

# Priprema površine aditivno proizvedene titanijeve legure Ti6Al4V za prevlačenje prevlakom PACVD TiN

---

**Premerl, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:235:153685>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-24**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matija Premerl**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Matija Premerl

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof.dr.sc. Darku Landeku na stručnoj pomoći tijekom izrade završnoga rada i ukazanom povjerenju.

Također se zahvaljujem Jurici Jačanu mag.ing.mech. na strpljenju i pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Hvala mojoj obitelji što su mi omogućili školovanje i bili neizmijerna moralna podrška.

Matija Premerl



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove.

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarški

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Premerl**

JMBAG: **0035217990**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Priprema površine aditivno proizvedene titanijeve legure Ti6Al4V za prevlačenje prevlakom PACVD TiN**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Surface preparation of additively produced titanium alloy Ti6Al4V for PACVD TiN coating**

Opis zadatka:

Titanijeve legure primjenjuju se za strojarske i biomedicinske konstrukcije u kojima se zahtjeva kombinacija dobrih mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju, dok se otpornost na trošenje povećava primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja površine. Primjenom aditivne tehnologije rastaljivanja praša titanijevih legura elektronskim snopom moguće je proizvesti konstrukcijske elemente smanjene mase, u odnosu na konvencionalno proizvedene legure, uz zadržavanje slične nosivosti. Potrebne dimenzije i kvalitete površine aditivno proizvedenih elemenata treba postići primjenom dodatnih postupaka obrade deformacijom i odvajanjem čestica.

U radu treba opisati izradu konstrukcijskih elemenata postupkom rastaljivanja praška elektronskim snopom te prema literaturi usporediti svojstva aditivno i konvencionalno proizvedene titanijeve legure Ti6Al4V.

U eksperimentalnom dijelu rada treba ispitati utjecaj parametara tokarenja aditivno proizvedene legure Ti6Al4V na hrapavost površine te predložiti parametre završne obrade brušenjem i poliranjem kao pripremu za nanošenje prevlake TiN plazmom potpomognutim taloženjem iz parne faze (PACVD). Na pripremljenim uzorcima provesti postupak prevlačenja PACVD TiN te ispitati debljinu, prionljivost i mikrotvrdoću prevlake. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti tehnološki postupak pripreme površine aditivno proizvedene legure za nanošenje tankih tvrdih prevlaka.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

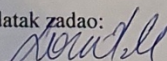
Predvideni datumi obrane:

9. 5. 2022.

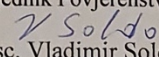
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TITANOVE LEGURE .....	3
2.1. Klasifikacija titanovih legura [1].....	3
2.2. Svojstva legure TiAl6V4 [1].....	5
2.3. Primjena titanovih legura.....	5
3. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE TITANOVIH LEGURA.....	7
3.1. Metoda taljenja metala elektronskim snopom.....	7
3.1.1. Odabir materijala .....	8
3.1.2. Parametri EBM postupka .....	8
3.1.3. Postupak izrade obratka EBM procesom .....	10
3.1.4. Prednosti i nedostaci EBM procesa .....	10
3.1.4.1. Poroznost .....	12
3.1.4.2. Povećana hrapavost površine.....	13
3.1.4.3. Zaostala naprezanja.....	14
3.2. Postupak selektivnog taljenja laserskim snopom .....	16
4. PREVLAČENJE POVRŠINE PACVD POSTUPKOM .....	18
4.1. Uređaj za PACVD postupak .....	18
4.2. Parametri PACVD postupka .....	19
4.3. Prednosti i nedostaci PACVD postupka .....	19
5. ZAVRŠNE OBRADNE ADITIVNO PROIZVEDENIH POVRŠINA .....	21
5.1. Fino tokarenje.....	21
5.2. Brušenje i poliranje.....	22
6. ISPITIVANJE SVOJSTAVA PREVLAKA.....	26

---

6.1.	Određivanje debljine prevlake.....	26
6.2.	Određivanje tvrdoće prema Vickersu (HV 0,01) .....	26
6.3.	Ispitivanje hrapavosti površine.....	27
6.4.	Ispitivanje adhezivnosti prevlake VDI metodom.....	28
7.	PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA.....	32
7.1.	Materijal ispitnih uzoraka .....	32
7.2.	Parametri finog tokarenja i brušenja uzoraka.....	32
7.3.	Parametri PACVD procesa .....	34
8.	REZULTATI ISPITIVANJA.....	37
8.1.	Obradivost površine EBM uzorka finim tokarenjem.....	37
8.2.	Ispitivanje hrapavosti tokarenih površina .....	39
8.2.1.	Ispitivanje hrapavosti nakon površinskih obrada .....	39
8.2.2.	Ispitivanje hrapavosti površine prevlake PACVD TiN .....	41
8.3.	Ispitivanje adhezivnosti i debljine sloja prevlake.....	42
8.4.	Ispitivanje mikrotvrdoće prevlake.....	48
9.	ZAKLJUČAK .....	50
	LITERATURA .....	51

**POPIS SLIKA:**

<b>Slika 2.1.</b> Kristalni oblici titana [2]: a) heksagonsko slagana struktura (HCP) b) kubična prostorno centrirana struktura (BCC).....	3
<b>Slika 2.2.</b> Titanove legure [2]: a) $\alpha$ legura b) $\alpha+\beta$ legura c) $\beta$ legura.....	4
<b>Slika 2.3.</b> Primjena titanovih legura: a) zrakoplovstvo [2] b) medicina [3] c) stomatologija [4] .	6
<b>Slika 3.1.</b> Uređaj za aditivnu proizvodnju metodom taljenja elektronskim snopom [5] .....	7
<b>Slika 3.2.</b> Eksplozija praška unutar radne komore [5].....	8
<b>Slika 3.3.</b> Jednostavne komponente za optimiranje parametara taljenja [5].....	9
<b>Slika 3.4.</b> Proces izrade komponente EBM procesom [6] .....	10
<b>Slika 3.5.</b> Prototip izmjenjivača topline izrađenog od čistog bakra [7].....	11
<b>Slika 3.6.</b> Vrste pora komponenti proizvedenih EBM procesom [9]: a) pore s nedostatkom srašćivanja materijala .....	13
<b>Slika 3.7.</b> Pukotine nastale nakupljanjem zaostalih naprezanja tijekom proizvodnje [21].....	14
<b>Slika 3.8.</b> Uređaj za aditivnu proizvodnju postupkom selektivnog taljenja laserskim snopom [30] .....	16
<b>Slika 3.9.</b> Morfologija vanjske površine uzoraka [31]: a) uzorak vertikalno građen SLM metodom b) uzorak horizontalno građen SLM metodom c) uzorak vertikalno građen EBM metodom d) uzorak horizontalno građen EBM metodom.....	17
<b>Slika 4.1.</b> Postrojenje za prevlačenje komponenti PACVD postupkom [32] .....	18
<b>Slika 4.2.</b> Ovisnost brzine taloženja i tvrdoće prevlake o protoku titanovog-IV-klorida [32].....	19
<b>Slika 4.3.</b> Neke od vrsti prevlaka koje je moguće napraviti PACVD postupkom [34].....	20
<b>Slika 5.1.</b> Shematski prikaz postupka tokarenja [35] .....	21
<b>Slika 5.2.</b> Shema postupka brušenja bez centra [36] .....	22
<b>Slika 5.3.</b> Sheme postupaka brušenja [37]: a) unutrašnje brušenje b) sužavanje .....	22
<b>Slika 5.4.</b> Postupak poliranja remenom [38]: a) shema postupka b) prikaz alata i tekture remena .....	24
<b>Slika 5.5.</b> Shema postupka poliranja brusnim valjcima [38] .....	25
<b>Slika 5.6.</b> Vodootporni brusni papir [39] .....	25
<b>Slika 6.1.</b> Metoda kalotest: a) shematski prikaz postupka [40] b) uređaj za metodu kalotest .....	26
<b>Slika 6.2.</b> Perthometer S8P.....	28
<b>Slika 6.3.</b> Shematski prikaz Rockwellovog testa [42] .....	28
<b>Slika 6.4.</b> Dobro prijanjajuća prevlaka [42] .....	29
<b>Slika 6.5.</b> Loše prijanjajuća prevlaka [42].....	30
<b>Slika 7.1.</b> Uzorak proizveden aditivnom proizvodnjom u polaznom stanju .....	32



<b>Slika 7.2.</b> Tokarski noževi: a) tokarski nož za finu obradu b) tokarski nož za rezanje .....	34
<b>Slika 7.3.</b> Noževi za finu obradu i rezanje na držaču .....	34
<b>Slika 7.4.</b> Postrojenje za PACVD postupak .....	35
<b>Slika 7.5.</b> Dijagram PACVD postupka .....	36
<b>Slika 8.1.</b> Fino tokaren uzorak S1.....	37
<b>Slika 8.2.</b> Fino tokaren uzorak S2.....	38
<b>Slika 8.3.</b> Fino tokaren uzorak S3.....	38
<b>Slika 8.4.</b> Fino tokaren uzorak K1 .....	39
<b>Slika 8.5.</b> Profili hrapavosti: a) uzorak S1 b) uzorak S2 c) uzorak S3 .....	40
<b>Slika 8.6.</b> Grafički prikaz visina neravnina aditivno proizvedenih uzoraka .....	41
<b>Slika 8.7.</b> Grafički prikaz visina neravnina prevučenih uzoraka.....	42
<b>Slika 8.8.</b> Ispitivanje adhezivnosti prevlake konvencionalno proizvedenog uzorka VDI metodom .....	43
<b>Slika 8.9.</b> Ispitivanje adhezivnosti prevlake aditivno proizvedenog uzorka VDI metodom.....	43
<b>Slika 8.10.</b> Način određivanja veličina X i Y.....	44
<b>Slika 8.11.</b> Ispitivanje otpornosti na trošenje konvencionalno proizvedenog uzorka: a) prvo mjesto b) drugo mjesto c) treće mjesto .....	45
<b>Slika 8.12.</b> Ispitivanje otpornosti na trošenje aditivno proizvedenog uzorka .....	46
<b>Slika 8.13.</b> DUH-211/211S .....	48
<b>Slika 8.14.</b> Proces ispitivanja mikrotvrdoće.....	48
<b>Slika 8.15.</b> Aditivno proizveden uzorak za ispitivanje mikrotvrdoće .....	49

**POPIS TABLICA:**

<b>Tablica 6.1.</b> Skala standardnih mikrotvrdoća prema metodi Vickers s odgovarajućim silama utiskivanja indentora .....	27
<b>Tablica 6.2.</b> Tvrdomjer - uređaj za mjerenje mikrotvrdoće [41] .....	27
<b>Tablica 7.1.</b> Posmaci alata tijekom obrade uzoraka .....	33
<b>Tablica 7.2.</b> Parametri PACVD procesa .....	35
<b>Tablica 8.1.</b> Rezultati ispitivanja površinskih hrapavosti prevučenih uzoraka .....	41
<b>Tablica 8.2.</b> Rezultati mjerenja i debljine prevlake .....	46
<b>Tablica 8.3.</b> Rezultati srednjih vrijednosti mikrotvrdoća .....	49

**POPIS OZNAKA:**

- $d$  - promjer kuglice za metodu kalotest, mm
- $E$  - debljina sloja prevlake,  $\mu\text{m}$
- $f$  - brzina posmaka alata u procesu tokarenja, mm/okr
- $f'$  - brzina posmaka alata u procesu tokarenja, mm/s
- $R_a$  - srednja visina neravnina,  $\mu\text{m}$
- $R_z$  - maksimalna visina neravnina,  $\mu\text{m}$
- $V_c$  - brzina rezanja, mm/s

**SAŽETAK**

U radu su opisane klasifikacija i primjena titanovih legura, aditivna proizvodnja EBM i SLM postupcima te proces prevlačenja PACVD. U eksperimentalnom dijelu rada ispitane su kvalitete površina konvencionalno i aditivno, EBM procesom, proizvedenih uzoraka prije i poslije prevlačenja PACVD TiN. Osim ispitanih hrapavosti površina, ispitana jesu: adhezivnost sloja prevlake VDI metodom, debljina sloja prevlake metodom kalotest i finalno mikrotvrdoća.

**Ključne riječi:** titanove legure, EBM, PACVD

**ABSTRACT**

The paper describes the classification and application of titanium alloys, additive manufacturing using EBM and SLM processes, and the PACVD coating process. In the experimental part of the work, the surface qualities of the conventionally and additively, with the EBM process, produced samples were tested before and after PACVD TiN coating. In addition to the tested surface roughness, the following were tested: adhesiveness of the coating layer using the VDI method, thickness of the coating layer using the ball cratering method, and finally microhardness.

**Keywords:** titanium alloys, EBM, PACVD

## 1. UVOD

Aditivne metode omogućavaju prototipnu i maloserijsku proizvodnju komponenti zahtjevnih geometrija. Proizvodi koji se ne bi mogli proizvesti konvencionalnim metodama ili bi njihova proizvodnja bila skupa, sada su na dohvat ruke. Iako je teško implementirati aditivne metode u velikoserijsku proizvodnju, one su idealne za izradu 3D prototipova kako bi bilo lakše vizualizirati i optimizirati velikoserijske proizvode. Titan i njegove legure se odlikuju vrlo dobrom kombinacijom mehaničkih svojstava i malom gustoćom, no problem u primjeni titana je što je teško obradiv metodama odvajanja čestica te je potrebno taj način obrade svesti na minimum. Procesi aditivne proizvodnje idealno ispravljaju taj nedostatak titana jer preciznom proizvodnjom minimiziraju potrebu za odvajanjem čestica.

