

# Utjecaj opterećenja na tvrdoću kompozita s matricom od Al-legure ojačane česticama lebdećeg pepela

---

Orešković, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:842721>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-07**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Orešković**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Luka Orešković

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem svojoj mentorici prof.dr.sc. Veri Rede, na predloženoj temi, stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem svojim roditeljima, Zlati i Zdravku na razumijevanju, ukazanom povjerenju i bezuvjetnoj podršci bez kojih završetak ovog studija ne bi bio moguć.

Također zahvaljujem i prijateljima uz koje je studiranje bilo lakše i zanimljivije.

Luka Orešković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA OREŠKOVIĆ**

Mat. br.: 0035206974

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj opterećenja na tvrdoću kompozita s matricom od Al-legure ojačane česticama lebdećeg pepela**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Load effect on the hardness of aluminium alloy – fly ash particulate-reinforced composites**

Opis zadatka:

Tvrdoća materijala je važno svojstvo svih tehničkih materijala, a mjerenje tvrdoće je vjerojatno najčešće provođeno ispitivanje od svih mehaničkih svojstava. Dobivene vrijednosti tvrdoće su u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima što doprinosi učestalosti ovog ispitivanja. Samo ispitivanje se relativno jednostavno provodi, a za neke metode mjerenja nije potrebna posebna priprema površine.

Kod Vickersove metode mjerenja tvrdoće moguće je primijeniti različita opterećenja. Za više vrijednosti opterećenja izmjerene vrijednosti tvrdoće ne ovise o opterećenju, ali za vrlo mala opterećenja utjecaj opterećenja je jako izražen. Postoji nekoliko matematičkih modela kojima se može kvantificirati utjecaj opterećenja na dobivene vrijednosti tvrdoće.

U diplomskom radu potrebno je opisati matematičke modele za analizu utjecaja opterećenja pri mjerenju tvrdoće koji se najčešće primjenjuju. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu na uzorcima Al-legure s dodatkom lebdećeg pepela. Pri mjerenju tvrdoće primijeniti različita opterećenja, od najmanjih prema višima. Dobivene rezultate analizirati jednim od opisanih modela i donijeti zaključke o utjecaju opterećenja na vrijednosti tvrdoće.

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:  
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: *Rede*  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
SAŽETAK .....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD .....	1
2. UTJECAJ OPTEREĆENJA NA VRIJEDNOST TVRDOĆE .....	4
3. MATEMATIČKI MODELI ZA ANALIZU .....	6
3.1. Meyerov zakon .....	6
3.2. Model otpornosti razmjeran svojstvima uzorka (PSR) .....	7
4. KUTNO KANALNO PREŠANJE .....	10
4.1. Uvjeti koji utječu na kutno kanalno prešanje .....	14
4.2. Optimalno kutno kanalno prešanje .....	17
4.3. Vrste alata za kutno kanalno prešanje .....	19
4.4. Rute .....	24
4.5. Svojstva materijala nakon kutnog kanalnog prešanja .....	25
5. KOMPOZITI .....	26
5.1. Lebdeći pepeo .....	28
5.2. Proizvodnja kompozita s metalnom matricom .....	29
5.3. Postupak dobivanja kompozita u poluskrućenom stanju - compocasting .....	29
6. ALUMINIJSKA LEGURA - AlSi7Mg .....	31
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	34
7.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	34
7.2. Materijal za ispitivanje .....	35
7.3. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće .....	38
7.4. Analiza mikrostrukture .....	40
7.5. Mjerenje tvrdoće .....	43
8. ANALIZA REZULTATA .....	49
8.1. Analiza utjecaja provlačenja na tvrdoću .....	49
8.2. Analiza utjecaja opterećenja na tvrdoću .....	54
8.3. Primjena Meyerovog zakona .....	57

9. ZAKLJUČAK.....	60
REFERENCE.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1. a) Vickersov penetrator, b) savršeni otisak, c) oblik otiska koji se deformirao zbog elastičnog povrata, d) deformacija otiska zbog proširenja površine e) otisci jednakih dijagonala, a različitih površina [2] .....	1
Slika 2. Promjena tvrdoće s promjenom opterećenja [1] .....	2
Slika 3. Promjena Meyerovog koeficijenta K sa promjenom eksponenta n pri različitim mjernim jedinicama [8] .....	7
Slika 4. Geometrija alata za kutno kanalno prešanje [14] .....	13
Slika 5. Klizna linija pri kutnom kanalnom prešanju [9].....	14
Slika 6. Klizne linije u kutnom kanalnom prešanju s trenjem pri oštrim (a) i zaobljenim (b) kutovima [9].....	15
Slika 7. Klizne linije sa kutom manjim od 90 (a) i savijanje oko unutarnjeg kuta (b) [9].....	16
Slika 8. Odmak materijala od površine kanala (a), lokalizirano smicanje (b), savijanje u izlaznom kanalu (c) [9].....	17
Slika 9. Kutno kanalno prešanje sa tri pomične plohe i klizačem u ulaznom kanalu (a), kutno kanalno prešanje sa pokretnim klizačem u oba kanala (b) [9] .....	20
Slika 10. Kutno kanalno prešanje s pokretnim donjim klizačem [9] .....	21
Slika 11. Shematski prikaz kontinuiranog kutnog kanalnog prešanja [9] .....	22
Slika 12. Konstrukcija alata za polukontinuirano kutno kanalno prešanje [9] .....	23
Slika 13. Geometrija alata s dva kanala(a) i kutno kanalno prešanje s jednim kanalom(b)[11].	24
Slika 14. Izgled alata za kutno kanalno prešanje (a) i rute (b) [12].....	25
Slika 15. Materijali za matricu i ojačalo [16] .....	27
Slika 16. Mikrostruktura dobro povezanog lebdećeg pepela i aluminija [22].....	28
Slika 17. Shematski prikaz Compocasting postupak [16] .....	30
Slika 18. Tipična mikrostruktura odljevaka AlSi7Mg a), pore od mikro skupljanja b), plinske pore c) [31].....	33
Slika 19. Oprema za lijevanje i miješanje.....	36
Slika 20. Alat za kutno kanalno prešanje .....	37
Slika 21. Hidraulička preša .....	37
Slika 22. Uzorci na kojima je provedeno ispitivanje tvrdoće.....	38
Slika 23. Uređaji za brušenje i poliranje.....	39
Slika 24. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	40
Slika 25. Mikrostruktura uzorka 0.....	41
Slika 26. Mikrostruktura uzorka I.....	41



<b>Slika 27. Mikrostruktura uzorka II</b> .....	42
<b>Slika 28. Mikrostruktura uzorka III</b> .....	42
<b>Slika 29. Tvrdomjer PMT-3U4.2</b> .....	43
<b>Slika 30. Mjesta ispitivanja tvrdoće uz rubove</b> .....	44
<b>Slika 31. Ovisnost tvrdoće o broju provlačenja i opterećenju pri mjerenju</b> .....	49
<b>Slika 32. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova neprovučenog uzorka (0) o opterećenju</b> .....	50
<b>Slika 33. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova jedanput provučenog uzorka (I) o opterećenju</b> ....	51
<b>Slika 34. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova dvaput provučenog uzorka (II) o opterećenju</b> .....	52
<b>Slika 35. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova triput provučenog uzorka (III) o opterećenju</b> .....	53
<b>Slika 36. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak 0</b> .....	54
<b>Slika 37. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak I</b> .....	55
<b>Slika 38. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak II</b> .....	55
<b>Slika 39. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak III</b> .....	56
<b>Slika 40. Parametri tvrdoće HV za uzorak 0 prema Meyerovom zakonu</b> .....	57
<b>Slika 41. Parametri tvrdoće HV za uzorak I prema Meyerovom zakonu</b> .....	58
<b>Slika 42. Parametri tvrdoće HV za uzorak II prema Meyerovom zakonu</b> .....	58
<b>Slika 43. Parametri tvrdoće HV za uzorak III prema Meyerovom zakonu</b> .....	59

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1. Uobičajeni kemijski sastav legure AlSi7Mg [27]</b> .....	31
<b>Tablica 2. Mehanička svojstva legure AlSi7Mg [28]</b> .....	32
<b>Tablica 3. Kemijski sastav AlSi7Mg</b> .....	35
<b>Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 0</b> .....	45
<b>Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće za uzorak I</b> .....	46
<b>Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak II</b> .....	47
<b>Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće za uzorak III</b> .....	48
<b>Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće s obzirom na uzorak (broj provlačenja)</b> .....	49
<b>Tablica 9. Rezultati linearne regresije za uzorak 0</b> .....	57
<b>Tablica 10. Rezultati linearne regresije za uzorak I</b> .....	58
<b>Tablica 11. Rezultati linearne regresije za uzorak II</b> .....	59
<b>Tablica 12. Rezultati linearne regresije za uzorak III</b> .....	59

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$A$	$\text{mm}^2$	površina
$a_1$	$\text{N/mm}$	parametar povezan s elastičnim i plastičnim svojstvima materijala
$A_1$	$\text{N/mm}^2$	konstanta neovisna o opterećenju
$a_2$	$\text{N/mm}^2$	parametar poveznici s elastičnim i plastičnim svojstvima materijala
$c_0$	$\text{N}$	parametar povezan je s zaostalim površinskim naprezanjem u uzorku
$c_1$	$\text{N/mm}$	parametar povezan sa elastičnim i plastičnim svojstvima uzorka
$c_2$	$\text{N/mm}^2$	parametar povezan sa elastičnim i plastičnim svojstvima uzorka
$d$	$\text{mm}$	duljina dijagonale
$d'$	$\text{mm}$	širina ulaznog kanala
$d''$	$\text{mm}$	udaljenost između dva izlazna kanala
$d_K$	$\text{mm}$	širina svakog izlaznog kanala
$F$	$\text{N}$	sila (opterećenje)
$F_1$	$\text{N}$	sila trenja između klizača i alata
$F_r$	$\text{N}$	otpor materijala
$H$		tvrdoća
$h$	$\text{mm}$	dubina udubljenja
$H_K$	$\text{mm}$	debljina klizača
$H_{\text{PSR}}$		"istinska tvrdoća"
$k$		konstanta (0,1891)
$K$	$\text{N mm}^{-n}$	konstanta materijal/indentor
$L_b$	$\text{mm}$	duljine kontakta obratka
$M$	$\text{Nm}$	moment savijanja
$n$		Meyerov indeks
$N$		broj prolaza kroz alat
$R$	$\text{mm}$	radijus
$T$	$\text{N}$	vlačne sile
$t$	$\text{mm}$	debljina ploče

---

$W$	N	minimalno opterećenje potrebno za pokretanje plastične deformacije
$\mu$		koeficijent trenja
$\varphi$	◦	unutarnjim kutom
$\psi$	◦	vanjskim kutom
$\varepsilon_{eff}$		efektivni stupanj deformacije

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
<b>ISE</b>	<i>Indentation size effect</i> - Utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće
<b>RISE</b>	<i>Reverse indentation size effect</i> - Obrnuti utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće
<b>PSR</b>	<i>Proportional specimen resistance model</i> - model otpornosti razmjeran svojstvima uzorka
<b>SPD</b>	<i>Severe plastic deformation</i> - Velike plastične deformacije
<b>ECAP</b>	<i>Equal channel angular pressing</i> - kutno kanalno prešanje
<b>FA</b>	<i>Fly Ash</i> - lebdeći pepeo
<b>RHA</b>	<i>Rice husk ash</i> - pepeo od ljuske riže

## SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj opterećenja na tvrdoću kompozita AlSi7Mg ojačanog česticama lebdećeg pepela. Kompozit je dobiven comocasting postupkom i naknadno podvrgnut kutnom kanalnom prešanju u nekoliko prolaza. Analiziran je i utjecaj provlačenja na tvrdoću kompozita (HV0,02, HV0,05, HV0,1 i HV0,2). Dobiveni rezultati analizirani su Meyerovim zakonom koji opisuje utjecaj opterećenja na dobivene vrijednosti tvrdoće.

Dobiveni rezultati ukazuju da broj provlačenja pri kutnom kanalnom prešanju intenzivno utječe na tvrdoću kompozita. Što je veći broj provlačenja veća je i tvrdoća materijala kod svih primijenjenih opterećenja. Najveći prirast tvrdoće zabilježen je nakon prvog provlačenja.

Primijenjeno opterećenje pri mjerenju tvrdoće utječe na vrijednosti tvrdoće. Regresijskom analizom potvrđeno je da se Meyerov model može primijeniti za analizu utjecaja opterećenja na tvrdoću ispitivanog kompozita.

Ključne riječi: utjecaj opterećenja na tvrdoću, Al-kompozit, kutno kanalno prešanje, Meyerov model.

## SUMMARY

The paper analyzes the indentation size effect of AlSi7Mg composite reinforced with fly ash particles. The composite was obtained by the compocasting process and subsequently subjected to equal-channel angular pressing in several extrusions. The influence of extrusions on the hardness of composites (HV0,02, HV0,05, HV0,1 and HV0,2) was also analyzed. The obtained results were analyzed by Meyer's law which describes the influence of load on the obtained hardness values.

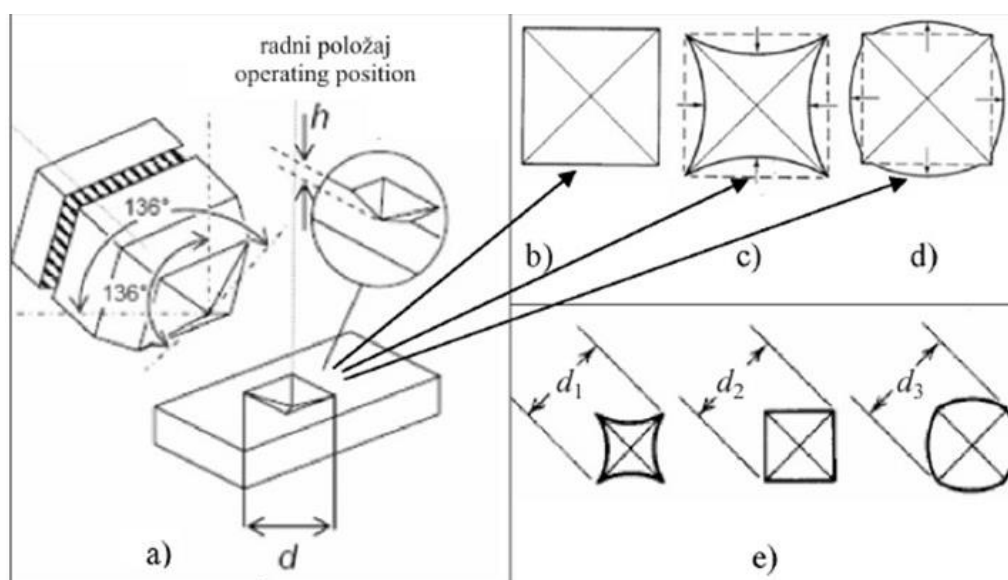
The obtained results indicate that the number of extrusions during equal-channel angular pressing intensively affects the hardness of the composite. The higher the number of extrusions, the higher the hardness of the material at all applied loads. The highest increase in hardness was recorded after the first extrusion.

The applied load when measuring the hardness affects the hardness values. Regression analysis confirmed that the Meyer model can be applied to analyze the influence of load on the hardness of the tested composite.

Key words: indentation size effect, Al-composite, equal-channel angular pressing, Meyer model.

## 1. UVOD

Tvrdoća predstavlja mjeru za otpornost materijala prema plastičnoj deformaciji. Jedna od najčešće korištenih metoda za ispitivanje tvrdoće je Vickersova metoda zbog svoje jednostavnosti i minimalne potreba za obradom uzorka [1]. Mjerenje tvrdoće po Vickersu određuje se mjerenjem dimenzija otiska koji je nastao nakon utiskivanja četverostrane dijamantne piramide pod određenim opterećenjem. Utiskivanje piramide ostavlja otisak na površini uzorka, [Slika 1]. Zbog elastičnog utjecaja, otisak nije uvijek savršenog oblika [Slika 1 b)], nego dolazi do iskrivljenja. Otisak se može deformirati zbog elastičnog povrata materijala oko ravnih površina piramide, [Slika 1 c)] ili zbog deformacija proširenja površina, [Slika 1 d)]. Otisci mogu imati različite oblike i površine uz jednake dijagonale, [Slika 1 e)] [2].



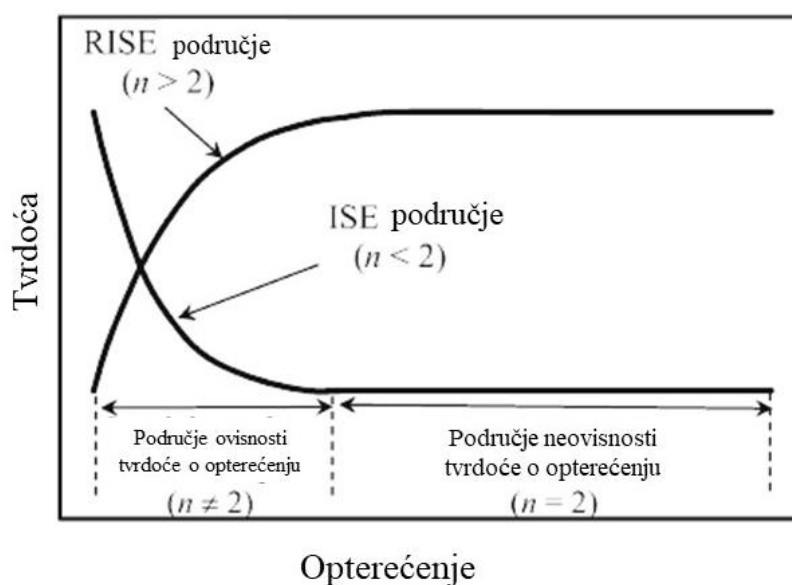
**Slika 1. a) Vickersov penetrator, b) savršeni otisak, c) oblik otiska koji se deformirao zbog elastičnog povrata, d) deformacija otiska zbog proširenja površine e) otisci jednakih dijagonala, a različitim površina [2]**

Eksperimentalno je potvrđeno da tvrdoća ovisi o opterećenju koje se koristi pri ispitivanju [1]. Uobičajeni postupak ispitivanja tvrdoće sastoji se od primjene fiksnog opterećenja preko dijamante piramide i mjerenja dimenzija otiska udubljenja na površini ispitnog materijala nakon prestanka djelovanja opterećenja. Tada se tvrdoća,  $H$ , može izračunati kao omjer primijenjenog opterećenja,  $F$ , na dodirnu ili projiciranu površinu,  $A$  [3]



$$H = \frac{F}{A} = k \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

gdje je  $d$  izmjerena duljina dijagonale udubljenja, a  $k$  je konstanta jednaka 0,1891 [3]. Tvrdoća je bitna jer se preko nje mogu dobiti druge važne karakteristike, međutim puno je stvari koje mogu utjecati na tvrdoću [4]. Jedna od važnijih je utjecaj opterećenja na tvrdoću. Ako dođe do povećanja opterećenja, a tvrdoća se smanji to se naziva utjecaj opterećenja na tvrdoću (engl. *Indentation size effect - ISE*), dok se kod drugih materijala tvrdoća može povećati, a ta se pojava naziva obrnut utjecaj opterećenja na tvrdoću (engl. *Reverse indentation size effect - RISE*), [Slika 2] [1].



**Slika 2. Promjena tvrdoće s promjenom opterećenja [1]**

Ispitivanje mikrotvrdoće uobičajen je postupak za određivanje mehaničkih svojstava malog volumena materijala. Princip Vickersove metode mikrotvrdoće identičan je ispitivanju makrotvrdoće. Mikrotvrdoća je potrebna za mjerenje tvrdoće malih dijelova, tankih slojeva, premaza, te za identifikaciju faza u metalografiji [5][6]. Oblik Vickers udubljenja geometrijski je sličan pri svim ispitnim opterećenjima. Stoga se očekuje da je vrijednost tvrdoće konstantna unutar statističke preciznosti u vrlo širokom rasponu opterećenja sve dok je ispitivani uzorak razumno homogen [6].

Utjecaj opterećenja na tvrdoću je pojava koja se još uvijek istražuje i koja pridonosi raznim drugim mehanizmima uključujući elastični povrat, otvrdnjavanje prilikom ispitivanja tvrdoće i gradijent naprezanja povezan sa dislokacijama (nepravilnostima). Način na koji opterećenje utječe na tvrdoću povezuje se s drugim svojstvima materijala kao što su modul elastičnosti, gustoća dislokacija, itd. [4].

## 2. UTJECAJ OPTEREĆENJA NA VRIJEDNOST TVRDOĆE

Utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće i njegov utjecaj na mehanička svojstva materijala dobiva sve veću znanstvenu i praktičnu pozornost. To je posljedica brzog razvoja nanomaterijala i nanotehnologije, kao i novog pristupa za proučavanje deformacije i čvrstoće krutih tijela. Istraživanja su pokazala da metoda ispitivanja tvrdoće ima široku primjenu za određivanje mehaničkih svojstava materijala na različitim razinama veličine otisaka [7].

Istraživanja utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće materijala pokazala su da se smanjenjem opterećenja utiskivanja  $F$  i konstantnim geometrijskim parametrima otiska, vrijednosti tvrdoće povećavaju, osobito pri malim opterećenjima. Prema dubini utisnuća dimenzijske razine mogu se klasificirati na: nanorazina na dubini manjoj od 0,1  $\mu\text{m}$ , mikrorazina od 0,1 do 1  $\mu\text{m}$ , mezorazina od 1 do 10  $\mu\text{m}$  i makrorazina veća od 10  $\mu\text{m}$  [7].

Ovaj fenomen proučava se preko jednog stoljeća, ali za sada mu još nije sa sigurnošću određen uzrok. Postoji nekoliko mogućih teorijskih objašnjenja. Najčešća objašnjenja u literaturi su eksperimentalne pogreške koje proizlaze iz ograničenja razlučivosti leće objektiva i osjetljivosti uređaja koji mjeri opterećenje [3]. Utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće može biti uzrokovan i svojstvima ispitivanog materijala (očvrstnuće tijekom utiskivanja), elastičnim povratom, elastičnoj otpornosti materijala, načinom pripreme ispitivanih uzoraka (brušenje, poliranje i zaostalo naprezanje) i drugim čimbenicima (trenje indenter-uzorak, podmazivanje i korozija) [6]. Tijekom posljednja dva desetljeća predloženo je i nekoliko novih teorijskih modela, ali unatoč velikom interesu, uzrok ovoj pojavi nije sa sigurnošću utvrđen [3].

