno od njih je i erozijsko trošenje. U ovom radu ispitani su uzorci aluminija toplo valjanog, hladno kovanog i uzorci nastali kutnom ekstruzijom u uvjetima erozijskog trošenja te su na kraju izneseni zaključci.

Ključne riječi: aluminij, erozijsko trošenje, kutna ekstruzija, ECAP

SUMMARY

Aluminum and its alloys find many applications in mechanical engineering due to their suitable properties such as favorable specific strength and corrosion resistance. Aluminum is subjected to different processing technologies in order to obtain better properties and adapt the material to the environment in which it will be exploited. Materials in exploitation are subjected to different types of wear, one of which is erosion wear. In this paper, samples of hot-rolled, cold-forged aluminum and samples created by angular extrusion under conditions of erosion wear were tested, and conclusions were presented at the end.

Key words: aluminum, erosion wear, angular extrusion, ECAP

1. UVOD

Aluminij i njegove legure nalaze mnoge primjene u strojarstvu zbog svojih prikladnih svojstava kao što su povoljna specifična čvrstoća i korozijska postojanost. Legiranjem aluminija postižu se legure sa zahtijevanim svojstvima, a precipitacijskim očvršćenjem mogu se dobiti veće čvrstoće. Aluminij ima dobar estetski izgled, sive boje i metalnog izgleda te osjećaja lakoće zbog niske gustoće.

Aluminij se podvrguje različitim tehnologijama obrade kako bi dobili bolja svojstva te prilagodili materijal okolišu u kojem će biti eksploatiran. Jedan od postupaka je ECAP (eng. *Equal Channel Angular Pressing*) ili postupak kutne ekstruzije koji se temelji na prolazu materijala kroz kanal s definiranim kutom pod visokim tlačnim i smičnim naprezanjima kako bi se poboljšala mehanička svojstva materijala. Svojstva koja su rezultat ovog postupka su veća mehanička čvrstoća, veća tvrdoća i manja istežljivost.

Materijali u eksploataciji podvrgnuti su različitim vrstama trošenja, a jedno od njih je i erozijsko trošenje. Erozijsko trošenje događa se prilikom strujanja krutih čestica u struji fluida prilikom čega udaraju u površinu osnovnog materijala. Krute čestice udarcima u površinu odlamaju i odnose čestice osnovnog materijala zbog čega dolazi do smanjenja mase. Ovo trošenje može biti pogubno stoga je bitno obratiti pozornost prilikom odabira materijala u primjeni gdje je moguće erozijsko trošenje.

U ovom radu ispitani su uzorci aluminija toplo valjanog, hladno kovanog i uzorci nastali kutnom ekstruzijom u uvjetima erozijskog trošenja.

2. ALUMINIJ I NJEGOVA SVOJSTVA

Aluminij (Slika 1) je tehnički materijal kojeg karakterizira mala gustoća, korozijska postojanost i lijep izgled, zbog navedenih svojstava koristi se u tehničkim primjenama nelegiran. U prirodi se nalazi u obliku oksida i smjesa oksida iz kojih se izdvaja elektrolitskom ekstrakcijom, a zbog zahtjevnosti taj proces je skup. Zbog teškoće pročišćavanja trgovački aluminij je kvalitete oko 99,0 %, a specijalnim postupcima moguće je dobiti aluminij većih čistoća 99,99 % i više. Nelegiran se koristi zbog svojstva niske gustoće i korozijske postojanosti, a legiranjem je moguće poboljšati njegova svojstva. [1, 2].



Slika 1: Prikaz čistog aluminija [1]

2.1. Povijest aluminija

Prvi aluminij proizveo je danski kemičar H. C. Ørsted 1825., a primjenu je našao u proizvodnji žlica i vilica za bogate. Aluminijske žlice i vilice su tada prvo korištene na dvoru Napoleona III. dok su ostali koristili pribor od čistog zlata i srebra. Prvi aluminij je proizveden korištenjem metalnog kalija koji je snažno redukcijsko sredstvo. Ovaj proces je bio iznimno skup te su se u vrijeme 19. stoljeća zbog toga rijetko proizvodili proizvodi od aluminija. Prvi jeftin postupak za proizvodnju aluminija pojavljuje se 1886. godine kada su C. M. Hall i P. Héroult dodali kriolit (NaAlF_6) u glinicu (Al_2O_3) pri proizvodnji aluminija te tako snizili njeno talište. Smjesa glinice i kriolita se tali na $950\text{ }^\circ\text{C}$, a iz nje se dobiva aluminij elektrolitičkom redukcijom na katodnom dnu ili katodi. Razvojem ovog procesa uz Bayerov postupak za

proizvodnju glinice iz boksita (glavne rude za dobivanje aluminija) označava početak industrijske proizvodnje aluminija. Precipitacijskim očvršćivanjem koje se razvilo kasnije postiglo se dodatno povećanje čvrstoće aluminijskih legura [2].

2.2. Prednosti aluminija kao tehničkog materijala

Pri izboru materijala bitno je obratiti pažnju na sve specifičnosti materijala, a u tehničkim namjenama neke karakteristike su izuzetno važne kao što su gustoća, masa i otpornost na koroziju. Aluminij ima tri glavna specifična svojstva koja ga karakteriziraju pri određivanju primjene kao tehničkog materijala [2]:

1. Omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ) odnosno specifična čvrstoća je iznimno povoljan (1/3 gustoće čelika) pri uporabi konstrukcija s ograničenjem na masu, a osigurava se zadovoljavajuća čvrstoća. Zbog ovog svojstva aluminijske legure nalaze svoju primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji gdje je ovaj omjer iznimno važan.
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće je najbolji među svim metalima te se zbog njega sve manje koristi bakar.
3. Korozijska postojanost je relativno velika, a ima visok afinitet prema kisiku.

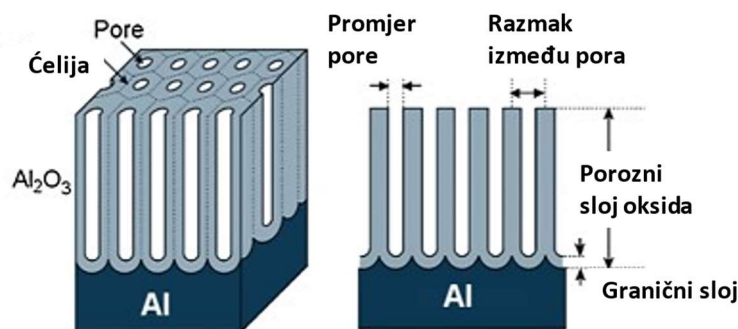
2.3. Kemijska i korozijska postojanost aluminija

Korozijska postojanost aluminija temelji se na stvaranju nepropusnog oksidnog sloja koji štiti korozivni medij od daljnjeg ulaska u materijal. Aluminij je otporan i na koncentriranu dušičnu kiselinu zbog debelog oksidnog sloja na površini, a ako se sloj ošteti on se daljnjim oksidiranjem obnavlja i sprječava daljnju koroziju [2].

Oksidni sloj kod aluminija reagira s lužinama te zbog toga nije prikladan za primjenu u lužnatim okruženjima. Mort i građevno vapno također oštećuju zaštitni sloj te je potrebno u tim slučajevima zaštititi dijelove rađene od aluminija nekom od opcija zaštitnih slojeva [2].

Nečistoće u aluminiju ili precipitati bakra i željeza imaju potencijal prouzročiti točkastu koroziju te se ona sprječava povećanjem čistoće aluminija i umjetnim stvaranjem neporoznog zaštitnog sloja. Oksidni sloj (Slika 2) koji nastaje prirodno na aluminiju debljine je oko 0,01 μm i pun je sitnih pora koje mogu biti nepovoljne pri utjecaju korozivnih medija. Postupcima fosfatiranja i kromiranja moguće je poboljšati kvalitetu prirodnog oksidnog sloja, a

anodizacijom – elektrokemijskom oksidacijom (tzv. eloksanje) moguće je umjetno podebljati oksidni sloj [2,3].



Slika 2. Prikaz aluminijevog oksidnog sloja [3]

2.4. Oblikovanje deformiranjem

Aluminij je izvanredno toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem zbog kubično plošno centrirane strukture (FCC). Postupcima prešanja moguće je dobiti profile složenih oblika, a valjanjem je moguće dobiti tanke limove do nekoliko mikrometara debljine što se koristi za pakiranje u prehrambenim industrijama. Aluminij za ove namjene mora biti nemetalnih uključaka i intermetalnih spojeva željeza i silicija. Uključci utječu i na površinu prilikom poliranja koju je kod aluminija moguće dovesti do visokog sjaja. Primarni aluminij je moguće upotrebljavati samo u gnječenom stanju, a čistoća i stupanj ugnječenosti utječu na konačna svojstva [2].

2.5. Aluminijske legure

Legiranjem se omogućavaju prilagodbe u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava. Mehanički se aluminijske legure gnječe i lijevaju, a njihova svojstva je moguće poboljšati precipitacijskim očvršćivanjem. Legirni elementi koji se koriste su: bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn), a nečistoće koje se mogu pronaći uglavnom su u manjim količinama i to su: željezo (Fe), krom (Cr) i titanij (Ti). Legirni elementi poboljšavaju osnovna svojstva legure, a neke od njih su čvrstoća, tvrdoća, omogućavanje toplinskog očvršćivanja, modificiranje veličine zrna, utjecaj na mehaničku obradu itd. [2].

3. TRIBOLOGIJA

Tribologija je znanost koja se bavi površinama u dodiru i relativnom gibanju te bavi se i o pratećim aktivnostima tih procesa. Naziv tribologija potječe od grčkog *τριβος*, čije je značenje trenje, trošenje i slično. Temelji prirodnih mehaničkih sustava su gibanja čvrstih tijela u međusobnom kontaktu te su temelji na kojima današnji i budući sustavi funkcioniraju.

Tribologija nalazi primjenu u svim područjima kao što su strojarstvo, transport, energetika, medicina, prehrambena industrija itd. U svim sustavima u kojima se nalazi relativno gibanje površina moguća je pojava trošenja iz kojeg eventualno dolazi do gubitka materijala. Jedna od temeljnih zadaća tribologije je da proučava i nalazi rješenja za smanjenje ili eliminaciju procesa trošenja koje u nekim slučajevima dovodi do potpunog kvara sustava [4].

Glavna područja u kojima tribologija nalazi svoju primjenu su: mehaničke konstrukcije (zupčanici, ležajevi, klizni elementi), materijali (metali, polimeri, keramika), obrada materijala (sredstva za hlađenje i podmazivanje, alatni materijali) i podmazivanje (ulja, masti, aditivi) [5]. U realnoj primjeni javlja se potreba za pronalaskom boljih rješenja za smanjenje trenja i trošenja, a razlozi zbog kojih se oni sve više proučavaju su [5]:

- Produžetak vijeka trajanja sustava
- Povećanje efikasnosti sustava
- Smanjenje troškova održavanja
- Smanjenje troškova zastoja
- Veća pouzdanost
- Veća sigurnost
- Očuvanje izvora materijala
- Očuvanje energije i smanjenje otpada

Tribološke mjere koje se primjenjuju kako bi osigurali prihvatljive mjere trenja i trošenja dijele se na [5]:

1. Izbor materijala i triboelemenata
2. Zaštita površina od trošenja
3. Uhodavanje
4. Podmazivanje

3.1. Trošenje

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutoga tijela zbog dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [5].

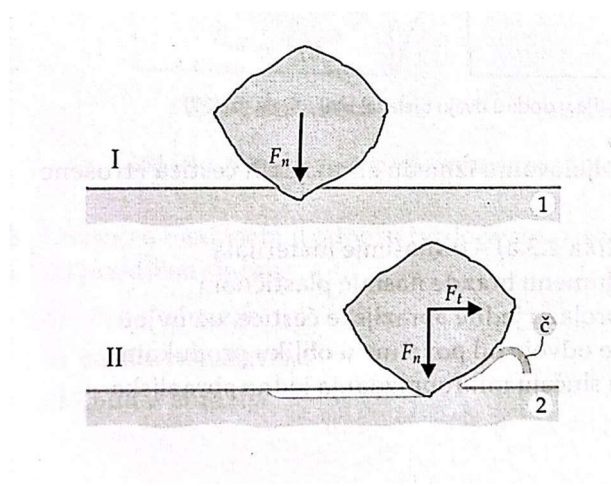
Trošenje je u relativnim sustavima gotovo uvijek kombinacija više vrsta trošenja, a većina autora se slaže da se mogu podijeliti na četiri osnovna mehanizma:

1. Abrazija
2. Adhezijsko trošenje
3. Umor površine
4. Tribokorozija

Mehanizmi trošenja se opisuju inicijalnim događajima koji uzrokuju zbivanja kod kojih prvotno dolazi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine, a zovu se jedinični događaji. Oni uglavnom uključuju proces nastajanja pukotina i njihovo napredovanje [5].

3.1.1. Abrazija

Abrazija je trošenje koje nastaje udarom tvrdih čestica ili izbočina u trošenu površinu pri čemu se iz nje istiskuje materijal. Ovo trošenje se opisuje kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice s dvije faze jediničnoga događaja. Na slici 3 prikazan je jedinični događaj abrazije [5].



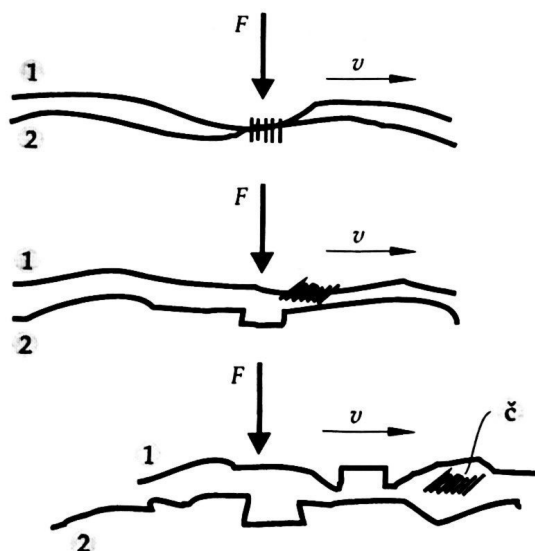
Slika 3. Jedinični događaj abrazije [5]

Jedinični događaj abrazije može se podijeliti u dvije faze [5]:

1. Faza – prodiranje abraziva u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne sile komponentne opterećenja F_n
2. Faza istiskivanja materijala u obliku čestica (č) pod utjecajem tangencijalne sile komponente opterećenja F_t

3.1.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje nastaje u dodiru dvije klizne plohe u relativnom gibanju, a materijal prelazi s jedne plohe na drugu zbog procesa mikrozavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije prikazan je na slici 4 [5].