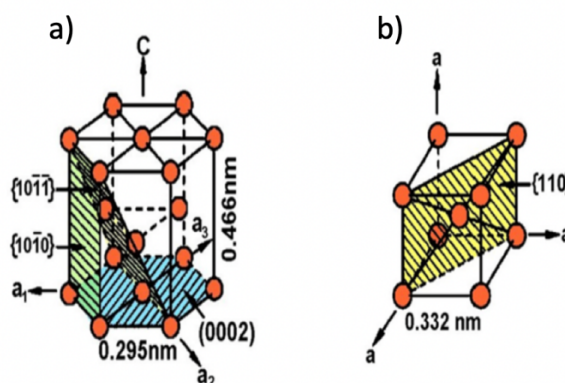
U radu su prikazane klasifikacija i primjena titanovih legura, postupci aditivne proizvodnje metodama taljenja elektronskim snopom i laserskom zrakom te proces prevlačenja komponenti titan-nitrid prevlakom metodom plazmom potpomognutog kemijskog taloženja iz parne faze (engl. Plasma assisted chemical vapour deposition, PACVD). Ispitivani uzorci izrađeni su metodom taljenja elektronskim snopom (engl. Electron beam melting, EBM) i konvencionalnim metodama dok je sloj prevlake, kojom su prevučeni, izrađen PACVD postupkom te su pri završetku procesa napravljena ispitivanja. Ispitivane su površinske hrapavosti konvencionalno i aditivno proizvedenih obradaka prije i poslije prevlačenja, određivana je debljina sloja prevlake te su ispitivane adhezivnost i mikrotvrdoća prevučenoga sloja.

# TEORIJSKI DIO

## 2. TITANOVE LEGURE

### 2.1. Klasifikacija titanovih legura [1]

Titan je vrlo atraktivan konstrukcijski materijal zbog svoje visoke čvrstoće, niske gustoće i odlične korozijske postojanosti. Zahvaljujući ovim svojstvima, titan i njegove legure predstavljaju tehnički superiorniji i isplativiji materijal od čelika. No, valja napomenuti da svojstva titanovih legura značajno mogu varirati ovisno o vrsti legure i njenom mikrostrukturnom stanju određenom vrstom i udjelom legiranih elemenata. Titan je polimorfan metal koji se javlja u dva kristalna oblika. Jedan koji je stabilan pri sobnoj temperaturi s heksagonskom gusto slaganoj strukturu (HCP), a naziva se  $\alpha$ -titan, i drugi koji je stabilan na povišenim temperaturama kubične prostorno centrirane strukture (BCC), poznat kao  $\beta$ -titan. Prekristalizacija kubične prostorno centrirane rešetke  $\beta$  titana u heksagonsku rešetku  $\alpha$  titana odvija se smicanjem, nalik formiranju martenzita kod čelika. Kod čistog titana  $\alpha$  faza je stabilna sve do temperature 885 °C kada se transformira u  $\beta$  fazu koja ostaje nepromijenjena sve do tališta 1670 °C. Dodatkom legiranih elemenata mijenjaju se udjeli  $\alpha$  i  $\beta$  faze i temperatura prekristalizacije. Oni elementi koji povišuju temperaturu prekristalizacije kroz stabilizaciju  $\alpha$  faze nazivaju se  $\alpha$  stabilizatorima i uključuju aluminij, kisik, dušik i ugljik. Elementi koji snižavaju temperaturu prekristalizacije i time stabiliziraju  $\beta$  fazu pri nižim temperaturama nazivaju se  $\beta$  stabilizatori.  $\beta$  stabilizatori se dijele na  $\beta$  izomorfne elemente koji imaju visoku topljivost u titanu i  $\beta$  eutektoidne elemente ograničene topljivosti koji formiraju intermetalne spojeve.  $\beta$  izomorfni elementi su molibden, vanadij, niobij i tantal, dok  $\beta$  eutektoidni elementi uključuju mangan, krom, silicij, željezo, kobalt, nikal i bakar. Kositar i cirkonij se smatraju neutralnim elementima jer oni niti povećavaju niti snižavaju temperaturu prekristalizacije. Titanove legure se općenito klasificiraju prema sadržaju  $\alpha$  i  $\beta$  faze u njihovoj mikro-strukturi pri sobnoj temperaturi te tako razlikujemo:  $\alpha$ , približno  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  i metastabilne  $\beta$  legure.



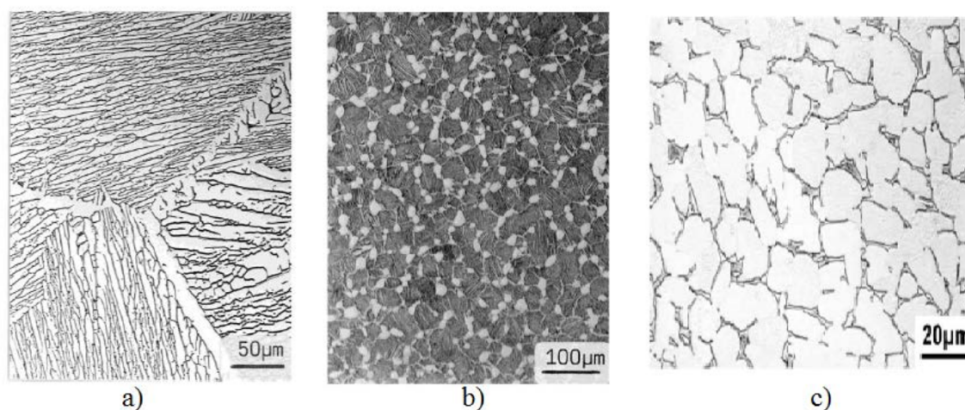
*Slika 2.1. Kristalni oblici titana [2]: a) heksagonsko slagana struktura (HCP) b) kubična prostorno centrirana struktura (BCC)*



Titanove  $\alpha$  i približno  $\alpha$  legure (slika 2.2a.) sadrže većinom 5 do 6 % aluminija kao glavnog legirnog elementa uz dodatak neutralnih elemenata kositra i cirkonija te nekih  $\beta$  stabilizatora. Budući da ove legure zadržavaju čvrstoću pri povišenim temperaturama i najbolje su otporne na puzanje od svih titanovih materijala, često se koriste za visokotemperaturne primjene. Otpornost na puzanje naročito poboljšava silicij zbog formiranja malih silikatnih precipitata koji uspješno sprečavaju pomicanje dislokacija. Ove vrste legura se također dobro ponašaju i pri niskim temperaturama zahvaljujući heksagonskoj gusto slaganoj strukturi koja osigurava dobru žilavost i čvrstoću pri sniženim temperaturama. Zbog ograničenog broja kliznih sustava HCP rešetke  $\alpha$  faza je manje žilava i teže oblikovljiva od  $\beta$  faze pa su ove legure relativno slabo hladno oblikovljive.

Titanove  $\alpha+\beta$  legure (slika 2.2b.) posjeduju najbolju kombinaciju mehaničkih svojstava i predstavljaju glavni dio proizvodnje titanovih materijala. Suprotno  $\alpha$  i približno  $\alpha$  legurama,  $\alpha+\beta$  legure mogu se toplinski obrađivati do umjereno visokih čvrstoća, premda nisu u tolikoj mjeri sklone toplinskoj obradi kao  $\beta$  legure. Općenito  $\alpha+\beta$  legure posjeduju dobru čvrstoću na sobnoj temperaturi i kratkotrajno se mogu izlagati povišenim temperaturama mada nisu otporne na puzanje. Zavarljivost legura ove skupine je loša zbog postojanja dvofazne mikrostrukture.

Metastabilne  $\beta$  legure (slika 2.2c.) sadrže dovoljnu količinu  $\beta$  stabilizatora koji stabiliziraju  $\beta$  fazu na sobnoj temperaturi. Budući da  $\beta$  faza s prostorno centriranom kubičnom rešetkom posjeduje znatno veću sposobnost deformacije nego  $\alpha$  faza, legure ove skupine pokazuju znatno bolju oblikovljivost. Neke  $\beta$  legure je moguće oblikovati i na sobnoj temperaturi.  $\beta$  legure mogu se toplinski očvrnuti rastopnim žarenjem i dozrijevanjem do viših čvrstoća nego  $\alpha+\beta$  legure. Glavni nedostaci ovih legura su nešto viša gustoća zbog sadržaja kroma, molibdena i vanadija koji se dodaju radi stabilizacije  $\beta$  faze, te snižene žilavosti nakon toplinske obrade i ograničena zavarljivost nekih legura.



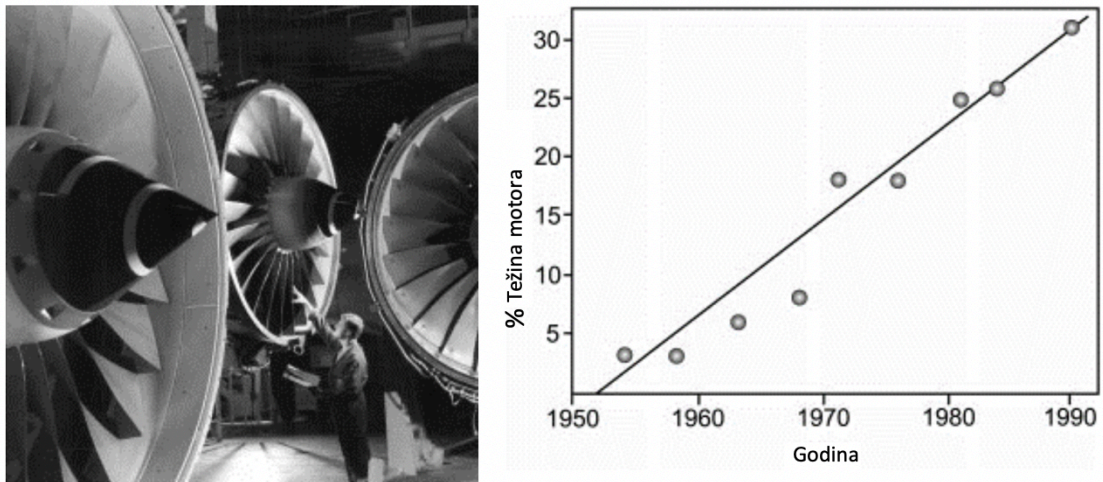
Slika 2.2. Titanove legure [2]: a)  $\alpha$  legura b)  $\alpha+\beta$  legura c)  $\beta$  legura

## 2.2. Svojstva legure TiAl6V4 [1]

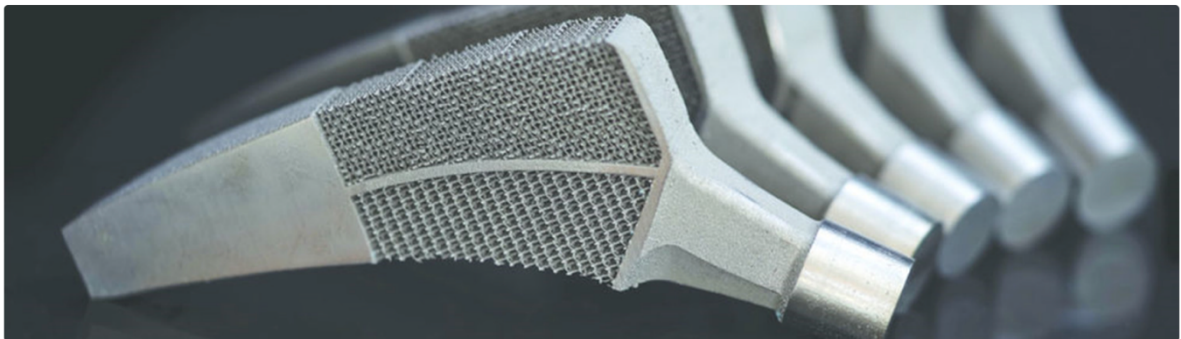
TiAl6V4 legura koja čini otprilike 55 % svih titanovih legura uključujući i čisti titan u zrakoplovstvu se uglavnom koristi za izradu konstrukcijskih elemenata letjelica. TiAl6V4 spada su skupinu  $\alpha+\beta$  legura koje su umjereno toplinski obradive, ali nemaju tako dobra svojstva pri povišenim temperaturama. Legure ove skupine općenito posjeduju dobru kombinaciju mehaničkih svojstava i primjenjive su pri temperaturama 315-400 °C. Među  $\alpha+\beta$  legurama razlikuju se one koje sadrže samo elemente stabilizatore  $\beta$  faze i one s dodacima stabilizatora  $\alpha$  faze. Kod  $\beta$  stabilizatora praktički se svi legirni elementi otapaju u  $\beta$  fazi pa je čvrstoća  $\alpha$  faze mala. Kod  $\alpha+\beta$  legura s aluminijem, aluminij se otapa u  $\alpha$  fazi i očvršćuje ovu fazu, dok se  $\beta$  stabilizatori koji pospješuju toplinsku obradu otapaju u  $\beta$  fazi. Na taj način povećava se čvrstoća obje faze pa se kod  $\alpha+\beta$  legura s aluminijem u principu postižu veće čvrstoće nego za legure bez aluminija. S porastom udjela  $\beta$  stabilizatora raste prokaljivost materijala, a pogoršava se zavarljivost. Gnječena TiAl6V4 legura često se toplinski obrađuje mekim žarenjem, te se tim postupkom postiže vlačna čvrstoća od približno 900 MPa, dobra otpornost na umor, osrednja lomna žilavost i umjerena brzina rasta napuklina. TiAl6V4 ELI legura, s niskim sadržajem kisika ( $\leq 0,13$  %), namijenjena je primjenama za lomno kritične elemente te u primjenama pri niskim temperaturama. Premda je kisik u ovoj leguri snažan očvršćujući element, on mora biti u niskim granicama da bi se zadržala visoka lomna žilavost. Sadržaj kisika također utječe i na temperaturu prekrystalizacije pa se kod komercijalne TiAl6V4 legure ova transformacija događa na temperaturama 1010-1020 °C, a kod ELI legure na temperaturama 960-980 °C.