Za razliku od "normalnog" utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće, poznat je i obrnuti utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće, gdje se mikrotvrdoća povećava s povećanjem ispitnog opterećenja. Uglavnom se pojavljuje kod materijala koji se plastično deformiraju [6].

Postoji mnogo primjera koji otkrivaju da se „normalni“ utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće javlja u krhkim materijalima, za razliku od obrnutog utjecaja koji se uglavnom javlja kod žilavih materijala [6].

Podrijetlo ove pojave istraživali su mnogi autori, koji su pokušali napraviti kritičke usporedbe primjenjivosti i učinkovitosti različitih empirijskih ili polu-empirijskih jednadžbi u opisu eksperimentalno izmjerenih podataka tvrdoće. Često korištene empirijske ili polu-empirijske jednadžbe za opisivanje varijacije veličine udubljenja s primijenjenim ispitnim opterećenjem uključuju Meyerov zakon, Hays-Kendall pristup, energetski balansni pristup, model otpornosti razmjernan svojstvima uzorka (engl. *Proportional specimen resistance model* - *PSR*) itd. Na

temelju analiza eksperimentalnih podataka, 1999. godine predložen je modificirani PSR model za opis utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće i određivanje tvrdoće neovisne o opterećenju. Također su detaljno razmotrena fizička značenja modificiranog PSR modela. Ovaj model je upotrijebljen za analizu karakteristika tvrdoće niza krhkih materijala, uključujući staklo, keramiku i kompozite s keramičkom matricom. Dokazano je da modificirani PSR model može dati zadovoljavajući opis izmjerenih podataka utisnuća te se na temelju ovog modela može dati objašnjenje za promatrane utjecaje [3].

Do danas se veliki broj istraživača bavio ovim fenomenom i opći zaključak bi bio da se mikroskopska mehanička svojstva materijala značajno razlikuju od svojstava materijala na makro ljestvici [8].

### 3. MATEMATIČKI MODELI ZA ANALIZU

#### 3.1. Meyerov zakon

Meyerov zakon i model otpornosti razmjeran svojstvima uzorka (PSR) dva su glavna pristupa za kvantitativni opis utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće.

Kod Meyerovog zakona, kojim se na najjednostavniji način opisuje utjecaj opterećenja na vrijednost tvrdoće, za udubljenja koja imaju idealnu geometriju odnos između ispitnog opterećenja i dijagonale otiska prikazuje se na sljedeći način:

$$F = Kd^n \quad (2)$$

gdje je:

$F$  - opterećenje

$d$  - dijagonalna duljina otiska

$K$  - konstanta materijala/indentora

$n$  - Meyerov indeks zbog zakrivljenosti krivulje.

Parametri  $n$  i  $K$  određeni su eksponencijalnom krivuljom koja se prilagođava dijagonali otiska  $d$  u odnosu na primijenjeno opterećenje  $F$ . Ovi parametri mogu se dobiti iz linearne regresije  $\log(d)$  u odnosu na  $\log(F)$ . Meyerov indeks  $n$  je nagib, a  $K$  je odsječak na ordinati. Kada je indeks  $n < 2$  radi se o "normalnom" utjecaju opterećenja na vrijednost tvrdoće, a kada je  $n > 2$  tada je utjecaj obrnuti. Ako je  $n = 2$ , mikrotvrdoća je neovisna o opterećenju [6].

Budući da je dijagonala otiska proporcionalna dubini otiska, jednadžba (2) može se izraziti na sljedeći način:

$$F = K'h^n \quad (3)$$

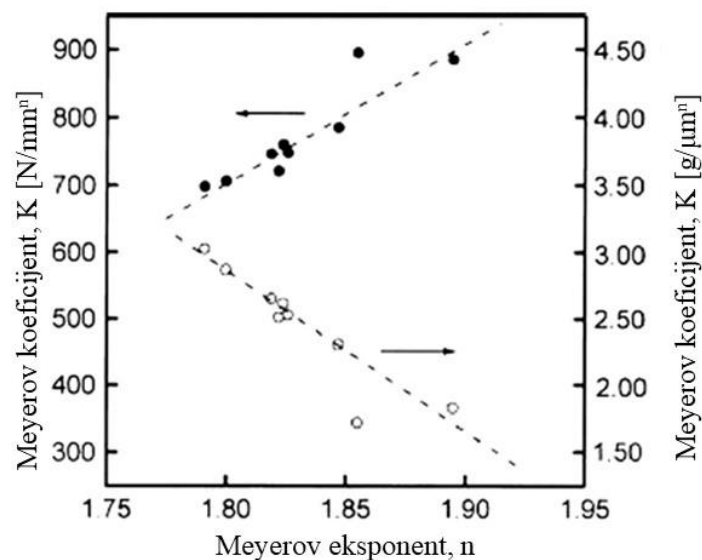
gdje je:

$K'$  - konstanta materijala/indentora

$h$  - dubina otiska.

Peng i sur. su istaknuli da korelacija između  $n$  i  $K$  nije imala velikog značaja za razumijevanje utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće, jer su njihova prethodna istraživanja pokazala da najbolja vrijednost koeficijenta  $K$  ovisi o sustavu mjernih jedinica

Prvi sustav mjernih jedinica koji se koristi je  $F$  u Newton-ima (N) i  $d$  u milimetrima (mm), a drugi  $F$  u gramima (g) i  $d$  u mikrometrima ( $\mu\text{m}$ ). U različitim sustavima jedinica odnos između  $n$  i  $K$  je potpuno različit [Slika 3] [8].



**Slika 3. Promjena Meyerovog koeficijenta  $K$  sa promjenom eksponenta  $n$  pri različitim mjernim jedinicama [8]**

Kod određivanju utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće u Meyerovom zakonu važnu ulogu ima samo parametar  $n$  i nije potrebno razmatrati varijaciju koeficijenta  $K$  [8].

Ostali potencijalni utjecajni čimbenici, kao što su neadekvatne mjerne sposobnosti iznimno malih utisnuća (Samuels, 1986.), prisutnost oksida ili kemijska onečišćenja na površini (Sargent, 1986.), trenje uzork-indentor (Li i sur., 1993.), povećana dominacija efekata rubova s malim utisnućima (Ma i Clark, 1995.) i radijusom vrha (McElhaney i sur., 1998.) na kraju se pokazalo da su neučinkoviti u određivanju utjecaja opterećenja na vrijednost tvrdoće [8].

### 3.2. Model otpornosti razmjeran svojstvima uzorka (PSR)

Početkom 1990 -ih, Li i Bradt predložili su model otpornosti razmjeran svojstvima uzorka (PSR) kako bi pružili novo objašnjenje za utjecaj opterećenja na tvrdoću. Ovaj model pretpostavlja da će na primijenjeno opterećenje  $F$ , djelomično utjecati otpor materijala  $Fr$  prema plastičnoj deformaciji. Prvom aproksimacijom,  $Fr$  se može smatrati sličnim elastičnom otporu opruge sa suprotnim predznakom u odnosu na primijenjeno ispitno opterećenje [3].

Model otpornosti razmjernan svojstvima uzorka govori o povezanosti između zadanog opterećenja ( $F$ ) i rezultirajuće veličine otiska ( $d$ ) gdje se normalno ponašanje može opisati pomoću jednadžbe (4) [4].

$$F_r = a_1 d \quad (4)$$

Ovaj model može se smatrati modificiranim oblikom Hays/Kendallovog pristupa utjecaju opterećenja na tvrdoću i može se opisati izrazom:

$$F = a_1 d + a_2 d^2 \quad (5)$$

Parametri  $a_1$  i  $a_2$  iz izraza (5) povezani su s elastičnim i plastičnim svojstvima materijala.

Parametar  $a_1$  karakterizira ovisnost mikrotvrdoće o opterećenju i opisuje utjecaj opterećenja na tvrdoću preko modela otpornosti razmjernog svojstvima uzorka. Sastoji se od dvije komponente: elastičnog otpora ispitnog uzorka i otpora trenja između indentora i uzorka. Parametar  $a_2$  izravno je povezan s mikrotvrdoćom neovisnom o opterećenju koja se ponekad naziva i "istinska tvrdoća"  $H_{PSR}$ .

$$H_{PSR} = 0.1891 * a_2 \quad (6)$$

Jednadžba (5) se može zapisati u obliku:

$$\frac{F}{d} = a_1 + a_2 d \quad (7)$$

Parametri  $a_1$  i  $a_2$  iz (7) mogu se dobiti iz grafa  $F/d$  u odnosu na dijagonalu otiska  $d$ . Jednadžba (7) se može smatrati modificiranim oblikom modela otpornosti razmjernog svojstvima uzorka.

$$F = c_0 + c_1 d + c_2 d^2 \quad (8)$$

Parametri  $c_0$ ,  $c_1$  i  $c_2$  iz izraza (8) mogu se dobiti iz kvadratnih regresija  $F$  prema  $d$ . Parametar  $c_0$  povezan je s zaostalim površinskim naprezanjem u uzorku, a parametri  $c_1 \approx a_1$  i  $c_2 \approx a_2$  povezani su s elastičnim i plastičnim svojstvima uzorka.

Omjer  $c_1/c_2$  je mjera zaostalog naprezanja uslijed strojne obrade i poliranja.

Meyerov indeks  $n$  opada s povećanjem mikrotvrdoće. Obrnuta veza između mikrotvrdoće i  $n$  opažena je za materijale na bazi željeza ili toplinski obrađenog čelika.

U slučaju kada dolazi samo do elastične deformacije ovisnost opterećenja o tvrdoći prikazana je izrazom:

$$F = W + A_1 d^2 \quad (9)$$

gdje je:

$A_1$  - konstanta neovisna o opterećenju,

$W$  - minimalno opterećenje potrebno za pokretanje plastične deformacije.

Vrijednosti  $W$  i  $A_1$  mogu se dobiti iz regresije  $F$  prema  $d^2$  [6].



## 4. KUTNO KANALNO PREŠANJE

Oblikovanje sa značajnom plastičnom deformacijom (engl. *Severe plastic deformation - SPD*), u koje spada i kutno kanalno prešanje uvelike je doprinijelo razvoju znanosti o materijalima. U Bridgmanovom radu o fizici visokog tlaka, oblikovanje sa značajnom plastičnom deformacijom počinje se promatrati kao znanstveni koncept. Njegov primarni interes bile su fazne transformacije pod iznimno visokim pritiscima, temperaturama i smičnim deformacijama koje se pojavljuju u Zemljinom plaštu tijekom stvaranja ruda i drugih minerala. Koristeći kombinaciju "visoki tlak + smicanje", došao je do brojnih otkrića. Ova tehnika, poznata kao torzija pod visokim tlakom, može se primijeniti samo na male tanke diskove. Zbog specifičnih tehničkih problema kao što su veliki okretni moment / opterećenje i poteškoće s povećanjem obratka, istraživanje o torziji pod visokim tlakom nije ušlo u širu primjenu, unatoč brojnim izvješćima o poboljšanjima svojstava različitih materijala [9].

U industrijsku primjenu ova tehnika oblikovanja metala uvedena je 1972., a tada je napravljena i prva optimizacija postupka korištenjem smicanja umjesto uvijanja. Nakon opsežnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, kutno kanalno prešanje (engl. *Equal channel angular pressing - ECAP*), omogućuje skoro idealnu deformaciju smicanja. Suprotno torziji pod visokim tlakom, ova tehnika je identificirana kao „jednostavni smični proces“. Tijekom daljnjeg razvoja prešla je iz laboratorija u industriju i tako postala prva i jedinstvena, komercijalizirana tehnika sa značajnom plastičnom deformacijom [9].

Kasnije su istražene i druge tehnike sa značajnom plastičnom deformacijom. One se razlikuju u tehničkoj realizaciji, proizvodima i postignutim rezultatima. Raspodjela i intenzitet smicanja utječu na promjenu strukture. Sve poznate tehnike sa značajnom plastičnom deformacijom mogu se klasificirati prema mehanizmu stvaranja jednostavnog smicanja:

1. jednostavno površinsko smicanje dobiveno kontaktnim trenjem
2. lokalno površinsko naprezanje dobiveno klizanjem, valjanjem ili utiskivanjem
3. jednostavno smicanje s promjenom brzine u operacijama oblikovanja (višesmjerno kovanje)
4. jednostavno smicanje između područja jake nehomogenosti
5. unutarnje jednostavno smicanje izazvano uzastopnim uvijanjem kroz cijeli volumen materijala (kutno kanalno prešanje)

Tehnike kontaktnog trenja rezultiraju jakim i jednolikim smicanjem kod tankih materijala, ali se ne mogu primijeniti kod većih presjeka. Zahtijevaju minimalno trenje i veliko opterećenje,

te veliki okretni moment i plastičnu deformaciju. Tehnike lokalnog površinskog naprezanja su efektivne za površinske plastične deformacije jer lokalno opterećenje zahtjeva male sile i osigurava uske tolerancije. Problemi kod jednostavnog smicanja s promjenom brzine u operacijama oblikovanja su značajna nehomogenost naprezanja/deformacija, promjena načina deformacije s jednostavnog smicanja na čisto smicanje, brojni koraci obrade, te velika naprezanja i opterećenja za obradu pri niskim temperaturama. Isto vrijedi i za tehnike koje se temelje na intenzivnom smicanju između područja jake nehomogenosti, posebno za tvrde materijale i proizvode velikih dimenzija. Za unutarnje smicanje uvijanjem, način deformacije je jednostavno smicanje, ali je raspodjela deformacija vrlo neujednačena i ne mijenja unutrašnjost materijala. Mnoge od ovih tehnika nisu prikladne za širu namjenu.

Kutno kanalno prešanje je jedna od najnaprednijih tehnika sa značajnim plastičnim deformacijama [9]. Kod ovog postupka obradak se može istiskivati u uzastopnim prolazima. Ova tehnika ima prednost stvaranja velikog kumulativnog naprezanja bez mijenjanja poprečnog presjeka obratka [10]. Nedostaci kutnog kanalnog prešanja su niska produktivnost, složeni alati i visoki troškovi, no ovi problemi su uklonjeni tijekom razvoja i praktične primjene [9].

Posljednjih godina, metode proizvodnje odozgo prema dolje koje se temelje na značajnim plastičnim deformacijama pronašle su sve veću važnost u postizanju fino-zrnatih i nano-kristalnih materijala [11]. Poznato je da fino-zrnati materijali pokazuju poboljšana mehanička svojstva kao što su istodobna velika čvrstoća i umjerena duktilnost, kao i sposobnost superplastičnog oblikovanja. Stoga imaju veliki potencijal za tehničku primjenu [10][12]. Nedostaci, poput poroznosti i nečistoća, koji postoje u metodi proizvodnje odozdo prema gore, poput kondenzacije inertnog plina ili centrifugiranja taline, eliminirani su tehnikama sa značajnom plastičnom deformacijom. Proces je moguće izvesti u više prolaza. Kao rezultat toga, nakupljanje naprezanja uzrokuje gomilanje dislokacija, što dovodi do stvaranja velikokutnih granica zrna s malo poroznosti u konačnoj strukturi. Do sada su razvijene i korištene posebne tehnike obrade sa značajnom plastičnom deformacijom za proizvodnju fino-zrnatih metala i legura, uključujući kutno kanalno prešanje, torziju pod visokim tlakom, akumulacijsko spajanje valjanjem, jednostavno istiskivanje smicanjem i prešanje profila. Kutno kanalno prešanje je vjerojatno najrazvijenija tehnika u kojoj se materijal deformira kroz dva kanala koja se sijeku pod određenim kutom. Kako bi se uklonila ograničenja ove tehnike, poput uklanjanja i ponovnog umetanja uzoraka za sljedeće prolaze, izvršene su neke izmjene

koje uključuju sljedeće: korištenje rotacijske matrice, postupak bočnog istiskivanja, matrica s više prolaza i kontinuirano kutno kanalno prešanje. Korištenje alata koji sadrži dva paralelna kanala je još jedan od načina u kojem se dva odvojena slučaja smicanja događaju kroz jedan prolaz, što dovodi do značajnog smanjenja prolaza za postizanje fino zrnatih materijala. U ovoj tehnici postoje dva glavna parametra koji mijenjaju stanje protoka i stanje naprezanja. Ti su parametri udaljenost između osi dvaju kanala i kut presijecanja kanala [11].

Kutno kanalno prešanje, koje su izvorno predložili Segal i sur., popularan je postupak oblikovanja za izradu rasutih nanostrukturiranih materijala (veličina zrna u rasponu 100-1000 nm). Ekstrudirani materijal ima poboljšana mehanička svojstva, kao što su velika čvrstoća i superplastičnost, koja su uzrokovana značajnom plastičnom deformacijom zbog istiskivanja. Podmazani obradak, s kvadratnim ili kružnim presjekom, može se ponavljano ekstrudirati bez promjene geometrije obratka, kroz jednake kanale koji se međusobno sijeku pod fiksnim kutom [13]. Na sjecištu kanala nalazi se smična zona u koju se unosi velika smična deformacija. Iznos smične deformacije je definiran geometrijom alata, unutarnjim ( $\varphi$ ) i vanjskim ( $\psi$ ) kutom. S više prolaza uzorka kroz alat unosi se veća plastična deformacija, a efektivni stupanj deformacije definiran je izrazom:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = N \left\{ \frac{2 \cot\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right\} \quad (10)$$

pri čemu je:

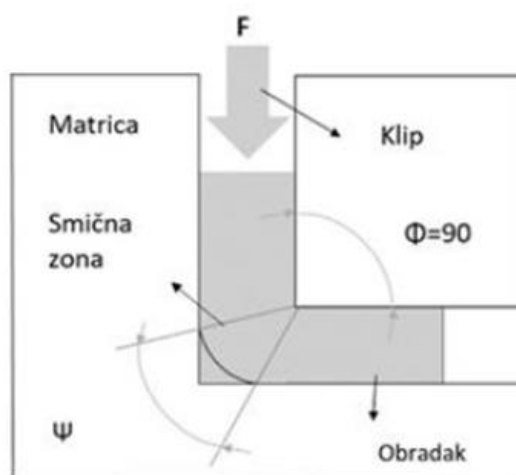
$\varepsilon_{\text{eff}}$ - efektivni stupanj deformacije

$N$ - broj prolaza kroz alat

$\varphi$  -unutarnji kut

$\psi$  vanjski kut [Slika 4] [14].

Postupak se češće koristi u laboratorijima, nego u industriji. Glavni problem za istiskivanje većih obradaka i materijala koji su teško obradivi je kako pravilno konstruirati kanal za industrijsku uporabu [13].



**Slika 4. Geometrija alata za kutno kanalno prešanje [14]**

Proces je u posljednjih nekoliko godina dobio veliku pozornost zbog razvoja nanotehnologije, a i dalje privlači pozornost zbog svog industrijskog potencijala.

Tijekom procesa metalni obradak se utiskuje kroz kanal koja se sastoji od dvije cijevi, jednakih po presjeku i koji se sijeku pod kutom  $\varphi$  (općenito,  $90^\circ$  ili  $120^\circ$ ). Obradak se podvrgava jednostavnoj posmičnoj deformaciji, ali zadržava istu geometriju poprečnog presjeka, tako da je moguće ponavljati više prolaza, od kojih svaki oplemenjuje zrno. U kutnom kanalnom prešanju obradak je moguće rotirati oko njegove uzdužne osi između svaka dva susjedna prolaza, stvarajući različite rute [15].

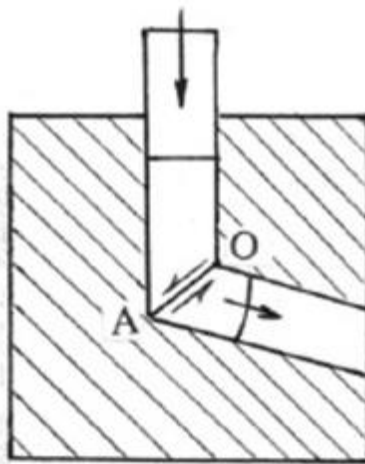
Otkad je ova vrsta obrade postala zanimljiva za proizvodnju materijala ultrafinog zrna, predložene su različite konstrukcijske varijacije kanala. Na temelju izračuna Von Misesovog naprezanja po prolazu prenesenom na materijal, dogovoreno je da je kanal s kutom sjecišta  $90^\circ$  i bez zaobljenih kutova najučinkovitiji [15].

Zbog složenog načina deformacije koji djeluje u procesu, postoji raspon svojstava od vrha do dna deformiranog obratka, što utječe na neujednačenost njegove mikrostrukture. U plastičnoj deformacijskoj zoni događa se deformacija čiji oblik ovisi o čimbenicima kao što su geometrija matrice (kut matrice i zaobljenost kuta), uvjeti obrade (kontaktno trenje, protutlak, temperatura i brzina prešanja, ruta i broj prolaza) i plastična svojstva samog materijala. Jednostavnom smicanju pristupa se kada su unutarnji i vanjski kutovi matrice oštri, nema trenja na stijenkama matrice i materijal se ponaša kao čvrsti materijal. Ovo je idealan slučaj i u praksi se ti uvjeti mogu samo djelomično ispuniti [12].

#### 4.1. Uvjeti koji utječu na kutno kanalno prešanje

##### Kontaktno trenje

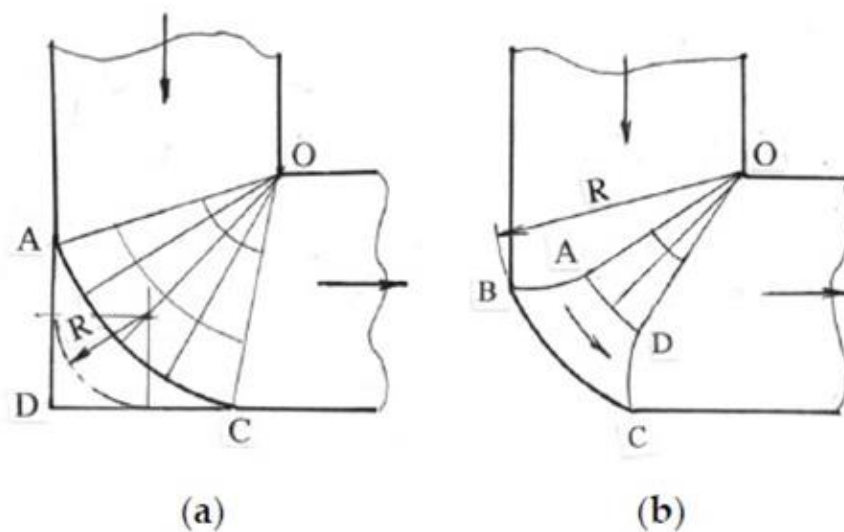
Unatoč upotrebi najboljih maziva, tijekom kutnog kanalnog prešanja uvijek je prisutno određeno trenje. Potreba za ispunjenjem rubnih uvjeta trenja mijenja plastičnu zonu s jedne klizne linije AO [Slika 5] u središnji kružni odsječak AOC [Slika 6 a)], čiji se kut povećava s povećanjem trenja. [Slika 6 a)] prikazuje klizno polje za jednako trenje u oba kanala. Središnji kružni odsječak AOC preraspodjeljuje smicanje između tri različita smjera i tvori "mrtvu" metalnu zonu ACD [9].