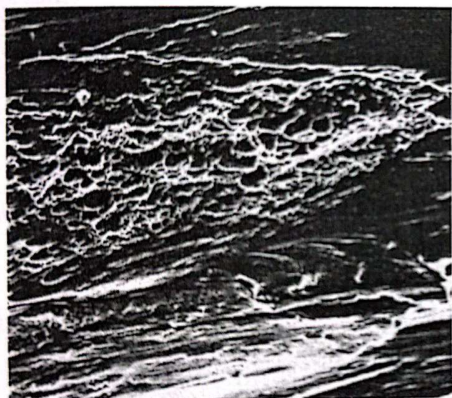


Slika 4. Jedinični događaj adhezije [5]

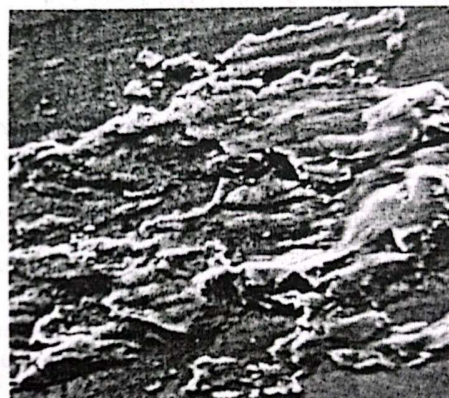
Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze [5]:

1. Na mjestu dodira izbočina zbog sila dodira različitih jakosti nastaje adhezijski spoj.
2. Adhezijski spoj se kida zbog relativnog gibanja površina, a čestica trošenja ostaje na jednom članu kliznog para.
3. Otkidanje čestice nakon određenog vremena, a oblik čestica je uglavnom lističast.

Izgled površina nakon adhezijskog trošenja prikazane su na slikama 5 i 6.



Slika 5. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [5]

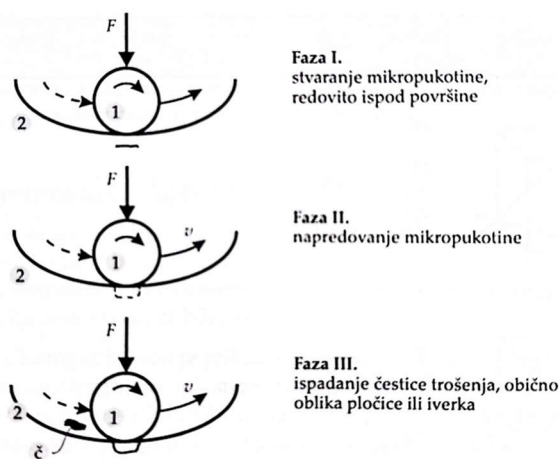


Slika 6. Površina na koju su čestice spontano „navarene“ [5]

3.1.3. Umor površine

Umor površine nastaje pri cikličnim promjenama naprezanja, a pri tome se odvajaju čestice s površine [5].

Umor površine prikazan je na Slici 7 u tri faze.



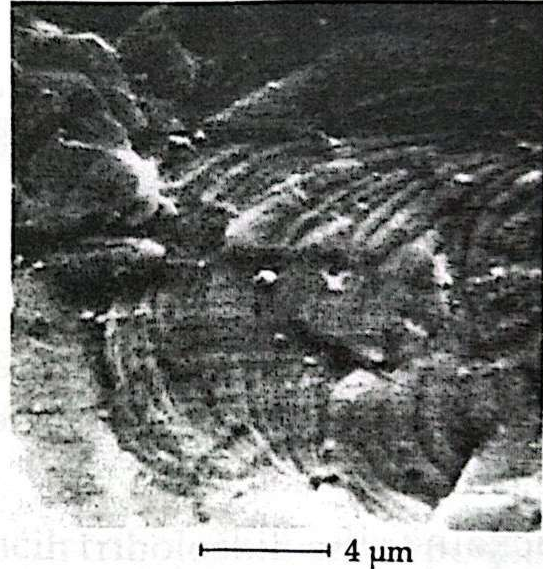
Slika 7. Jedinični događaj umora površine [5]

U prvoj fazi pod utjecajem tlaka koncentriranog dodira dolazi do najvećeg smičnog naprezanja te do pojave prvih mikropukotina ispod površine (nema odvajanja čestica). U drugoj fazi zbog daljnje prisutnosti naprezanja pri dodiru mikropukotine ispod površine izbijaju iznad, a produkt su sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi dolazi do odvajanja krupnijih čestica opisanih

kao oblik ivera, ostavljajući oštećenje oblika rupica [5]. Izgled površina nastalih umorom površine prikazan je na slikama 8 i 9 [5].



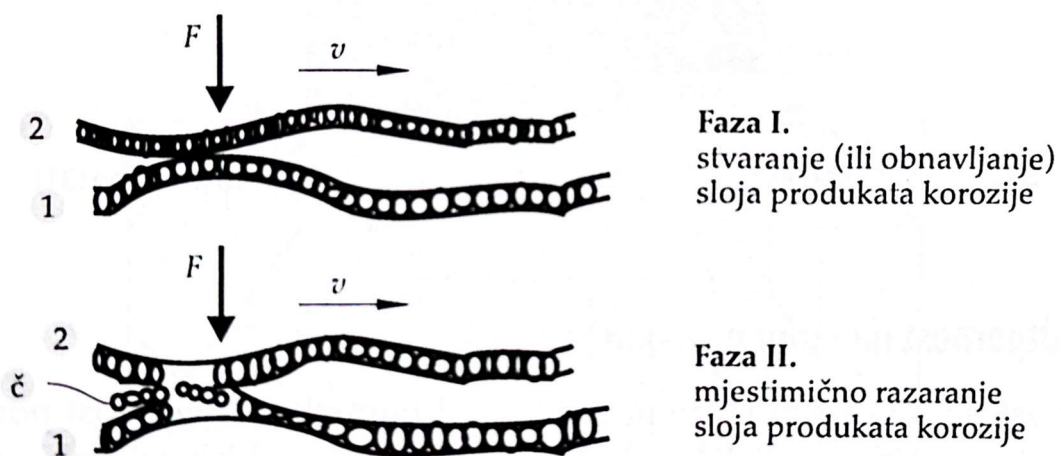
Slika 8. Površina oštećena umorom [4]



Slika 9. Površina oštećena umorom [4]

3.1.4. Tribokorozija

U uvjetima u kojima se odvijaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okoliše moguće je tribokemijsko trošenje ili tribokorozija. Ovo trošenje je moguće prikazati u dvije faze, a prikazane su na Slici 10 [5].

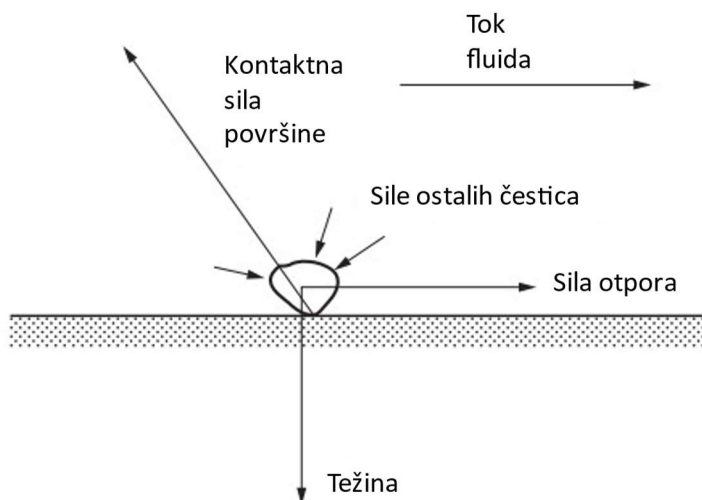


Slika 10. Jedinični događaj tribokorozije [5]

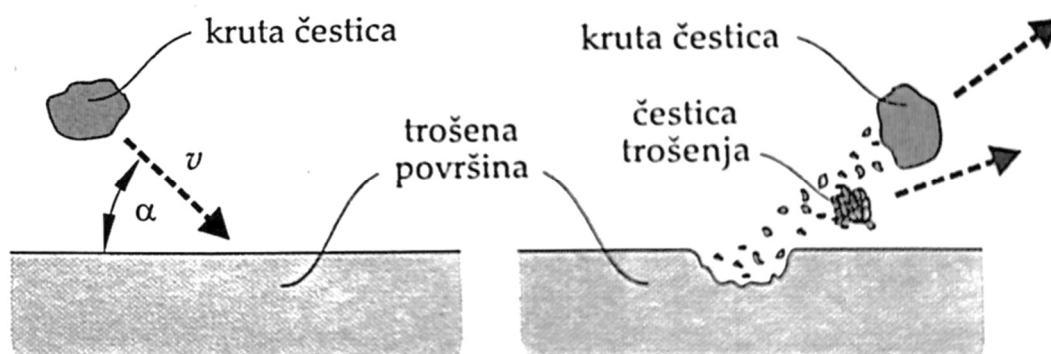
3.2. Erozija krutim česticama

Erozija krutim česticama je proces trošenja kada krute čestice udaraju u površinu drugog tijela pod određenim kutom. Količina odnošenog materijala ovisna je o normalnoj komponenti udarne sile čestica i o dužini puta na površini kojim se čestica kretala. Obujam trošenja ovisi o količini i masi erozivnog medija, a također o brzini udara i vrsti materijala erozivnog i trošenog tijela.

Inicijalni događaj erozijskog trošenja se opisuje kao udar tvrde čestice u površinu manje tvrdoće s normalnom komponentom sile [4]. Inicijalni događaj erozije prikazan je na Slici 11, a na slici 12 prikazan je kut upada erozijske čestice i prikaz odnošenja čestice materijala [4].



Slika 11. Inicijalni događaj erozije [4]

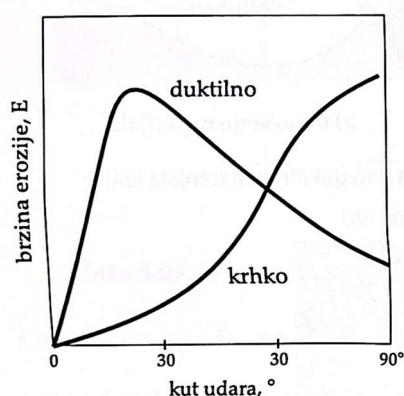


Slika 12. Prikaz upada erozijske čestice i odnošenja čestice materijala [5]

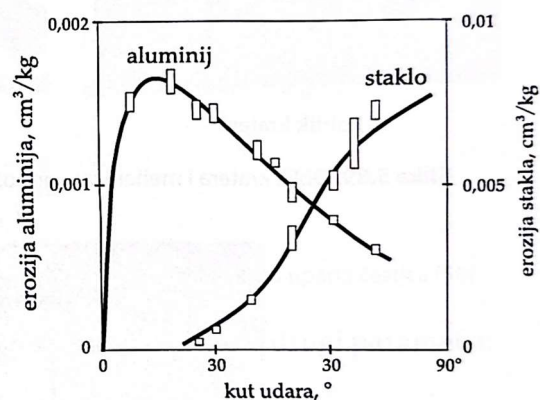
Upadom čestice na površinu pod određenim kutom i brzinom javljaju se kontaktne sile na trošenoj površini, a tako i reaktivne sile u čestici. Čestica ovisno o brzini, masi i kutu upada deformira površinu te razara površinu čime se otkidaju čestice materijala u obliku čestice trošenja. Pokazatelj otpornosti na trošenje je dinamička izdržljivost površine odnosno udio tvrdih faza i njihova tvrdoća ovisna o kutu upada čestica [4,5].

Kod malih kutova strujanja čestica prema površini govori se o abrazivnoj eroziji, a kada čestice struje gotovo pod pravim kutom govori se o udarnoj eroziji.

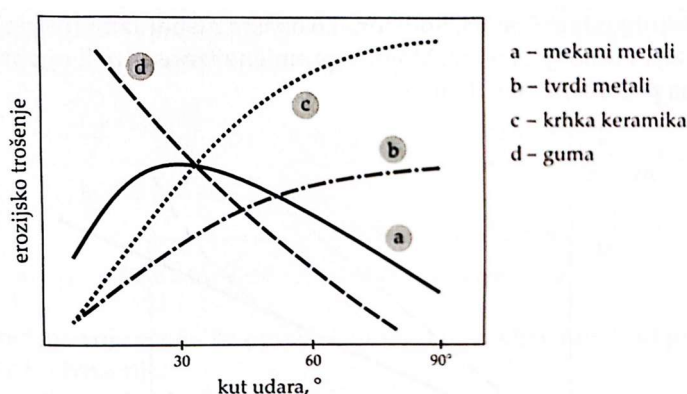
Kut između erodiranog materijala i trajektorije čestica erozije naziva se kut udara (kut upada čestica, α). Brzina erozije ovisna o kutu upada čestica znatno ovisi o vrsti erodiranog materijala. Duktilni materijali postižu najveći stupanj erozije pri manjim kutovima npr. 15° i 30° , a krhki materijali postižu najveći stupanj pri kutovima oko 90° [5]. Ovisnost brzine erozije i kuta udara prikazana je na Slikama 13, 14 i 15 [5].