## 2.3. Primjena titanovih legura

Titanove legure imaju široku primjenu u zrakoplovnoj, automobilskoj, biomedicinskoj, pomorskoj i kemijskoj industriji zbog svojstava kao što su visoki omjer otpornosti na naprezanje i gustoće, biokompatibilnost i otpornost na koroziju. U zrakoplovstvu su iznimno poželjne kao zamjena za čelik zbog svoje male gustoće, temperaturno su stabilne i pri niskim i pri visokim temperaturama, a uz to izrazito su otporne na koroziju i kompatibilne su sa kompozitima. U biomedicini, legure titana se koriste kao zamjena za tvrda tkiva. TiAl6V4 je najčešće korištena legura kao materijal za implantate, no zbog njezine toksičnosti i velike razlike između Youngovih modula elastičnosti kosti i legure njezina upotreba se smanjuje i koriste se legure sa nižim modulima elastičnosti sličnijim onima kostiju. Slika 2.3a. prikazuje avionske motore kompanije Rolls Royce, slika 2.3b. prikazuje umjetne kukove, dok slika 2.3c. prikazuje nastavke za umjetne zube, a svima im je zajedničko da su izrađeni od titanove legure TiAl6V4.



a)



b)



c)

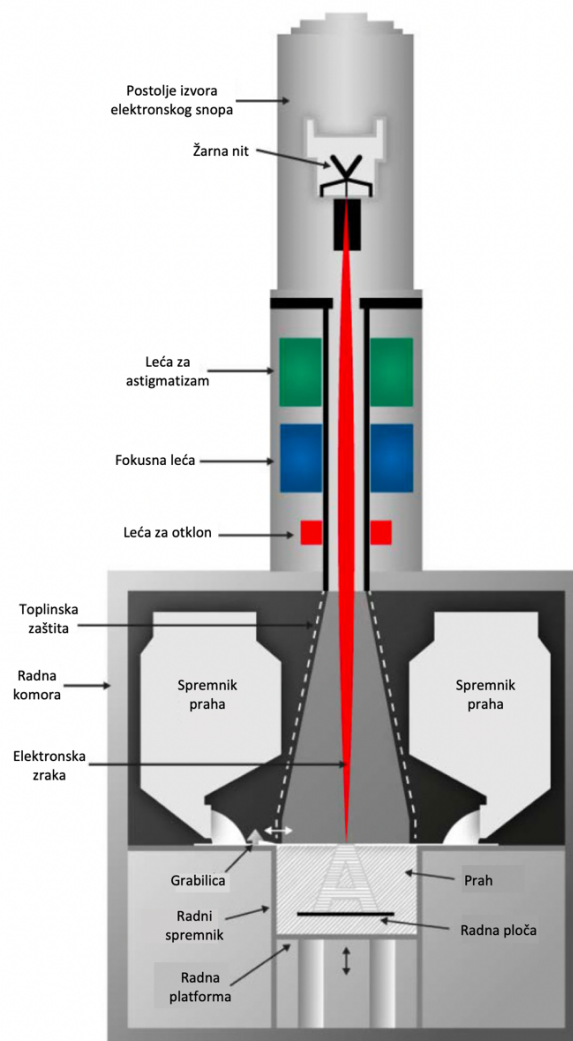
*Slika 2.3. Primjena titanovih legura: a) zrakoplovstvo [2] b) medicina [3] c) stomatologija [4]*

### 3. POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE TITANOVIIH LEGURA

Tehnologije aditivne proizvodnje prikladne su za proizvodnju pojedinačnih ili maloserijskih tehnički sofisticiranih proizvoda. Na temelju trodimenzionalnog virtualnog modela, proizvodnja se može napraviti u bilo koje vrijeme na bilo kojem mjestu, a što je prikladno jer proizvodnju možemo provoditi blizu mjesta uporabe. Ovom tehnologijom komponente se proizvode spajanjem u slojevima što omogućava dobivanje gotovih dijelova koji se ne bi mogli ostvariti konvencionalnim proizvodnim tehnologijama ili bi njihova proizvodnja bila izrazito skupa.

#### 3.1. Metoda taljenja metala elektronskim snopom

Slika 3.1. prikazuje uređaj za aditivnu proizvodnju metodom taljenja elektronskim snopom (engl. Electron beam melting, EBM). Glavni dijelovi uređaja su radna komora, postolje sa lećama koje emitira i usmjerava elektronski snop, radna platforma na kojoj se odvija proces izrade te spremnici praška s pripadajućim grabilicama.



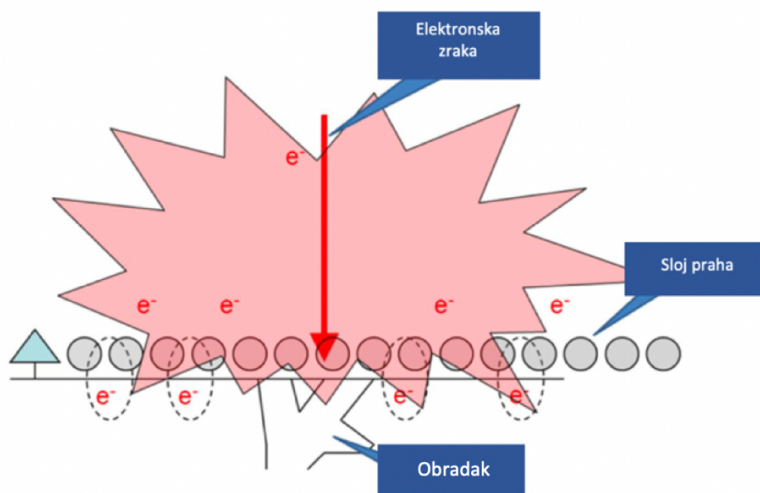
Slika 3.1. Uređaj za aditivnu proizvodnju metodom taljenja elektronskim snopom [5]

### 3.1.1. Odabir materijala

Odabir materijala za postupak taljenja elektronskim snopom je ograničen na električno vodljive materijale tj. metale. Metalni prašak se proizvodi različitim procesima, a neki od njih su atomizacija plinom, atomizacija indukcijskom plazmom, Armstrongovim procesom i hidrid-dehidridnim procesom. Koju god tehnologiju proizvodnje praška koristili bitno je zadovoljiti određene uvijete kao što su sferna morfologija čestica praška, visoka protočnost, prašak bez unutarnje poroznosti te proizvodnja zrnaca praška približno jednakih promjera i oblika s što manjim udjelom sitnih zrna [5]. Uz navedene zahtjeve prilikom odabira materijala potrebno je odrediti sigurnost rukovanja praškom kao i sigurnost tijekom korištenja u EBM sustavu. Važno je provesti ispitivanje minimalne energije zapaljenja kako bi se odredila lakoća zapaljenja oblaka praška prilikom elektrostatickog pražnjenja. Za EBM sustave preporuča se korištenje praška sa veličinom čestica u rasponu od 45 do 105  $\mu\text{m}$ , koje imaju minimalnu energiju zapaljenja veću od 0,5 J [5].

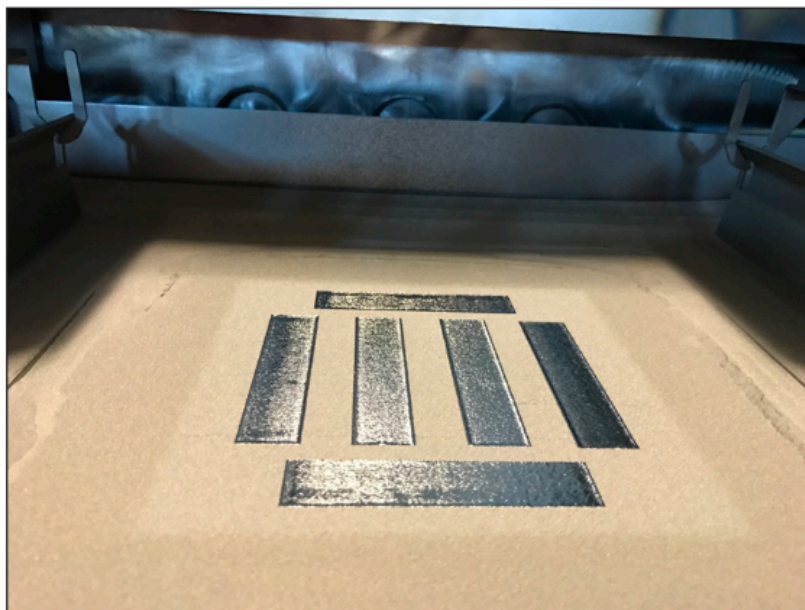
### 3.1.2. Parametri EBM postupka

Nakon odabira praška za EBM proces, sljedeći korak je testiranje ponašanja praška u sustavu i identificiranje skupa parametara koji se zatim mogu optimizirati na temelju primjene. Prvo se provodi test isparavanja metala u vakuumu u radnoj komori nad hladnim praškom. Kada gustoća raspodjele naboja prijeđe kritičnu granicu praška, čestice praška se počinju međusobno odbijati i dolazi do električnog pražnjenja, što rezultira eksplozijom praška unutar same komore (slika 3.2.) [5]. Važno je identificirati i održavati skupove parametara unutar područja kod kojega ne dolazi do isparavanja konstantnima kako bi proces izgradnje obratka tekao stabilno. U nestabilnim procesima taljenja prašak će isparavati i taložiti se ne kontrolirano po komori te izrada željene komponente neće biti moguća.



Slika 3.2. Eksplozija praška unutar radne komore [5]

Test isparavanja slijedi test sinteriranja u kojemu se ploča za građenje prethodno zagrije i drži na unaprijed definiranim temperaturama 30 minuta kako bi se utvrdilo je li prašak ispod građevne ploče polusinteriran. Prašak mora biti sinteriran kako bi ploči za građenje davao stabilnost tijekom nanošenja novoga sloja materijala te radi održavanja dobre toplinske vodljivosti. Ukoliko prašak nije polusinteriran, ispitivanje se provodi na višoj temperaturi. Test sinteriranja određuje vrijeme i energiju potrebnu za postizanje dobrih početnih uvjeta procesa. Nakon što su postavljeni ispravni početni uvjeti, sljedeći korak je određivanje parametara procesa izgradnje. U EBM sustavu, dva su glavna skupa parametara koji kontroliraju proces izrade, a odnose se na predgrijavanje i taljenje. Parametri predgrijavanja kontroliraju temperaturu procesa i stabiliziraju sloj praška prije početka procesa taljenja. Parametri taljenja kontroliraju taljenje i ponovno skrućivanje praška sloj po sloj kako bi se izradila željena komponenta. Ova početna procjena se obično provodi na jednostavnim geometrijama kao što su blokovi ili kocke bez udubina ili izbočina (slika 3.3.) te je modifikacija parametara vizualni proces, odnosno inženjer modificira parametre građenja na temelju kvalitete gornje površine koju nadgleda kroz prozor za promatranje izgrađene komponente. Čista, ravna i sjajna gornja površina komponente obično daje najbolje rezultate srašćivanja taljenjem.

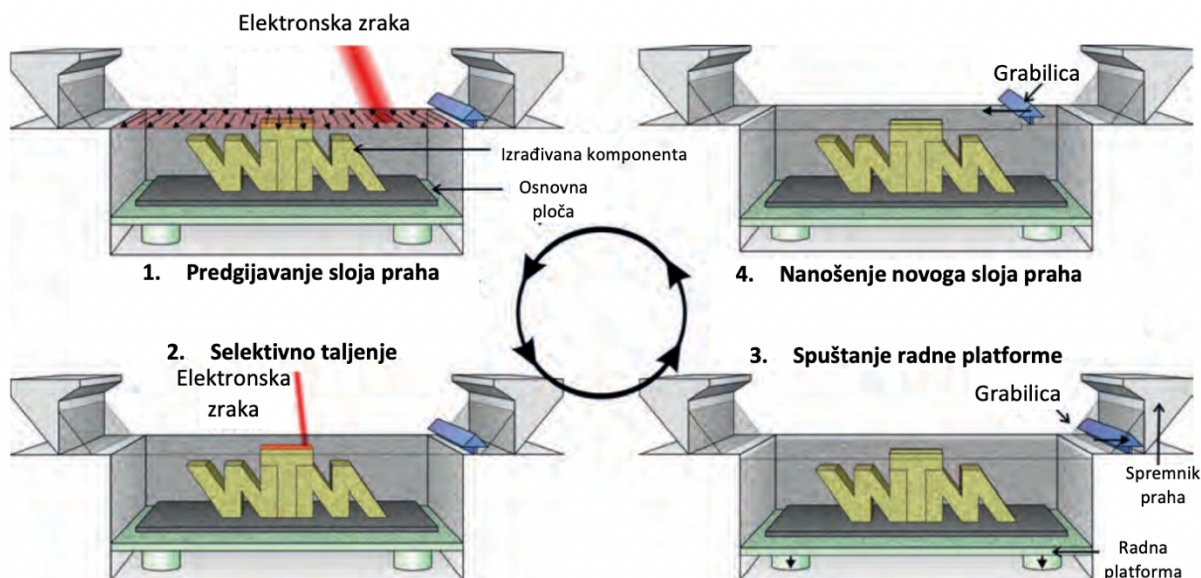


*Slika 3.3. Jednostavne komponente za optimiranje parametara taljenja [5]*

Treba napomenuti da zbog reakcija elektrona sa atmosferom, proizvodnja se odvija u vakuumskoj komori na tlaku oko mbar pomoću kontroliranog protoka helija.