Slika 5. Klizna linija pri kutnom kanalnom prešanju [9]

Ova zona sprječava podmazivanje izlaznog kanala. Stoga je u stvarnosti trenje u kanalima različito, a polje klizne linije sa [Slika 6 a)] treba izmijeniti. Kod dobrih maziva, koeficijent plastičnog trenja  $\mu$  je nizak u ulaznom kanalu ( $\mu = 0,06-0,08$ ), ali može biti jednak maksimalnom trenju ( $\mu = 1,0$ ) na donjoj stijenci izlaznog kanala, zbog prijanjanja materijala na alat [9].

U posebnim slučajevima kutnog kanalnog prešanja s pomičnim stijenjkama kanala, trenje može varirati od maksimalnog do nula [9].



**Slika 6. Klizne linije u kutnom kanalnom prešanju s trenjem pri oštrim (a) i zaobljenim (b) kutovima [9]**

#### Konstrukcija kanala

Glavna ideja kutnog kanalnog prešanja bila je ekstruzija bez trenja kroz dva kanala identičnih presjeka koji se sijeku. Nakon toga su predložene i brojne izmjene geometrije kanala. Ove izmjene transformiraju jednostavan način deformacije posmika i stoga nisu korisne u smislu evolucije strukture i karakteristika procesa. Na primjer, kanali često imaju radijuse  $R$  na vanjskom kutu [Slika 6]. Za istiskivanje s trenjem, polja kliznih linija ostaju slična ako je polumjer  $R$  unutar zone mrtvog metala ACD, [Slika 6 a)]. U alternativnim situacijama, uključujući istiskivanje bez trenja, polje klizne linije pretpostavlja središnji kružni odsječak AOD i područje krute rotacije ADCB oko središta O, [Slika 6 b)]. Smična naprezanja duž granice BC mogu varirati od nule do maksimuma. Ovaj je slučaj posebno nepovoljan zbog značajne neujednačenosti naprezanja po cijelom presjeku materijala [9].

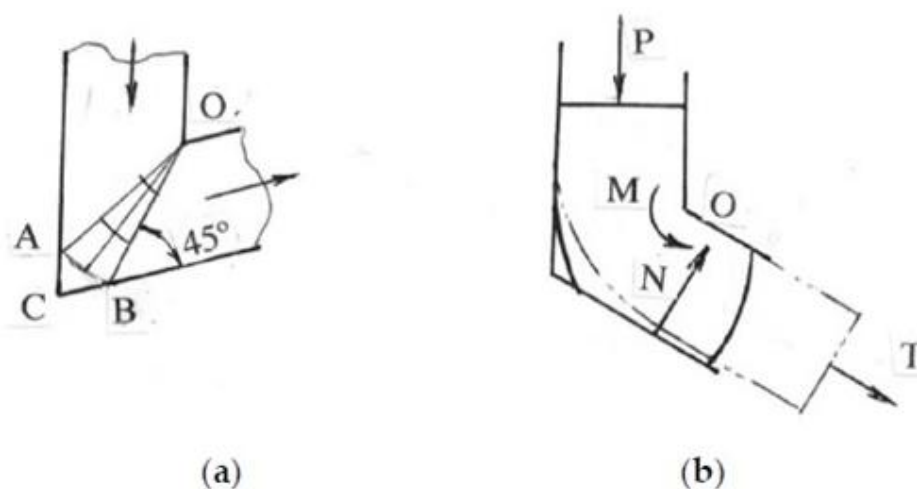
#### Pomične stijenke kanala

Smanjenje trenja na stijenkama kanala smanjuje opterećenje pri obradi i pomaže u deformiranju jačih materijala i povećavanju alata za veće dimenzije obratka. To se može postići kretanjem stijenki kanala s uzorkom. Za matrice s pravokutnim presjekom kanala koriste se dvije pomične bočne stijenke ulaznog kanala i donja pomična stijenka izlaznog kanala. Ako donja stijenka ne klizi, tada su moguće tri pomične bočne stijenke ulaznog kanala. Dok s jedne strane matrica sa smanjenim trenjem zahtijeva manja opterećenja obrade, s druge strane dovodi

do veće zone plastične deformacije. Povratni tlak smanjuje zonu plastične deformacije, odnosno vanjski kutni razmak, što dovodi do homogenije deformacije pod točno definiranim uvjetima [12].

#### Kut između kanala

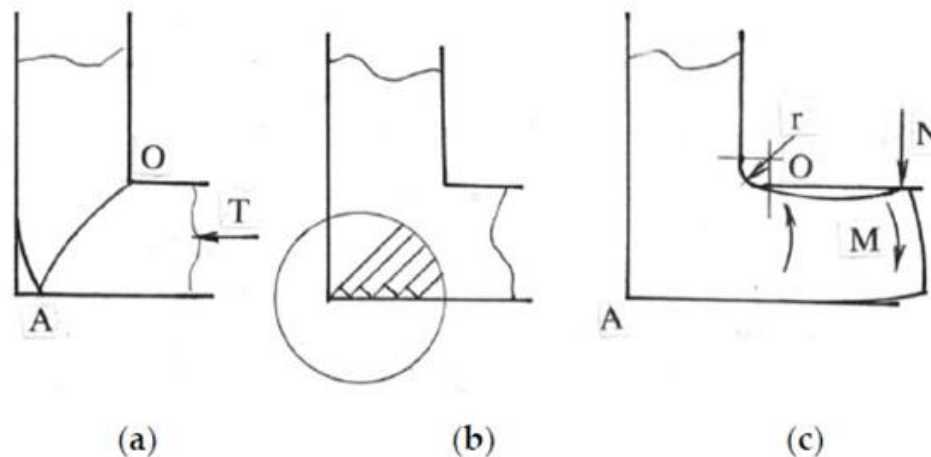
Poznato je da akumulirani tlak smicanja i istiskivanja u istom omjeru ovise o kutu između kanala. Time se definiraju dva kriterija za odabir kuta sjecišta. Kut sjecišta trebao bi biti dovoljno velik da poveća akumulirano smicanje i trebao bi biti dovoljno mali da smanji tlak istiskivanja. Prvi slučaj ograničen je formiranjem zone mrtvog metala ABC za kutove manje od  $90^\circ$  čak i u uvjetima bez trenja [Slika 7 a)]. Slično ograničenje za drugi slučaj je prijelaz s jednostavnog smicanja na savijanje oko unutarnjeg kuta O [Slika 7 b)]. Takvo plastično savijanje je alternativni način deformacije, kada moment savijanja  $M$  svih primijenjenih sila dosegne kritičnu vrijednost. To se događa s povećanjem kuta presijecanja kanala ili primjenom vlačne sile  $T$  na ekstrudirani materijal. Kut presijecanja trebao bi biti manji od  $135^\circ$  [9].



**Slika 7. Klizne linije sa kutom manjim od  $90^\circ$  (a) i savijanje oko unutarnjeg kuta (b) [9]**

U slučaju oštih uglova matrice, naprezanje se blago povećava odozgo prema dolje, osim u malom presjeku pri vrhu i pri dnu gdje obradak ima manje naprezanja. S povećanjem zaobljenosti vanjskog kuta matrice, ta se područja šire. Matrica s kutom kanala od  $90^\circ$  i ostrim kutovima najbolje se približava idealnom kućištu, stoga se ova konstrukcija matrice najviše koristi [12].

Pri kutnom kanalnom prešanju mogu se pojaviti neki sekundarni efekti: odmak materijala od površine kanala, lokalizirano smicanje i savijanje u izlaznom kanalu, [Slika 8]. Ovi sekundarni učinci mogu predstavljati probleme tijekom višeprolazne obrade [9].



**Slika 8. Odmak materijala od površine kanala (a), lokalizirano smicanje (b), savijanje u izlaznom kanalu (c) [9]**

Objavljeni su mnogi znanstveni radovi o kutnom kanalnom prešanju, a fokus većine numeričkih istraživanja bio je usmjeren na parametre postupka kao što su geometrija kanala, geometrija obratka, brzina probijanja, rute obrade, temperatura i svojstva materijala na homogenost deformacije ekstrudiranog materijala. Dosad se malo pažnje pridavalo trenju, fizičkoj varijabli za koju se zna da ima presudnu ulogu u istiskivanju čak i kad je obradak podmazan, jer izravno utječe na deformacije, raspodjelu naprezanja i maksimalno opterećenje pritiskom na konstrukciju kanala [13].

#### 4.2. Optimalno kutno kanalno prešanje

Optimalni uvjeti obrade mogu se sažeti kao:

1. Trenje kontakta treba biti što je moguće manje. Važno je podmazati obratke i oba kanala prije svakog prolaska.
2. Budući da obratci u kanalima imaju konstantnu brzinu, plohe alata koji se kreću istom brzinom rezultiraju nultim trenjem duž granica. Ovaj je zahtjev posebno važan za donju stijenku izlaznog kanala.



3. Optimalna konstrukcija obuhvaća kanale s oštrim vanjskim kutom i dovoljnim radijusom u unutarnjem kutu. Osim toga, optimalna konstrukcija bi trebala automatski primijeniti određeni povratni pritisak tijekom obrade.

4. Kut presijecanja između kanala od  $90^\circ$  osigurava najveće smicanje po prolazu i rezultira prihvatljivim ekstruzijskim naprezanjima za većinu materijala.

Ako se koristi višeprolazna obrada javlja se potreba za dodatnim zahtjevima. Nakon svakog prolaska, obradak bi trebao biti potpuno izbačen iz alata kako bi se podmazali i pregledali obradak i oba kanala. Izbačen obradak ispravne veličine i oblika bez grešaka mogu se odmah podmazati i umetnuti u alat za obavljanje sljedećeg prolaska. Takvo polukontinuirano kutno kanalno prešanje „pass-by-pass“ eliminira postupke čišćenja obradaka, njihovo preoblikovanje i zagrijavanje, koji su uglavnom potrebni kod običnog (isprekidanog) kutnog kanalnog prešanja [9].

Da bi se smanjilo prisutno trenje potrebno je provesti: (a) optimizaciju konstrukcije koja smanjuje trenje do najbolje moguće mjere, (b) izbor materijala kanala, koji bi trebao biti primjeren sa stajališta čvrstoće, kao i kemijski inertan s obzirom na njihovu interakciju s obratkom i atmosferom pri temperaturi obrade [15].

Ostali problemi s konstrukcijom povezani su s različitim dijelovima konvencionalnih kanala, posebno s obzirom na problem dimenzijske stabilnosti pod pritiskom koji se primjenjuje tijekom istiskivanja. Općenito je bitno da takvi uređaji imaju minimalne spojeve, tako da u uvjetima visokog tlaka materijal ne bi trebao teći između elemenata kanala. Ta bi pojava trebala biti još izraženija na visokim temperaturama [15].

Osim optimalnih karakteristika obrade, postoje i optimalni uvjeti obrade kao što su temperatura, broj prolaza, brzina istiskivanja, rute, povratni tlak itd. Optimalni uvjeti obrade ovise o materijalu, željenoj strukturi, svojstvima i području primjene. Mehanika obrade također pokazuje snažan utjecaj na ove uvjete. Oni bi se trebali zadati za svaku vrstu materijala, tehnika i konstrukcije alata pomoću eksperimentalnih opažanja, strukturne analize i ispitivanja materijala [9].

U idealnom slučaju kutnog kanalnog prešanja deformacija je jednostavno smicanje u uskoj zoni duž ravnine sjecišta kanala. Odstupanja od ovog ponašanja nastaju kada ti uvjeti nisu ispunjeni. U tom se slučaju deformacija odvija u znatno široj zoni čiji oblik ovisi o konstrukciji kanala, uvjetima obrade i svojstvima materijala. Promjenom ovih čimbenika pokazalo se da je smicanje obratka najhomogenije pri upotrebi kanala sa smanjenim trenjem i primjene protutlaka. Postoji povećanje čvrstoće od vrha do dna obratka, osim u najnižem dijelu gdje je

materijal mekši. To se može ukloniti povećanjem protutlaka. Povećanje čvrstoće odozgo prema dolje manje je od 10% i smanjuje se s brojem prolaza. Gradijent čvrstoće je manji u većim uzorcima. Stoga povećanje veličine poboljšava homogenost i pogoduje tehničkoj primjeni. U mikrostrukturi materijala gustoća dislokacija je vrlo velika što utječe na čvrstoću materijala [12].

### 4.3. Vrste alata za kutno kanalno prešanje

#### Rani razvoj

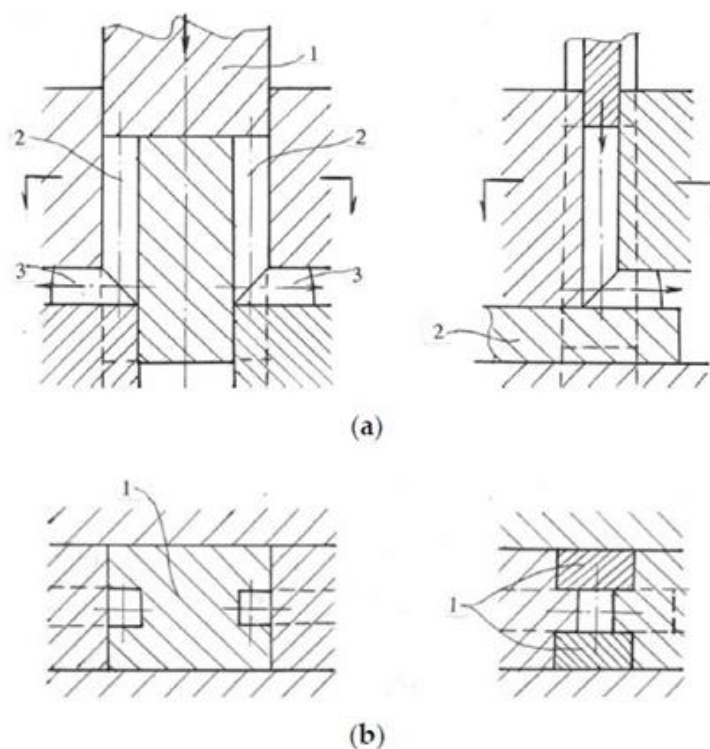
U početku su korišteni jednostavni razdjelnici koji su sadržavali dva okrugla kanala koja se sijeku pod kutom od 90 °. Obratci približno istog presjeka su istisnuti i izbačeni iz alata sljedećim obratkom. Prvi pokusi s višeprolaznom obradom čistih metala potvrdili su Bridgmanov koncept jednostavne posmične obrade za promjenu strukture i svojstava. Tijekom tog vremena otkrivene su i nove mogućnosti obrade, poznate kao rute. Takvi jednostavni alati nisu se pokazali kao praktični. Ekstrudiranje je zahtijevalo velika naprezanja i opterećenja, koja su premašila teoretske procjene 3 do 5 puta. Završna obrada bila je loša s puno otpadnog materijala i kratkim vijekom trajanja alata. Također su uočene pukotine i lom. To je jasno pokazalo da je konstrukcija alata ključni faktor za kutno kanalno prešanje. Nove ideje i pristupi bili su potrebni za konstrukcijski razvoj kutnog kanalnog prešanja za primjenu na specifičnim materijalima i pri rješavanju tehničkih problema [9].

#### Pokretne plohe kanala

U kanalima s pravokutnim presjecima neke se plohe mogu pomicati zajedno s materijalom. Na taj način potpuno se uklanja trenje i adhezijsko trošenje uz površine obratka. Prvi praktični problem za razvoj takve tehnike bila je ponovna obrada kontinuirano lijevanih čeličnih obradaka u kovana koljenasta vratila. Značajna prednost ove tehnologije bila je potpuno zatvaranje velikih šupljina lijevanja i smanjenje poroznost u središnjem području obratka nakon samo jednog prolaska istiskivanja na visokim temperaturama, bez promjene poprečnog presjeka materijala. Proces je uključivao proizvodnu liniju koja se sastoji od stroja za horizontalno lijevanje, posebne preše za kutno kanalno prešanje i preša za kovanje. Za kutno kanalno prešanje, problemi su bili kontaktno trenje i veliki omjer duljine i promjera obratka. Ti su problemi riješeni primjenom pomičnog klizača (1) između dva ulazna (2) i izlaznog (3) kanala [Slika 9 a)] te korištenjem učinkovitog maziva od tekućeg grafita. Ova konstrukcija eliminira trenje duž tri stijenke kanala, osigurava snagu i stabilnost probijanja, uravnotežuje

klizač i isporučuje mazivo na donje stijenke izlaznih kanala. Nakon što je dosegao najniži položaj, klizač se povlači i oslobađa obradak [9].

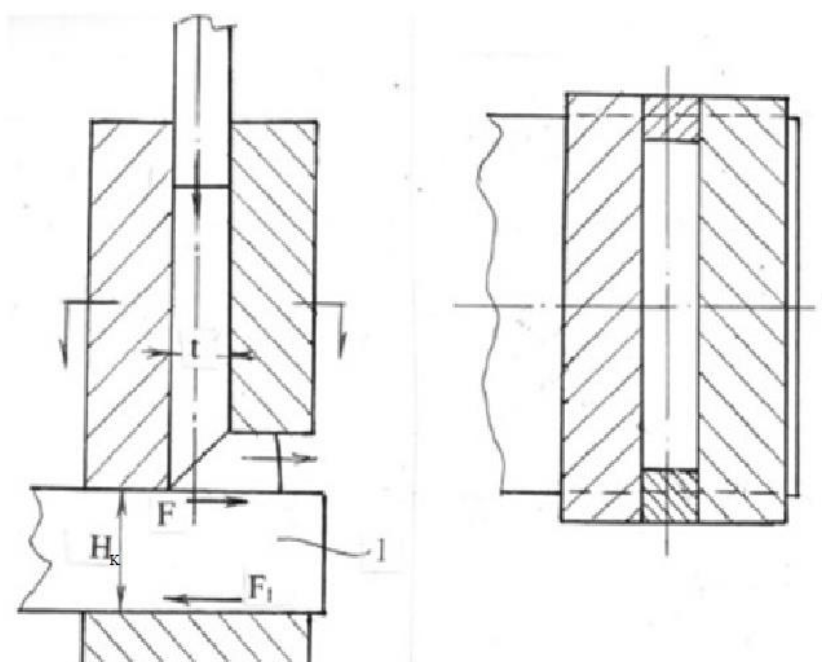
Drugo moguće područje za industrijsku primjenu kutnog kanalnog prešanja bila je hladna i topla obrada legura radi poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava. Osnovni problemi u ovom slučaju bila su velika ekstruzijska naprezanja i naljepljivanja materijala na alat tijekom višeprolazne obrade. To je zahtijevalo sofisticiranu kombinaciju pomičnih ploha u oba kanala, [Slika 9 b)]. Dva klizača (1) u ulaznom kanalu uklonila su trenje uz stijenke i osigurala čvrstoću i stabilnost probijanja. Donji klizač (2) u izlaznom kanalu zamijenio je veliko plastično trenje između materijala i alata, s malim trenjem između dijelova alata i eliminirao lijepljenje. Ova je konstrukcija omogućila obradu magneta, posebnih elastičnih legura, supravodiča i drugih materijala s vlačnom čvrstoćom do 1600 MPa. Nakon dovršetka radnog hoda, donji klizač se dodatnim cilindrom pomiče u krajnji lijevi položaj, oslobađa obradak i izbacuje ga iz izlaznog kanala.



**Slika 9. Kutno kanalno prešanje sa tri pomične plohe i klizačem u ulaznom kanalu (a), kutno kanalno prešanje sa pokretnim klizačem u oba kanala (b) [9]**

### Obratci u obliku ploča

U većini slučajeva kutnog kanalnog prešanja postoji velika neusklađenost između jednostavnih geometrijskih oblika pravokutnih ili cilindričnih obradaka i složenih oblika većine praktičnih proizvoda, pa je potrebna dodatna naknadna obrada, poput strojne obrade ili oblikovanja. Kutno kanalno prešanje velikih obradaka u obliku ploča s naknadnim valjanjem uveden je za izradu ploča i limova različitih debljina. Optimalna konstrukcija uključuje samo klizač ploče 1 u izlaznom kanalu [Slika 10]. Tijekom istiskivanja klizač se pomiče silom trenja  $F$  po materijalu. Ova sila nadilazi trenje  $F_1$  između klizača i alata, koje ostaje nisko ako je ekstruzijski tlak na klizaču ravnomjerno raspoređen po donjoj površini klizača. Taj je uvjet ispunjen ako je omjer  $H_K/t > 2,5$  gdje je  $H_K$  debljina klizača, a  $t$  debljina obratka. Izbacivanje obratka izvodi se slično kao na [Slika 9 b)]. Zbog jednostavnosti i pouzdanosti ovaj alat je doživio veliki razvoj [9].



Slika 10. Kutno kanalno prešanje s pokretnim donjim klizačem [9]

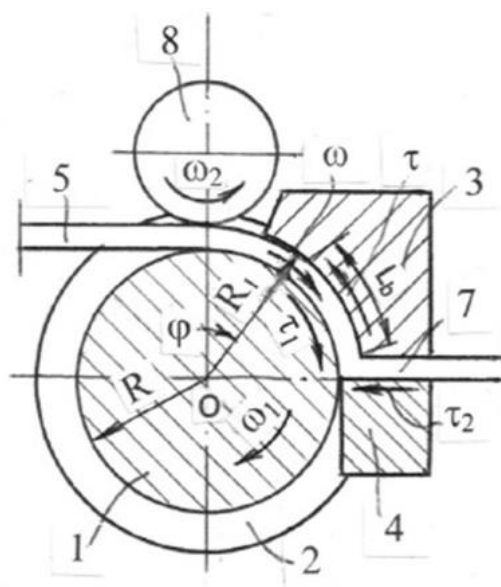
### Alat za velike obratke

Drugi aspekt praktične primjene kutnog kanalnog prešanja je alat za velike obratke. Područja primjene, poput automobilske, zrakoplovne i transportne industrije, trebaju napredne proizvode velikih veličina. Prijelaz na veće obratke poboljšava tehničke i ekonomske karakteristike prerade. U tom su slučaju naprezanja i vrijeme istiskivanja jednaki za male i velike obratke što

značajno povećanje produktivnosti. Dodatno, veći obradci poboljšavaju ujednačenost napreznja i smanjuju pritisak istiskivanja zbog stabilnijih temperatura i uvjeta trenja [9].