Slika 13. Prikaz brzine erozije u ovisnosti u kutu udara čestica [5]



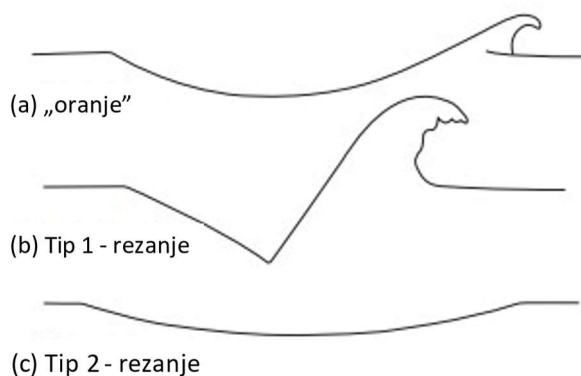
Slika 14. Prikaz odnosa odnošenog volumena aluminija i stakla sa kutom udara čestica [5]



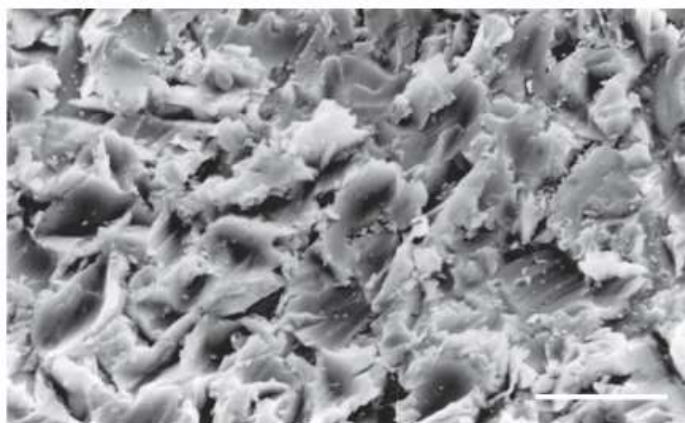
Slika 15. Odnos trošenja i kuta udara erozijskih čestica [5]

Na slici 13 vidljiv je porast brzine erozije krhkih materijala s povećanjem kuta udara, a kod duktilnih materijala brzina erozije s porastom kuta udara opada. Usporedivši realne materijale na slici 14 vidljiva je karakteristika duktilnih materijala aluminija prilikom erozijskog trošenja, a staklo se ponaša karakteristikom krhkih materijala. Slikom 15 prikazane su karakteristike prethodno navedenih materijala, a dodani su materijal elastomera (guma) i tvrdi metali koji prate prethodno iznesene tvrdnje. Pri procesu erozije znatno utječe elastičnost materijala koji zbog svojeg svojstva apsorpcije energije čestica elastičnom deformacijom odlično podnose udare. [5]

Promatrajući udar jedne čestice u metale pri kutu od 30° eksperimentalno su utvrđena tri osnovna tipa udarnog oštećenja površine. Prvi tip nastaje udarom čestica sferičnog oblika, a ostavlja trag sličnog oranju (eng. *ploughing*) pri čemu čestica gura materijal u stranu i ispred sebe vidljivo na slici 16 (a). Drugi tip oštećenja površine nastaje udarom čestice oštrog oblika s orijentacijom oštrog dijela prema površini. Na slici 16 (b) prikazan je oblik kada oštra čestica udari u površinu, rotira se pri čemu gura materijal ispred sebe i stvara oblik „usnice“. Treća vrsta nastaje kada se čestica rotira unazad i pri tome odlama višak materijala tzv. usnicu, prikazano na slici 16 (c) [4,5]. Izgled površine nakon erozijskog trošenja prikazan je na slici 17. Vidljiva je karakteristična „raščupanost“ površine.



Slika 16. Tri tipa oštećenja površine nastale erozijom [4]



Slika 17. Izgled površine nakon erozijskog trošenja [4]

Na otpornost eroziji česticama utječu brojni parametri:

1. Veličina erozijskih čestica
2. Brzina gibanja čestica
3. Oblik erozivnih čestica
4. Temperatura

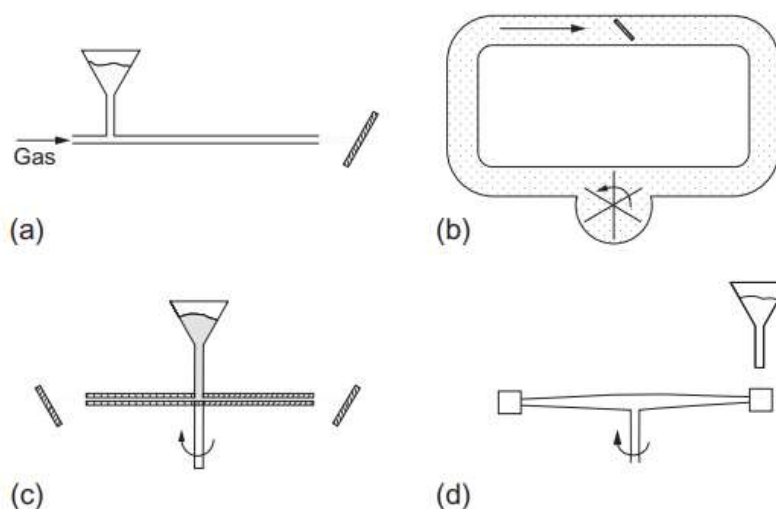
3.2.1. Eksperimentalno određivanje otpornosti na eroziju česticama

Eksperimentalno određivanje otpornosti na eroziju česticama se provodi kako bi se dobila informaciju o ponašanju materijala u sustavima u kojima se javlja erozijsko trošenje. Ove informacije pomažu opravdati teorijske modele trošenja te kako bi pomogli u daljnjem proučavanju mehanizama trošenja.

Otpornost na eroziju česticama moguće je ispitati eksperimentalno na 4 načina [4]:

- a) Metoda udara mlaza
- b) Metodom recirkulacijske petlje
- c) Metodom centrifugalnog akceleratora
- d) Metoda sa rotirajućim rukama

Eksperimentalne metode su prikazane na slici 18.



Slika 18. Prikaz eksperimentalnih metoda određivanja otpornosti na trošenje erozijom [4]

Metoda udarom mlaza prikazana na Slici 18 (a) bazira se na udaru mlaza erozijskih čestica nošenih strujom plina na površinu uzorka. Moguće je primjenjivati različite vrste dimenzija sapnica za pokus (1 mm do 50 mm promjera) pri čemu je moguće utjecati na širinu udarne površine. Mijenjanjem protoka plina utječe se na brzinu čestica, a udaljenosti između sapnice i uzorka regulira se sila i širina površine koja se ispituje. [4]

Metoda recirkulacijske petlje prikazana na Slici 18 (b) koristi se za analizu trošenja komponenata cijevi (kutni spojevi, ventili itd.) na način da erozijske čestice konstantno cirkuliraju kroz zatvorenu petlju cijevi. Cirkulacija se omogućuje pumpom koja osigurava konstantan protok erozijskog medija kroz cijevi. [4]

Metoda centrifugalnog akceleratora prikazana na Slici 18 (c) koristi kružno gibanje cijevi kroz koju se dovode erozijske čestice. Rotacija cijevi rezultira konstantnom strujom erozijskog medija koji udara u uzorak koji je postavljen na rubove putanje cijevi. [4]

Metoda s kružno rotirajućim rukama prikazana na Slici 18 (d) koristi rotiranje držača uzoraka koji udaraju u struju erozijskog medija. Struja erozijskih čestica slobodno pada pod utjecajem gravitacijske sile, a brzina se regulira ventilom. Uzorci su smješteni u dva držača pričvršćeni vijcima. Regulacijom kuta pada čestica moguće je ispitivati različite kutove udara čestica. [4]

4. VALJANJE

Jedan od načina obrade metala deformiranjem je valjanje. Valjanjem se početnom materijalu (ingotu ili poluproizvodu) propuštanjem kroz setove valjaka smanjuje presjek te se oblikuju u željeni oblik. Valjci zahvaćaju materijal te ga tjeraju kroz setove valjaka pri čemu nastaju tlačne i smične sile kojima je moguće poboljšati mehanička svojstva materijala (povećanje tvrdoće). Ovaj postupak se koristi za proizvodnju proizvoda u obliku profila, tračnica, cijevi, limova i traka [6].

Valjanje se dijeli na tri osnovna postupka koji se mogu mijenjati i slagati ovisno o obliku konačnog proizvoda, a to su uzdužno (aksijalno), poprečno (radijalno) i koso (spiralno).

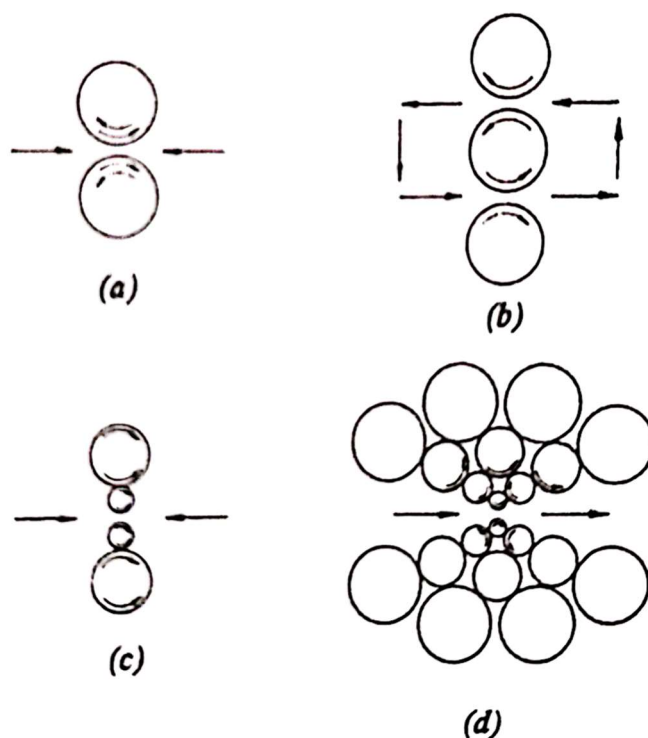
Uzdužnim valjanjem materijal se dovodi između dva seta valjaka koji se okreću u suprotnim smjerovima. Ovim načinom se materijalu smanjuje visina i povećava širina presjeka, a zbog tlačnih sila povećava se dužina obradka.

Poprečnim valjanjem materijal se dovodi između dva seta valjaka koji se okreću u istom smjeru pri čemu se materijal tjera na bočne valjke koje oblikuju materijal u konačni proizvod određenog profila.

Kod kosog valjanja materijal se dovodi između para valjaka čije osi vrtnje nisu u istoj ravnini, nego pod određenim kutom.

Ovisno o temperaturi na kojoj se odvija proces valjanja, ono se dijeli na hladno i toplo valjanje. Hladno valjanje se odvija na temperaturama nižoj od temperature rekristalizacije pri čemu dolazi do povećanja čvrstoće, a smanjuje se istezljivost. Toplim valjanjem se ne dobiva povećanje tvrdoće, ali se zadržava istezljivost. Predmeti većeg presjeka se uglavnom valjaju u toplom stanju zbog mogućnosti većih deformacija i većeg smanjenja presjeka (kako bi se što više smanjio utrošak energije i rada). U hladnom stanju se valjaju tanki limovi i trake zbog manje mase i debljine presjeka pri čemu je moguće dobiti površinu manje hrapavosti i uže tolerancije. Limovi i trake zbog manje mase hladno se oblikuju jer bi toplinski gubitci bili znatno veći od prednosti toplog oblikovanja [6].

Valjanje se provodi kroz setove valjaka koji mogu biti različito raspoređeni ovisno o zahtjevima konačnog proizvoda (Slika 19). Najjednostavniji oblik je valjački stan s dva valjka kojima je moguće mijenjati smjer vrtnje kako bi se omogućilo valjanje u oba smjera. Kod ovakvog sustava potrebno je između svakog ciklusa smanjiti zračnost između valjaka pa su nastale izmjene s više valjaka kojima su te mane izbjegnute [6].

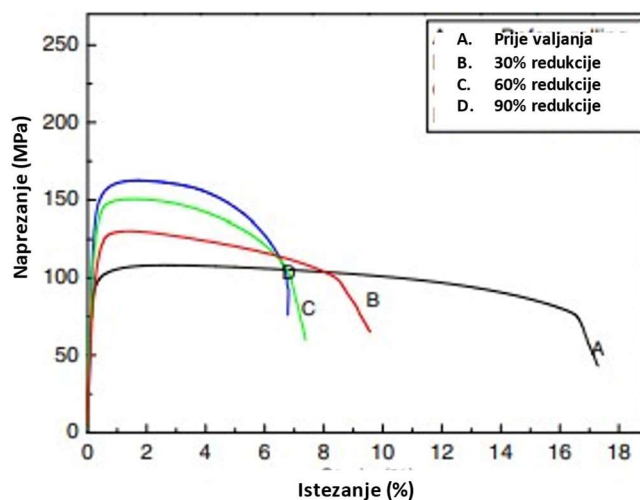


Slika 19. Raspored valjaka kod različitih vrsta valjanja: (a) dva valjka, (b) tri valjka, (c) četiri valjka, (d) složeni oblik [6]

4.1. Valjanje aluminija i aluminijских legura

Jedan od temeljnih tehnologija izrade poluproizvoda iz aluminija i njegovih legura je valjanje. Valjanjem je moguće dobiti ploče, tanke folije i trake aluminija različitih debljina iz početnog ingota. Aluminij se iz primarnog lijevanog poluproizvoda većih debljina toplo oblikuje na tanje limove, a zatim hladnim oblikovanjem moguće je dobiti limove i folije tanjih presjeka [6].

U eksperimentalnom radu Jiang J. et al. vidljiv je porast mehaničke čvrstoće aluminija visoke čistoće ovisno o redukciji debljine uzoraka. Također, povećanjem redukcije debljine smanjuje se istezljivost. Grafički prikaz prikazan je na slici 20 [7].



Slika 20. Prikaz ovisnosti napreznja o istezanju uzoraka čistog aluminija s različitim stupnjevima redukcije debljine [7]

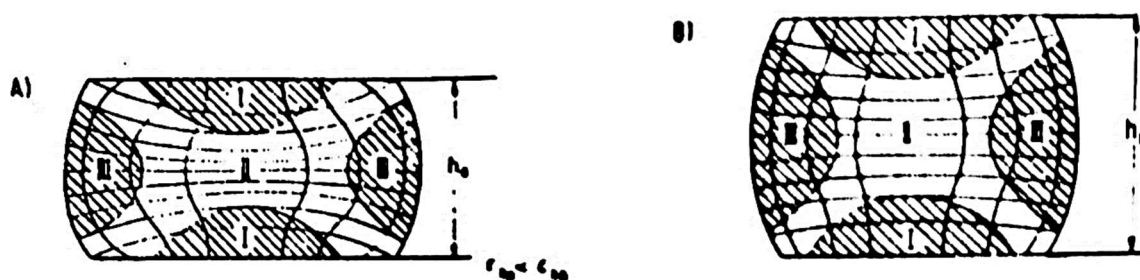
5. KOVANJE

Kovanje je postupak oblikovanja materijala deformiranjem gdje se unose u materijal znatne mehaničke deformacije s ciljem dobivanja željenog oblika i svojstava. Najčešće se odvija u toplom stanju obzirom na veću deformabilnost materijala pri povišenim temperaturama. Obradke manjih dimenzija moguće je obrađivati i u hladnom stanju. Kovanje se dijeli na dva tipa: slobodno kovanje i kovanje u ukovnjima (kalupima za kovanje) [6].