### 3.1.3. Postupak izrade obratka EBM procesom

Nakon uspješno određenih parametara pomoću testa isparavanja i predgrijavanja praška slijedi drugi korak. Područja koja pripadaju geometriji komponente potpuno se rastaljuju fokusiranim snopom elektrona.



Slika 3.4. Proces izrade komponente EBM procesom [6]

Ovisno o geometriji, ovdje se koriste različite strategije obrade koje se mogu sastojati od kombinacije kontura i šrafura pri brzinama skeniranja od 4 do 10 m/s. Šrafura opisuje područje koje je potpuno rastaljeno u krivudavom obliku s određenim razmakom između linija, obično između 25  $\mu\text{m}$  i 150  $\mu\text{m}$  [7]. Konture izratka se mogu obraditi s više istovremeno djelujućih snopova elektrona koji omogućavaju da se do 100 položaja konture potpuno tali kvazi-simultano. U trećem koraku, nakon skrućivanja, procesna platforma se pomiče za jednu debljinu sloja prema dolje. Ovisno o veličini praška i rastaljenom materijalu, moguće je implementirati debljine slojeva između 50  $\mu\text{m}$  i 150  $\mu\text{m}$  [7]. U posljednjem koraku nanosi se novi sloj praška. U tu svrhu, grabilica se najprije pomiče preko praška ispred spremnika te na taj način dovoljna količina praška pada na drugu stranu grabilice. Kontinuiranim pomakom, grabilica nanosi novi sloj te se proces ciklički nastavlja, cjelokupni postupak izrade komponente EBM procesom prikazuje slika 3.4.

### 3.1.4. Prednosti i nedostaci EBM procesa

Jedna od glavnih prednosti aditivne proizvodnje je gotovo neograničena sloboda dizajna (slika 3.5.). Slobodu dizajna omogućava sam način postupka, budući da sloj praška ne služi samo kao

potpora gornjim slojevima, već im ujedno daje i visoku mehaničku stabilnost. Također, zbog niske sklonosti izobličavanju komponente kao rezultatom visoke temperature predgrijavanja, za EBM postupak gotovo da nisu potrebne potporne konstrukcije, a osim potpuno zatvorenih šupljina, postoje neograničene slobode u izradi vanjskog oblika predmeta. U tom pogledu, velika varijabilnost snopa elektrona dopušta istovremenu proizvodnju geometrije i strukture, a time i postavljanje određene kombinacije svojstava materijala. EBM postupak omogućuje proizvodnju staničnih struktura koje se ne bi mogle proizvesti konvencionalnim postupcima. Tako se danas u medicinskoj tehnologiji primjenjuju hibridne strukture koje se sastoje od čvrstih i poroznih područja, npr. kao implantati koji su prilagođeni pacijentu i mogu se isporučiti u točno prikladnom obliku unutar samo nekoliko dana na temelju snimka strukture kosti pacijenta. To povećava uspješnost liječenja i smanjuje operativni stres za pacijenta. Štoviše, meta materijale je lako proizvesti postupkom EBM. Ovi materijali dobivaju svoja svojstva iz svojih struktura. Na primjer, moguće je proizvesti materijale s negativnim Poissonovim omjerima ili čak materijale s akustičnim razmakom pojasa koji potpuno eliminiraju mehaničke oscilacije u određenom frekvencijskom rasponu [7]. EBM tehnologija pokazuje daljnje prednosti tijekom obrade visokotemperaturnih materijala kao što su legure na bazi nikla i titan aluminidi. Mogućnost skeniranja elektronskom zrakom preko sloja praha u defokusiranom načinu rada pri velikim brzinama otklona tijekom predgrijavanja omogućuje visok unos energije bez potpunog taljenja praška. Tako se cijeli sloj praška može stalno održavati na temperaturama iznad 1000°C tijekom faze izgradnje [7]. Ovom strategijom mogu se učinkovito smanjiti zaostala naprezanja, osobito u komponentama sa debljim stjenkama, a materijali visokih performansi kao što su titan-aluminij legure mogu se kvalitetnije obrađivati.



*Slika 3.5. Prototip izmjenjivača topline izrađenog od čistog bakra [7]*

Upotreba titan-aluminij legura za rotirajuće dijelove, npr. lopatica turbine ili kotača turbopunjača, posebno je atraktivna zbog njihove male gustoće te se trenutno za njihovu proizvodnju koristi isključivo centrifugalno lijevanje. Selektivno taljenje metalnog praška

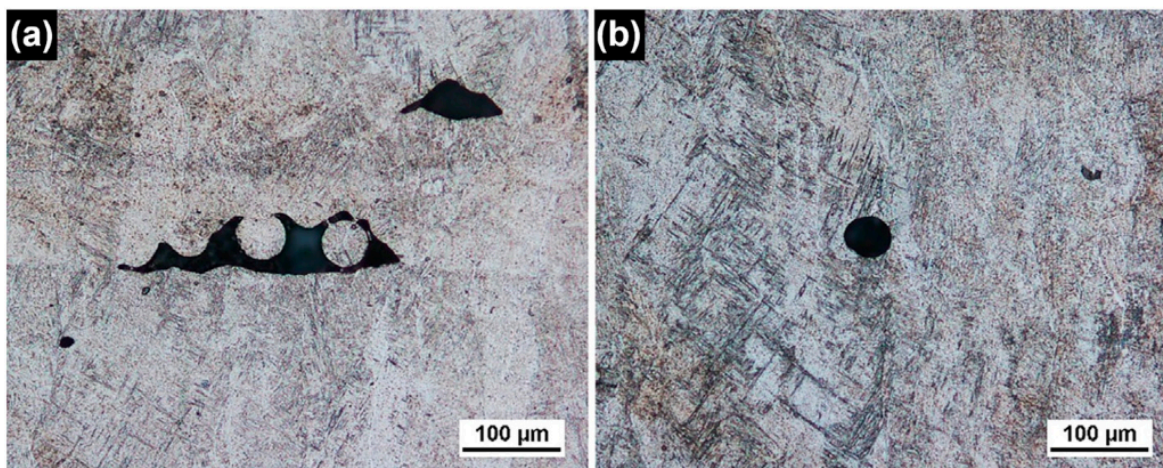


elektronskim snopom predstavlja alternativu s raznim prednostima. EBM proces se provodi u vakuumu, rezultat tomu je da ne dolazi do kontaminacije taljenog materijala unatoč visokom afinitetu titan-aluminij legura prema reakcijama s drugim elementima. Štoviše, mogu se izbjeći bilo kakve reakcije titan-aluminija s materijalom podloge, a time i sve moguće promjene svojstava jer se u EBM uređaj postavlja prah bez ikakvih alata. Brzo skrućivanje dovodi do iznimno finih mikro struktura i homogene raspodjele legirnih elemenata. U slučaju taljenja elektronskim snopom udjeli potpornih struktura su mali u usporedbi s udjelima priljevaka u postupku centrifugalnog lijevanja.

Što se tiče nedostataka, svi procesi aditivne proizvodnje imaju određena ograničenja. Ograničenja dolaze u obliku prisutnosti velike hrapavosti površina, visokog afiniteta prema kisiku, visokih vlačnih zaostalih naprezanja te moguće visoke poroznosti. Navedena ograničenja smanjuju mehanička svojstva komponenti, a u nastavku su opisani defekti nastali tijekom aditivne proizvodnje TiAl6V4 dijelova.

#### 3.1.4.1. Poroznost

Aditivnom proizvodnjom teorijski se može proizvesti potpuno gusta struktura, ali neoptimalni parametri taloženja rezultirat će poroznošću. Kontrolirane porozne strukture koriste se za prilagođavanje mehaničkih svojstava. Međutim, nekontrolirane pore u aditivno proizvedenoj leguri TiAl6V4 će pogoršati svojstva materijala. Oblik i orijentacija pora snažno utječu na makroskopsku duktilnost. Mehanička ispitivanja i analiza mikro strukture otkrili su da će pore vjerojatno postati mjesta nukleacije mikro pukotina. Nekontrolirana poroznost je zapravo vrlo česta u aditivno proizvedenim dijelovima. U proizvodima proizvedenim aditivnim metodama prevladavaju dvije vrste pora: plinske pore i pore s nedostatkom srašćivanja materijala [8]. Plinske pore obično imaju sferni ili eliptični oblik s promjerom od od 1 do 100  $\mu\text{m}$  i nasumično su raspoređene u materijalu kako prikazuje slika 3.6b. Okrugli oblik ovih pora ukazuje na to da su nastale zbog zarobljavanja plina te da plin zarobljen u otopljenom bazenu nije na vrijeme pobjegao i stoga je zaglavio u skrtnutom zrnu [9-11]. Zbog toga su gusti metalni prahovi poželjniji od prahova spužvastog tipa kao sirovina u procesima aditivne proizvodnje jer šuplja struktura u spužvastim prahovima lako stvara plinske pore [12,13]. Obično će usporavanje brzine skeniranja i povećanje snage snopa donekle ublažiti stvaranje plinskih pora, ali ih je teško potpuno eliminirati [11,14].



*Slika 3.6. Vrste pora komponenti proizvedenih EBM procesom [9]: a) pore s nedostatkom srašćivanja materijala  
b) plinske pore*

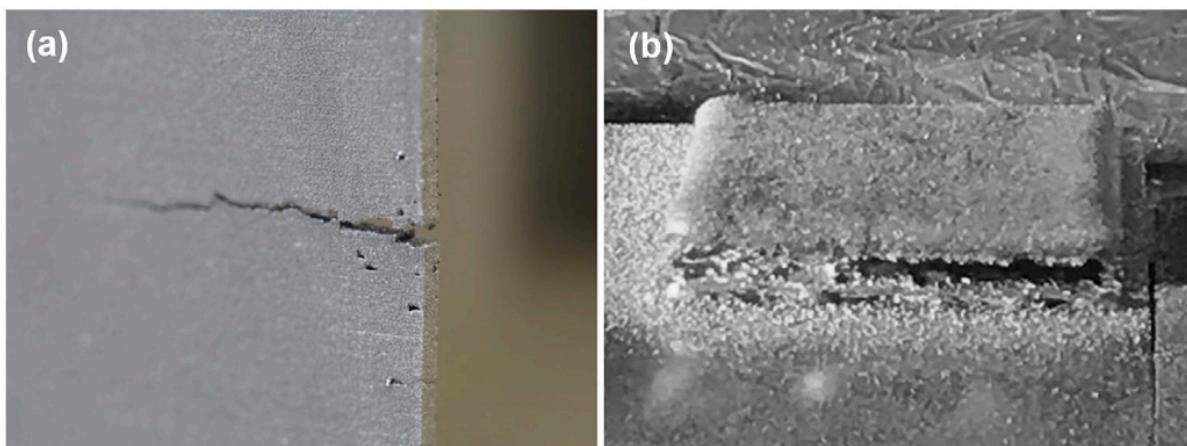
Za razliku od plinskih pora, pore s nedostatkom srašćivanja materijala obično su veće i imaju oblik nepravilnog klina ili trake s oštrim vrhovima na dva kraja kako prikazuje slika 3.6a. Ove pore su općenito raspoređene na graničnoj zoni dvaju susjednih slojeva, ostavljajući tanke ravne pukotine na sučelju. Kao što je opisano u literaturi [15-18], pore koje se ne spajaju uglavnom nastaju zbog odstupanja od optimalnih uvjeta taljenja, kao što je nedovoljna energija lasera koji pokušava rastaliti preveliku količinu praška, što rezultira neadekvatno taljenje i slabu vezu između slojeva. Kratka os pora bez spoja obično je poravnata u smjeru izgradnje. Kada su izloženi opterećenju, osobito jednoosnom vlačnom opterećenju paralelnom smjeru građenja, oštri vrhovi ovih pora skloni su koncentriranim lokalnim naprezanjima što dovodi do prijevremenog loma [16,19]. U usporedbi s plinskim porama, pore s nedostatkom srašćivanja materijala štetnije utječu na performanse proizvoda proizvedenih aditivnim metodama, ali se smatra da se mogu izbjeći. Učinkovit način smanjenja pora zbog nedostatka srašćivanja materijala je povećanje gustoće ulazne energije.

#### *3.1.4.2. Povećana hrapavost površine*

Različite brzine skeniranja, veličine praha i visine slojeva odgovorne su za različite hrapavosti površina. Međutim, treba napomenuti da optimizacija parametara taloženja može samo u ograničenoj mjeri ublažiti problem hrapavosti površine. Najučinkovitija metoda za smanjenje hrapavosti površine je poliranje površine. Polirani primjerci pokazuju veće naprezanje do loma nego tek izrađeni primjerci. To je rezultat mehaničkog uklanjanja kritičnih nedostataka na površini koji induciraju koncentraciju naprezanja i djeluju kao pokretači pukotina [17]. U stvarnim primjenama, gotovo svi aditivno proizvedeni dijelovi zahtijevat će neku vrstu naknadne obrade kako bi se površina obradila do tražene hrapavosti.