#### Kontinuirano kutno kanalno prešanje

Postoji značajan interes za kontinuiranim kutnim kanalnim prešanjem dugačkih proizvoda, koji se obično izrađuju valjanjem, izvlačenjem ili istiskivanjem. Određene probleme predstavljaju nestabilnost procesa, završna obrada površine i trošenje alata. Kod jednostavnijih postupaka, duljina kontaktnog područja između materijala i alata je fiksna. Materijal se najprije zagrijava, a zatim ekstrudira silom trenja. Nije dopušteno intenzivno zagrijavanje. Klizanje između materijala i valjka, te povećanje temperature obrade ovise o duljini kontakta. Oni su beznačajni za optimalnu duljinu i povećavaju se s povećanjem duljine. Za duljinu kraću od optimalne opaža se proklizavanje materijala s intenzivnim zagrijavanjem. Naprednija konstrukcija omogućuje samopodešavanje duljine kontakta obratka  $L_b$  tijekom obrade, [Slika 11] [9].

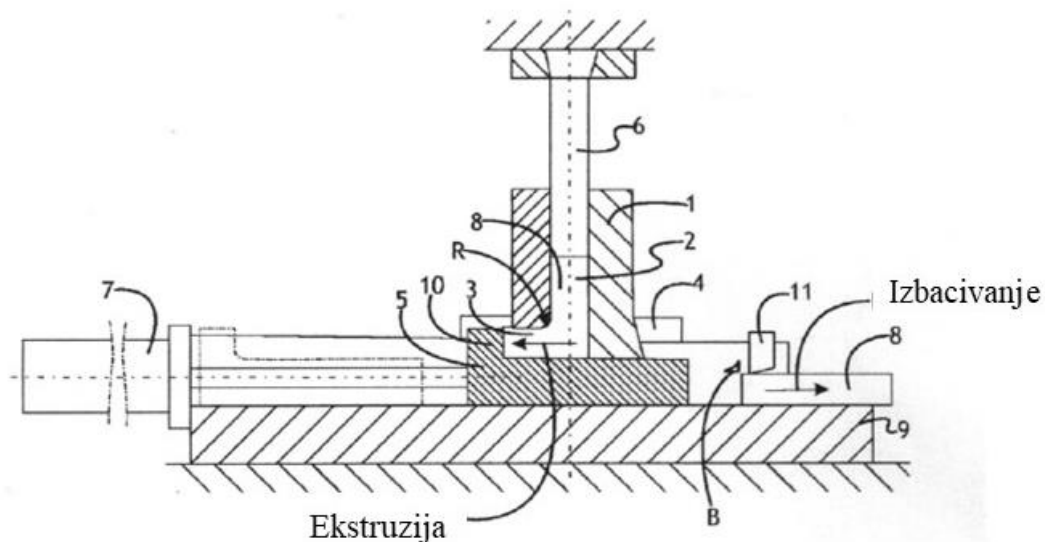


**Slika 11. Shematski prikaz kontinuiranog kutnog kanalnog prešanja [9]**

#### Polukontinuirano kutno kanalno prešanje

Uobičajeni alat za obratke ne kontrolira njihov oblik i veličinu. Zbog izvijanja na prednjem kraju obratka i oštih neobrađenih rubova na gornjoj površini obratka, obradak se ne može umetnuti u alat u sljedećem prolazu. Stoga su potrebne dodatne operacije hlađenja, strojne obrade, čišćenja i predgrijavanja. Vrijeme potrebno za takav isprekidani način obrade traje i po nekoliko sati. Novi koncept polukontinuiranog „pass -by -pass “ kutnog kanalnog prešanja bez

ikakvih dodatnih operacija nedavno je razvio Engineered Performance Materials. [Slika 12] shematski prikazuje princip i konstrukciju alata. Ulazni kanal (2) i izlazni kanal (3) formirani su od bloka alata (1) i klizača (5) postavljenih na osnovnu ploču (9). Klizač ima izbočinu (10) koja preklapa izlazni kanal. U izvornom položaju, obradak (8) je umetnuta u kanal (2), a hidraulični cilindar (7) pomiče klizač s desne strane dok se ne postigne čvrst kontakt između obratka i izbočine. Tijekom istiskivanja obratka klipom (6), obradak i klizač u izlaznom kanalu pomiču se istom brzinom uklanjajući trenje na donjoj površini obratka i pretvarajući trenje između klizača (5) i vodeće ploče (9) u protutlak. Nakon završetka hoda, cilindar pomiče klizač u krajnji lijevi položaj, potpuno oslobađa obradak, a klip (6) gura obradak na osnovnu ploču. Zatim, cilindar (7) vraća klizač u prvobitni položaj, izbacuje obradak iz matrice i istodobno nožem odsijeca oštre neobrađene rubove na gornjoj površini obratka (11). Podmazani obradak može se odmah umetnuti u ulazni kanal za sljedeći prolaz [9].



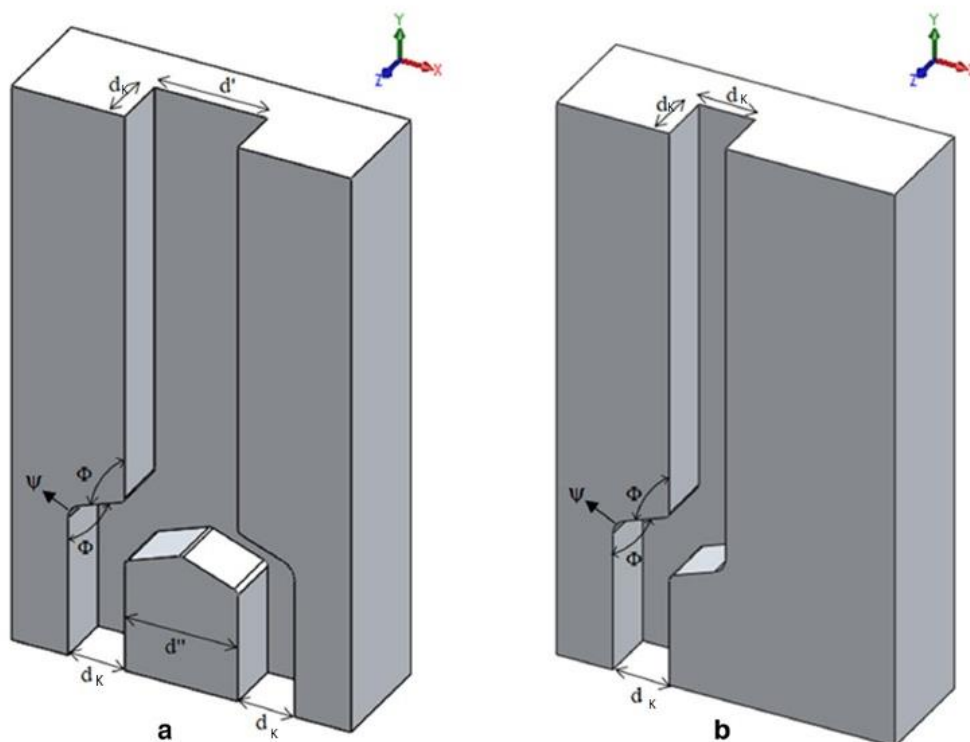
**Slika 12. Konstrukcija alata za polukontinuirano kutno kanalno prešanje [9]**

### Model s dva kanala

U kutnom kanalnom prešanju alat sadrži dva dijela koji su međusobno sastavljeni maticama i vijcima. Alat za oblikovanje sastoji se od ulaznog kanala pravokutnog presjeka i dva izlazna kanala kvadratnog presjeka koji su međusobno odvojeni. Postoji zrcalna simetrija u odnosu na sredinu ulaznog kanala koja je postavljena paralelno s izlaznim kanalima [Slika 13 a)]. Širina

ulaznog kanala ( $d'$ ) dvostruko je veća od širine svakog izlaznog kanala ( $d_K$ ), dok su druge dimenzije iste.

Dva uzorka četvrtastog presjeka postavljena su jedan do drugoga i istovremeno se prešaju kroz paralelne kanale. Kutovi ( $\Phi$ ) i vanjski zakrivljeni kutovi ( $\psi$ ) iznose  $110^\circ$  odnosno  $18^\circ$ , a udaljenost između dva izlazna kanala ( $d''$ ) jednaka je širini ulaznog kanala ( $d'$ ). [Slika 13 b)], prikazuju dvostruku matricu i matricu s jednim kanalom za kutno kanalno prešanje.



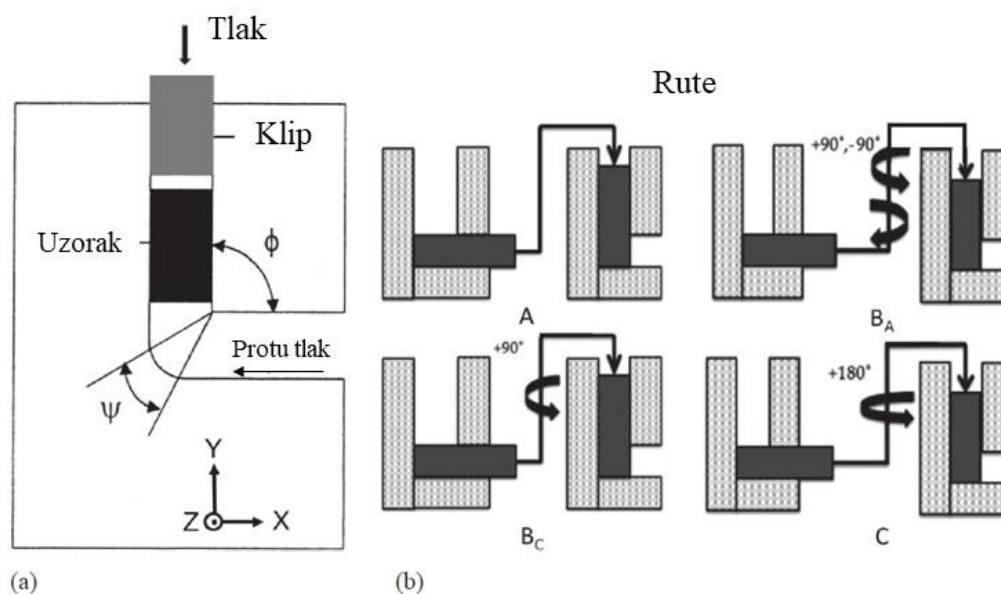
**Slika 13. Geometrija alata s dva kanala(a) i kutno kanalno prešanje s jednim kanalom(b)[11]**

Uz prednosti tradicionalnog kutnog kanalnog prešanja u paralelnim kanalima, primjenom ove metode, u svakom ciklusu može se obraditi veća količina materijala po jedinici površine s opterećenjem manjim od dvostrukog opterećenja od tradicionalnog, posebno pri visokim faktorima trenja. U ovom se procesu troši manje energije po jedinici volumena [11].

#### 4.4. Rute

Za Kutno kanalno prešanje s više prolaza postoje različite rute koji se mogu koristiti za uvođenje različitih sustava klizanja. Na ruti A, obradak se ekstrudira bez rotacije između prolaza. Na ruti B<sub>A</sub>, radni komad se okreće za  $90^\circ$  u naizmjeničnim smjerovima, u smjeru

kazaljke na satu, a zatim u suprotnom smjeru ili obrnuto, između uzastopnih prolaza. Na ruti B<sub>C</sub>, obradak se zakreće za 90° u istom smjeru, bilo u smjeru kazaljke na satu ili u suprotnom smjeru, između uzastopnih prolaza. Na ruti C, obradak se zakreće za 180° između prolaza. S različitim načinima obrade, različite mikrostrukture mogu se proizvesti od istog početnog obratka. Istraživanja su pokazala da se velika istoosna zrna u obratku mogu značajno izobličiti tijekom kutnog kanalnog prešanja. [Slika 14] prikazuje različite rute kutnog kanalnog prešanja [10].



Slika 14. Izgled alata za kutno kanalno prešanje (a) i rute (b) [12]

#### 4.5. Svojstva materijala nakon kutnog kanalnog prešanja

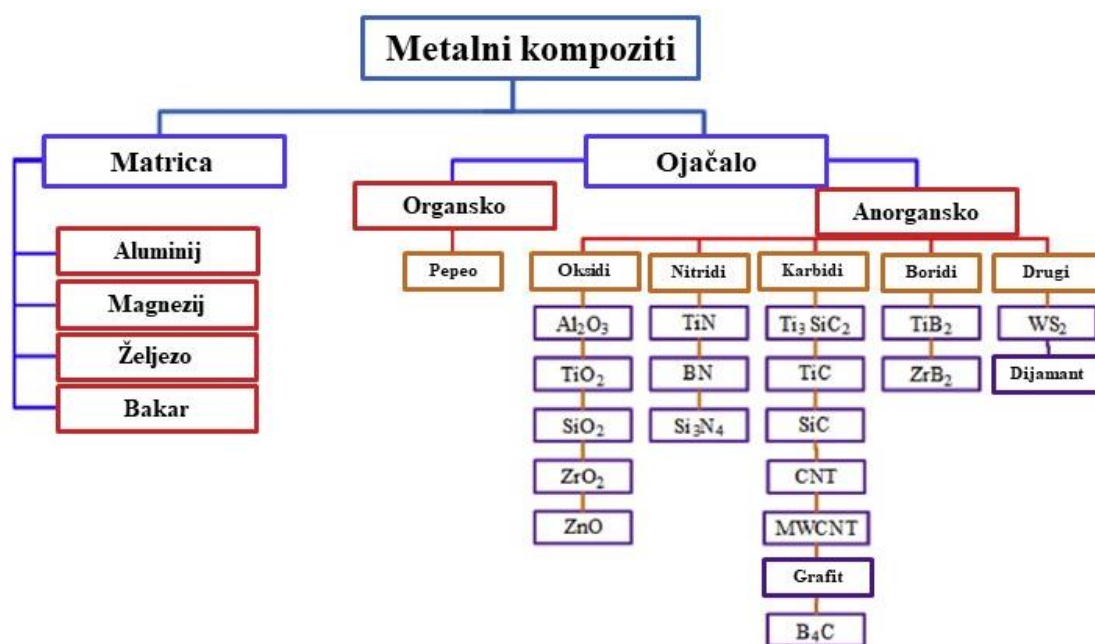
Čvrstoća polikristalnog materijala povezana je s veličinom zrna. Kako se granica elastičnosti povećava sa smanjenom veličinom zrna, ultrafini zrnati materijali proizvedeni postupkom kutnog kanalnog prešanja dobili su značajnu pozornost, dok materijali visoke čvrstoće općenito pokazuju nisku duktilnost. Obrada tipično dovodi do smanjenja duktilnosti koja je manja od one koja proizlazi iz konvencionalnih procesa masovnog oblikovanja kao što su valjanje, izvlačenje i ekstruzija. Većina materijala obrađenih kutnim kanalnim prešanjem ima relativno nisku duktilnost, ali obično pokazuju značajno veću čvrstoću od istih materijala s grubim zrnima. Uočene su i druge karakteristike kao što su superelastičnost, otpornost na trošenje i povećan umor sitnozrnatih materijala [10].



## 5. KOMPOZITI

Kompozitni materijal je mješavina dva ili više materijala međusobno netopljivih i posjeduju svojstva koja su bolja u odnosu na materijale od kojih su sastavljeni, robusniji su i lakši od ostalih uobičajenih materijala, poput čelika. U automobilskoj industriji za izradu mnogih komponenata u vozilu prelazi se sa čelika na kompozitne materijale kako bi se smanjila težina vozila. Kompoziti s metalnom matricom imaju prednost u odnosu na druge kompozite zbog poboljšanih mehaničkih svojstava, dobre toplinske i električne vodljivosti, sposobnosti da se odupru djelovanju visokih temperatura, vlazi i radijaciji. Kompozit s metalnom matricom je kombinacija matrice od legure duktilnih metala ojačane drugim metalnim, nemetalnim ili organskim materijalima. Obično se razlikuju po kemijskim i fizičkim karakteristikama matrice i vrsti materijala za ojačanje. Dodavanjem ojačavajućih čestica materijala u matricu poboljšavaju se fizičke i mehaničke karakteristike kompozita. Materijal koji je ugrađen u matricu poboljšava svojstva materijala matrice kao što su specifična čvrstoća, otpornost na trošenje, izvrsna otpornost na koroziju i visoki modul elastičnosti [16] [17].

Općenito, kompoziti sadrže jednu vrstu čestica za ojačanje, no razvijena je i nova skupina, nazvana hibridni kompoziti s metalnom matricom, koja sadrži više od jedne vrste ojačanja [18]. Prema vrsti ojačanja koja se koristi, kompozit se može klasificirati u kompozitne ojačane česticama, vlaknima, laminatne kompozite i složene kompozite. Kompoziti ojačani česticama su lako dostupni, jeftiniji i lakši za izradu [16]. Kompoziti su podijeljeni u podskupine prema veličini ojačanja kao makro-, mikro- i nanokompoziti. Posljednjih godina nanokompoziti su u fokusu mnogih istraživanja zbog svojih izvrsnih svojstava korištenjem nanocjevčica i nanočestica kao ojačanja [18]. Povezivanje međufaznih površina u kompozitnim materijalima ozbiljan je problem proizvodnje kompozita. Ako matrica i materijali za dodatno ojačavanje nisu kompatibilni, tada je teško dobiti očekivana svojstva od dobivenih kompozita. Za proizvodnju kompozita mogu se koristiti razni materijali za matricu i ojačanje [Slika 15] [16].



Slika 15. Materijali za matricu i ojačalo [16]

Među dostupnim matričnim materijalima (Al, Mg, Cu, Fe, Ti) za kompozite s metalnom matricom, Al i Mg su najčešći. Neke od značajnih svojstava aluminija su niža gustoća, ekonomičnost, jednostavnost za obradu različitim tehnikama i posjeduju veliki omjer čvrstoće prema gustoći i izvrsnu otpornost na koroziju [16]. Aluminijske legure su popularne, ali su relativno mekane za mnoge primjene i stoga ne ispunjavaju sve zahtjeve za tribološke svrhe [19].

Aluminijski kompoziti sastoje se od legure na bazi aluminija koja se naziva matrični materijal i materijala za ojačanje, za koji se najčešće koriste čestice keramike poput SiC, B<sub>4</sub>C, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i TiC. Ojačala poboljšavaju otpornost na trošenje, dok čestice u nano veličini omogućuju i poboljšanje mehaničkih te triboloških svojstava. Nanokompoziti s aluminijskom matricom koriste se tamo gdje primjena zahtijeva visoku vlačnu čvrstoću, tvrdoću i žilavost [17] [19].

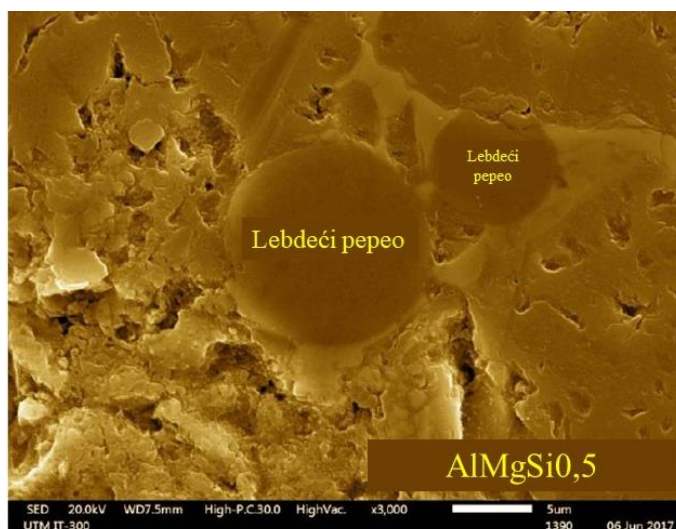
Zahvaljujući poboljšanoj učinkovitosti, ekološkim i financijskim prednostima, aluminijski kompoziti sve se više koriste u industriju, kućanstvu i drugim područjima. Koriste se u automobilskom sektoru kao sastavni dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem, poput glava cilindra, klipova i blokova cilindra zbog male mase, velikog omjera čvrstoće i gustoće i visoke toplinske vodljivosti, smanjene potrošnje goriva, smanjene emisije ugljika, vibracija i buke, pa bi njihova primjena u transportnom sektoru bila najbolji odabir u budućnosti [17] [20].

## 5.1. Lebdeći pepeo

Znanstvenici nastoje pronaći materijale koji odgovaraju njihovim specifičnim zahtjevima. Poboljšanje proizvodnih metoda i pronalaženje zamjenskih materijala samo su neke od mogućnosti za ispunjavanje zahtjeva, ali zbog visokih troškova ograničena je njihova upotreba. Među raznim ojačanjima koja se koriste kod aluminijskih kompozita, lebdeći pepeo (engl. *Fly Ash - FA*) je jedan od najjeftinijih dostupnih ojačanja. Prednosti korištenja lebdećeg pepela kao ojačanja je njegova niska gustoća, što značajno doprinosi razvoju učinkovitih i jeftinih aluminijskih kompozita. Većina napora u razvoju kompozita na bazi aluminija s ojačalom od otpadnih materijala usmjerena je na uporabu lebdećeg pepela. Osim što je smanjilo troškove proizvodnje, uvođenje lebdećeg pepela u aluminij smanjuje gustoću kompozita, povećava tvrdoću, otpornost na trošenje i krutost [21].

Istraživanja kompozita od aluminija ojačanog pepelom pokazala su veliki potencijal u raznim primjenama. Pepeo je lako dostupan kao nusproizvod krutog otpada tijekom izgaranja ugljena u termoelektranama. Kemijski sastav lebdećeg pepela sastoji se od  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  i  $Fe_2O_3$  kao glavnih sastojaka i oksida Mg, K, Ca, K i Na kao manjinskih sastojaka. Pokazalo se da povećanje volumnog postotaka pepela povećava tvrdoću, žilavost i tlačnu čvrstoću Al-kompozita, a smanjuje se i gustoća. Iznad 20 mas.% pepela, i tlačna čvrstoća i tvrdoća kompozita počinju se smanjivati zbog povećanja nakupljanja čestica i smanjenja učvršćivanja krute otopine [22].

[Slika 16] prikazuje mikrostrukturu kompozita s aluminijskom matricom ojačanog česticama lebdećeg pepela [22].