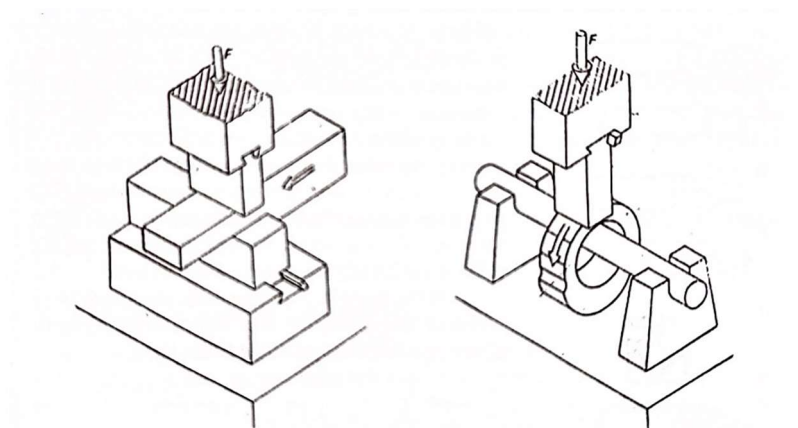
Slobodno kovanje je najstariji oblik oblikovanja te se provodi bez kalupa. Najvažnije operacije ovog tipa kovanja su [6]:

1. Sabijanje (Slika 21) – Materijalu se smanjuje visina u lateralnom smjeru i materijal slobodno teče u transverzalnom smjeru. Stupanj deformacije utječe na tvrdoću materijala.
2. Iskivanje (Slika 22) i raskivanje - Smanjuje se veličina poprečnog presjeka (debljina materijala) te se istovremeno povećava dužina.
3. Probijanje (Slika 23) – U obradak se utiskuje alat određene geometrije gdje se utiskuje alat u jednu stranu obradka pri čemu se formira slijepa rupa, a zatim se okreće te se probija.
4. Zasijecanje (Slika 24) – Kao predoperacija prethodi iskivanju i izduživanju.

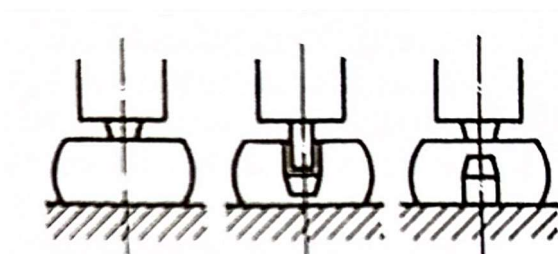
5. Savijanje (Slika 24) – Materijal se alatom deformira na način da na vanjskom dijelu uzorkuje tlačna naprezanja, a na unutarnjem dijelu tlačna.



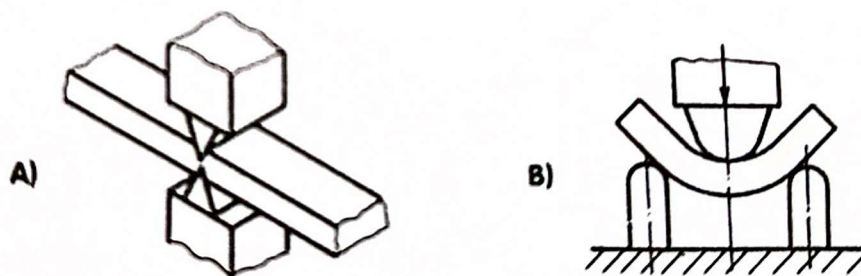
Slika 21. Postupak sabijanja i raspodjela tvrdoće zbog nejednake deformacije usred trenja: A) velika deformacija, B) mala deformacija [6]



Slika 22. Postupak iskivanja [6]



Slika 23. Probijanje [6]



Slika 24. A) Zasijecanje; B) savijanje [6]

Kovanjem u ukovnjima metal se pod utjecajem malja ili preše velikom silom tjera u kalup gdje ispunjava šupljine cijelog profila kalupa. Materijal ovim načinom kovanja teče samo u smjeru kretanja alata [6].

U oblikovanju deformiranjem jedna od mjera promjene dimenzije je stupanj deformacije. Stupanj deformacije označava koliko su se promijenile dimenzije u odnosu na početni oblik proizvoda. Što je veći stupanj deformacije više je unesene energije u materijal te su svojstva drugačija (veća tvrdoća, veća krhkost).

5.1. Kovanje aluminija

Tehnički aluminij (99% Al) ima plošno centriranu kubičnu rešetku te je jako duktilan zbog čega je hladno i toplo oblikovljiv. Tehnički aluminij ima R_m približno 100 MPa, a dodavanjem legirnih elemenata moguće je povisiti čvrstoću i tvrdoću aluminija i njenih legura.

Obzirom da je aluminij relativno mekan materijal, iznimno je prikladan za hladno oblikovanje. Ovim postupkom moguće je dobiti veće vrijednosti tvrdoće materijala, a potrebno je pripaziti na povećanje krhkosti i smanjenje istezanja.

U tablici 1 su rezultati iz rada Bay, N. [8] gdje su prikazane tvrdoće žarenih i hladno kovanih uzoraka aluminija različitih postotaka čistoće. Vidljiva je veća tvrdoća hladno kovanih uzoraka [8].

Tablica 1. Prikaz tvrdoće aluminija različitih čistoća u žarenom i hladno kovanom stanju [8]

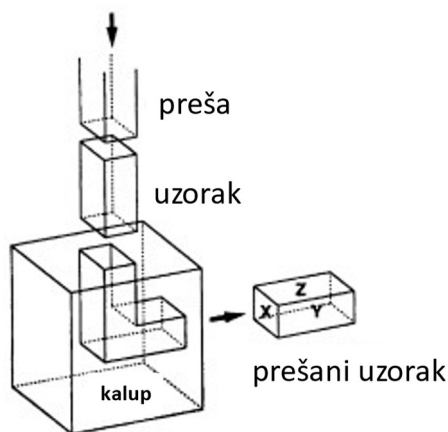
Oznaka	DIN Oznaka	Tvrdoća - žareno, HV	Tvrdoća - hladno kovano, HV
EN-AW-1050	Al99,50	20	34
EN-AW-1070	Al99,70	18	30
EN-AW-1098	Al99,95	15	25

6. ECAP postupak

ECAP postupak (engl. *Equal Channel Angular Pressing*) je proces obrade metala sa svrhom poboljšanja mehaničkih svojstava metala i legura. Razvijen je tijekom godine 1970-te do 1980-te na institutu Minsk u Sovjetskom savezu. Tadašnji cilj bio je razviti tehnologiju proizvodnje gdje će na proizvodu biti moguće narinuti velika smična naprezanja. Istraživanje nije skupilo dovoljnu pozornost te je prekinuto, a nastavljeno je 1990-te kada su objavljeni rezultati razvoja uzoraka vrlo sitnih kristalnih zrna [9].

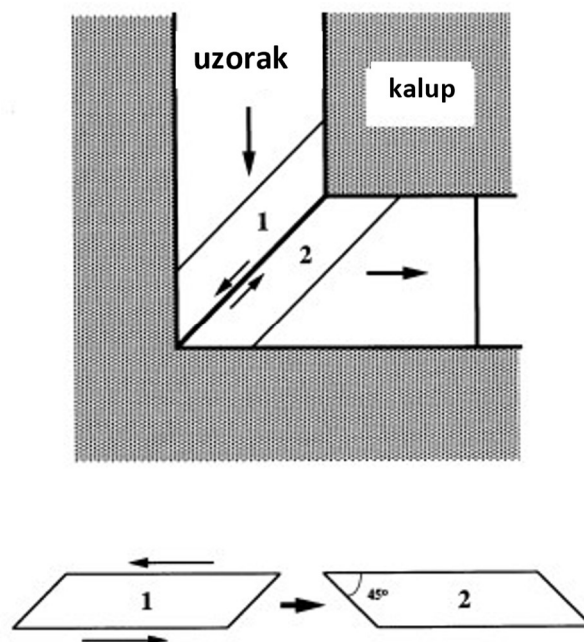
ECAP postupak koristi tehnologiju prolaska metala kroz kutni kanal matrice u obliku slova L. Nakon prolaska metala kroz kanal, ona se zakreće za 90 stupnjeva i ponovno se provodi kroz matricu. Ovaj postupak rezultira ultrafinom zrnastom strukturom koja je otpornija na trošenje, koroziju i ima visok udarni rad loma pri niskim temperaturama.

Na slici 25 [9] je prikazana shema ECAP postupka za šipke i kvadratne profile sa kutom kanala od 90°. Materijal je prethodno mehanički obrađen na dimenzije profila matrice. Osi X je okomita ravnina na smjer tečenja, Y je paralelna ravnina sa smjerom tečenja pri izlazu iz matrice, a os Z je ravnina paralelna s gornjom površinom obradka prilikom izlaza [9].



Slika 25. Shema ECAP postupka sa kvadratnim profilom obradka i kutom 90° [9]

Osnovna ovog procesa je smična deformacija, a osnovno teorijsko objašnjenje je prikazano je Slici 26 gdje su površine 1 i 2 označene kao površine na koje utječe smična sila zbog prolaza kroz kutni dio. Vidljiv je smični pomak ravnina teorijskih površina, a presjek obradka ostaje isti [9]. Obradak je moguće više puta podvrgnuti ECAP postupku kako bi se postigla još finija svojstva.



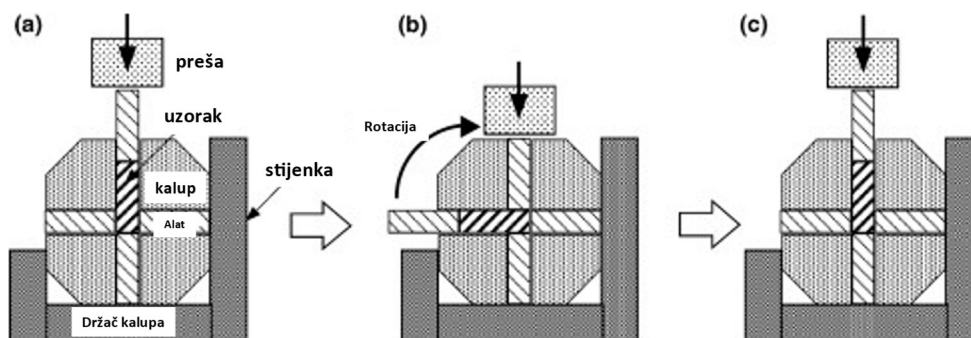
Slika 26. Prikaz smičnih ravnina obradka pri prolazu kroz kutni dio [9]

Ograničenje klasičnog ECAP-a je da se obradak mora ukloniti iz kalupa i ponovno vraćati nazad za ponavljanje procesa. Nastale su varijacije ovog postupka kako bi se uklonile prethodno navedene mane. Neke od njih su: rotirajući kalup, bočna ekstruzija i kalupi sa više kutova prolaza [9].

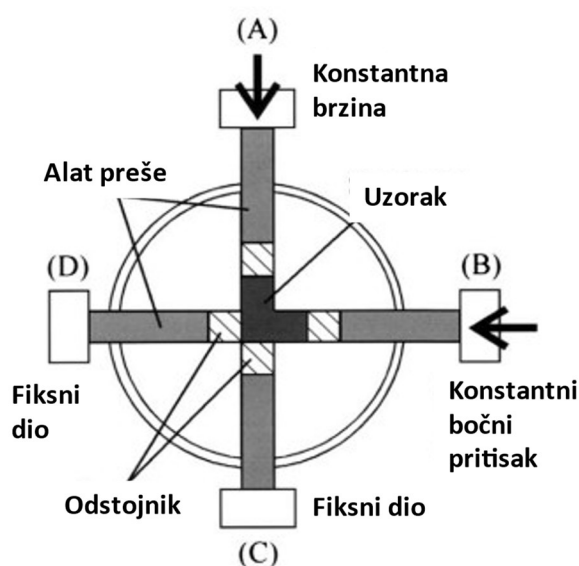
Rotirajući kalup prikazan na Slici 27 uklanja potrebu za vraćanjem uzorka nazad u kalup radi više prolaza. Kalup se sastoji od dva kanala koji se nalaze po kutom od 90° . Tri dijela kanala su ispunjena materijalom. Iz kanala koji je otvoren izlazi ispuna koja se okretanjem kalupa opet tlači nazad.

Bočna ekstruzija prikazana na Slici 28 radi na sličnom principu kao i rotirajući kalup, ali nema kalupa koji se rotira nego je kalup statičan. Na kraju kanala se nalaze preše koje ovisno o ciklusu stvaraju tlačnu silu na uzorak.

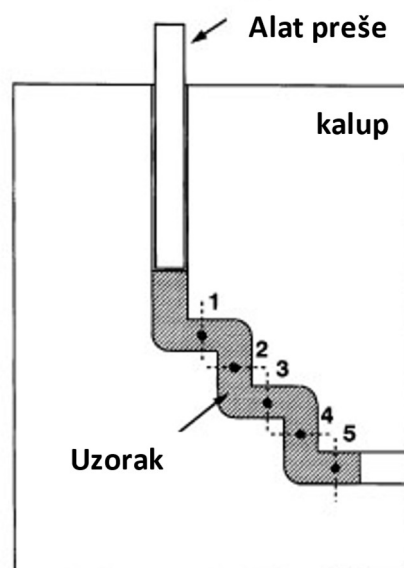
Kalup s više prolaza prikazan na Slici 29 je sličan osnovnoj ekstruziji, ali ima više „zavoja“ pod kutom od 90° kojima se u jednom prolazu uzorak podvrgne više puta smičnom naprezanju.