### 3.1.4.3. Zaostala naprezanja

Metode aditivne proizvodnje, posebno one temeljene na srašćivanju materijala laserskim snopom, sklone su značajnoj količini induciranih zaostalih naprezanja, zbog svojih velikih temperaturnih gradijenata (reda veličine  $\sim 5 \times 10^4$  K/cm u aditivnoj proizvodnji TiAl6V4). Zaostala naprezanja će se povećati s povećanjem broja slojeva, a vršna vrijednost uvijek se javlja na ili blizu slobodne površine završno nanesenog sloja. Mercelis i Kruth [20] su tvrdili da se profil zaostalog naprezanja sastoji od velike količine vlačnih naprezanja u gornjem dijelu izratka. Uz dodavanje novih slojeva na prethodno izgrađene slojeve, vlačna naprezanja se pretvaraju u tlačna naprezanja. Istraživači su primijetili da su zaostala naprezanja veća duž smjera skeniranja od okomitog smjera zbog većeg toplinskog gradijenta duž smjera skeniranja [21], stvarajući anizotropnu raspodjelu naprezanja u završnom dijelu [21,22]. Poznato je da zaostala naprezanja doprinose nastanku pukotina i savijanju u dijelu, što dovodi do odvajanja konstrukcija od podloge i pukotina u gotovim dijelovima [20,22]. Slika 3.7. prikazuje tipične lomove uzrokovane koncentriranim vlačnim zaostalim napreznjima.



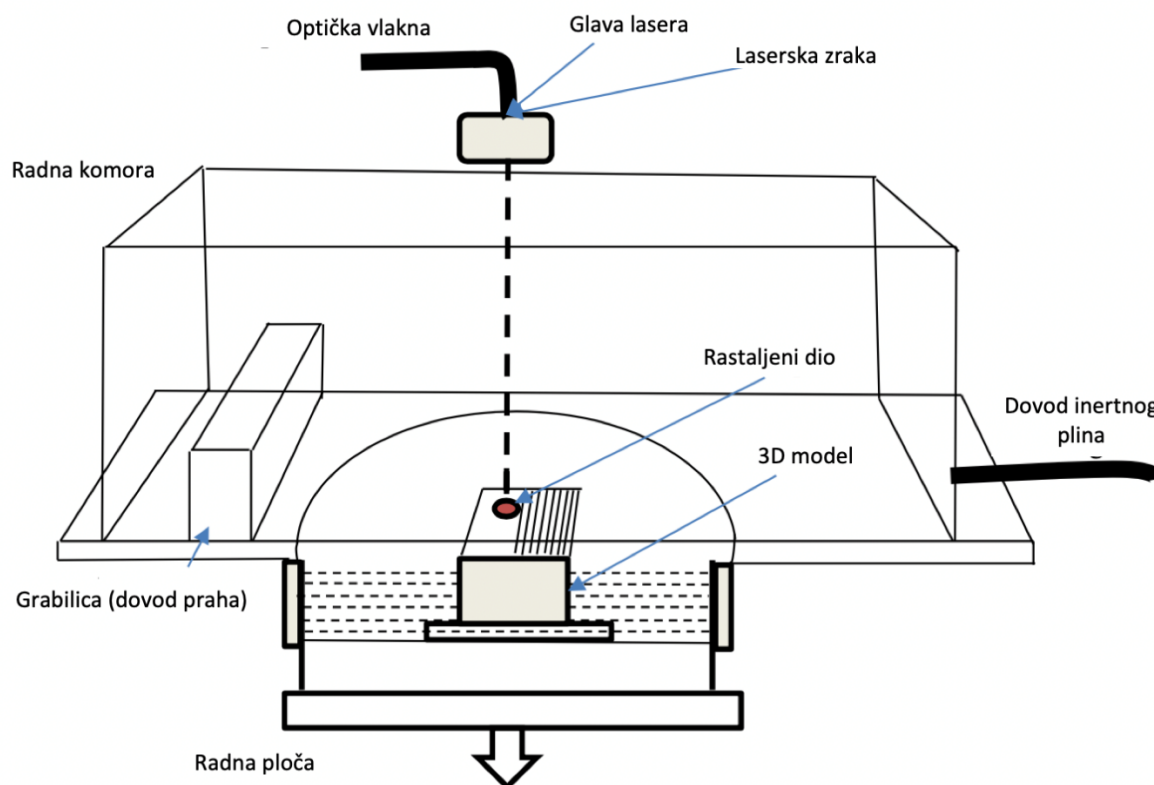
*Slika 3.7. Pukotine nastale nakupljanjem zaostalih naprezanja tijekom proizvodnje [21]*

Lomovi uzrokuju narušavanje geometrijske točnosti i smanjenje izdržljivosti, stoga dijelovi izrađeni EBM postupkom mogu zahtijevati potporne strukture kako bi se ograničilo savijanje ili izobličenje tijekom proizvodnje [23,24]. Budući da zaostala naprezanja potječu od toplinskih gradijenta, način za njihovo ublažavanje je smanjenje toplinskog gradijenta korištenjem toplinske obrade za ublažavanje naprezanja na visokim temperaturama. Vastola i suradnici [25] sustavno su izračunali zaostala naprezanja nastala EBM postupkom u TiAl6V4 leguri variranjem temperature predgrijavanja srašćenog sloja i otkrili da temperatura predgrijavanja sloja ima najznačajniji utjecaj na zaostala naprezanja. Kvantitativno, svaki porast temperature predgrijavanja za 50 °C pokazuje smanjenje naprezanja oko 20%. Kao što je predstavljeno ranije, EBM proces održava temperaturu izgradnje sloja od 600 °C do 750 °C tijekom taloženja

[26–28]. Općenito, potrebno je oko 5 h za postizanje potpunog rasterećenja na ovoj temperaturi, dok ciklusi taloženja EBM-a uglavnom traju dulje od 5 h. Stoga u EBM postupku zaostala naprezanja mogu biti zanemarena.

### 3.2. Postupak selektivnog taljenja laserskim snopom

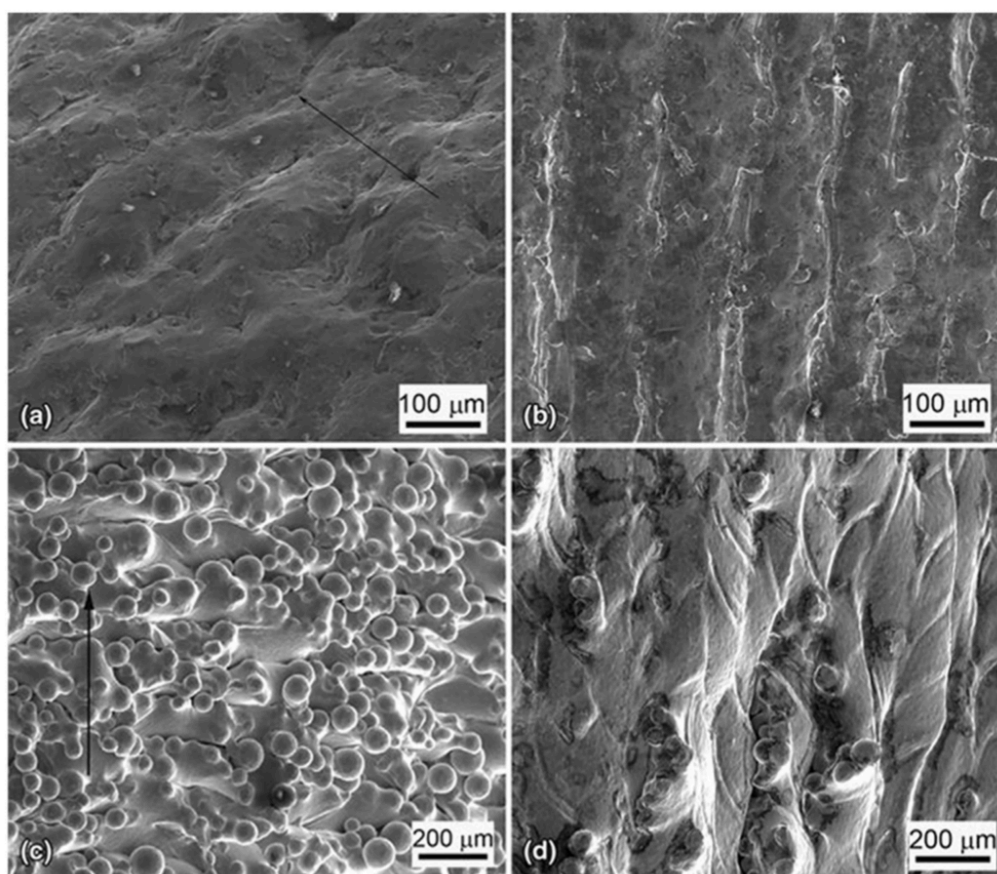
Postupak selektivnog taljenja laserskim snopom (engl. Selective laser melting, SLM) za razliku od EBM postupka koristi energiju laserske zrake. Obično je to laser s iterbijevim vlaknima koji postiže snage do 1 kW za stvaranje 3D metalnih dijelova sraščivanjem finog metalnog praška [29]. Sloj finog metalnog praška nanosi se na radnu platformu pomoću grabilica ili valjaka, a laserska zraka tali prašak prema 2D presjeku u kontroliranom inertnom okruženju. Platforma, na kojoj se izrađuje komponenta, se zatim spušta i nanosi se novi sloj. Postupak selektivnog taljenja laserskim snopom prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8. Uređaj za aditivnu proizvodnju postupkom selektivnog taljenja laserskim snopom [30]

Debljina sloja može varirati od 15  $\mu\text{m}$  do 150  $\mu\text{m}$ . Fokus snopa kontrolira galvanometar, a kretanje snopa kontrolira F-theta leća. U usporedbi s lijevanim i kovanim komponentama, dio proizveden SLM postupkom imati će izvrsna mehanička svojstva zahvaljujući sposobnostima pročišćavanja zrna, kemijskoj homogenosti i smanjenju količine i veličine segregacije faza. Međutim, zbog konvekcije izazvane visokim toplinskim kapilarnim silama, kapljica taline može biti nestabilna uzrokujući nehomogenu mikrostrukturu [29].

Parametri procesa su snaga laserskog snopa, brzina skeniranja i razmak između linija skeniranja te oni izravno utječu na ponašanje taljenja metalnog praška. Zbog toga se parametri procesa moraju pažljivo kontrolirati kako bi se uspješno proizvele visokokvalitetne komponente. Kao što možemo vidjeti, SLM i EBM procesi su vrlo slični, no u čemu se donekle razlikuju su hrapavost površine nakon postupka gradnje i zaostala naprezanja. Površina izgrađena EBM postupkom ima više prilijepljenog djelomično otopljenog praška, dok je površina izgrađena SLM postupkom mnogo glatkija. To treba pripisati većem toplinskom zračenju induciranom visokoenergetskim snopom elektrona kod EBM postupka [31]. Na donjoj slici 3.9. prikazane su površine aditivno proizvedenih uzoraka SLM i EBM metodama s naznačenim smjerovima izgradnje.

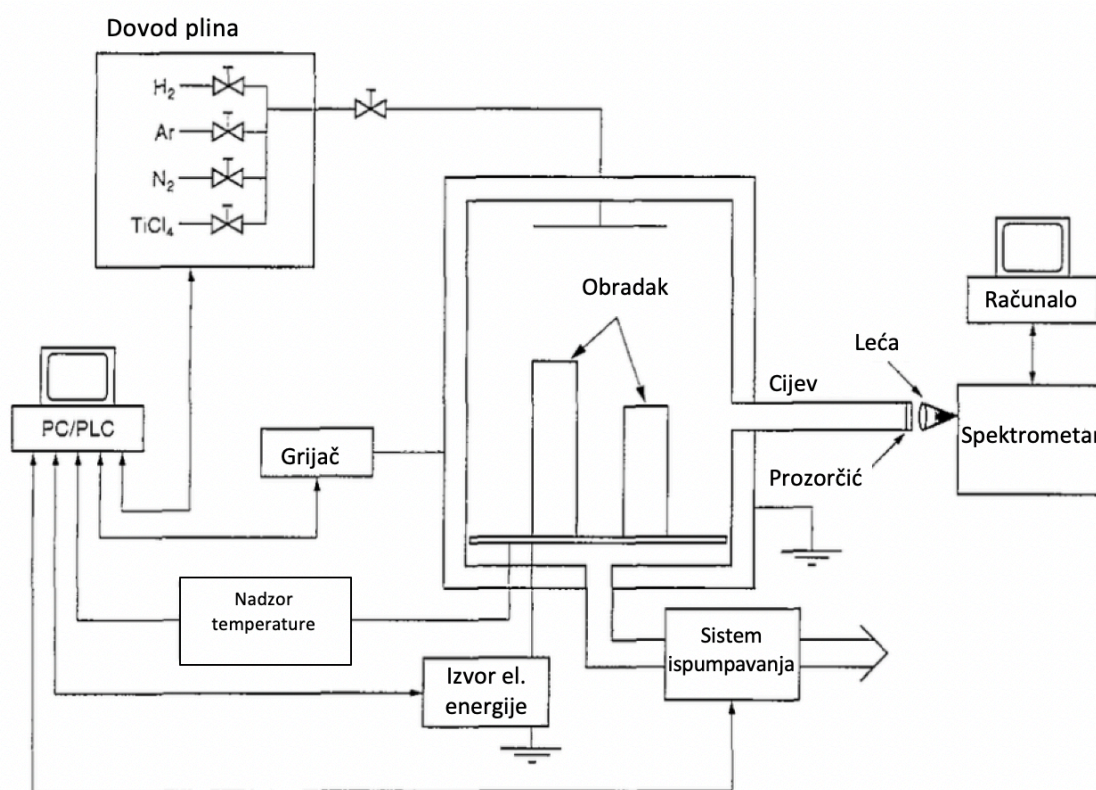


*Slika 3.9. Morfologija vanjske površine uzoraka [31]: a) uzorak vertikalno građen SLM metodom b) uzorak horizontalno građen SLM metodom c) uzorak vertikalno građen EBM metodom d) uzorak horizontalno građen EBM metodom*

## 4. PREVLAČENJE POVRŠINE PACVD POSTUPKOM

### 4.1. Uređaj za PACVD postupak

Postupak plazmom potpomognutog kemijskog taloženja iz parne faze (eng. Plasma assisted chemical vapour deposition, PACVD), koristi plazmu ioniziranog plina i isparenog prekursora kao izvor materijala prevlake. Plazma se sastoji od slobodno pokretnih, negativno i pozitivno nabijenih čestica (elektrona, iona itd.), kao i električno neutralnih atoma i molekula. Plazma obavlja izratke koji se obrađuju, a koji su postavljeni na katodu u vakuumskoj komori, dok je zid komore anoda. Na donjoj slici prikazan je uređaj za prevlačenje komponenti PACVD postupkom sa popratnim dijelovima (spremnici plina i prekursora, računala, spektrometar itd.).