Slika 16. Mikrostruktura dobro povezanog lebdećeg pepela i aluminija [22]

Troškovi proizvodnje mogu se smanjiti ako se industrijski otpad i prirodni minerali iskoriste kao čestice ojačala. Pepeo od ljuske riže (*Rice husk ash - RHA*) je poljoprivredni otpad koji je u velikim količinama dostupan širom svijeta i smatra se jednom od ekonomski prihvatljivih čestica za ojačanje aluminijskih kompozita [23].

Čestice pepela od ljuske riže poboljšale su otpornost kompozita na trošenje, smanjile su plastičnu deformaciju površine i veličinu čestica trošenja. Do povećanja otpornosti na trošenje dolazi zbog povećanja tvrdoće, homogene raspodjele, sfernog oblika čestica pepela i smanjenja kontaktne površine [23].

## **5.2. Proizvodnja kompozita s metalnom matricom**

Različite metode izrade kompozita imaju svoje prednosti i nedostatke, pa se prema zahtjevima može odabrati odgovarajuća metoda. Aluminijski kompoziti mogu se proizvesti različitim procesima, kao što su postupci izrade u tekućem (lijevanje uz miješanje) i čvrstom stanju (metalurgija praha). Metoda izrade u tekućem stanju prilično je jednostavna i jeftinija u usporedbi s proizvodnim postupcima u čvrstom stanju [17].

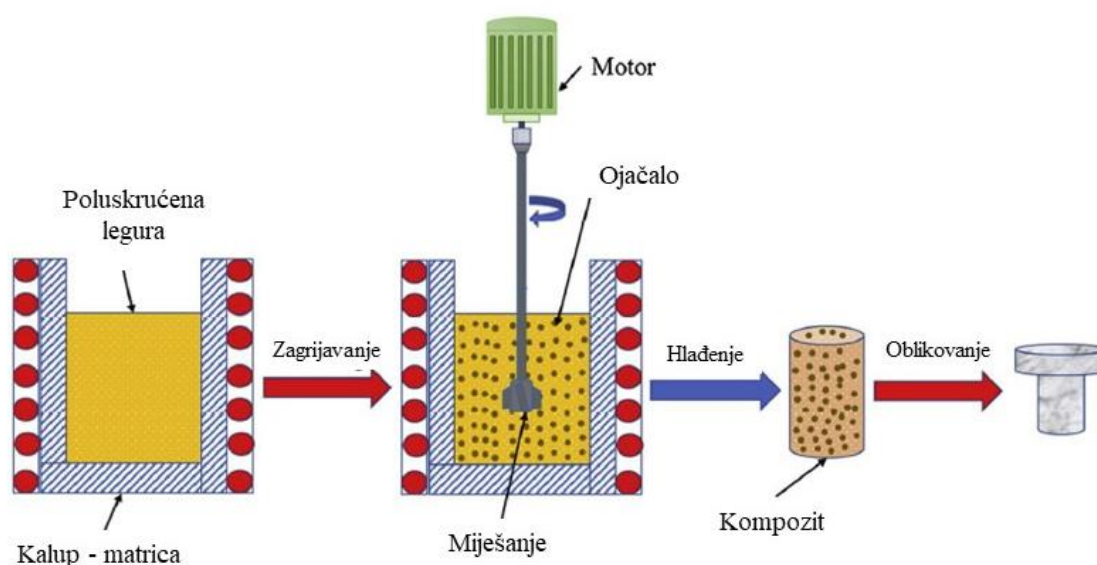
Osim načina obrade u čvrstom i tekućem stanju za proizvodnju kompozita s metalnom matricom, postoje i druge tehnike, poput procesa u polutvrdom stanju (compocasting). Proizvodni procesi imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva, kao i na cijenu proizvodnje [16].

## **5.3. Postupak dobivanja kompozita u poluskrućenom stanju - compocasting**

Compocasting je metoda u kojoj se čestice ojačala dodaju u poluskrućenu talinu. Primarne krute čestice nastale u polutvrdoj smjesi smanjuju nakupljanje čestica za ojačanje. To će rezultirati boljom raspodjelom čestica, globularnom strukturom i s iznimno niskom poroznošću u odnosu na proces lijevanja uz miješanje. Miješanje se može izvesti mehaničkim vibracijama, mehaničkim miješanjem i elektromagnetskim miješanjem. Elektromagnetsko miješanje jedan je od uobičajenih načina stvaranja globularne strukture u metalima. U ovoj metodi, željeni metal miješa se u rasponu temperature između solidusa i likvidusa rotacijskom Lorentzovom silom koja proizlazi iz magnetskog polja zavojnica, pa se posljedično razgranata (dendritička) lijevana struktura transformira u kuglastu strukturu. Shabani i sur. pokazali su da na globularnu strukturu legure utječu parametri poput intenziteta magnetskog miješanja i brzine hlađenja. Kao matrica koriste se različite aluminijske legure. Legura Al-Si je jedan od materijala za

compocasting zbog svoje dobre livljivosti i sposobnosti stvaranja polukrute strukture bez šupljina i nedostataka [16] [19].

[Slika 17] prikazuje compocasting postupak u kojem se primarne čvrste čestice pretvore u polutvrdu smjesu koja se zatim izljeva u kalup. Primarna prednost compocastinga je niža temperatura obrade materijala i poboljšano kvašenje budući se miješanje provodi unutar raspona temperature skrućivanja aluminijske legure. Kompozit proizveden compocasting postupkom ima poboljšana mehanička svojstva kao što su tvrdoća, granica tečenja, vlačna čvrstoća i nosivost. Pritom je zadržana duktilnost aluminijske matrice. Iako je ova tehnika još u ranoj fazi, neki kočioni cilindri i klipovi proizvedeni su baš tim postupkom [16].



Slika 17. Shematski prikaz Compocasting postupak [16]

Pravilno odabrani parametri proizvodnog procesa poput temperature rastaljene tvari, brzine miješanja, temperature predgrijavanja ojačala itd. važni su za proizvodnju kompozita tehnikom compocastinga.

Predgrijavanje ojačala sprječava toplinsku neusklađenost i pospješuje kvašenje. Zbog temperaturne razlike između rastaljene legure i ojačala, u posudi se stvara polurastaljeni metal. Miješanjem polurastaljenog materijala poboljšava se disperzija čestice. Ova polukruta masa može mehanički zarobiti čestice ojačala, spriječiti njihovu gravitacijsku segregaciju i smanjiti njihovu aglomeraciju te omogućiti bolju raspodjelu čestica [24].

## 6. ALUMINIJSKA LEGURA - AlSi7Mg

Aluminijske legure poznate su po niskoj gustoći i relativno dobrim mehaničkim svojstvima. Pokazuju dobru otpornost na koroziju i dobra tehnološka svojstva. Jedinstvena kombinacija ovih svojstava učinila ih je savršenim materijalom za transportnu industriju. Budući da je aluminij dobar električni vodič, njegove legure našle su primjenu i u industriji proizvodnje električne energije. Neke komponente, poput kućišta razvodnih uređaja s plinskom izolacijom, proizvedene su od legura aluminija i silicija. Budući da su ti elementi veliki i složeni, uglavnom su lijevani u pješčanim kalupima. Najbolja svojstva mogu se postići tek nakon precipitacijskog očvrnuća, ali nije ga moguće provesti na svim legurama. Dodatak magnezija u legure Al-Si omogućuje njihovu toplinsku obradu [25].

Postoje četiri glavne skupine temeljene na sustavima Al-Si (-Cu), Al-Cu, Al-Mg (-Si) i Al-Zn (-Si)-Mg. Većina lijevanih legura temelji se na sustavu Al-Si zbog dobre livljivosti. Neke legure Al-Cu, Al-Mg i Al-Zn pokazuju bolja svojstva od legura Al-Si, ali je njihova livljivost općenito loša jer pokazuju visoku sklonost toplim pukotinama. Dodavanjem Mg postižu se dobra mehanička svojstva nakon toplinske obrade. Legure Al-Si-Mg koriste se za kotače, odljevke i dijelove ovjesa od koji se traži umjerena do visoka čvrstoća i dobra duktilnost [26]. Legure Al-Si-Cu (-Mg) dominiraju na tržištu komponenti pogonskih sklopova, poput blokova motora, glava cilindra, klipova i odljevaka, gdje je čvrstoća na povišenoj temperaturi i/ili otpornost na trošenje važnija od duktilnosti [26].

AlSi7Mg je široko korištena, toplinski obradiva aluminijska legura koja se može koristiti za proizvodnju lakih funkcionalnih komponenti u automobilskom i zrakoplovnom sektoru. Ovaj materijal ima jako dobar omjer čvrstoće i gustoće, s dobrom otpornošću na koroziju i idealan za primjene koje zahtijevaju kombinaciju izvrsnih toplinskih svojstava s malom masom [27].

U [Tablica 1] je prikazan uobičajeni kemijski sastav legure AlSi7Mg.

**Tablica 1. Uobičajeni kemijski sastav legure AlSi7Mg [27]**

Maseni udio elemenata, %							
Si	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu	Ti	Al
6,5~7,5	0,5~0,8	≤0,1	≤0,2	≤0,1	≤0,05	≤0,2	ostatak

Prah AlSi7Mg može se koristiti u metalurgiji praha, za selektivno lasersko sinteriranje i sl. [27].

U [Tablica 2] prikazana su mehanička svojstva AlSi7Mg legure

**Tablica 2. Mehanička svojstva legure AlSi7Mg [28]**

<b>Modul elastičnosti, GPa</b>	<b><math>R_{p0,2}</math>, MPa</b>	<b>Vlačna čvrstoća, MPa</b>	<b>Istezljivost, %</b>
70	240	405	13,5

Primarna  $\alpha$ (Al)-faza nastala iz taline je dendritična, kada legura AlSi7Mg kristalizira u standardnim uvjetima. Međutim, primarna  $\alpha$ -faza turbulentno miješana elektromagnetskim poljem tijekom skrućivanja je sfernog tipa, a kristalna zrna su usitnjena. Što se dulje miješa to će dendritna struktura više prijeći u strukturu globularnog tipa [29].

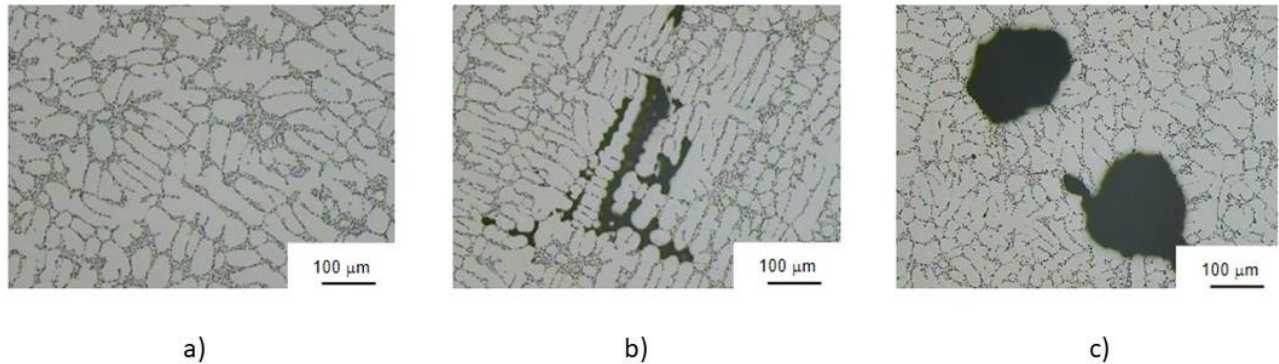
Svojstva legura Al-Si ovise o veličini, obliku i raspodjeli silicijeve i intermetalne faze u matrici. Poznata je činjenica da rafiniranje legure smanjuje poroznost. Dodatak titanija i bora smanjuje veličinu dendrita  $\alpha$ (Al)-faze što također doprinosi smanjenju poroznosti. Sve to utječe na poboljšanje mehaničkih svojstava osobito dinamičke izdržljivosti [30].

Osim mikrostrukturnih karakteristika, dinamička izdržljivost lijevanih aluminijskih komponenti uvelike ovisi o defektima lijevanja nastalim tijekom skrućivanja jer pogoduju nastanku pukotina zbog visoke koncentracije lokalnog naprezanja.

Na svojstva umora legura Al-Si osim poroznosti utječu i strukturne značajke poput finoće dendrita, udjela intermetalnih faza i toplinske obrade materijala. U slučaju postojanja grešaka u odljevcima, utjecaj strukturnih značajki ima manju ulogu.

Greške često rezultiraju lošim mehaničkim svojstvima, uključujući ograničenu čvrstoću i duktilnost, promjenjivu lomnu žilavost, nastanak i širenje pukotina.

[Slika 18] prikazuje mikrostrukturu lijevane AlSi7Mg legure koja se sastoji od  $\alpha$ -faznih dendrita-svijetlosivih (kruta otopina Si u Al) i eutektičkih ( $\alpha$ -faza i tamno sivih Si čestica) smještenih u međudendritičkim prostorima [31].



**Slika 18. Tipična mikrostruktura odljevaka AlSi7Mg a), pore od mikro skupljanja b), plinske pore c) [31]**



## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

### 7.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovog rada je ispitati tvrdoću kompozita s matricom od Al-legure i dodatkom lebdećeg pepela. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom po Vickersu primjenom različitih opterećenja: 0,1962 N (HV0,02), 0,4905 N (HV0,05), 0,981 N (HV0,1), 1,96 N (HV0,2). Dobiveni rezultati analizirani su jednim od modela koji opisuju utjecaj opterećenja na dobivene vrijednosti tvrdoće. Ispitani su uzorci kompozita u lijevanom stanju i uzorci nakon postupka kutnog kanalnog prešanja.

Kako bi se provelo ispitivanje napravljeno je sljedeće:

- pripremljeni su metalografski uzorci s poliranom površinom
- analizirana je mikrostruktura uzoraka
- izmjerena je mikrotvrdoća s različitim opterećenjima.

## 7.2. Materijal za ispitivanje

Kompozitni materijal na kojem su provedena ispitivanja dobiven je compocasting postupkom iz Al-legure oznake AlSi7Mg i 6% čestica lebdećeg pepela kao ojačala. Kemijski sastav legure prikazan je u tablici [Tablica 3].

**Tablica 3. Kemijski sastav AlSi7Mg**

Kemijski element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Al
Udio, wt%	7,0	0,11	< 0,01	< 0,01	0,37	0,01	0,12	0,056	Ostatak

Lebdeći pepeo je uglavnom nehomogena mješavina metalnih oksida promjera 1 - 120  $\mu\text{m}$ , a dobiva se kao nusproizvod izgaranja ugljena u termoelektranama.

Lebdeći pepeo je prosijan te su korištene samo čestice manje od 45  $\mu\text{m}$  kako ne bi došlo do neželjenih pojava kao što su "isplivavanje" na površinu i aglomeracija. Kako bi se spriječile neželjene pojave koristi se metoda compocasting kod koje se pepeo dodaje leguri u polučvrstom stanju u rasponu temperature između solidusa i likvidusa, a što bliže likvidus liniji.

Pepeo se dodaje uz miješanje kako bi se dobro rasporedio unutar legure.

Parametri korišteni za izlivanje kompozita su:

- pepeo je predgrijavan na temperaturu 150 °C u trajanju od 2h, kako bi se riješili vlage
- lijevanje kompozita je izvedeno pri temperaturi 680 °C
- postupno je dodavan pepeo uz brzinu miješanja od 500 o/min
- vrijeme miješanja: 5 min
- kokila u koju je kompozit uliven predgrijana je na temperaturu 500 °C, te je nakon lijevanja odljevak ostavljen da se postupno ohladi.

Za provođenje navedenog postupka korištena je slijedeća oprema, [Slika 19]:

- Za taljenje legure korišten je keramički lonac s grijačima te ugrađenim senzorom za praćenje temperature.
- Za predgrijavanje pepela i kokile korištena je električna peć koja posjeduje mogućnost regulacije temperature.
- Kokila je čelična, dimenzija 20×30×120 mm.
- Mješalica s plosnatom lopaticom kojoj se može podešavati broj okretaja.



**Slika 19. Oprema za lijevanje i miješanje**

Kako bi se poboljšala svojstva odliveni kompozitni materijal podvrgnut je kutnom kanalnom prešanju. Kada se metalni materijali izlože plastičnoj deformaciji dolazi do smanjenja veličine kristalnih zrna, struktura postaje zbijenija što utječe na promjenu svojstava.

Pri ovom postupku materijal se istiskuje kroz kalup L oblika gdje pri promjeni smjera kretanja materijala dolazi do intenzivne plastične deformacije [Slika 20]. Bolja svojstva se postižu višestrukim prešanjem jer nakon prvog prolaza dolazi do usmjerenosti kristalne strukture, što za posljedicu ima nehomogenost svojstava.



**Slika 20. Alat za kutno kanalno prešanje**

Iz izlivenog ingota izrezani su uzorci dimenzija 12×12×120 mm. Uzorci su podvrgnuti kutnom istiskivanju u više prolaza sa zakretanjem oko uzdužne osi za 90° nakon svakog prolaza (ruta B<sub>C</sub>). Uzorci su protiskivani na hidrauličnoj preši "HYDRAUMA" od 40 kN [Slika 21], brzinom ispod 0,2 m/s, s konstantnim pritiskom. Da bi se smanjilo trenje kao mazivo korišten je molibdenov disulfid.



**Slika 21. Hidraulička preša**

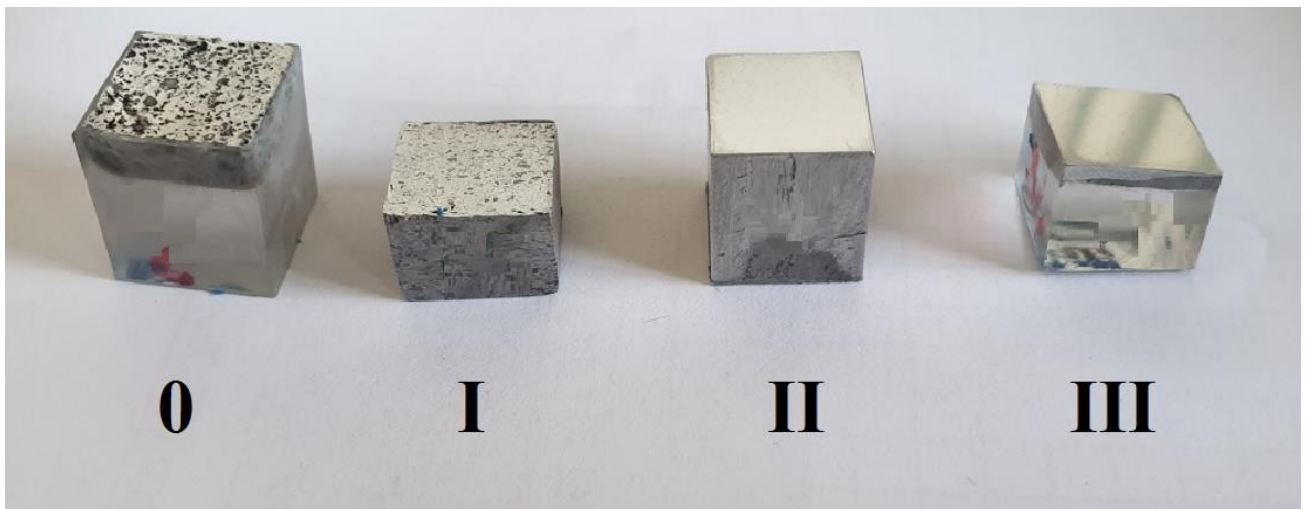
### 7.3. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće

Priprema uzorka provedena je u Laboratoriju za materijalografiju u Zavodu za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Za svako stanje pripremljen je po jedan uzorak:

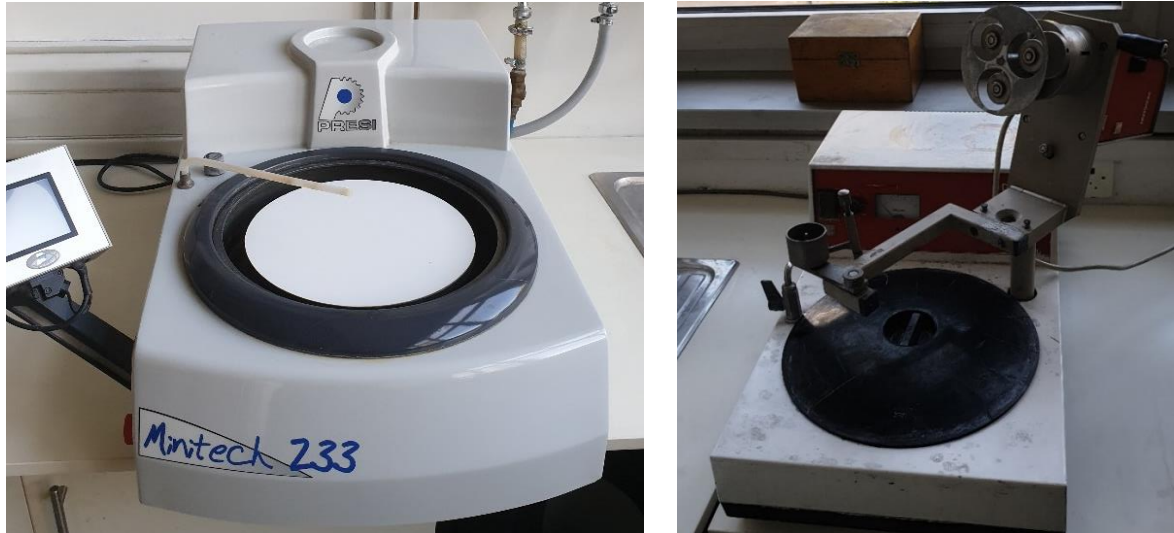
- lijevano stanje – uzorak 0
- lijevano i jedanput provučeno stanje - uzorak I
- lijevano i dvaput provučeno stanje - uzorak II
- lijevano i triput provučeno stanje - uzorak III

Na svim uzorcima pripremljena je po jedna površina za analizu mikrostrukture i mjerenje tvrdoće. Navedena površina je prvo pobrušena u nekoliko stupnjeva sa sve finijim brusnim papirom, a zatim ispolirana dijamantnim česticama. Zbog jednostavnije pripreme neki uzorci su prije brušenja i poliranja zaliveni u masu (uzorci 0 i III) [Slika 22].