Slika 27. Prikaz rotirajućeg kalupa i koraka a, b i c procesa [9]

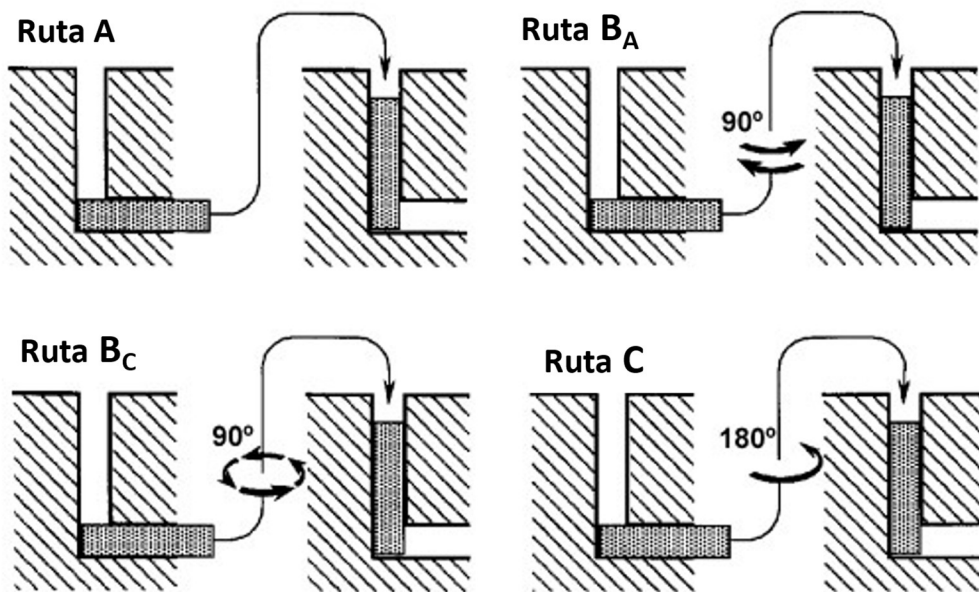


Slika 28. Prikaz bočne ekstruzije [9]



Slika 29. Prikaz kalupa sa više prolaza [9]

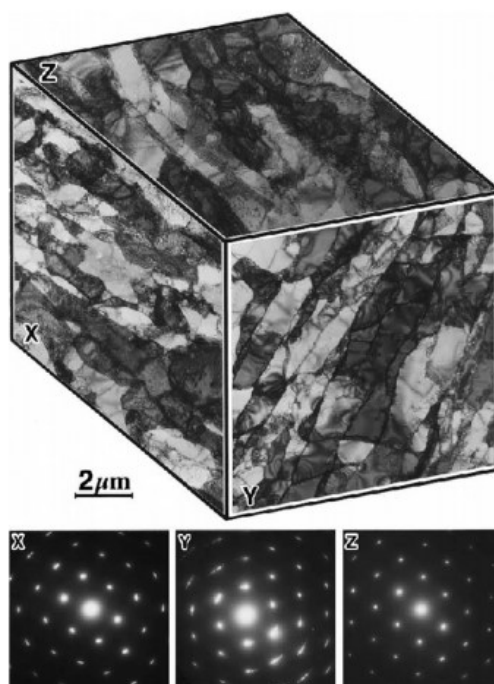
Različiti rezultati postižu se modifikacijom rute prolaza uzorka pa tako postoje 4 osnovne rute s oznakama A, B_A, B_B i C. Njihove razlike su u načinu okretanja uzorka nakon prethodnog prolaza kroz kalup, a prikazane su na Slici 30 [10].



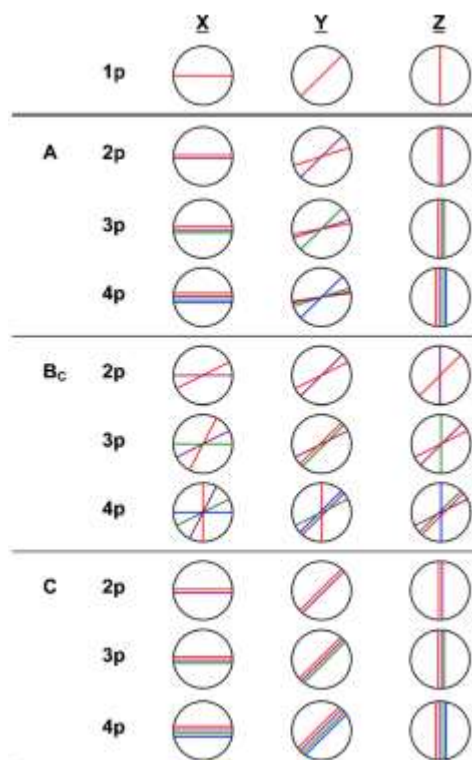
Slika 30. Rute ECAP postupka [10]

6.1. Mikrostruktura nakon ECAP postupka

ECAP postupak se koristi kako bi poboljšali svojstva metala i legura, a to je izravna posljedica promjene mikrostrukture materijala. Slika 31 prikazuje mikrostrukturu površina u 3 osi te su priložene i SAED (eng. *Selected area electron diffraction*) uzorci struktura. Vidljivo je da površina X ima izdužena zrna u horizontalnom smjeru, površina Y ima dijagonalno orijentirana zrna, a površina Z ima vertikalno orijentirana zrna. Ova pojava je rezultat smičnih površina prilikom procesa. Kako bi se bolje razumio smjer izduženja zrna, na Slici 32 prikazane su orijentacije zrna prilikom više prolaza [10].



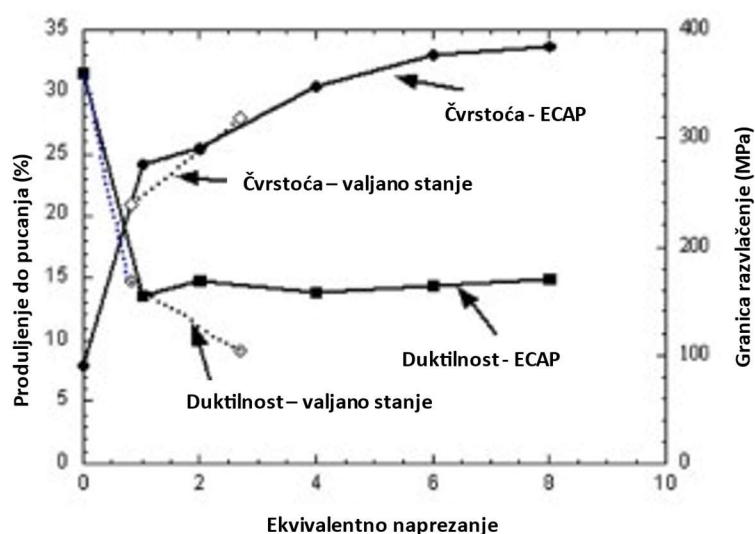
Slika 31. Mikrostruktura polikristalnog aluminija nakon jednog prolaza ECAP-a i SAED uzorci [10]



Slika 32. Prikaz orijentacije izduženja mikrostrukture u ovisnosti o broju prolaza [10]

6.2. Mehanička svojstva nakon ECAP postupka

ECAP postupak rezultira većom tvrdoćom i boljim mehaničkim svojstvima što je rezultat usitnjenja zrna. Uspoređujući čvrstoću i duktilnost 3004 aluminijske legure (prema ISO standardu približno AlMn1Mg1) obrađene tehnologijama ECAP-a i hladnog valjanja vidljivo je da obje tehnologije rezultiraju sličnim rezultatima do ekvivalentnog napreznja od 1 (iznos deformacija do pucanja i granica elastičnosti je slična). Porastom ekvivalentnog napreznja od 1 vidljive su veće vrijednosti čvrstoće i duktilnosti s porastom ekvivalentnog napreznja u odnosu na hladno valjano stanje što je vidljivo na Slici 33 [9].



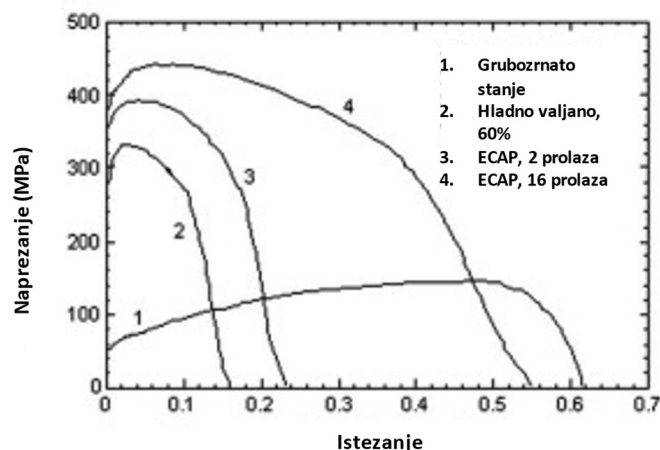
Slika 33. Prikaz svojstva 3004 aluminijske legure u hladno valjanom i ECAP stanju u ovisnosti o ekvivalentnom napreznju i istezanju do pucanja [9]

Tablica 2 prikazuje rezultate ispitivanja čvrstoće čistog aluminija u ovisnosti o broju prolaza ECAP postupkom. Vidljivo je povećanje granice razvlačenja, a tako i vlačne čvrstoće porastom broja prolaza. Produljenje se s povećanjem broja prolaza smanjuje [11].

Tablica 2. Prikaz mehaničkih svojstava čistog aluminija u ovisnosti o broju prolaza ECAP-a [11]

Broj prolaza ECAP-a	0	1	2	3	4	8
Granica razvlačenja - YS (eng. Yield strength) (MPa)	39	87	118	136	145	153
Vlačna čvrstoća UTS- (eng. Ultimate tensile strength) (MPa)	83	144	165	178	186	192
Produljenje EL - (eng- elongation) (%)	36	19	15	14	14	12

Na uzorku bakra visoke čistoće (99,996%) uspoređen je bakar u grubozrnatom stanju, hladno valjan, ECAP sa 2 prolaza i ECAP sa 16 prolaza. Uzorci izrađeni ECAP tehnologijom pokazuju veću čvrstoću u ovisnosti o naprezanju prikazano na Slici 34 [9].



Slika 34. Prikaz čvrstoće u ovisnosti o istezanju bakra, ispitivano na 20 °C sa brzinom promjene naprezanja 10-3s-1 [9]

Iz ovih podataka moguće je zaključiti da ECAP postupak rezultira povećanjem mehaničke čvrstoće, tvrdoće i smanjenjem istezanja u ovisnosti o broju prolaza.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada ispitala se otpornost na erozijsko trošenje aluminija u osnovnom (toplo valjanom), kovanom (hladno oblikovan, stupanj deformacije – 60%) i stanju nakon ECAP postupka. Uzorci početnog stanja su nabavljeni od dobavljača Strojopromet d.o.o., a hladno kovanje i postupak kutne ekstruzije napravljen je u Laboratoriju za odlikovanje deformiranjem, FSB Zagreb. Uzorci su mehanički izrezani na oblike kocka 10x10x10 mm.

Prije ispitivanja erozijskog trošenja napravljeno je ispitivanje tvrdoće uzoraka. Kemijski sastav uzoraka odgovara materijalu aluminija 99,95%.

7.1. Ispitivanje erozijskog trošenja

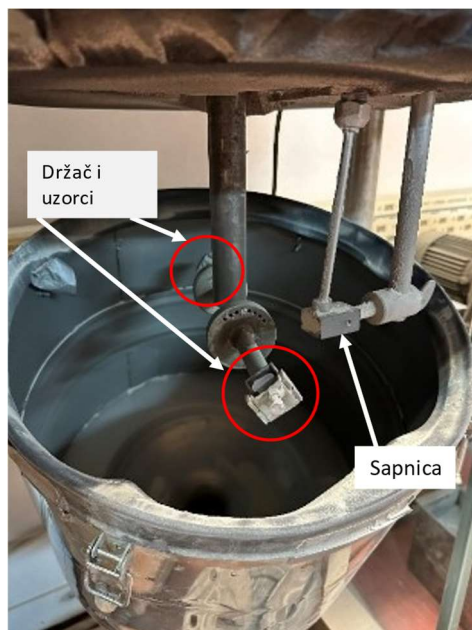
Uzorci su ispitivani na uređaju za ispitivanje erozijskog trošenja laboratorija za tribologiju na FSB Zagreb koji je prikazan na slici 35. Brzina vrtnje uzoraka je 1440 o/min, a abraziv gravitacijski pada kroz sapnicu promjera 5 mm. Abraziv je kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70. Brzina vrtnje stroja je 1440 min⁻¹, a brzina uzorka je 24,3 m/s. Vrijeme ispitivanja jednog ciklusa u ovom diplomskom radu je 15 min. Uzorci su pričvršćeni vijkom u držaču prikazanom na slici 36, a uzorci su podvrgnuti trošenju u 4 ciklusa (ponavljanje ciklusa ispitivanja na 4 uzorka). Ispitivanje je provedeno u 2 faze:

- Ispitivanje uzoraka pod kutom udara čestica od 30 stupnjeva.
- Ispitivanje uzoraka pod kutom udara čestica od 90 stupnjeva.



Slika 35. Uređaj za ispitivanje erozijskog trošenja

Uzorci su nakon jednog ciklusa izvađeni iz držača (Slika 36), ispuhani od preostalih čestica abraziva i trošenih čestica te obrisani čistim alkoholom. Nakon čišćenja izmjerena je masa pojedinog uzorka na vagi METLLER B5V 1000, rezolucije 0,0001 g.



Slika 36. Držač uzoraka i sapnica

7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća početnog stanja (toplo valjanog), hladno kovanog stanja i stanja nastalog kutnom ekstruzijom je izmjerena te je prikazana u tablici 3. Tvrdoća je izmjerena metodom po Vickersu. Mjerenja su napravljena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na FSB Zagreb.

Postupak mjerenja tvrdoće proveden na uređaju za mjerenje tvrdoće po metodi Vickers (HV1) slijedećih karakteristika:

- proizvođač: Zwick/Roell / Indentec, Njemačka;
- tip: ZHV μ -ST;
- serijski broj: 206030;
- odabrano opterećenje: 9,8067 N što odgovara HV1;
- mjerna nesigurnost: +/- 2 %

Tablica 3. Tvrdoća uzoraka (K – hladno kovano stanje, E - ECAP)

Uzorak	Početno stanje	K	E
HV _{SR}	44	46	57

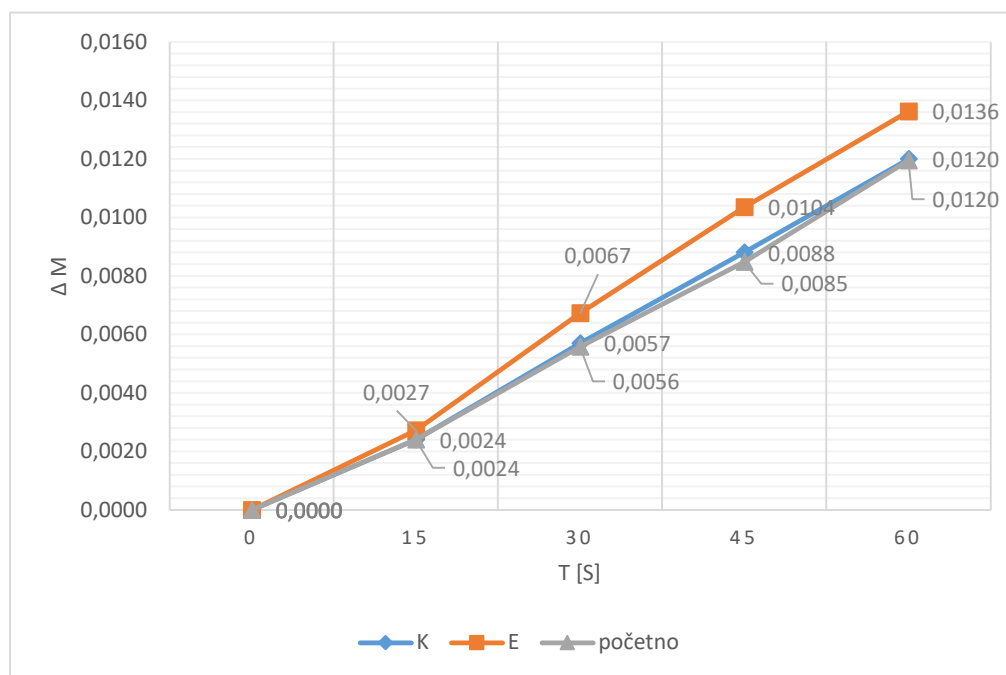
Prema Tablici 3 vrijednosti tvrdoća uzoraka kovanog stanja veća od početnog stanja (približno 5 % veća od početnog stanja), a vrijednost tvrdoća uzoraka ECAP postupka je 30 % veća od vrijednosti tvrdoća početnog stanja.