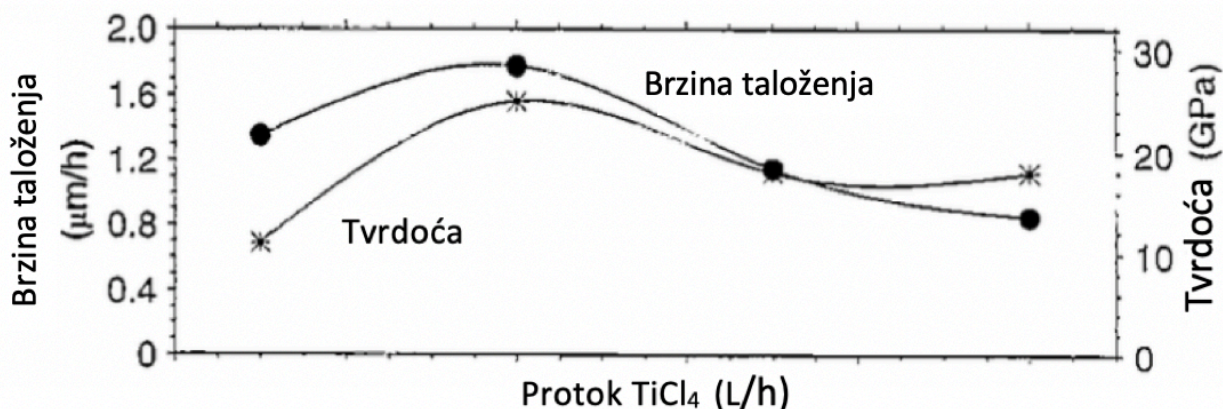
Slika 4.1. Postrojenje za prevlačenje komponenti PACVD postupkom [32]

Na vakuumsku komoru PACVD uređaja su povezani spremnici plinova i prekursora, koji se tijekom postupka kontrolirano ispuštaju i kemijskim reakcijama stvaraju sloj prevlake i nusprodukte reakcija. Protok plinova i prekursora je konstantan, odnosno vakuumaska komora se kontinuirano opskrbljuje novim plinovima i iz nje se odvede istrošeni plinovi i nusprodukti. Postupak taloženja moguće je podijeliti u četiri faze. U prvoj fazi dolazi do disocijacije prekursora i ioniziranja plinova vodika, argona i dušika. Također, u ovoj fazi dolazi do kemijske razgradnje titanovog-IV-klorida na titan i klor. U drugoj fazi dolazi do sudaranja iona plinova i

metala prekursora sa površinom obrađivanog predmeta. U trećoj fazi dolazi do stvaranja kapljica titan-nitridne prevlake na površini predmeta, te se postupak završava sa otprašivanjem, odnosno uklanjanjem ne izreagiranih atoma plinova i metala sa površine predmeta.

#### 4.2. Parametri PACVD postupka

Parametri taloženja (temperatura podloge, karakteristike plazme) zajedno sa karakteristikama podloge (npr. sastav, mikrostruktura, topografija) određuju karakteristike prevlake (debljina, kemijski sastav, mikrostruktura). Parametri PACVD procesa koje je potrebno regulirati jesu napon, temperatura, ukupni tlak te protok plinova vodika, dušika, argona i titanovog-IV-klorida. Tijekom postupka odvija se niz elektrokemijskih procesa te još nije u potpunosti istražena ovisnosti mikrostrukture o parametrima PACVD procesa. Ipak, na temelju provedenih istraživanja [33] možemo dobiti određene zaključke. Brzina taloženja prevlake ovisi o protoku titanovog-IV-klorida s jasno izraženim maksimumom brzine za određenu vrijednost protoka kako prikazuje slika 4.2. Ovaj maksimum najvjerojatnije nastaje kao natjecanje između dovoljne opskrbe titana i stvaranja negativnih iona (iz titanovog-IV-klorida) koji potiskuju aktivnost plazme.



Slika 4.2. Ovisnost brzine taloženja i tvrdoće prevlake o protoku titanovog-IV-klorida [32]

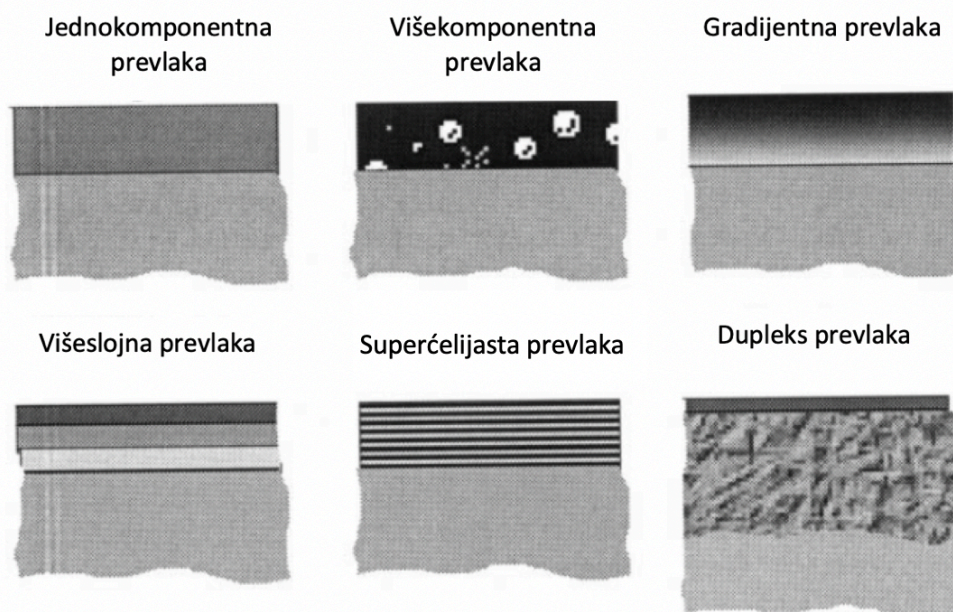
Iz prikazanog dijagrama na gornjoj slici se također može vidjeti da su brzina taloženja i tvrdoća linearno povezani.

#### 4.3. Prednosti i nedostaci PACVD postupka

Posebnosti PACVD procesa su njegova visokoučinkovita upotreba energije i plina, kao i izostavljanje kemijskih kupki, tvari i otpadnih proizvoda što ga čini ekološki povoljnim. Dodatne prednosti ovoga procesa su i niska radna temperatura, dobra pokrivenost radnoga komada te zbog same izvedbe postupka, smanjena je šansa za lomljenje nanesenog sloja i osigurana su dobra dielektrična svojstva.



Na slici 4.3. prikazane su neke vrste prevlaka koje je moguće izraditi PACVD postupkom. Od dolje navedenih izuzetno je zanimljiva dupleks prevlaka koja se sastoji od debljeg potpornog sloja i tanke i tvrde prevlake. Potporni sloj se još naziva difuzna zona, te je *dva* do *tri* puta deblji od sloja prevlake kojoj osigurava stabilnost i potporu. U suprotnom, ukoliko bi se prevlaka nalazila direktno u kontaktu sa mekanom površinom predmeta, bila bi joj narušena mehanička svojstva.



*Slika 4.3. Neke od vrsti prevlaka koje je moguće napraviti PACVD postupkom [34]*

Nedostatci ove tehnologije su jednim dijelom logističke i financijske prirode. Postrojenje za PACVD postupak je skupo i komplicirano za montažu. Uz to, za različite vrste geometrija predmeta potrebno je modificirati parametre procesa. Često se dobra otpornost na trošenje u jednoj situaciji ne može pokazati u drugoj - smjernica mora biti "prikladnost za svrhu". Dobro poznavanje pojedinosti progresivnog trošenja određenog alata u danoj proizvodnoj operaciji mora biti dostupno kako bi se dizajnirale potrebne značajke u prevlaci alata, značajke koje se mogu razlikovati na različitim dijelovima radnih površina što je vrlo važno za složene geometrije alata.

## 5. ZAVRŠNE OBRADJE ADITIVNO PROIZVEDENIH POVRŠINA

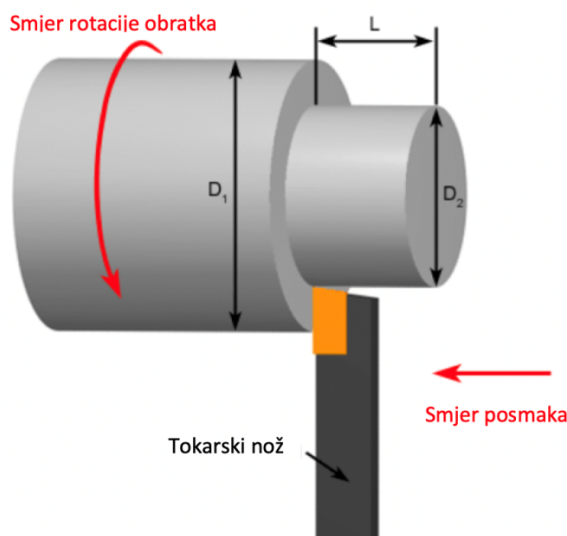
Strojna obrada je neophodna kod komponenti proizvedenih aditivnim postupcima te ona služi za poboljšanje funkcionalnosti i kvalitete proizvoda. Strojna obrada se može definirati kao proces uklanjanja materijala koji se koristi za proizvodnju korisnih komponenti i uključuje korištenje alatnih strojeva na električni pogon, s oštrim alatom za rezanje materijala, kako bi se postigla željena geometrija. Proces obrade se tada može smatrati sustavom koji se sastoji od obratka, alata i stroja. Za uklanjanje materijala koristi se nekoliko operacija strojne obrade. Tokarenje, bušenje i glodanje neke su od glavnih operacija strojne obrade u rezanju metala. Nakon osnovnih postupaka za odstranjivanje čestica, provode se postupci brušenja i poliranja čiji je rezultat izrazito glatka površina koja je spremna za prevlačenje.

### 5.1. Fino tokarenje

Tokarenje je jedna od osnovnih operacija rezanja metala. U ovoj operaciji obrade radni materijal se učvršćuje u steznu glavu tokarilice i rotira odgovarajućom brzinom. Radni materijal se reže pomoću krutog, fiksiranog alata za rezanje u stupu stroja, koji se kreće konstantnom brzinom duž osi šipke kako bi se formirala tražena geometrija. Postupak tokarenja prikazan je na slici 5.1.

Parametri procesa uključeni u ovu operaciju obrade jesu:

- Brzina rezanja ( $V_c$ ) - brzina kojom se rezana površina radnoga komada prolazi rezni rub alata,
- Posmak alata ( $f$ ) – udaljenost za koju se alat pomakne u aksijalnom smjeru pri svakom okretaju obrađivanog komada,
- Dubina rezanja ( $d$ ) – debljina materijala uklonjenog sa šipke u radijalnom smjeru.