Slika 22. Uzorci na kojima je provedeno ispitivanje tvrdoće

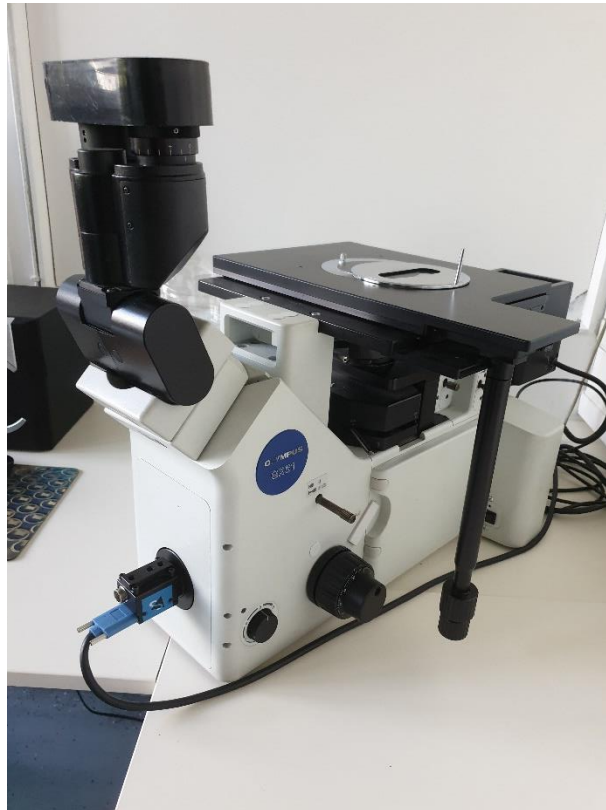
Ravna, glatka i sjajna površina uzoraka pripremljena je na uređajima za brušenje i poliranje, [Slika 23].



Slika 23. Uređaji za brušenje i poliranje

#### 7.4. Analiza mikrostrukture

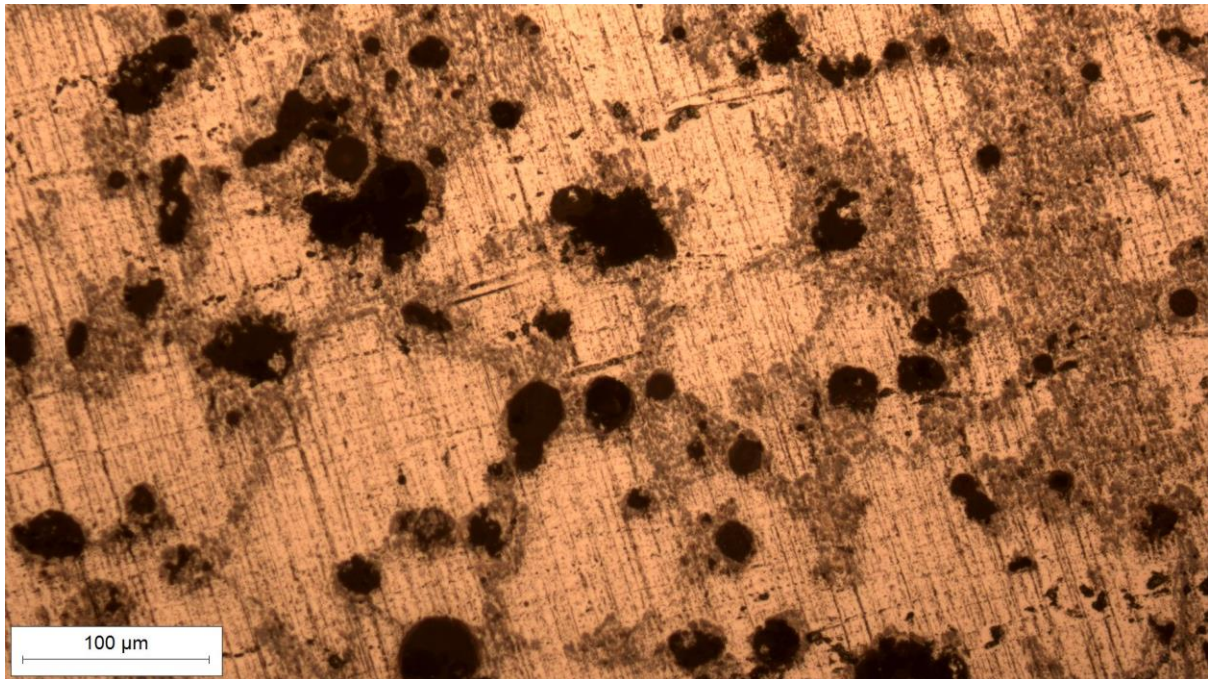
Na pripremljenim uzorcima provedena je analiza mikrostrukture pomoću uređaja Olympus GX51 [Slika 24] u Laboratoriju za materijalografiju u Zavodu za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



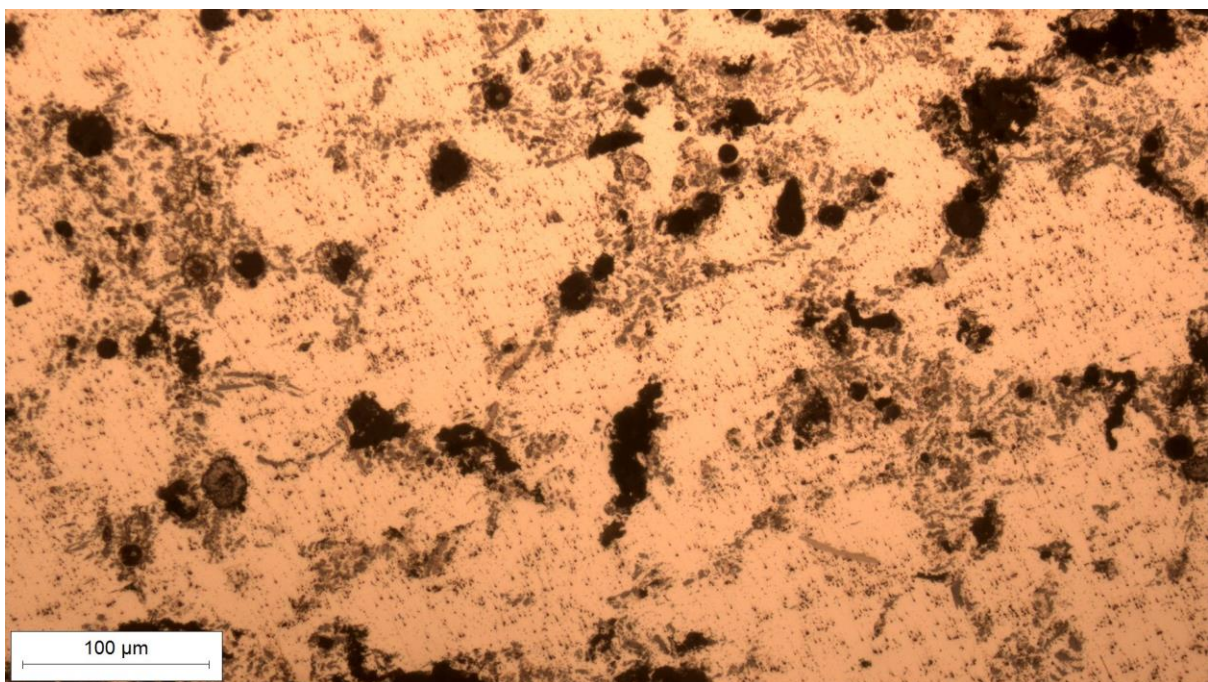
**Slika 24. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51**

Na fotografijama koje slijede prikazana je mikrostrukura svih uzoraka u poliranom stanju, snimljena pri povećanju  $200\times$  [Slika 25, Slika 26, Slika 27, Slika 28].



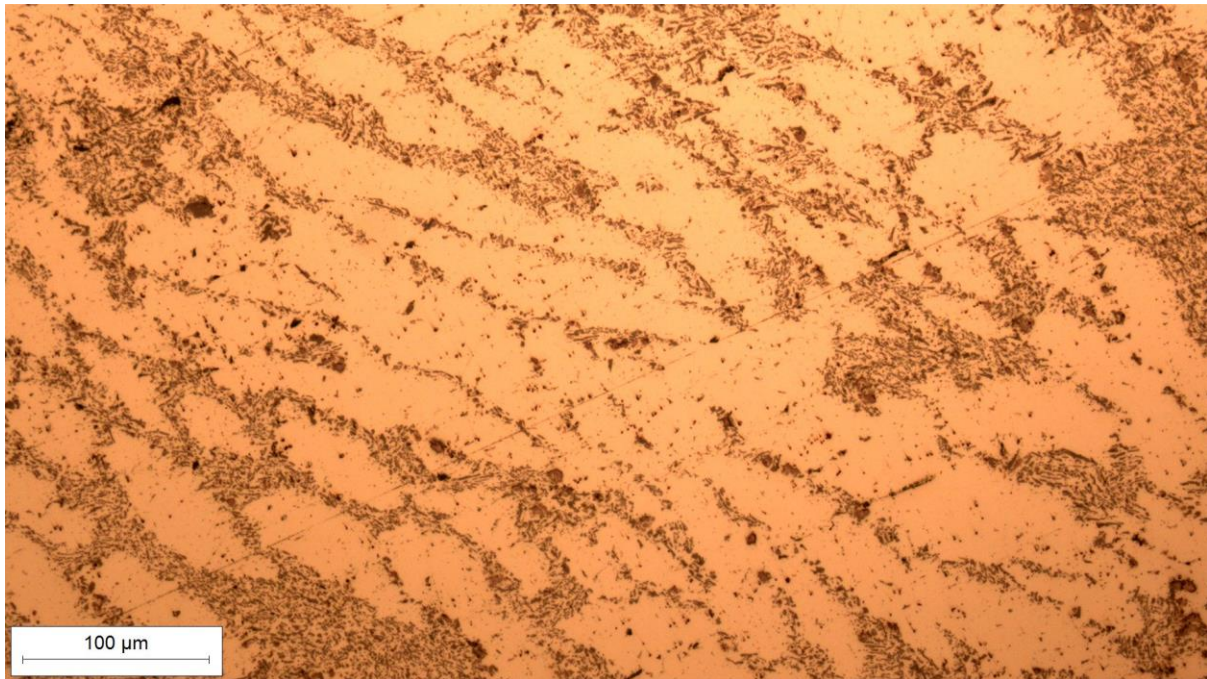


**Slika 25. Mikrostruktura uzorka 0**

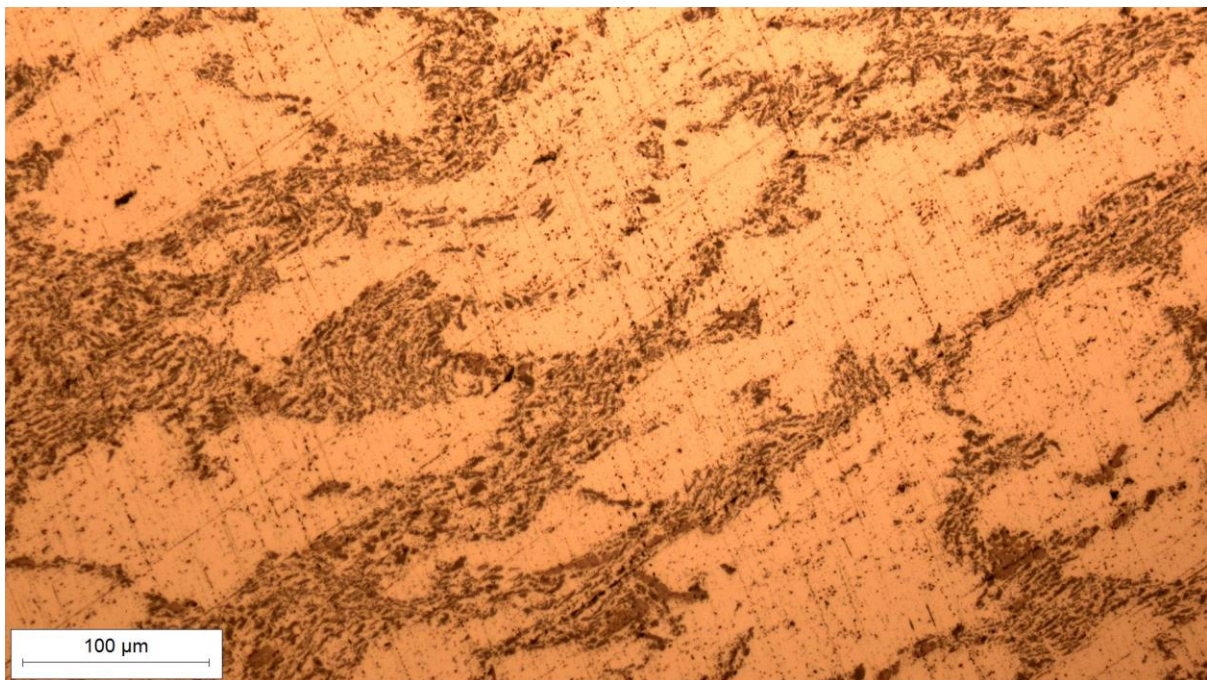


**Slika 26. Mikrostruktura uzorka I**





**Slika 27. Mikrostruktura uzorka II**



**Slika 28. Mikrostruktura uzorka III**

Svijetla površina je  $\alpha$  čvrsti rastvor silicija u aluminiju. Kako je silicij slabo topiv u aluminiju izlučuje se u obliku sitnih nakupina koje se na slici vidi kao siva faza. Najtamnija faza u mikrostrukturi su čestice lebdeće pepela koje su uglavnom homogeno raspoređene unutar

promatranog presjeka kompozita. Na fotografiji mikrostrukture u lijevanom i jedanput provučenom stanju, osim navedenog, vide se i pore koje se daljnjim provlačenjem smanjuju (uzorak II) i na kraju gube (uzorak III).

### 7.5. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom izvodilo se na mikrotvrdomjeru PMT-3U4.2 u laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje [Slika 29]. Mjerenje se provodi utiskivanjem dijamantnog indentora u obliku četverostrane piramide pomoću poznatog iznosa sile. Na površini uzorka ostaje otisak u obliku romba kojem se mjere dijagonale i pomoću njih se izračunava iznos tvrdoće prema izrazu (1).



Slika 29. Tvrdomjer PMT-3U4.2

Pri mjerenju tvrdoće korištena su četiri različita opterećenja i to: 0,1962 N (HV0,02), 0,4905 N (HV0,05), 0,981 N (HV0,1), 1,96 N (HV0,2). Za svako opterećenje provedeno je po 20 mjerenja na svakom uzorku, po 5 mjerenja uz rub svake stranice uzorka [Slika 30].



**Slika 30. Mjesta ispitivanja tvrdoće uz rubove**

Rezultati mjerenja tvrdoće pri različitim opterećenjima i srednje vrijednosti tvrdoća prikazani su u tablicama [Tablica 4, Tablica 5, Tablica 6, Tablica 7]

Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 0

Uzorak 0	Broj mjerenje	HV0,02	HV0,05	HV0,1	HV0,2
Rub 1	1	54	48	47	39
	2	50	51	56	52
	3	47	43	53	51
	4	49	53	50	51
	5	64	53	58	54
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>53</b>	<b>50</b>	<b>53</b>	<b>49</b>
Rub 2	1	59	62	61	50
	2	53	65	62	51
	3	55	61	59	50
	4	46	67	59	53
	5	49	66	69	40
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>52</b>	<b>64</b>	<b>62</b>	<b>49</b>
Rub 3	1	49	43	51	41
	2	60	52	59	46
	3	45	50	55	50
	4	50	57	44	44
	5	44	55	53	38
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>44</b>
Rub 4	1	49	43	45	37
	2	59	48	42	43
	3	56	47	43	41
	4	42	54	41	42
	5	43	49	43	43
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>50</b>	<b>48</b>	<b>43</b>	<b>41</b>
<b>Srednja vrijednost za sve 4 strane</b>		<b>51</b>	<b>53</b>	<b>52</b>	<b>46</b>

Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće za uzorak I

Uzorak I	Broj mjerenje	HV0,02	HV0,05	HV0,1	HV0,2
Rub 1	1	46	78	93	83
	2	48	77	86	82
	3	53	81	85	83
	4	69	67	97	80
	5	42	86	86	86
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>51</b>	<b>78</b>	<b>89</b>	<b>83</b>
Rub 2	1	69	78	75	83
	2	51	77	86	76
	3	62	67	81	82
	4	69	69	81	78
	5	60	76	76	86
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>62</b>	<b>73</b>	<b>80</b>	<b>81</b>
Rub 3	1	69	78	84	91
	2	59	86	89	93
	3	70	71	81	82
	4	51	77	83	76
	5	62	68	80	83
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>62</b>	<b>76</b>	<b>83</b>	<b>85</b>
Rub 4	1	65	68	80	76
	2	64	73	77	82
	3	65	76	80	79
	4	62	71	81	78
	5	55	59	74	76
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>62</b>	<b>69</b>	<b>79</b>	<b>78</b>
<b>Srednja vrijednost za sve 4 strane</b>		<b>60</b>	<b>74</b>	<b>83</b>	<b>82</b>

Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak II

Uzorak II	Broj mjerenje	HV0,02	HV0,05	HV0,1	HV0,2
Rub 1	1	78	83	92	83
	2	53	76	85	87
	3	88	69	83	89
	4	64	78	92	79
	5	67	81	84	86
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>70</b>	<b>77</b>	<b>87</b>	<b>85</b>
Rub 2	1	83	89	84	89
	2	83	91	88	90
	3	83	87	80	83
	4	76	91	88	79
	5	85	100	87	86
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>82</b>	<b>91</b>	<b>85</b>	<b>85</b>
Rub 3	1	81	81	84	80
	2	88	86	79	85
	3	85	81	89	86
	4	88	87	90	94
	5	76	91	89	93
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>88</b>
Rub 4	1	93	83	84	74
	2	88	86	86	77
	3	69	89	89	88
	4	83	84	78	84
	5	72	80	79	86
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>81</b>	<b>84</b>	<b>83</b>	<b>82</b>
<b>Srednja vrijednost za sve 4 strane</b>		<b>79</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>85</b>

Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće za uzorak III

Uzorak III	Broj mjerenje	HV0,02	HV0,05	HV0,1	HV0,2
Rub 1	1	93	96	97	92
	2	83	94	87	88
	3	106	106	89	81
	4	102	92	94	94
	5	96	94	90	89
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>91</b>	<b>89</b>
Rub 2	1	91	87	97	95
	2	78	92	94	98
	3	74	92	87	97
	4	78	96	86	91
	5	93	94	93	88
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>83</b>	<b>92</b>	<b>91</b>	<b>94</b>
Rub 3	1	88	100	98	95
	2	85	86	107	99
	3	88	86	99	100
	4	85	94	97	99
	5	85	100	94	99
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>86</b>	<b>93</b>	<b>99</b>	<b>98</b>
Rub 4	1	102	96	104	86
	2	85	92	92	94
	3	76	91	85	87
	4	76	91	94	92
	5	74	87	99	88
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>83</b>	<b>91</b>	<b>95</b>	<b>90</b>
<b>Srednja vrijednost za sve 4 strane</b>		<b>87</b>	<b>93</b>	<b>94</b>	<b>93</b>



## 8. ANALIZA REZULTATA

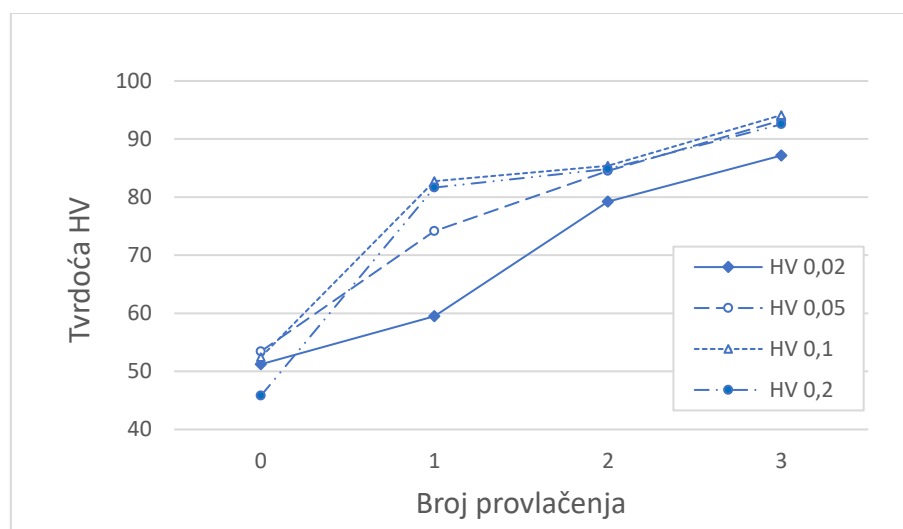
### 8.1. Analiza utjecaja provlačenja na tvrdoću

Dobiveni rezultati pokazuju da broj provlačenja pri kutnom kanalnom prešanju intenzivno utječe na tvrdoću, [Tablica 8] [Slika 31]. Sa svakim sljedećim provlačenjem povećava se tvrdoća kompozita i što je veći broj provlačenja to je tvrdoća uzoraka veća. Povećanje tvrdoće nastaje nagomilavanjem dislokacija zbog intenzivne plastične deformacije. Osim toga u lijevanom stanju udio pora je vrlo visok, što također može utjecati na niže vrijednosti tvrdoće. Povećanje tvrdoće jače je izraženo što je opterećenje pri mjerenju tvrdoće veće.

Neprovučeni uzorak 0 (lijevano stanje) ima najnižu tvrdoću 46 HV<sub>0,2</sub>. Uzorak 0 ima velika rasipanja rezultata i pad tvrdoće s povećanjem opterećenja zbog pora u mikrostrukтури (veća vjerojatnost da se zahvati pora prilikom mjerenja tvrdoće). Nakon prvog provlačenja postupkom kutnog kanalnog prešanja (uzorak I) tvrdoća se povisila na 82 HV<sub>0,2</sub>. Daljnjim provlačenjem tvrdoća se povisila na 85 HV<sub>0,2</sub> (uzorak II), a nakon trećeg provlačenja na 93 HV<sub>0,2</sub> (uzorak III). Prvo provlačenje izazvalo je najveći prirast tvrdoće kod skoro svih primijenjenih opterećenja.

Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće s obzirom na uzorak (broj provlačenja)

Uzorak	HV <sub>0,02</sub>	HV <sub>0,05</sub>	HV <sub>0,1</sub>	HV <sub>0,2</sub>
<b>0</b>	51	53	52	46
<b>I</b>	60	74	83	82
<b>II</b>	79	84	85	85
<b>III</b>	87	93	94	93

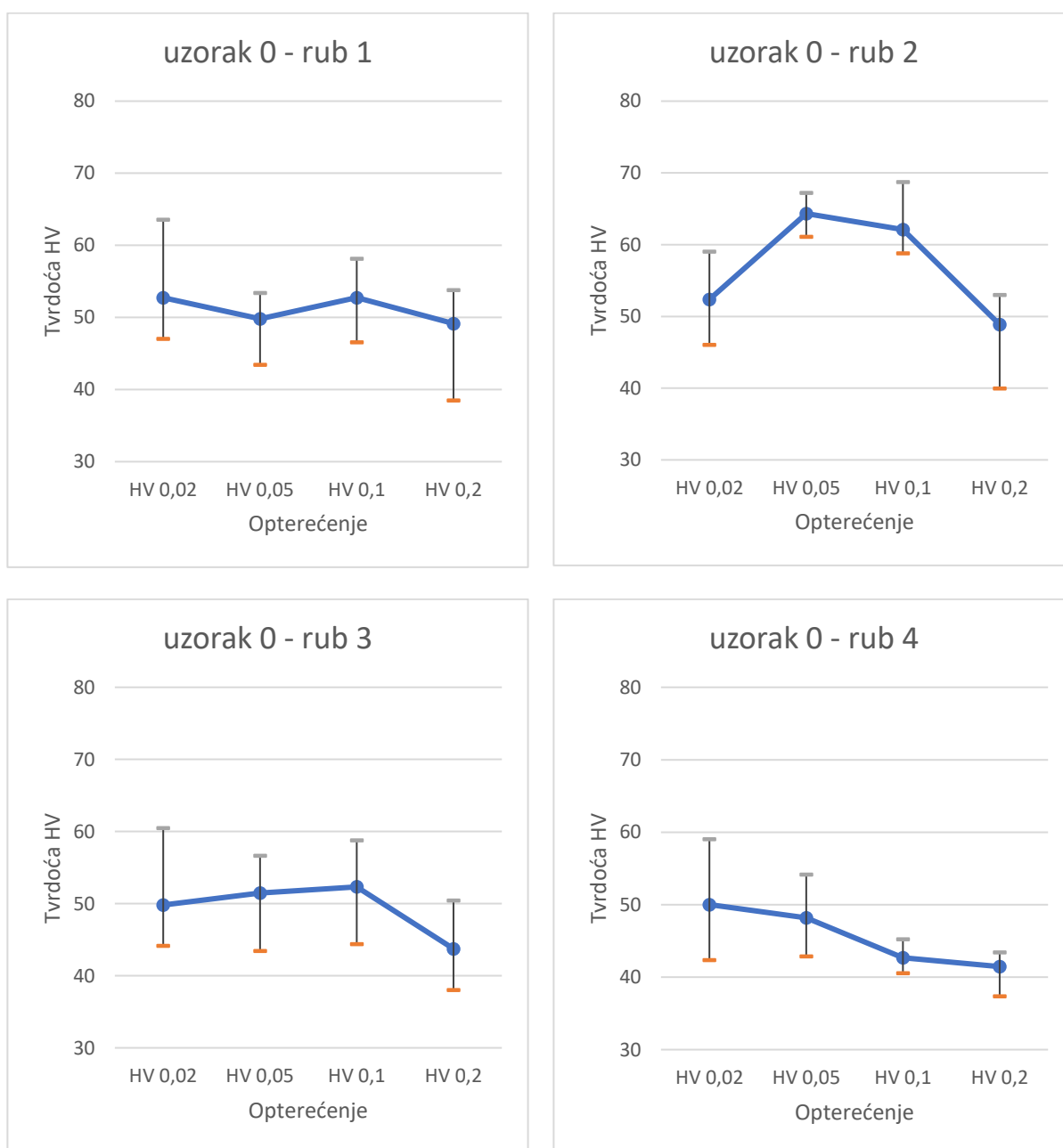


Slika 31. Ovisnost tvrdoće o broju provlačenja i opterećenju pri mjerenju



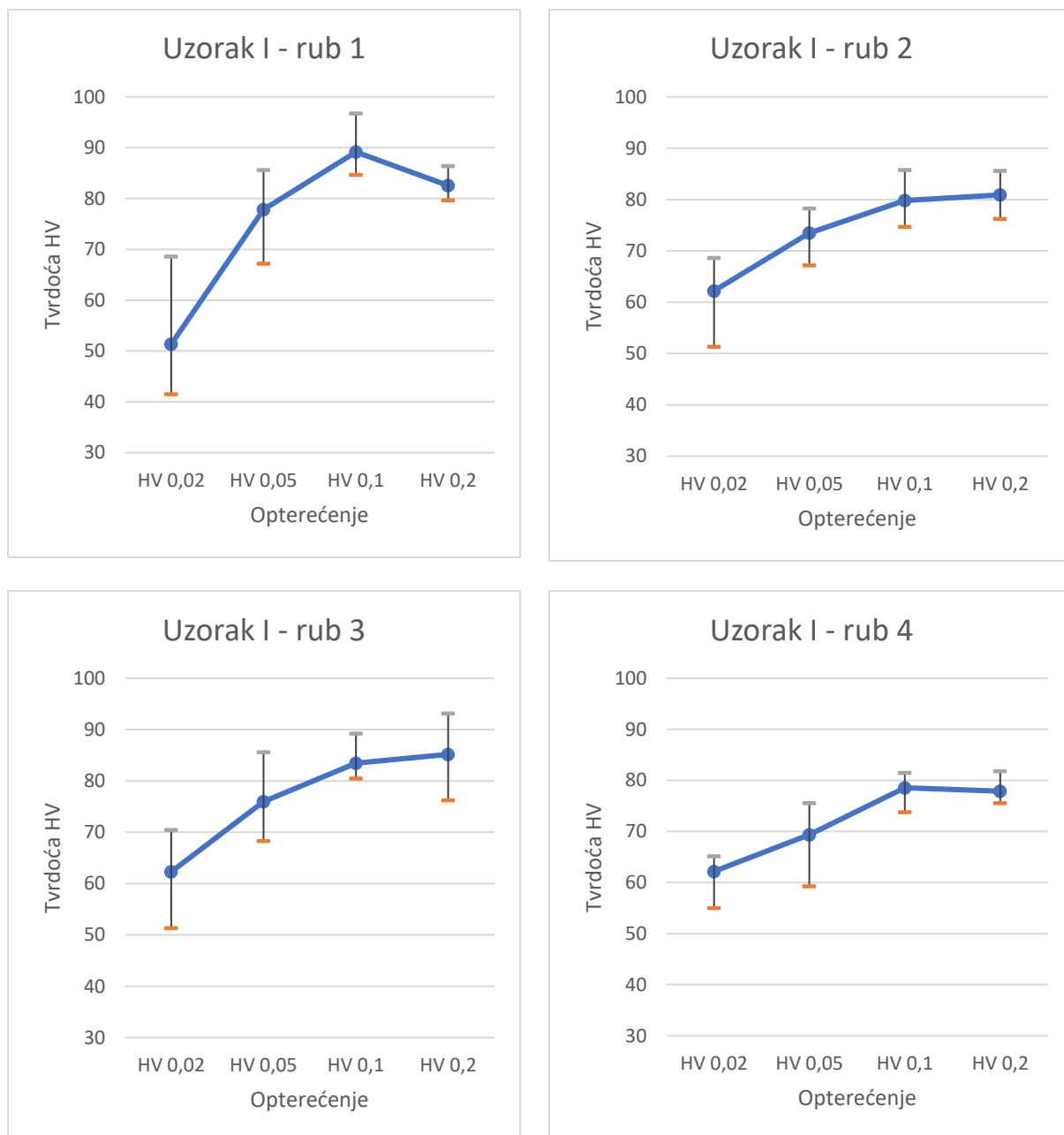
Utjecaj broja provlačenja na ujednačenost vrijednosti tvrdoće pojedinih rubova svih uzoraka prikazani su na slikama koje slijede, [Slika 32, Slika 33, Slika 34, Slika 35]. U grafovima su prikazane srednje vrijednosti i rasipanja za tvrdoću svakog pojedinog ruba.

Za najniže opterećenje (HV0,02), kod uzorka 0 koji nije provučen, nema značajnije razlike u izmjerenoj tvrdoći. Izmjerene vrijednosti za HV0,2 također se ne razlikuju previše, dok se rezultati za HV0,05 i HV0,1 jako razlikuju po rubovima [Slika 32].



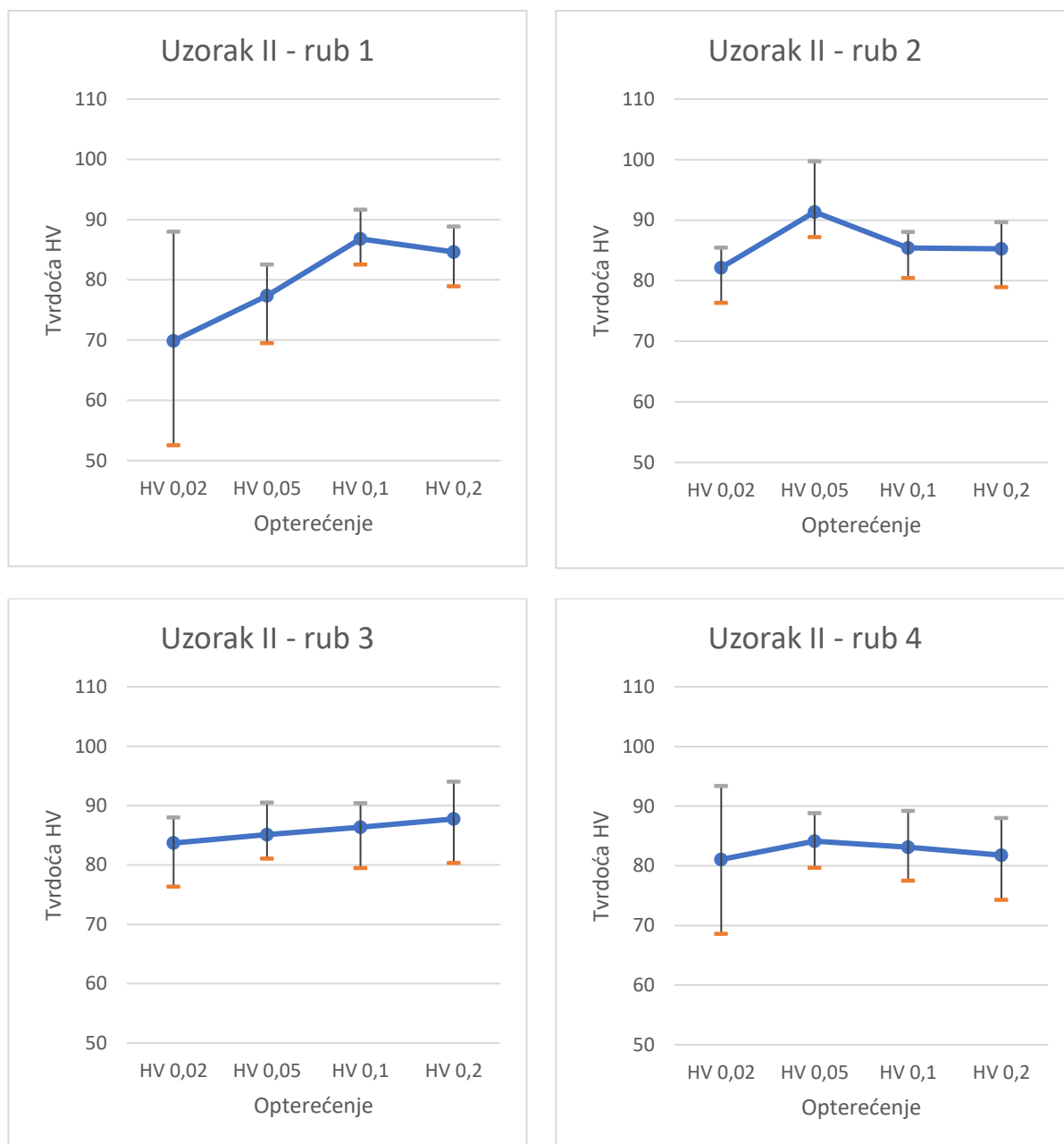
**Slika 32. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova neprovučenog uzorka (0) o opterećenju**

Kod uzorka I koji je jedanput provučen razlika između srednjih vrijednosti tvrdoće rubova dosta je velika, a najmanja je kod najvećeg opterećenja (HV0,2) [Slika 33].



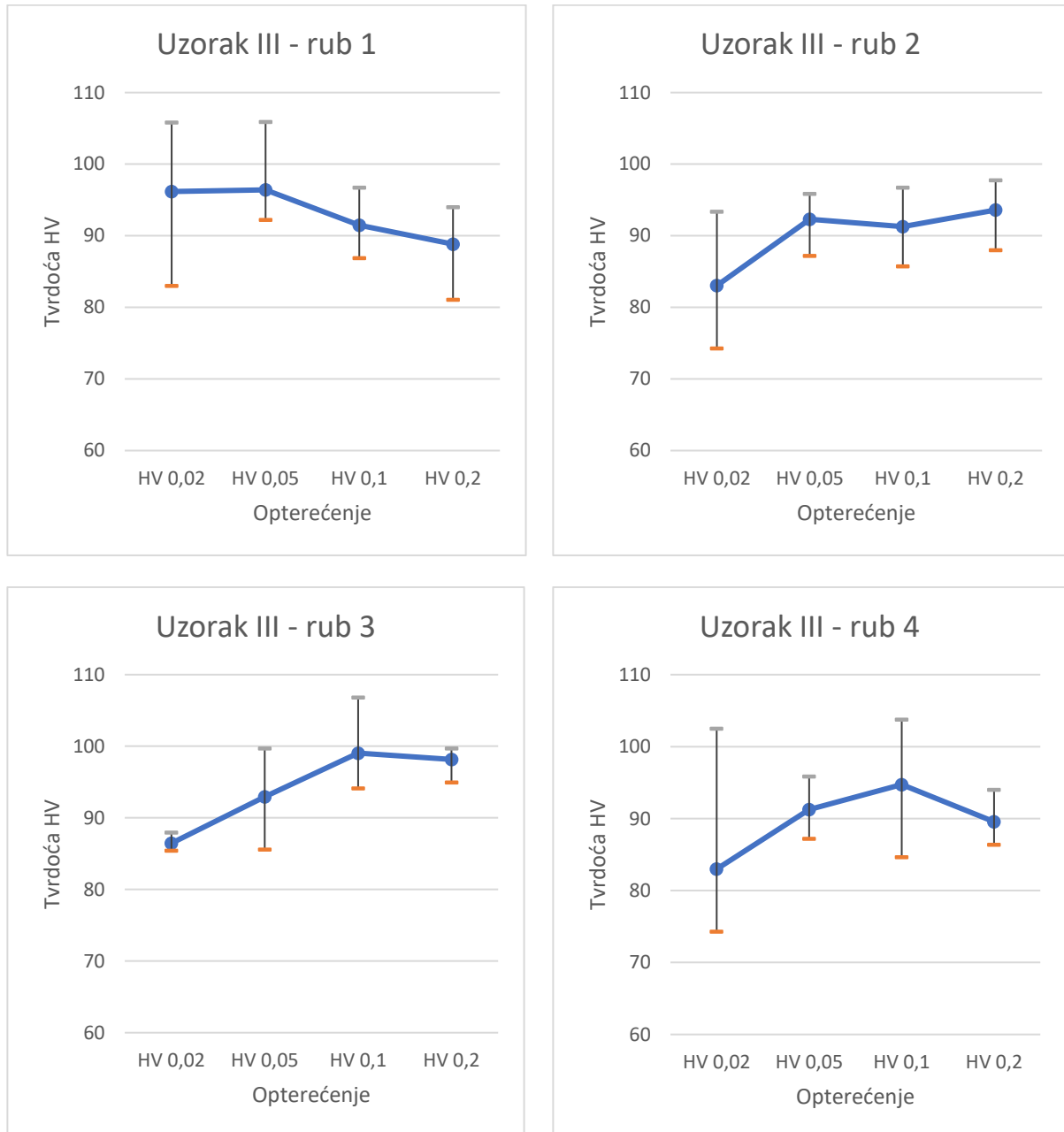
**Slika 33. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova jedanput provučenog uzorka (I) o opterećenju**

Kod uzorka II razlika srednjih vrijednosti tvrdoće među rubovima je dosta velika za dva niža opterećenja (HV0,02 i HV0,05), a nešto niža razlika je prisutna kod viših opterećenja (HV0,1 i HV0,2)



**Slika 34. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova dvaput provučenog uzorka (II) o opterećenju**

Kod uzorka III koji je triput provučen razlika srednjih vrijednosti izmjerenih tvrdoća pojedinih rubova veća je kod HV0,02 i HV0,2 nego kod HV0,05 i HV0,1 [Slika 35].

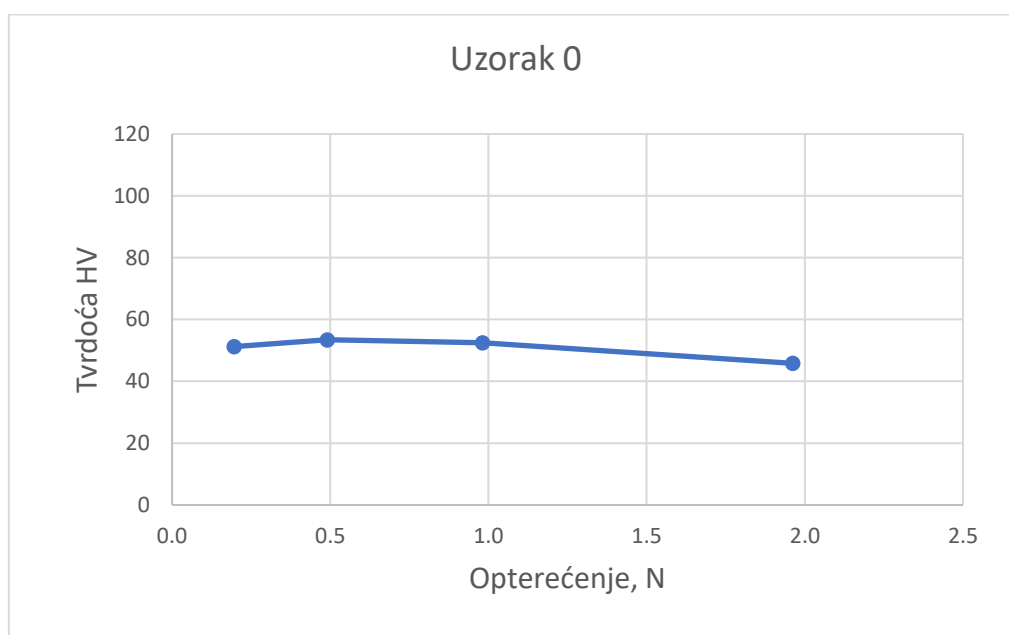


**Slika 35. Ovisnost tvrdoće pojedinih rubova triput provučenog uzorka (III) o opterećenju**

## 8.2. Analiza utjecaja opterećenja na tvrdoću

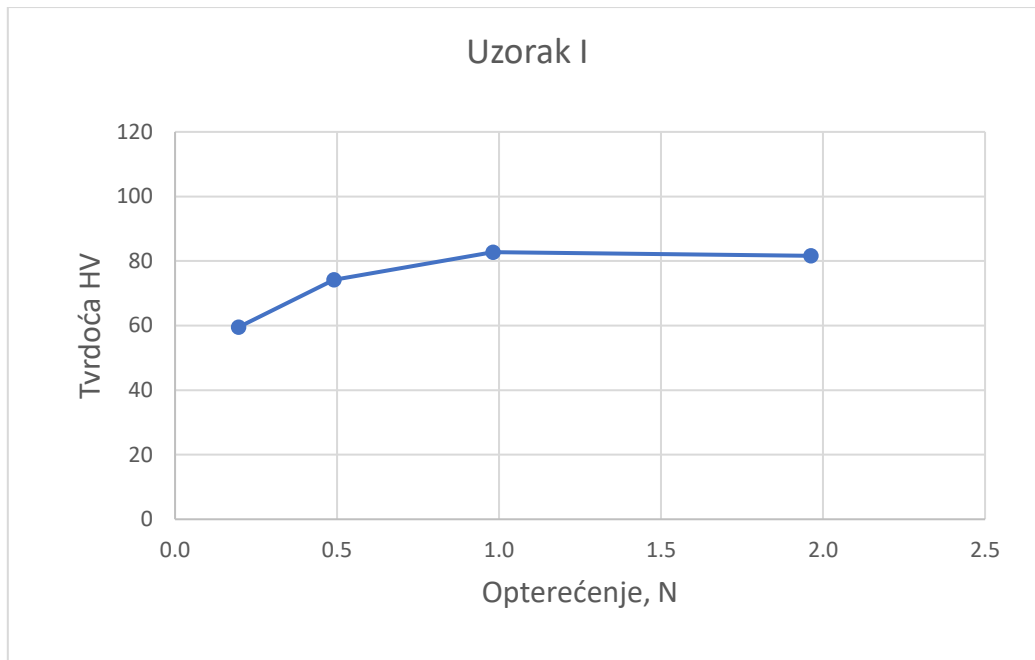
Za sva četiri uzorka prikazan je utjecaj opterećenja pri mjerenju tvrdoće na vrijednosti tvrdoće, što se vidi na dolje prikazanim grafovima [Slika 36, Slika 37, Slika 38, Slika 39]. U grafovima su prikazane srednje vrijednosti.

Kod uzorka 0, koji nije provučen, nema znatnije promjene tvrdoće s porastom opterećenja, [Slika 36]. Na početku tvrdoća raste od 51 do 53 HV s porastom opterećenja od 0,196 N do 0,491 N, a daljnjim povećanjem opterećenja vrijednost tvrdoće pada na 46 HV.