7.3. Rezultati ispitivanja trošenja erozijom

Nakon mjerenja mase u svakom koraku ispitivanja (rezultati prikazani u Prilogu 1) izračunata je promjena mase. Promjena mase je računata na način da je masa svakog stanja oduzeta od prethodnog u svakom ciklusu erozijskog trošenja (0, 15, 30, 45 i 60 min). U tablici 4 prikazana je promjena mase uzoraka sa kutom udara od 30 stupnjeva, a na slici 37 podatci su prikazani grafički.

Tablica 4. Rezultati promjene mase uzoraka pri kutu od 30 stupnjeva

$\Delta m/\text{min}$	0	15	30	45	60
K	0,0000	0,0024	0,0057	0,0088	0,0120
E	0,0000	0,0027	0,0067	0,0104	0,0136
početno	0,0000	0,0024	0,0056	0,0085	0,0120



Slika 37. Promjena mase nakon erozijskog trošenja pri kutu od 30 stupnjeva

Iz dobivenih podataka vidljiva je približno slična promjena mase uzoraka kovanog i početnog stanja, a uzorci ECAP postupka imaju veći iznos promjene mase.

Uzorci hladno kovanog stanja nakon 15 minuta imaju 0 % gubitka mase u odnosu na uzorke početnog stanja, nakon 30 minuta imaju 1,79 % veći gubitak, nakon 45 minuta 3,5 % veći gubitak, a nakon 60 minuta promjena mase je 0 % u odnosu na uzorke početnog stanja.

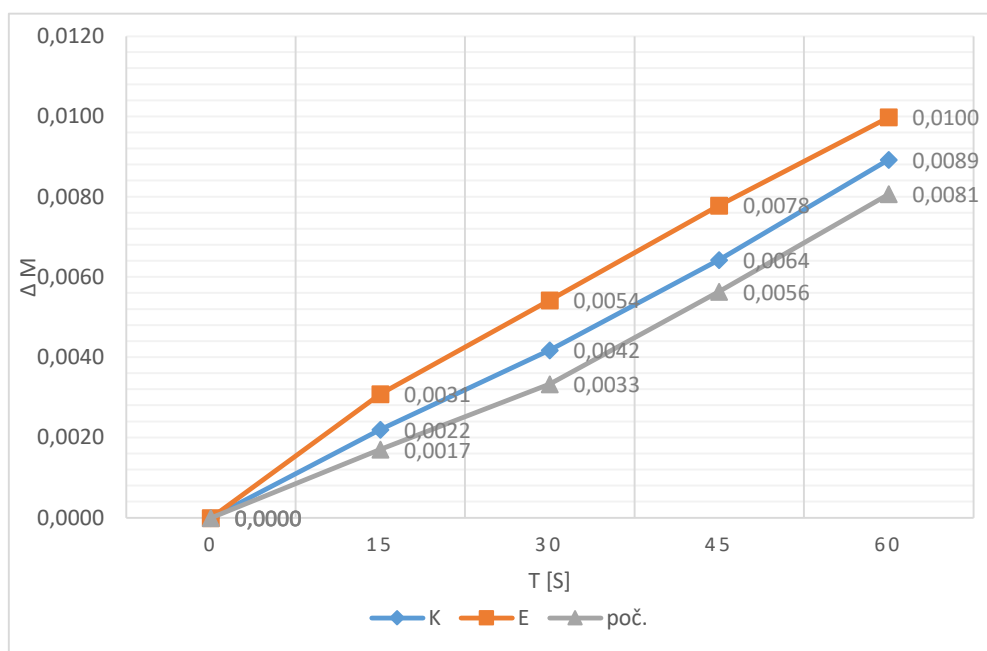
Izgled krivulje erozijskog trošenja tj. krivulje promjene mase uzoraka kovanog stanja i uzoraka početnog stanja nema izražene razlike.

Uzorci nastali kutnom ekstruzijom nakon 15 minuta imaju gubitak mase 12,5 % u odnosu na uzorke početnog stanja, nakon 30 minuta 19,6 % veći gubitak mase, nakon 45 minuta 22,35 % veći, a nakon 60 minuta gubitak mase je 13,3 % veći.

Uzorci pri kutu od 90 stupnjeva su podvrgnuti istim procesom ispitivanja, a rezultati nakon računanja promjene mase su prikazani u tablici 5 i na slici 38.

Tablica 5. Promjena mase uzoraka pri kutu od 90 stupnjeva

$\Delta m/\text{min}$	0	15	30	45	60
K	0,0000	0,0022	0,0042	0,0064	0,0089
E	0,0000	0,0031	0,0054	0,0078	0,0100
poč.	0,0000	0,0017	0,0033	0,0056	0,0081



Slika 38. Promjena mase uzoraka pri kutu od 90 stupnjeva

Pri kutu od 90 stupnjeva vidljivo je da je promjena mase početnog stanja najmanja dok iza nje slijedi kovano stanje, a najveću promjenu mase imaju uzorci ECAP postupka.

Uzorci hladno kovanog stanja nakon 15 minuta imaju 29,4 % gubitka mase u odnosu na uzorke početnog stanja, nakon 30 minuta imaju 27,27 % veći, nakon 45 minuta 14,29 % veći, a nakon 60 minuta promjena mase je 9,9 % veća u odnosu na uzorke početnog stanja.

Uzorci nastali kutnom ekstruzijom nakon 15 minuta imaju gubitak mase od 82,4 % veći u odnosu na uzorke početnog stanja, nakon 30 minuta 63,64 % veću, nakon 45 minuta 39,29 % veću, a nakon 60 minuta gubitak mase je 23,46 % veći u odnosu na uzorke početnog stanja.

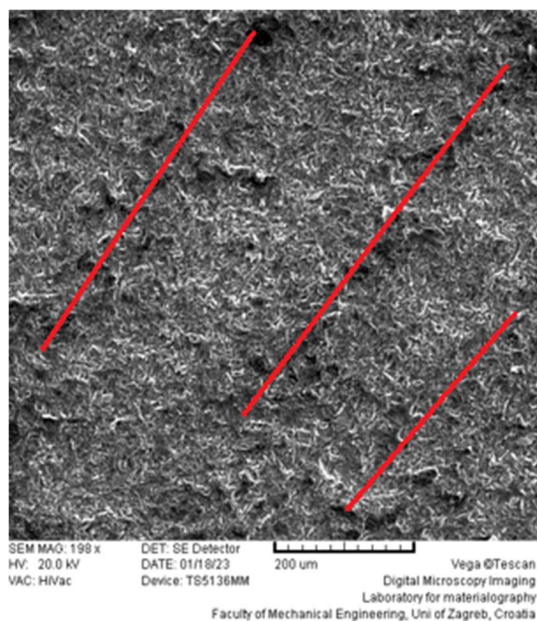
7.4. Izgled površine

Površine nakon erozijskog trošenja su pregledane pomoću SEM mikroskopa, Tesan Vega 5136 mm u Laboratoriju za materijalografiju, FSB Zagreb.

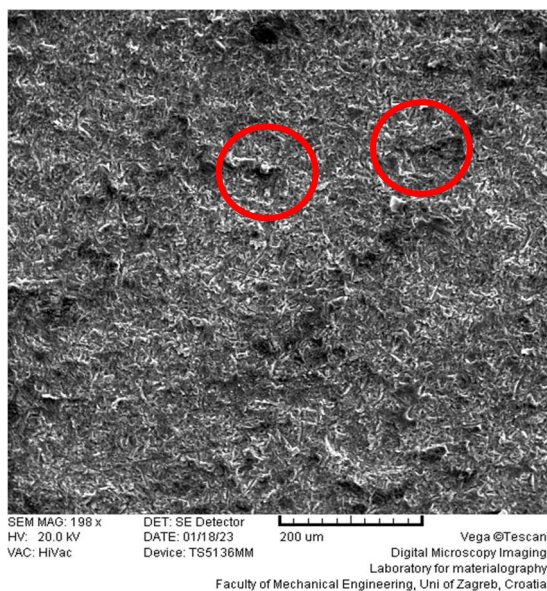
7.4.1. Stanje površine uzoraka početnog (osnovnog stanja)

Nakon ispitivanja, na SEM mikroskopu pregledano je stanje površine svih uzoraka početnog stanja pri kutovima od 30 i 90 stupnjeva pri povećanju 200x.

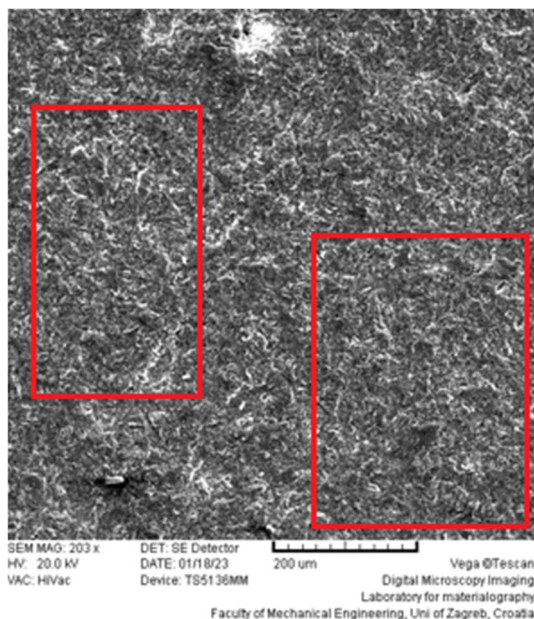
Na površini pod kutom od 30 stupnjeva vide se linije trošenja česticama koje zbog kuta udara ostavljaju brazde (Slika 39). Mogu se uočiti karakteristične „usnice“ na uzorcima početnog stanja nakon trošenja pri kutu od 30 stupnjeva (Slika 40). Pod kutom od 90 stupnjeva vidljivo je zaglađivanje površine (Slika 41) što je moguće pripisati također kutu upada čestica pri kojem čestice padaju okomito na površinu te time nastaje efekt kovanja odnosno zaglađenja površine.



Slika 39. Prikaz brazdi (crvene linije) nastalih erozijskim trošenjem početnog stanja pri kutu od 30 stupnjeva



Slika 40. Prikaz područja „usnica“ (crveni krug) na uzorku početnog stanja pri kutu od 30 stupnjeva



Slika 41. Prikaz područja zaglađenosti (crveni kvadrat) površine na uzorku početnog stanja pri kutu od 90 stupnjeva

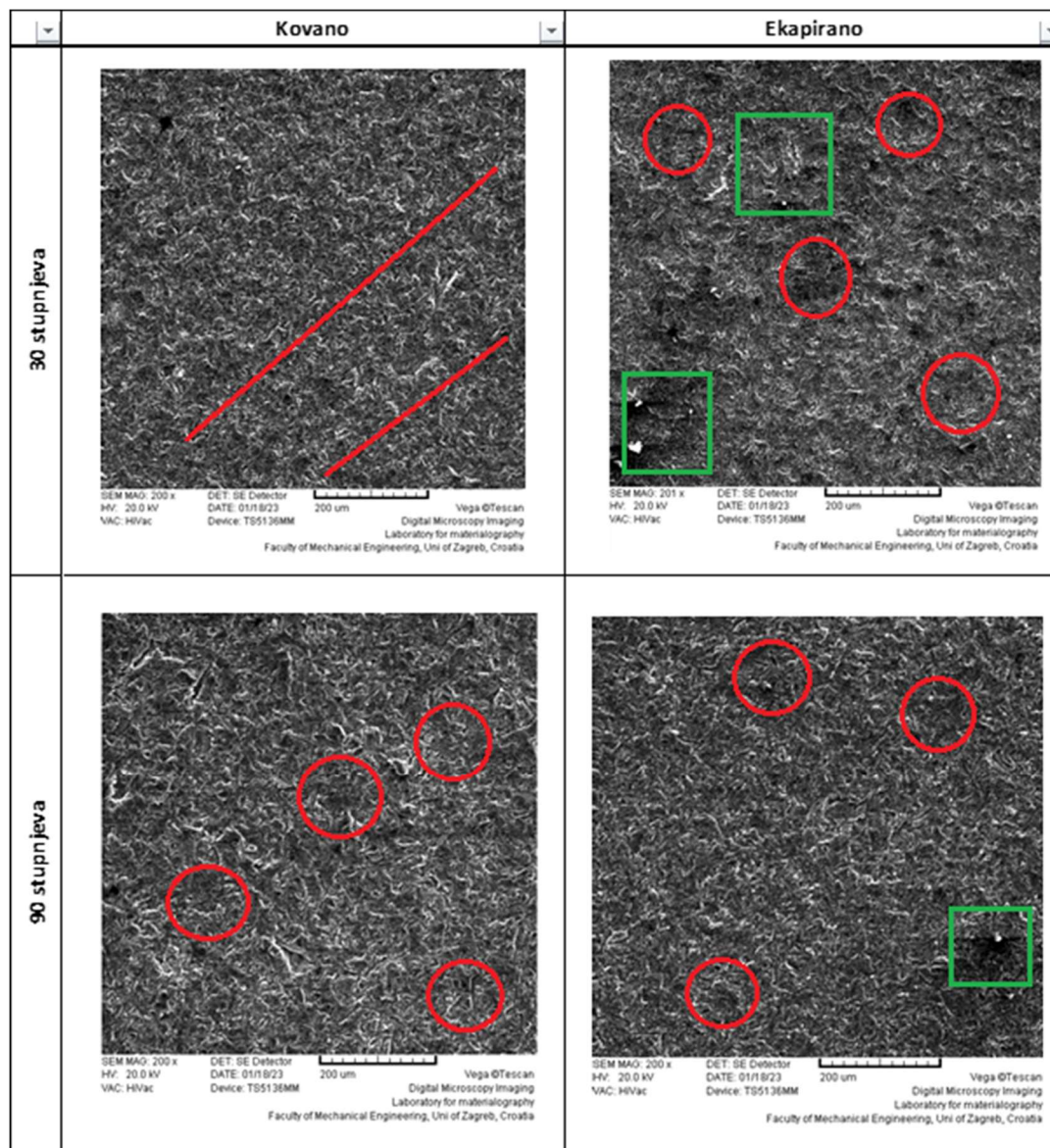
7.4.2. Stanje površine uzoraka kovanog i ECAP postupka pri 200x uvećanja

Uzorci nakon erozijskog trošenja u kovanom i ECAP stanju promatrani su na SEM mikroskopu pri povećanju 200x.