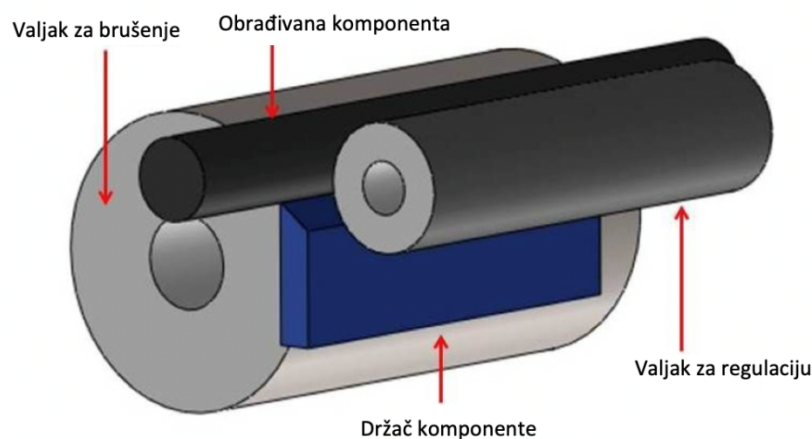


Slika 5.1. Shematski prikaz postupka tokarenja [35]

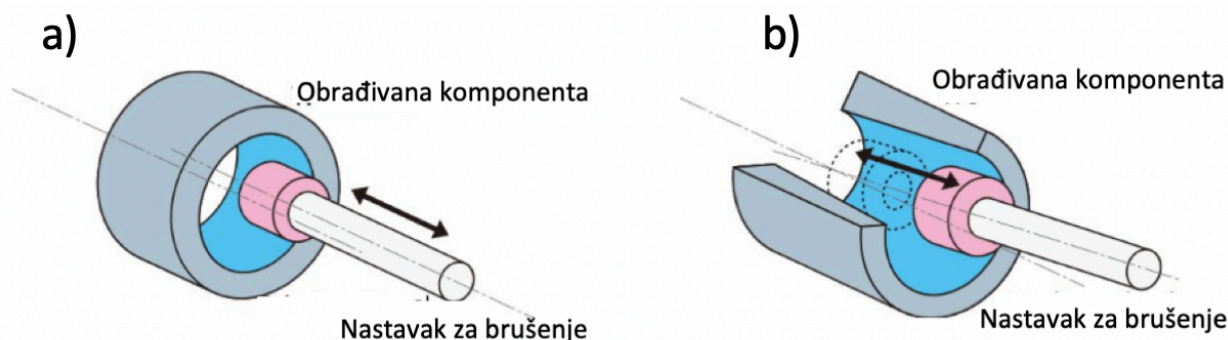
## 5.2. Brušenje i poliranje

Brušenje je proces uklanjanja metala primjenom abrazivnih čestica koja se spajaju u rotirajući kotač. Kada pokretne abrazivne čestice dođu u kontakt s obratkom, djeluju kao sićušni alati za rezanje, pri čemu svaka čestica izrezuje sićušni komadić s obratka. Uobičajena je pogreška vjerovati da brusni abrazivni kotači uklanjaju materijal trljanjem; zapravo, proces je isto toliko radnja rezanja kao i bušenje, glodanje i tokarenje. Cilindrično brušenje (također se naziva brušenje središnjeg tipa) koristi se za brušenje cilindričnih površina. Radni komad se montira na središta i rotira na brusilici, odnosno središnjem pogonu. Abrazivni kotač i izradak se okreću odvojenim motorima i različitim brzinama te se stol može podesiti za proizvodnju konusa.

Postoji više vrsta cilindričnog brušenja, a neke od njih su: brušenje vanjskog promjera (OD), brušenje unutarnjeg promjera (ID) (slika 5.3a.), brušenje uranjanjem i brušenje bez centra (slika 5.2.).



Slika 5.2. Shema postupka brušenja bez centra [36]

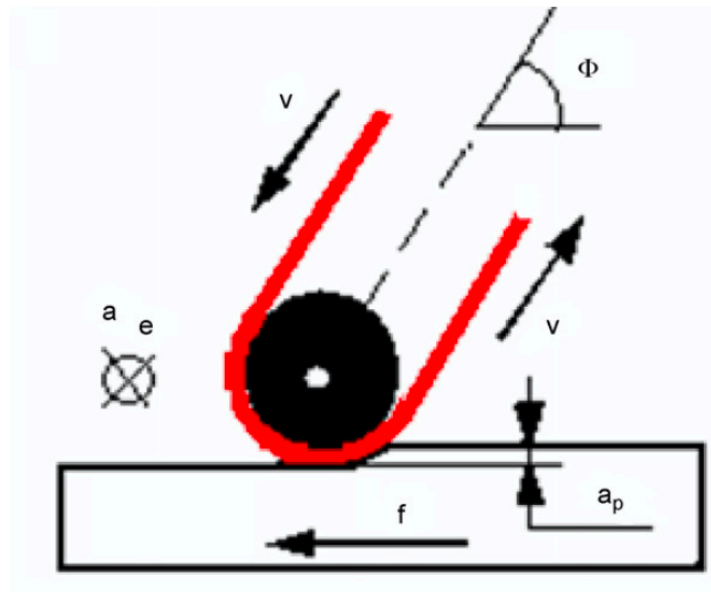


Slika 5.3. Sheme postupaka brušenja [37]: a) unutrašnje brušenje b) sužavanje

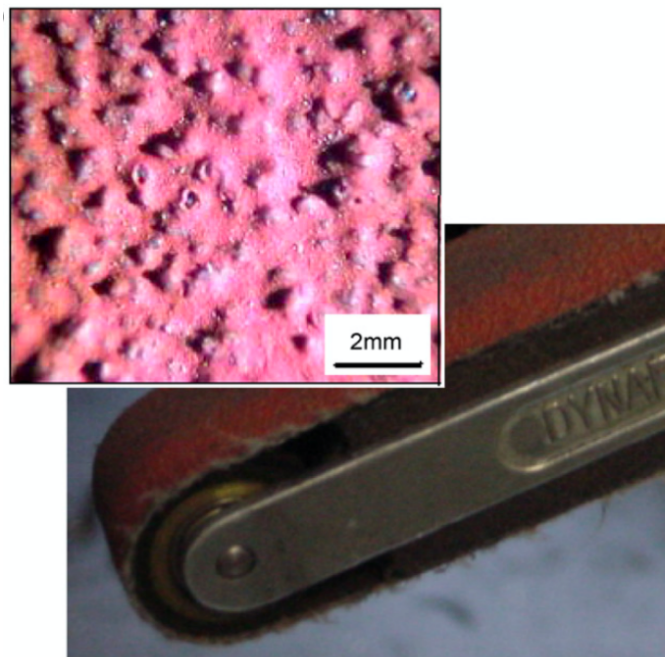
Nakon postupka brušenja dolazi postupak finalne obrade, odnosno poliranje. Kada se teško obradivi materijali, poput onih koji se uglavnom koriste za proizvodnju komponenti

zrakoplovnih motora (legure na bazi titana i nikla) oblikuju u komponente složene geometrije i niske krutosti, čak ni završno glodanje ili brušenje možda neće moći generirati komponente prema potrebnim standardima kvalitete površina: niska površinska hrapavost ( $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ ) i visok integritet površine obratka. Stoga je uobičajena praksa da neke sigurnosno kritične komponente zrakoplovnih motora koriste automatizirane procese poliranja kako bi se postigli strogi industrijski zahtjevi za kvalitetu površine obratka.

Metode završne obrade korištenjem obloženih abrazivnih elemenata u obliku remenja (slika 5.4.) i brusnih valjaka (slika 5.5.) ili ploča primjenjuju se u metaloprerađivačkoj industriji. Koju metodu poliranja odabrati ovisi o nekoliko stvari. Poliranje remenom omogućava obradu znatno većih površina nego obrada brusnim valjcima ili pločama, no to ne predstavlja prepreku njihovoj istovremenoj implementaciji. Naime, poliranje remenom je poželjno zbog svojih visokih stopa uklanjanja materijala, dok poliranje brusnim valjcima ili pločama može predstavljati jedino inženjersko rješenje koje omogućuje geometrijski pristup malim radijusima. Iako izvedivo, nije poželjno mijenjati abrazivni alat tijekom završne obrade jedne komponente kako bi se spriječile korekcije alata koje dovode do neusklađenosti površine. Također valja uzeti u obzir i hrapavost dobivene površine, sve metode poliranja mogu generirati glatkiju hrapavost površine od granične vrijednosti  $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ , ali poliranje brusnim valjcima ili pločama nije dovoljno za potpuno uklanjanje tragova glodanja. Uz sve navedeno, u obzir treba uzeti i površinski integritet dobivene površine. Metalurška analiza je pokazala da poliranje remenom u suhim uvjetima može dovesti do pojave nepoželjnih termički zahvaćenih (preoblikovanih) slojeva koji se mogu ukloniti u narednim fazama završne obrade. Time zaključno, prilikom poliranja valja upotrebljavati odgovarajući rashladni medij kako bi ograničili toplinski utjecaj i osigurali željenu teksturu površine. Osim strojnog poliranja, moguće je i ručno poliranje. Ručno poliranje je dugotrajno i fizički zamorno te se ne koristi u velikoserijskoj proizvodnji i proizvodnji velikih komponenti. Voodotporni brusni papir (slika 5.6.) za ručno poliranje dolazi u više različitih razreda koji se međusobno razlikuju po količini čestica na površini papira, odnosno po njihovoj gustoći.

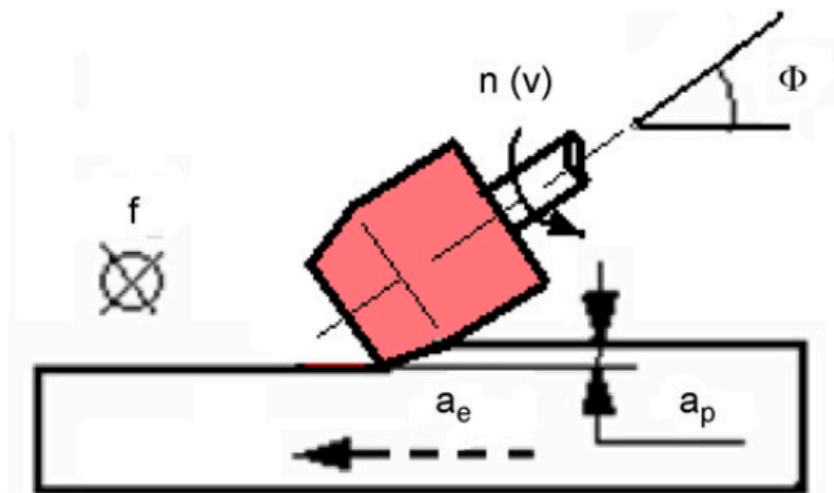


a)

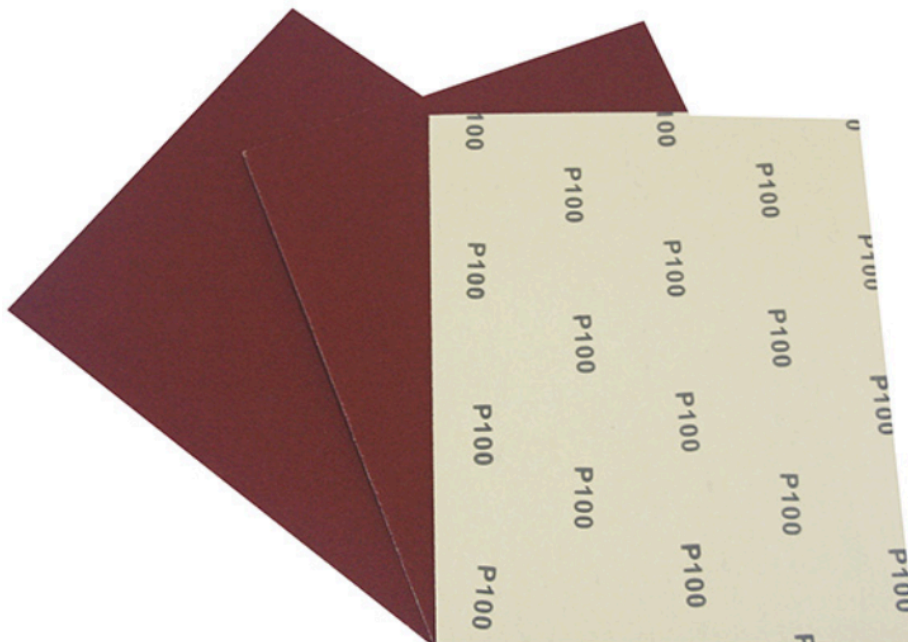


b)

*Slika 5.4. Postupak poliranja remenom [38]: a) shema postupka b) prikaz alata i texture remena*



Slika 5.5. Shema postopka poliranja brusnim valjcima [38]



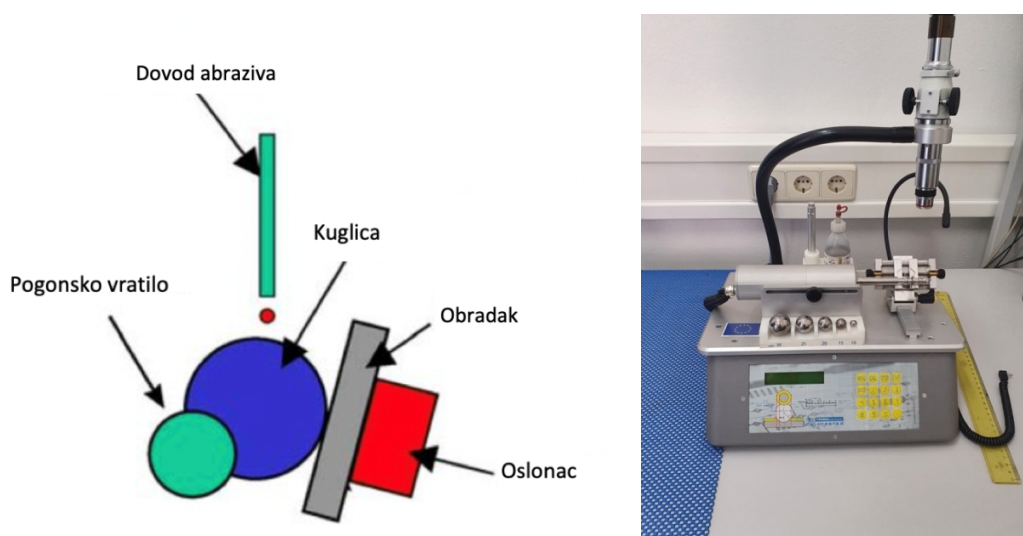
Slika 5.6. Vodootporni brusni papir [39]

## 6. ISPITIVANJE SVOJSTAVA PREVLAKA

Prevlaci nakon procesa prevlačenja valja odrediti značajke u vidu: hrapavosti, tvrdoće, otpornosti na trošenje i adhezivnosti. U daljnjem tekstu su dane neke od metoda kojima se navedene značajke određuju.