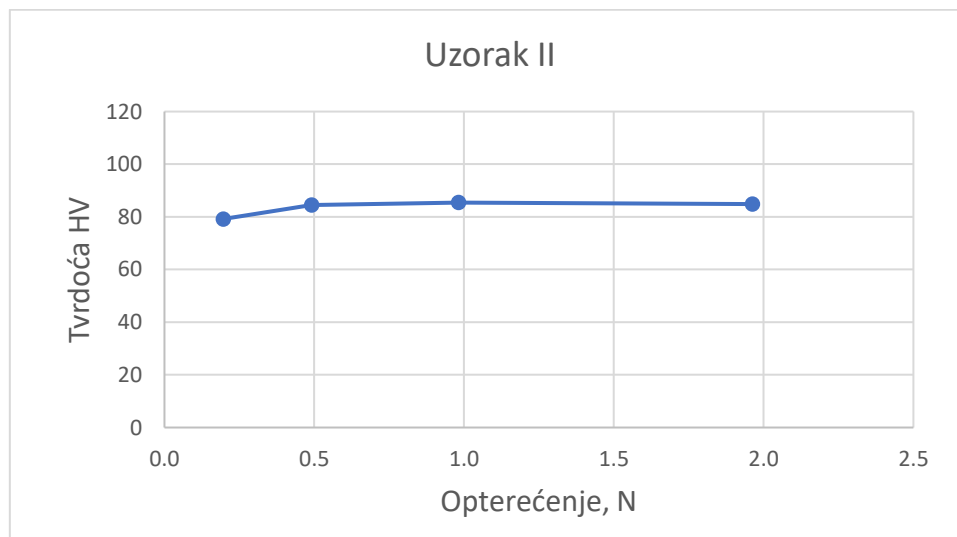
**Slika 36. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak 0**

Kod uzorka I, koji je jedanput provučen, dolazi do porasta tvrdoće s povećanjem opterećenja [Slika 37]. U odnosu na druge uzorke, dolazi do značajnog porasta tvrdoće između najmanjeg (HV0,02) i najvećeg (HV0,2) opterećenja. Tvrdoća postupno raste od 60 do 83 HV pri povećanju opterećenja od 0,196 N do 0,981 N, a nakon toga blago pada na 82 HV kad se opterećenje povisi na 1,962 N.



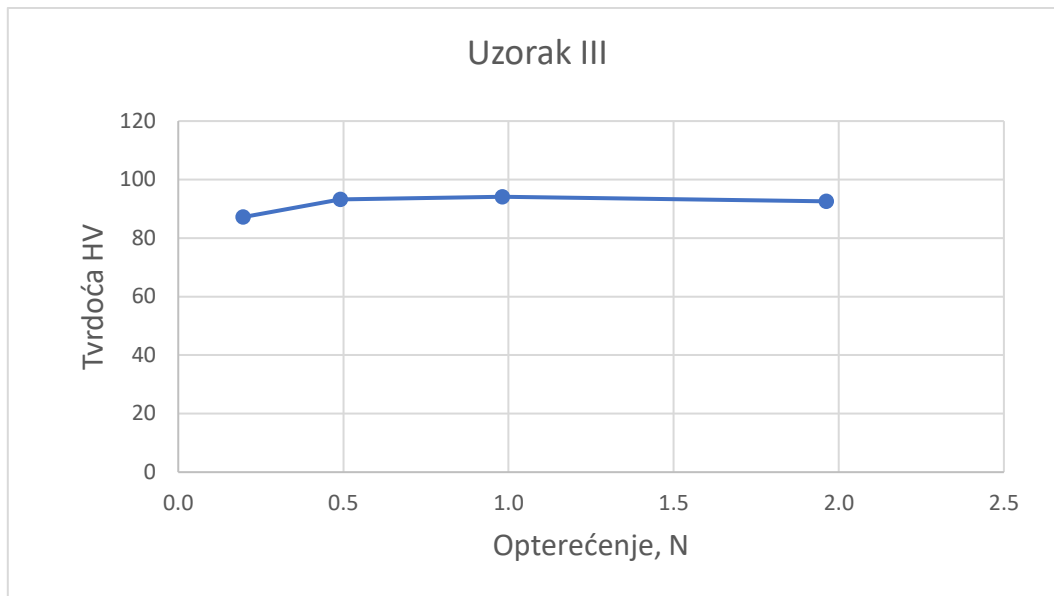
**Slika 37. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak I**

Kod uzorka II, koji je dvaput provučen, dolazi do blagog porasta tvrdoće s povećanjem opterećenja, [Slika 38]. Vrijednost tvrdoće raste s početnih 79 do 85 HV.



**Slika 38. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak II**

Kod uzorka III, koji je triput provučen, na početku tvrdoća postupno raste s povećanjem opterećenja do 0,981 N, od vrijednosti 87 do 94 HV. Daljnjim povećanjem opterećenja na vrijednost od 1,962 N, tvrdoća se smanjuje na 93 HV [Slika 39].



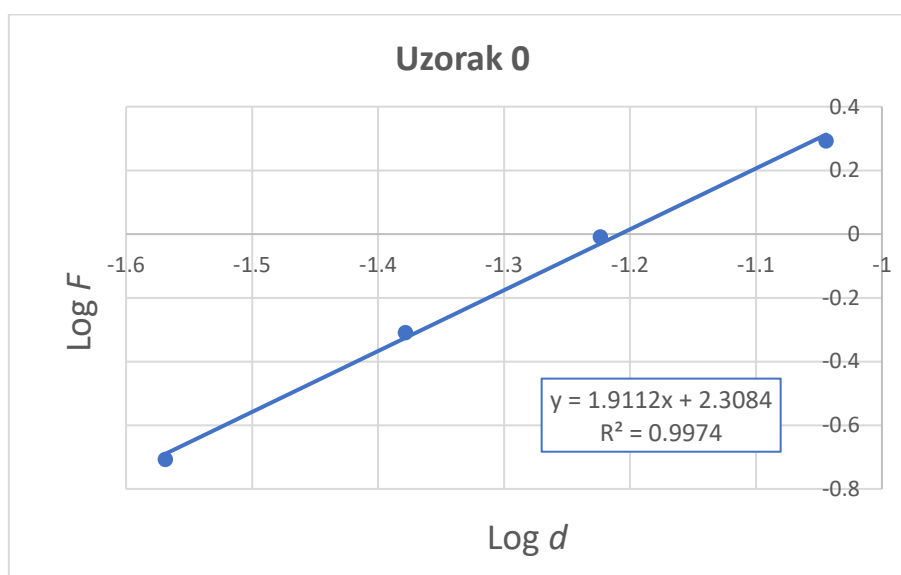
**Slika 39. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za uzorak III**

Na uzorku I najjače je izražen obrnut utjecaj opterećenja na izmjerenu tvrdoću. Uzorci II i III imaju blago povećanje tvrdoće, dok se kod uzorka 0 tvrdoća smanjuje.

### 8.3. Primjena Meyerovog zakona

Iz dobivenih rezultata pri mjerenju tvrdoće, linearnom regresijom određene su vrijednosti parametara  $n$  i  $K$  za Meyerov model kvantifikacije utjecaja opterećenja na tvrdoću. Vrijednost Meyerovog indeksa  $n$  određuje se iz nagiba pravca, a odsječak na ordinati je  $\log K$ .

Kod uzorka 0 vrijednost parametra  $n$  manja je od 2, što ukazuje na pad tvrdoće s porastom opterećenja. Vrijednost koeficijenta determinacije je vrlo visoka i iznosi 0,9974, [Slika 40], [Tablica 9].



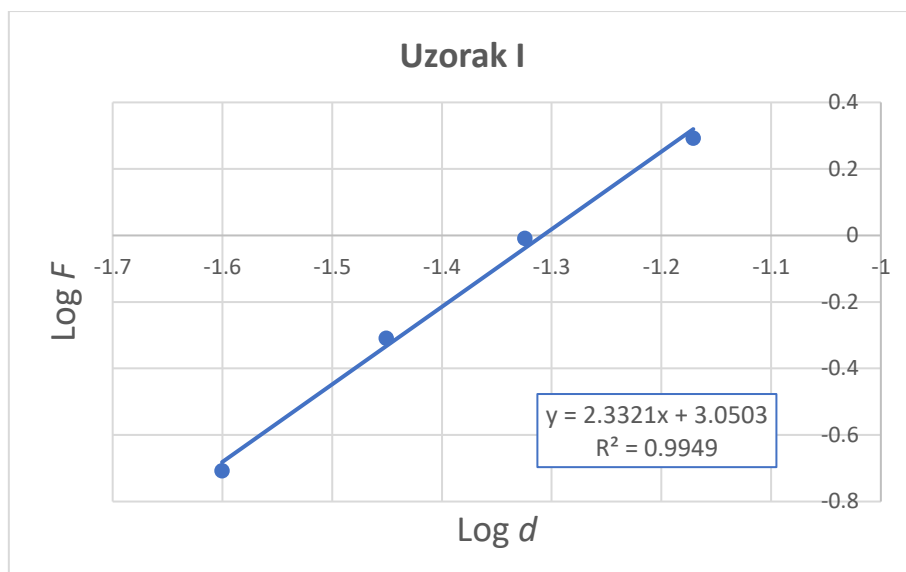
Slika 40. Parametri tvrdoće HV za uzorak 0 prema Meyerovom zakonu

Tablica 9. Rezultati linearne regresije za uzorak 0

Meyer - uzorak 0			
$n$	Log $K$	$K, N\text{ mm}^{-n}$	$R^2$
1,9	2,31	203	0,997

Za razliku od uzorka 0, kod uzorka I vrijednost parametra  $n$  veća je od 2, što ukazuje na povećanje tvrdoće s porastom opterećenja. Vrijednost koeficijenta determinacije je vrlo visoka i iznosi 0,9949, [Slika 41], [Tablica 10].



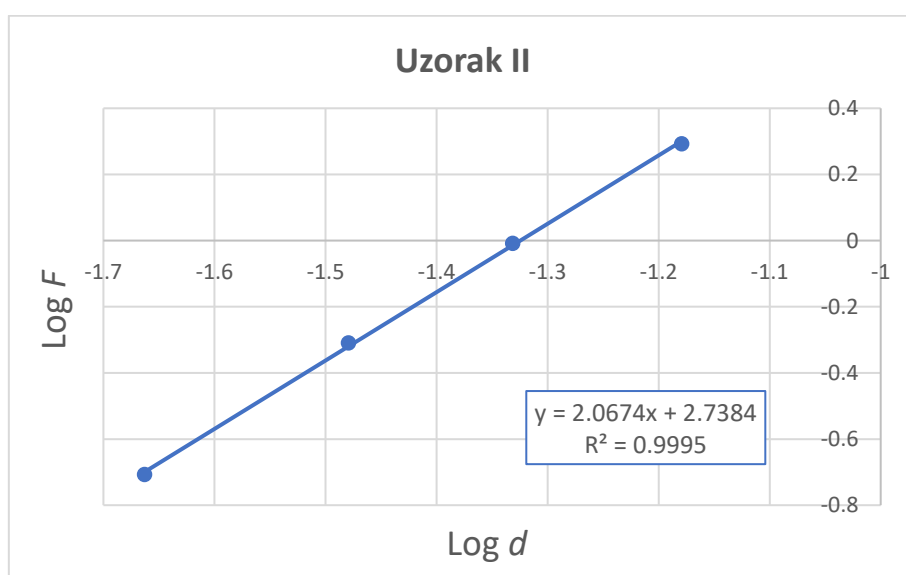


Slika 41. Parametri tvrdoće HV za uzorak I prema Meyerovom zakonu

Tablica 10. Rezultati linearne regresije za uzorak I

Meyer - uzorak I			
$n$	Log K	K, N mm <sup>-n</sup>	R <sup>2</sup>
2,3	3,05	1123	0,995

Kod uzorka II vrijednost parametra  $n$  nešto je veća do 2, što ukazuje da dolazi do malog povećanja tvrdoće s porastom opterećenja. Vrijednost koeficijenta determinacije je vrlo visoka i iznosi 0,9995, [ Slika 42], [Tablica 11].

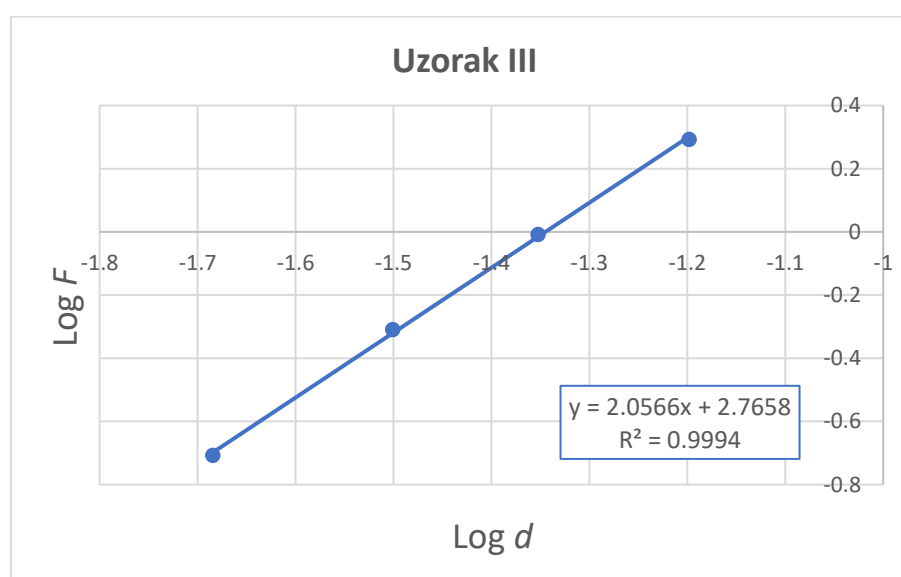


Slika 42. Parametri tvrdoće HV za uzorak II prema Meyerovom zakonu

**Tablica 11. Rezultati linearne regresije za uzorak II**

Meyer - uzorak II			
$n$	Log $K$	$K, N\text{ mm}^{-n}$	$R^2$
2,07	2,74	548	0,9995

Kod uzorka III vrijednosti parametra  $n$  i log  $K$  vrlo su slične vrijednostima kod uzorka II, pa i ovdje dolazi do malog povećanja tvrdoće s porastom opterećenja. Vrijednost koeficijenta determinacije je vrlo visoka i iznosi 0,9994, [Slika 43], [Tablica 12].

**Slika 43. Parametri tvrdoće HV za uzorak III prema Meyerovom zakonu****Tablica 12. Rezultati linearne regresije za uzorak III**

Meyer - uzorak III			
$n$	Log $K$	$K, N\text{ mm}^{-n}$	$R^2$
2,06	2,77	583	0,9994

Kod uzoraka I, II i III vrijednosti Meyerovog indeksa  $n$  veće su od 2 čime se dokazuje obrnut utjecaj opterećenja na tvrdoću kompozita. Kod uzorka 0 vrijednost Meyerovog indeksa  $n$  manja je od 2, što dokazuje „normalan“ utjecaj opterećenja na tvrdoću. Kod svih uzoraka visok koeficijent determinacije potvrđuje da Meyerov zakon dobro opisuje ovu pojavu.

## 9. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja na kompozitu s AlSi7Mg-matricom u koju je dodano 6% čestica lebdećeg pepela i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Broj provlačenja pri kutnom kanalnom prešanju intenzivno utječe na tvrdoću kompozita. Što je veći broj provlačenja veća je i tvrdoća materijala. Najveći prirast tvrdoće zabilježen je nakon prvog provlačenja.
- Utjecaj provlačenja na razliku tvrdoće po poprečnom presjeku provučenog uzorka nije jasno izražen.
- Primijenjeno opterećenje pri mjerenju tvrdoće utječe na vrijednosti tvrdoće. Taj utjecaj najviše je izražen kod jedanput provučenog uzorka. Kod neprovučenog uzorka tvrdoća s povećanjem opterećenja pada, a kod preostalih uzoraka raste.
- Obrnuti utjecaj opterećenja na tvrdoću kod provučenih uzoraka potvrđen je i Meyerovim indeksom ( $n > 2$ ), dok je za neprovučeni uzorak potvrđen „normalan“ utjecaj opterećenja na tvrdoću ( $n < 2$ ).
- Vrijednosti koeficijenta determinacije su vrlo visoke za sve uzorke pa je Meyerov model prikladan za analizu utjecaja opterećenja na tvrdoću ispitivanog kompozita.

**REFERENCE**

- [1] Majić Renjo M, Rede V, Čurković L. Reverse indentation size effect of a duplex steel. Vol. 52, *Kovove Materialy*. 2014. p. 299–304. doi: 10.4149/km-2014-5-299
- [2] Čurković L, Rede V, Grilec K. Utjecaj opterećenja na izmjerenu tvrdoću silicijeve karbidne keramike. *Kem u Ind Chem Chem Eng*. 2010;59(10):483–8.
- [3] Jiang D. Recent progresses in the phenomenological description for the indentation size effect in microhardness testing of brittle ceramics. *J Adv Ceram*. 2012;1(1):38–49. doi: 10.1007/s40145-012-0004-2
- [4] Budiarsa IN. Indentation size effect (ISE) of Vickers hardness in steels: Correlation with H/E. *Appl Mech Mater*. 2013;391(September 2013):23–8. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.391.23
- [5] Petřík J, Blaško P, Bidulská J, Guzanová A, Sinaiová I. The automatic testers in microhardness measurement and ISE effect. *Acta Metall Slovaca*. 2016;22(3):195–205. doi: 10.12776/ams.v22i3.758
- [6] Petřík J, Blaško P, Mihaliková M, Vasilňáková A, Mikloš V. The relationship between the deformation and the indentation size effect (ISE). *Metall Res Technol*. 2019 Oct 11;116(6):622. doi: 10.1051/metal/2019022
- [7] Matyunin VM, Abusaif N, Marchenkov AY. Analysis of the indentation size effect on the hardness measurements of materials. *J Phys Conf Ser*. 2019;1399(4). doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044016
- [8] Liu M, Lu C, Tieu AK. Crystal plasticity finite element method modelling of indentation size effect. *Int J Solids Struct*. 2015;54:42–9. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.11.008
- [9] Segal V. Equal-channel angular extrusion (ECAE): From a laboratory curiosity to an industrial technology. *Metals (Basel)*. 2020;10(2). doi: 10.3390/met10020244
- [10] Wang J, Zhu H, Vadiraja Sudhakar K, Price AH. Influence of equal-channel angular extrusion on impact toughness of aluminum and brass at room and low temperatures. *Int J Mech Mater Eng*. 2014;9(1):1–10. doi: 10.1186/s40712-014-0019-2
- [11] Abdi M, Ebrahimi R. Twin parallel channel angular extrusion as a development of ECAE in parallel channels. *SN Appl Sci*. 2020;2(4):1–10. doi: 10.1007/s42452-020-2324-0
- [12] Skrotzki W. Deformation heterogeneities in equal channel angular pressing. *Mater Trans*. 2019;60(7):1331–43. doi: 10.2320/matertrans.MF201926
- [13] De Souza VA, Watanabe I, Yanagida A. Numerical estimation of frictional effects in equal channel angular extrusion. *Mater Trans*. 2016;57(9):1399–403. doi: 10.2320/matertrans.MH201513
- [14] Krolo J. Postupci recikliranja metalnog otpada u čvrstom agregatnom stanju [kvalifikacijski rad]. Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje. 2018;
- [15] Mathieu J-P, Suwas S, Eberhardt A, Tóth LS, Moll P. A new design for equal channel angular extrusion. *J Mater Process Technol*. 2006 Mar;173(1):29–33. doi:

- 10.1016/j.jmatprotec.2005.11.007
- [16] Ramanathan A, Krishnan PK, Muraliraja R. A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *J Manuf Process*. 2019;42(September):213–45. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017
- [17] Sharma AK, Bhandari R, Pinca-Bretotean C. A systematic overview on fabrication aspects and methods of aluminum metal matrix composites. *Mater Today Proc*. 2020;45:4133–8. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.899
- [18] Ružić J, Simić M, Stoimenov N, Božić D, Stašić J. Innovative processing routes in manufacturing of metal matrix composite materials. *Metall Mater Eng*. 2021;27(1). doi: 10.30544/629
- [19] Shamsipour M, Pahlevani Z, Shabani MO, Mazahery A. Squeeze casting of electromagnetically stirred aluminum matrix nanocomposites in semi-solid condition using hybrid algorithm optimized parameters. *Kov Mater*. 2017;55(1):33–43. doi: 10.4149/km-2017-1-33
- [20] Razzaq AM, Majid DL, Manan NH, Ishak MR, Basheer UM. Effect of Fly Ash Content and Applied Load on Wear Behaviour of AA6063 Aluminium Alloy. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;429(1). doi: 10.1088/1757-899X/429/1/012038
- [21] Selvam DRJ, Dinaharan DRI. Synthesis and characterization of Al6061-Fly Ashp-SiCp composites by stir casting and compocasting methods. *Energy Procedia*. 2013;34:637–46. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.795
- [22] Razzaq AM, Abdul Majid DLA, Ishak MR, Uday MB. Microstructural characterization of fly ash particulate reinforced AA6063 aluminium alloy for aerospace applications. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017;270(1). doi: 10.1088/1757-899X/270/1/012028
- [23] Gladston JAK, Dinaharan I, Sheriff NM, Selvam JDR. Dry sliding wear behavior of AA6061 aluminum alloy composites reinforced rice husk ash particulates produced using compocasting. *J Asian Ceram Soc*. 2017;5(2):127–35. doi: 10.1016/j.jascer.2017.03.005
- [24] Thomas S, Keshavamurthy R, Kumar PGS, Tambrallimath V, Prasanna GD. An improved compocasting technique for uniformly dispersed multi-walled carbon nanotube in AA2219 Alloy Melt. *FME Trans*. 2020;48(3):581–7. doi: 10.5937/fme2003581T
- [25] Poloczek L, Dybowski B, Rodak K, Jarosz R, Kielbus A. Influence of age hardening parameters on the microstructure and properties of the AlSi7Mg sand cast alloy. *Arch Metall Mater*. 2015;60(4):3035–41. doi: 10.1515/amm-2015-0485
- [26] <https://www.european-aluminium.eu/media/1544/aam-products-6-cast-alloys-and-products.pdf> (23.10.2021.)
- [27] <https://www.msosupplies.com/products/alsi7mg-aluminum-based-metal-powder-for-additive-manufacturing-3d-printing> (11.20.2021.)
- [28] <https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2019-11/AlSi7Mg-M2beide.pdf> (11.20.2021.)

- [29] Mao W, Li Y, Zhao A, Zhong X. The formation mechanism of non-dendritic primary  $\alpha$ -Al phase in semi-solid AlSi7Mg Alloy. *Sci Technol Adv Mater*. 2001;2(1):97–9. doi: 10.1016/S1468-6996(01)00032-8
- [30] Tupaj M, Orłowicz AW, Mróz M, Trytek A, Markowska O. Usable Properties of AlSi7Mg Alloy after Sodium or Strontium Modification. *Arch Foundry Eng*. 2016;16(3):129–32. doi: 10.1515/afe-2016-0064
- [31] Fintová S, Konečná R, Nicoletto G. Microstructure, defects and fatigue behavior of cast AlSi7Mg alloy. *Acta Metall Slovaca*. 2013;19(3):223–31. doi: 10.12776/ams.v19i3.164