Površina kovanog stanja ima slabije izražene tragove trošenja na 30 stupnjeva, a na 90 stupnjeva uočavaju se udubine udaraca odnosno valovitost površine. Površina uzoraka nastalih kutnom ekstruzijom na 30 stupnjeva ima izražene nepravilnosti zbog odlamanja čestica, a pri 90 stupnjeva uočljiva je valovitost površine.

Slike površina uzoraka pri kutovima trošenja od 30 i 90 stupnjeva nalaze se u tablici 6.

Tablica 6. SEM slike površina uzoraka; crvene linije – brazde, crveni krug – neravnine (valovitost), zeleni kvadrat - nepravilnosti



8. ANALIZA REZULTATA

Provedenim eksperimentom cilj je bio utvrditi otpornost na erozijsko trošenje uzoraka toplo valjanih, hladno kovanih (stupanj deformacije 60%) i uzoraka nastalih kutnom ekstruzijom odnosno utvrditi brzinu trošenja i izgled površine nakon erozijskog djelovanja čestica na površinu.

8.1. Tvrdoća

Uzorcima je prvotno testirana tvrdoća te je utvrđeno da je za početno stanje (toplo valjano) tvrdoća površine 44 HV10, a za hladno kovan uzorak izmjereno je 46 HV1. Porast tvrdoće kovanog uzorka (5 % veća u odnosu na uzorke početnog stanja) je u skladu s očekivanjem zbog karakteristika tehnologije (sabijanjem kristalnih struktura) i usporedbe s literaturom [8]. Uzorcima napravljenim kutnom ekstruzijom (ECAP postupkom) izmjerena je tvrdoća od 57 HV1. Uzorci ECAP postupka imaju znatno veću tvrdoću u odnosu na početno stanje (30 % veća u odnosu na uzorke početnog stanja) zbog velikih sila prilikom ekstruzije uzoraka i sabijanja kristalnih struktura. Tvrdoća uzoraka nastalih kutnom ekstruzijom uspoređena je s literaturom [8] gdje je vidljivo povećanje mehanički svojstava uzoraka nakon ECAP postupka, a posljedično i povećanje tvrdoće.

8.2. Erozijsko trošenje i promjena mase

Nakon provedenog eksperimenta erozijskog trošenja aluminijskih uzoraka pri kutu udara čestica od 30 stupnjeva, uočena je minimalna razlika (%) u promjena mase početnih (toplo valjanih) uzoraka i hladno kovanih uzoraka. Promjene u odnosu na uzorke početnog stanja nakon ciklusa od 15 i 60 minuta nije bilo odnosno bila je 0 %. Dok je za uzorke nastalim kutnom ekstruzijom uočena veća promjena mase. Najveća promjena ECAP uzoraka u odnosu na uzorke početnog stanja je bila 22,35 % nakon 45 minuta trošenja.

Kod kuta udara od 90 stupnjeva uočeno je da su najmanju promjenu mase imali uzorci početnog stanja, zatim hladno kovani uzorci (29,4 % veća u odnosu na uzorke početnog stanja), a najveći iznos promjene mase imali su uzorci nastali kutnom ekstruzijom gdje je prosječna promjena mase u odnosu na uzorke početnog stanja nakon 15 minuta bila 82,4 % veća u odnosu na uzorke početnog stanja. Moguće je uočiti da je iznosom promjena mase pri 90 stupnjeva manja nego pri 30 stupnjeva što se objašnjava prirodom udara pod pravim kutom – udarna

erozija. Pri kudu od 30 stupnjeva čestice stvaraju brazdu i odnose materijal dok pri 90 stupnjeva čestice udaraju normalnom silom u površinu te tek nakon dovoljno unesene energije uspiju izbiti česticu trošenog materijala. Ovi podatci su očekivani s obzirom na to da su hladno kovani i uzorci nastali kutnom ekstruzijom većih tvrdoća i veće krhkosti zbog čega dolazi do veće brzine erozije (prema Slici 13), a usporedba brzine erozije i tvrdoće uspoređena je i potvrđena s izvorom [12].

Prema literaturi [8] uzorci nastali kutnom ekstruzijom imaju sitnozrnatu strukturu i veću tvrdoću čije je svojstvo bolja otpornost na trošenje. U rezultatima ispitivanja provedenim u ovom diplomskom radu uočeno je da uzorci kutnom ekstruzijom imaju najveću brzinu trošenja uspoređujući ih s toplo valjanim i hladno kovanim stanjem. Ovi podatci mogu se objasniti većom krhkošću materijala, a time i manjom žilavošću. Zbog veće tvrdoće materijal nije u mogućnosti apsorbirati unesenu energiju elastičnom deformacijom nego se čestice s površine odlamaju krhkim lomom.

8.3. Izgled površine

Površina početnog stanja pri kudu udara čestica od 30 stupnjeva ima karakteristične brazde prikazane na slici 40 gdje se vide karakteristične „usnice“ koje su nastale udarom i rotacijom čestice trošenja u površinu. Površine uzoraka početnog stanja pri kudu udara od 90 stupnjeva imaju karakterističan izgled zaglađivanja površine prikazane na slici 41 te je vidljiva valovitost površine koju je nastala djelovanjem normalne sile udara čestice trošenja u površinu, a zatim su naknadno erozijske čestice zagladile površinu.

Površina nakon erozijskog trošenja hladno kovanih uzoraka pri 30 stupnjeva ima manje vidljive brazde, a pri 90 stupnjeva vidljiva je zaglađenost i valovitost što je i vidljivo na slikama u tablici 6.

Površina uzorka nastala kutnom ekstruzijom (ekapirani uzorak) pri kudu udara čestica od 30 stupnjeva ima manje izražene brazde trošenja, a vidljive su neravnine na površini („rašćupanost“). Uočavaju se nepravilnosti na površini u obliku dijelova koji su znatno uzdignuti od ostalih područja. Pri 90 stupnjeva uočava se zaglađenost površine i nešto manje nepravilnosti (prema Tablici 6).

Rezultati pokusa izgleda površine očekivani su s obzirom na to da se kod uzoraka manje tvrdoće (toplo valjano stanje) očekuju izraženije brazde trošenja na površini zbog početnog izgleda površine nakon valjanja (tragovi valjanja) te su također zbog manje tvrdoće prisutne

veća količina „usnica“. Na tvrdim uzorcima porastom tvrdoće sve su manje izraženije karakteristike površine trošenih erozijom (brazde, preostale čestice trošenja, neravnine).

9. ZAKLJUČAK

Materijali prilikom eksploatacije izloženi su različitim oblicima opterećenja pa tako i trošenja. Trošenje je jedno od najbitnijih faktora prilikom odabira materijala i njegove primjene. Pravilan odabir materijala ima veliku ulogu u prevenciji kvarova, zastoja i havarija. Jedno od vrsta trošenja je erozijsko trošenje koje se odvija kada krute čestice trošenja u fluidnom mediju udaraju u površinu materijala, a nastanak ove vrste trošenja u eksploataciji može biti štetan s obzirom na to da se teško može uočiti (unutar cijevi i konstrukcija za provođenje materijala koji teku). Aluminij se zbog niskih vrijednosti mehaničkih svojstava (tvrdoća i granica elastičnosti) tehnološki obrađuje, a neki od tehnologija kojima se modificiraju mehanička svojstva su valjanje, kovanje i kutna ekstruzija. U ovom radu su uzeti uzorci aluminija čistoće 99,95% obrađeni toplim valjanjem, hladnim kovanjem sa stupnjem deformacije od 60% i kutnom ekstruzijom.

Nakon ispitivanja i rasprave zaključeno je:

- Vrijednosti tvrdoće su 44 HV10 za uzorke početnog stanja, 46 HV1 za uzorke hladno kovanog stanja (5 % veća u odnosu na početno stanje) i 57 HV1 za uzorke nastalima kutnom ekstruzijom (30 % veća u odnosu na početno stanje)
- Uzorci toplo valjanog stanja i hladno kovanog pri 30 stupnjeva imaju slične vrijednosti promjene mase, a uzorci nastali kutnom ekstruzijom imaju veće vrijednosti (najviše 22,35 % gubitka mase u odnosu na uzorke početnog stanja nakon 45 minuta trošenja)
- Najveću otpornost na erozijsko trošenje pri 90 stupnjeva imaju uzorci toplo valjanog stanja iza kojih slijede uzorci hladno kovanog stanja (29,4 % veća promjena mase u odnosu na uzorke početnog stanja nakon 15 min), a najveće vrijednosti imaju uzorci nastali kutnom ekstruzijom (82,4 % veća vrijednost promjene mase u odnosu na uzorke početnog stanja nakon 15 min)
- Uzorci nastali kutnom ekstruzijom imaju najveće vrijednosti gubitka mase u oba slučaja s obzirom na to da su znatno veće tvrdoće, a zbog toga i manje žilavosti
- Pri 30 stupnjeva površina toplo valjanih uzoraka nakon erozijskog trošenja ima najizraženije karakteristike trošenja površine nakon udara erozivnog medija (Slika 39 i 40), a s povećanjem tvrdoće (hladno kovani i uzorci nastali kutnom ekstruzijom) karakteristike su sve manje izražene (prema Tablici 6)

- Pri 90 stupnjeva površina toplo valjanih uzoraka ima najizraženiju zaglađenost površine, uzorci hladno kovanog stanja i stanja nastalog kutnom ekstruzijom imaju manje vidljiva područja zaglađenosti površine (prema Tablici 6)

LITERATURA

- [1] Chemical elements, Virtual Museum. Prikaz čistog aluminija u prirodnom stanju. Web izvor: <https://images-of-elements.com/aluminium.php>. Datum pristupa: 17.06.2023.
- [2] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: FSB Zagreb; 2002.
- [3] Md Jani AM, Losic D, Voelcker NH. Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications. Vol. 58, Progress in Materials Science. Elsevier Ltd; 2013. p. 636–704. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.01.002
- [4] Hutchings I, Shipway P. Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials: Second Edition. Butterworth-Heinemann. 2017.
- [5] Grilec K, Jakovljević S, Marić G. Tribologija u strojarstvu. Zagreb: FSB Zagreb; 2013.
- [6] Miljenko Math. Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem. Zagreb: AJA Palme 37, Zagreb; 1999.
- [7] Jiang J, Ding Y, Zuo F, Shan A. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. Scr Mater. 2009 May;60(10):905–8. doi: 10.1016/j.scriptamat.2009.02.016
- [8] Bay N. Cold forming of aluminium-state of the art. Vol. 71, Journal of Materials Processing Technology. 1997.
- [9] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Vol. 51, Progress in Materials Science. 2006. p. 881–981. doi: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
- [10] Langdon TG. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering A. 2007. Jul 25;462(1–2):3–11. doi: 10.1016/j.msea.2006.02.473
- [11] Djavanroodi F, Omranpour B, Ebrahimi M, Sedighi M. Designing of ECAP parameters based on strain distribution uniformity. Progress in Natural Science: Materials International. 2012. Oct 1;22(5):452–60. doi: 10.1016/j.pnsc.2012.08.001
- [12] Divakar M, Agarwal VK, Singh SN. Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316. Wear. 2005. p. 110–7. doi: 10.1016/j.wear.2005.02.004

PRILOZI

I. Rezultati ispitivanja

Prilog 1. Rezultati ispitivanja

Vrijednosti tvrdoća:

Mjerenje tvrdoće aluminijskih uzoraka u dobavnom stanju				
Uzorak	1. mjerenje Tvrdoće – HV 10	2. mjerenje Tvrdoće HV 10	3. mjerenje Tvrdoće HV 10	Aritmetička – sredina mjerenja Tvrdoće – HV10
Dobavno st.	43,1	42,4	45,8	43,8

Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 uzorak K

t	d ₁	d ₂	dsr	HV
s	mm	mm	mm	
10	0,1965	0,2039	0,2002	46,3
10	0,1937	0,2039	0,1988	46,9
10	0,1928	0,2057	0,1993	46,7
10	0,1993	0,2122	0,2068	43,8
10	0,1974	0,2104	0,2039	44,6
HV _{sre}				45,7

Rezultati ispitivanja tvrdoće HV1 uzorak E

t	d ₁	d ₂	dsr	HV
s	mm	mm	mm	
10	0,1807	0,1798	0,1803	57,1
10	0,177	0,1816	0,1793	57,7
10	0,1789	0,1844	0,1817	56,2
10	0,1816	0,1863	0,184	54,8
10	0,1789	0,1816	0,1803	57,1
HV _{sre}				56,6

Uzorak	Početno stanje	K	E
HV _{sre}	43,8	45,7	56,6

Vrijednosti hladno kovanih uzoraka pri kutu udara čestica od 90 stupnjeva:

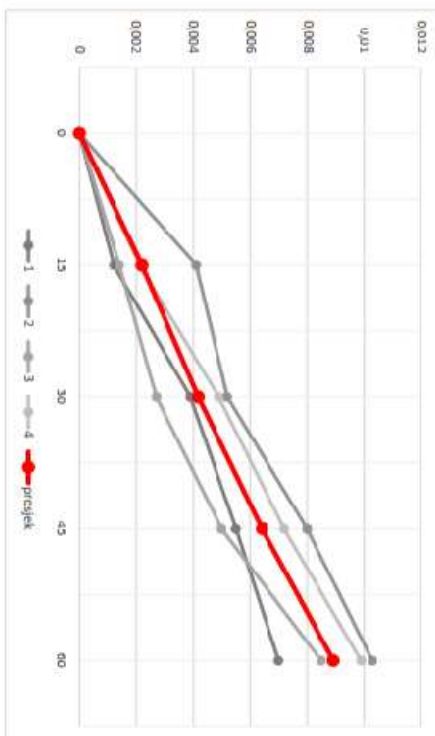
90 kovani

50 kovani	0	15	30	45	60
1	7,6582	7,657	7,6543	7,6527	7,6512
2	7,5687	7,5646	7,5635	7,5607	7,5584
3	7,6564	7,655	7,6537	7,6514	7,6479
4	7,6254	7,6233	7,6205	7,6182	7,6155
5		7,7242	7,71	7,7204	7,7199
6		7,5358	7,5342	7,5319	7,5295

$\Delta m g $	0	15	30	45	60
1	0	0,0012	0,0039	0,0055	0,007
2	0	0,0041	0,0052	0,008	0,0103
3	0	0,0014	0,0027	0,005	0,0085
4	0	0,0021	0,0049	0,0072	0,0099
5	0	-7,7242	-7,71	-7,7204	-7,7199
6	0	-7,5358	-7,5342	-7,5319	-7,5295
	n	n	n	n	n

prosjeak	0	0,0022	0,004175	0,006425	0,008925
----------	---	--------	----------	----------	----------

izbačeni rezultati ispitivanja

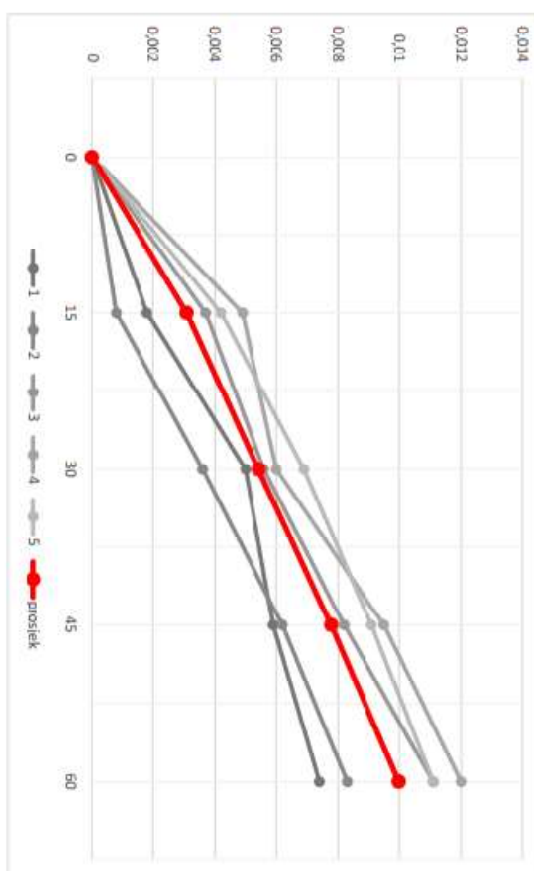


Vrijednosti hladno kovanih uzoraka pri kutu udara čestica od 30 stupnjeva:

30 kovani					
Δt [h]	0	15	30	45	60
1	7,6909	7,6882	7,6847	7,6816	7,6782
2	7,5284	7,5269	7,524	7,5226	7,5181
3	7,5181	7,5151	7,5125	7,5078	7,504
4	7,6794	7,677	7,6728	7,6696	7,6685

Δt [h]	0	15	30	45	60
1	0	0,0027	0,0062	0,0093	0,0127
2	0	0,0015	0,0044	0,0058	0,0103
3	0	0,003	0,0056	0,0103	0,0141
4	0	0,0024	0,0066	0,0098	0,0109

prosjeak	0	0,0024	0,0057	0,0088	0,012



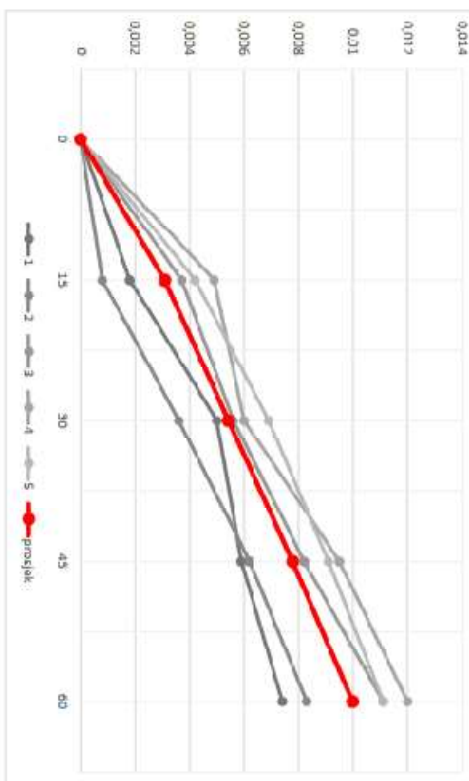
Vrijednosti uzoraka kutne ekstruzije pri kutu udara čestica od 90 stupnjeva:

90 ekstrudirani

Imenik	0	15	30	45	60
1	7,8204	7,8186	7,8154	7,8145	7,813
2	8,1371	8,1363	8,1335	8,1309	8,1288
3	8,1156	8,1119	8,11	8,1074	8,1045
4	7,8525	7,8476	7,8465	7,843	7,8405
5	7,8312	7,827	7,8243	7,8221	7,8201
6	8,1426	8,1408	8,1386	8,1386	8,1366
7	7,7962	7,7941	7,7909	7,7909	7,7904

$\Delta m, [g]$	0	15	30	45	60
1	0	0,0018	0,005	0,0059	0,0074
2	0	0,0008	0,0036	0,0063	0,0083
3	0	0,0037	0,0056	0,0082	0,0111
4	0	0,0049	0,006	0,0095	0,017
5	0	0,0042	0,0069	0,0091	0,0111
6	0	-8,1425	-8,1408	-8,1386	-8,1366
7	0	0,0021	0,0053	0,0055	0,0058

zbirani rezultati ispitivanja

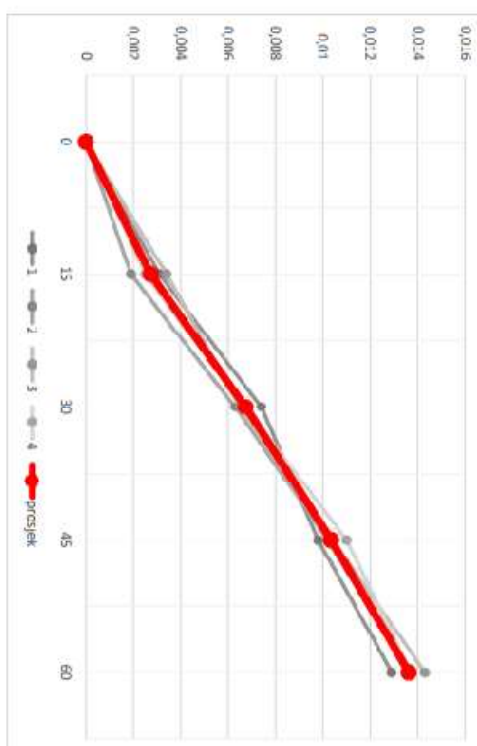


Vrijednosti uzoraka kutne ekstruzije pri kutu udara čestica od 30 stupnjeva:

30 ekstrudiran					
[mm]/[g]	0	15	30	45	60
1	7,7804	7,7773	7,773	7,7706	7,7675
2	7,7884	7,7855	7,7871	7,7782	7,7748
3	7,7748	7,7714	7,7683	7,7644	7,7605
4	7,7885	7,766	7,7618	7,7575	7,7548

Δm [g]	0	15	30	45	60
1	0	0,0031	0,0074	0,0098	0,0129
2	0	0,0019	0,0063	0,0102	0,0136
3	0	0,0034	0,0065	0,0104	0,0143
4	0	0,0025	0,0067	0,011	0,0137

prosjeak	0	0,002725	0,006725	0,01035	0,013625
----------	---	----------	----------	---------	----------



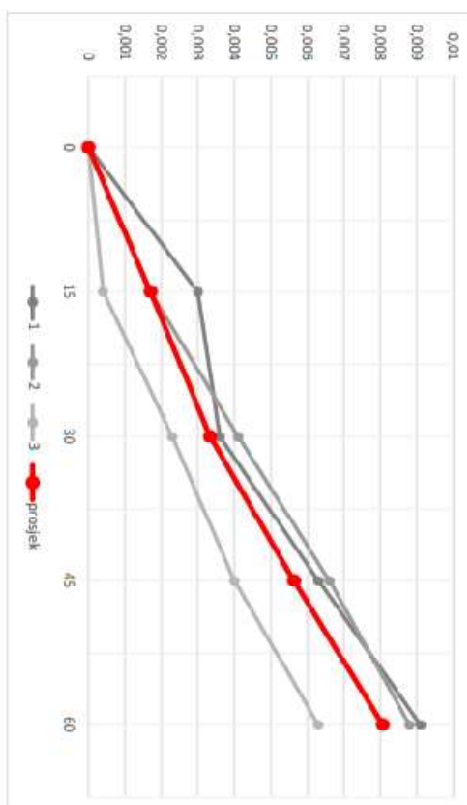
Vrijednosti uzoraka početnog stanja (toplo valjano) pri kutu udara čestica od 90 stupnjeva:

početno stanje 90

[min]/h	0	15	30	45	60
1	7,7084	7,7054	7,7048	7,7021	7,6993
2	1,6407	1,639	1,6386	1,6341	1,6319
3	7,6221	7,6617	7,6598	7,6581	7,6558

Δm [g]	0	15	30	45	60
1	0	0,003	0,0036	0,0063	0,0091
2	0	0,0017	0,0041	0,0066	0,0088
3	0	0,0004	0,0023	0,004	0,0063

prosjeak	0	0,0017	0,003333	0,005633	0,008067
----------	---	--------	----------	----------	----------



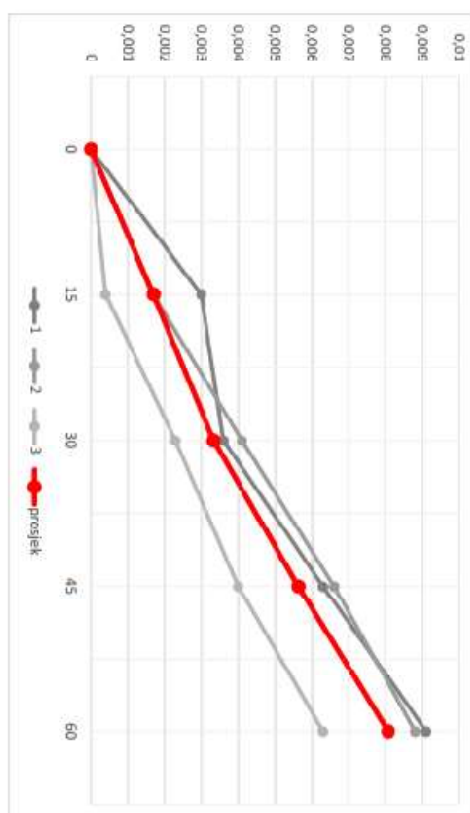
Vrijednosti uzoraka početnog stanja (toplo valjano) pri kutu udara čestica od 30 stupnjeva:

početno stanje 30

l [m]	0	15	30	45	60
1	7,48	7,4778	7,4746	7,4713	7,467
2	7,5681	7,5656	7,5636	7,5623	7,5592
3	7,467	7,4635	7,4603	7,4564	7,4531
4	7,5597	7,5558	7,5535	7,5504	7,5477

Δm [g]	0	15	30	45	60
1	0	0,0012	0,0054	0,0087	0,013
2	0	0,0015	0,0045	0,0058	0,0089
3	0	0,0035	0,0067	0,0106	0,0139
4	0	0,0024	0,0057	0,0088	0,012

prosjeak	0	0,0024	0,005533	0,008367	0,011933
----------	---	--------	----------	----------	----------

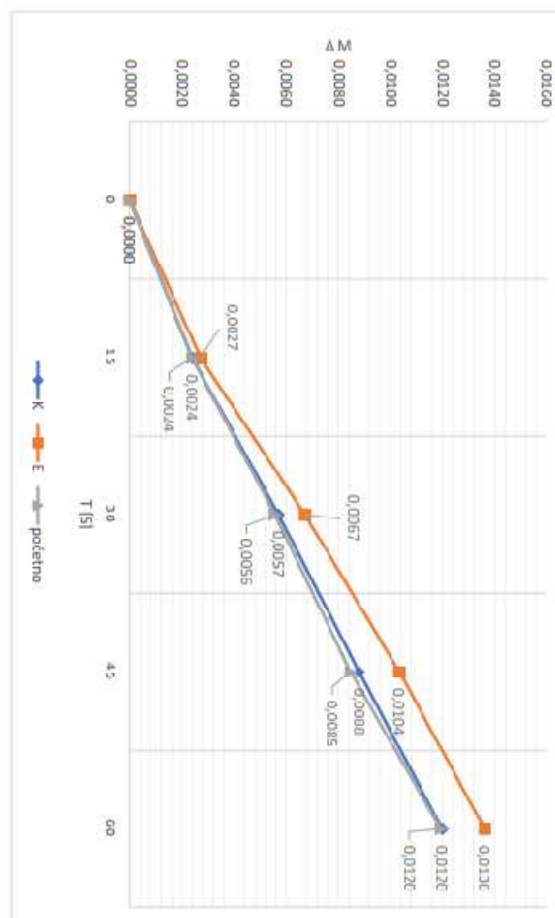


Usporedba vrijednosti kovanih, uzoraka kutne ekstruzije i uzoraka početnog stanja pri kutu od 30 stupnjeva:

30 stupnjeva

Usporedba prosječnih vrijednosti gubitka mase na 30 stupnjeva

Δm [g]	0	15	30	45	60
K	0,0000	0,0024	0,0057	0,0088	0,0120
E	0,0000	0,0027	0,0067	0,0104	0,0136
početno	0,0000	0,0024	0,0056	0,0085	0,0120



Usporedba vrijednosti kovanih, uzoraka kutne ekstruzije i uzoraka početnog stanja pri kutu od 90 stupnjeva:

90 stupnjeva

Usporedba prosječnih vrijednosti gubitka mase na 90 stupnjeva

Δm [g]	0	15	30	45	60
K	0,0000	0,0022	0,0042	0,0064	0,0089
E	0,0000	0,0031	0,0054	0,0078	0,0100
poč.	0,0000	0,0017	0,0033	0,0056	0,0081