### 6.1. Određivanje debljine prevlake

Metoda kalotest je prikladna za ispitivanje otpornosti tankih, tvrdih premaza na trošenje finim abrazivima. Prednosti testa jesu: brzina, praktičnost, mogućnost izvedbe na malim uzorcima te korištenje relativno jeftine opreme. Oprema za kalotest se sastoji od električki pogonjenog vratila, postolja za namještanje pozicije i kuta ispitnog uzorka te kuglice napravljene od tvrdoga metala. U ovom se ispitivanju kuglica rotira pritisnuta na prevučeni ispitni uzorak. Između kuglice i ispitnog uzorka unosi se abrazivna smjesa, a nakon fiksnog broja okretaja veličina kratera koji se formira može se koristiti za izračunavanje trošenja do kojeg dolazi te ujedno i debljine nanesenog sloja. Na slici 6.1a. prikazan je shematski prikaz metode, dok je na slici 6.1b. prikazan sam uređaj.



Slika 6.1. Metoda kalotest: a) shematski prikaz postupka [40] b) uređaj za metodu kalotest

### 6.2. Određivanje tvrdoće prema Vickersu (HV 0,01)

Vickersov test tvrdoće koristi dijamentnu kvadratnu piramidu s vršnim kutom od  $136^\circ$ , koja se utiskuje u površinu uzorka zadanom silom,  $F$ . Vrijeme za početnu primjenu sile je dvije do osam sekundi, a ispitna sila se održava deset do petnaest sekundi. Nakon što je sila uklonjena, mjere se dijagonalne duljine udubljenja i izračunava se aritmetička sredina dijagonale otiska  $d$ . Tablica 6.1. prikazuje skalu standardnih mikrotvrdoća prema metodi Vickers s odgovarajućim silama utiskivanja indentora.

**Tablica 6.1.** Skala standardnih mikrotvrdoća prema metodi Vickers s odgovarajućim silama utiskivanja indentora

Skala mikrotvrdoće	Korištena sila
HV 0,01	0,09807
HV 0,015	0,1471
HV 0,02	0,1961
HV 0,025	0,2452
HV 0,05	0,4903
HV 0,1	0,9807

Ispod, na slici 6.2., prikazan je tvrdomjer koji služi za mjerenje mikrotvrdoće.

**Tablica 6.2.** Tvrdomjer - uređaj za mjerenje mikrotvrdoće [41]

### 6.3. Ispitivanje hrapavosti površine

Za kvalitetnu i dugotrajnu prevlaku bitna je hrapavost podloge na koju se prevlaka nanosi. Hrapavost se može mjeriti na više načina, a osnovne metode jesu: vizualna usporedba sa standardiziranim komparatorima, utiskivanje plastične trake na površinu i mjerenje visine izbočina te metoda koja se zasniva na određivanju profila površine pomoću elektromehaničkog uređaja s ticalom ili profilometra s laserskim snopom (bezkontaktno mjerenje hrapavosti). Elektromehanički uređaj za mjerenje hrapavosti na slici 6.2. sastoji se od jedinice za dovod koja pomiče različite sonde za mjerenje profila i hrapavosti konstantnom brzinom preko objekta koji se mjeri. Središnja računalna jedinica zatim obrađuje mjerni signal i pruža grafički prikaz skenirane površine i izlaz različitih karakterističnih površinskih vrijednosti i parametara



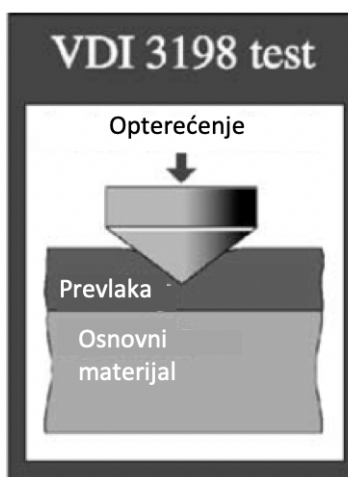
hrapavosti, kao što su dubina profila, srednje vrijednosti hrapavosti  $R_a$  te dubine hrapavosti  $R_z$  i  $R_{max}$ . Duljina skeniranja prema standardu je maksimalno 60 mm u rasponu mjerenja od 0,1  $\mu\text{m}$  do 250  $\mu\text{m}$ .



Slika 6.2. Perthometer S8P

#### 6.4. Ispitivanje adhezivnosti prevlake VDI metodom

Rockwellov test propisan normom VDI 3198 je destruktivni test kvalitete za prevučene komponente. Princip ove metode prikazan je na slici 6.3., dijamantni stožac s kutom 120 ° prodire u površinu prevlake, izazivajući plastičnu deformaciju podloge i lom prevlake.

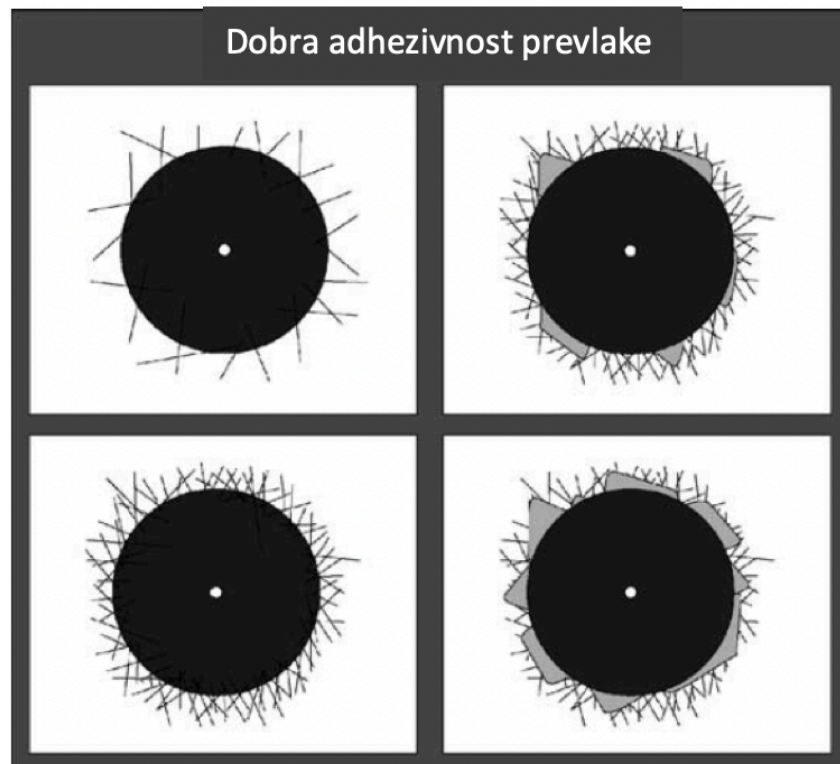


Slika 6.3. Shematski prikaz Rockwellovog testa [42]

Kao i u svakom ispitivanju udubljenja, mora se ispuniti pravilo 1/10, te stoga ukupna debljina uzorka (podloge s prevlakom) mora biti najmanje 10 puta veća od dubine udubljenja. Vrsta i volumen zone loma prevlake na prvi pogled pokazuju adhezivnost prevlake, a drugo njegovu

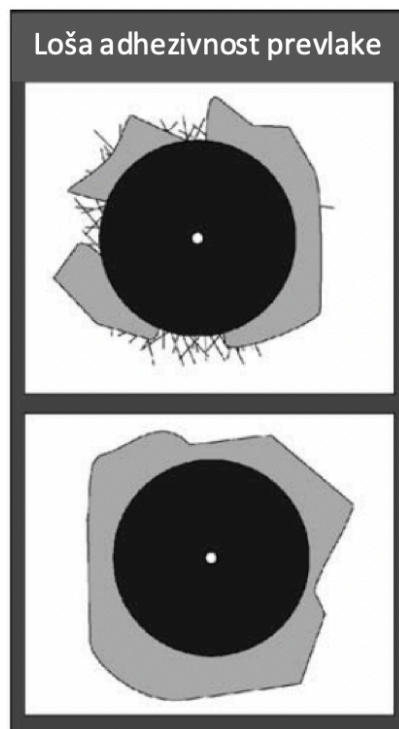
krhkost. Obloženi uzorak može se adekvatno procijeniti pomoću svjetlosne mikroskopije. Međutim, metoda kontrole kvalitete postaje znatno učinkovitija kada se koriste skenirajuća elektronska mikroskopija i spektroskopija.

Izgled prevlake oko mjesta utiskivanja dijamantnog stožca prikazan je na slici 6.4. Kontaktna geometrija, u kombinaciji s intenzivnim prijenosom opterećenja, izaziva ekstremna posmična naprezanja na graničnoj površini. Dobro prijanjajuće prevlake uspijevaju izdržati ova posmična naprezanja i spriječiti prošireno raslojavanje po obodu otiska. Četiri različite teksture slike 6.4. ilustriraju oblike otiska koji jamče jake međufazne veze između premaza i podloge [1,2].



Slika 6.4. Dobro prijanjajuća prevlaka [42]

Nasuprot rezultatima prikazanim na slici 6.4., rezultati na slici 6.5. prikazuju prevlake kod kojih je došlo do raslojavanja prevučenog sloja, odnosno uzorke koji nemaju dobru adhezivnost prevlake. Nadalje, radijalne pukotine i slabo raslojavanje ukazuju na dobro prionjenu ali krhku prevlaku. U svakom slučaju, eksplicitan i sveobuhvatan opis polja naprezanje-deformacija, koje se događa tijekom procesa utiskivanja, od velike je važnosti uzimajući u obzir da su načini loma prevlake i međusloja prevlaka/podloga povezani sa specifičnim komponentama naprezanja na mjestu prodiranja dijamantnog stožca.



*Slika 6.5. Loše prijanjajuća prevlaka [42]*

# EKSPERIMENTALNI DIO

## 7. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

### 7.1. Materijal ispitnih uzoraka

Materijal ispitnih uzoraka je titanova legura TiAl6V4. Ova legura posjeduje dobru kombinaciju mehaničkih svojstava te je relativno dobro toplinski obradiva. Uz to, navedena legura je otporna na koroziju, a njen kemijski sastav je 90 % titan, 6 % aluminij, 4 % vanadij, maksimalno 0.25 % željeza te maksimalno do 0.2 % kisika. Ispitivanje je provedeno na četiri ispitna uzorka od kojih su tri bila dobivena aditivnom metodom taljenjem praha titanove legure elektronskim snopom, dok je jedan uzorak proizveden konvencionalnim metodama. Uzorci korišteni u ispitivanju u polaznom stanju srašćeni su u obliku valjka dužine 108 mm i promjera 18 mm kako prikazuje slika 7.1.



Slika 7.1. Uzorak proizveden aditivnom proizvodnjom u polaznom stanju

U polaznom stanju uzorci nisu pogodni za prevlačenje zbog njihove hrapave strukture te ih je potrebno obraditi postupcima finog tokarenja i brušenja.

### 7.2. Parametri finog tokarenja i brušenja uzoraka

Proces obrade odvajanjem čestica je podijeljen na proces finog tokarenja i proces brušenja. Uzorci se postavljaju u zahvat na tokarilici te je sa njih, ovisno o parametrima tokarenja za svaki uzorak, skinut sloj materijala. Parametar koji se razlikuju od uzorka do uzorka je brzina posmaka,  $f$  [mm/s], dok im je zajednička geometrija, dubina rezanja koja iznosi 0,1 mm te brzina rezanja koja iznosi  $V_C = 0,042$  m/s, odnosno 42 mm/s. Posmaci alata za svaki uzorak nalaze se u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Posmaci alata tijekom obrade uzoraka

Uzorak	$f$ [mm/okr]	$f'$ [mm/s]
S1	0,05	0,0375
S2	0,15	0,1125
S3	0,26	0,195
K1	0,05	0,0375

Finim tokarenjem promjer uzoraka je smanjen s 18 mm na 16 mm. Uzorci s oznakama S1, S2, S3 su proizvedeni aditivnim postupkom, dok je uzorak K1 proizveden konvencionalnim metodama. Na strojno obrađenim uzorcima izmjerena je hrapavost površine. Nakon ispitivanja hrapavosti tokarenih površina iz uzorka s najmanjom hrapavosti su izrezane dvije serije diskova. Prva serija ima visinu diska 10 mm i promjer  $\varnothing 16$  mm, druga serija ima visinu 4 mm i promjer  $\varnothing 16$  mm. Korišteni noževi prikazani su na slici 7.2., dok se isti noževi na držaču nalaze na slici 7.3. Diskovi su brušeni vodootpornim nizom brusnih papira zrnatosti P600, P800, P1200 i P2000 kako bi se dodatno smanjila hrapavost površine i povećala mogućnost prijanjanja prevlake na uzorak. Valja napomenuti da u postupak prevlačenja ulaze diskovi sa najboljom kvalitetom hrapavosti površine jer nema smisla prevlačiti izrazito hrapave uzorke zbog loše prionjivosti prevlake na osnovni materijal.



a)



b)

*Slika 7.2. Tokarski noževi: a) tokarski nož za finu obradu b) tokarski nož za rezanje*



*Slika 7.3. Noževi za finu obradu i rezanje na držaču*

### 7.3. Parametri PACVD procesa

Završni proces obrade je proces prevlačenja aditivno i konvencionalno proizvedenih titanovih legura prevlakom titan-nitrida. Prevlačenje je provedeno PACVD procesom s parametrima navedenim u tablici 7.2. Na slici 7.4. prikazano je postrojenje za PACVD postupak, a na slici 7.5. dijagram postupka.

Tablica 7.2. Parametri PACVD procesa

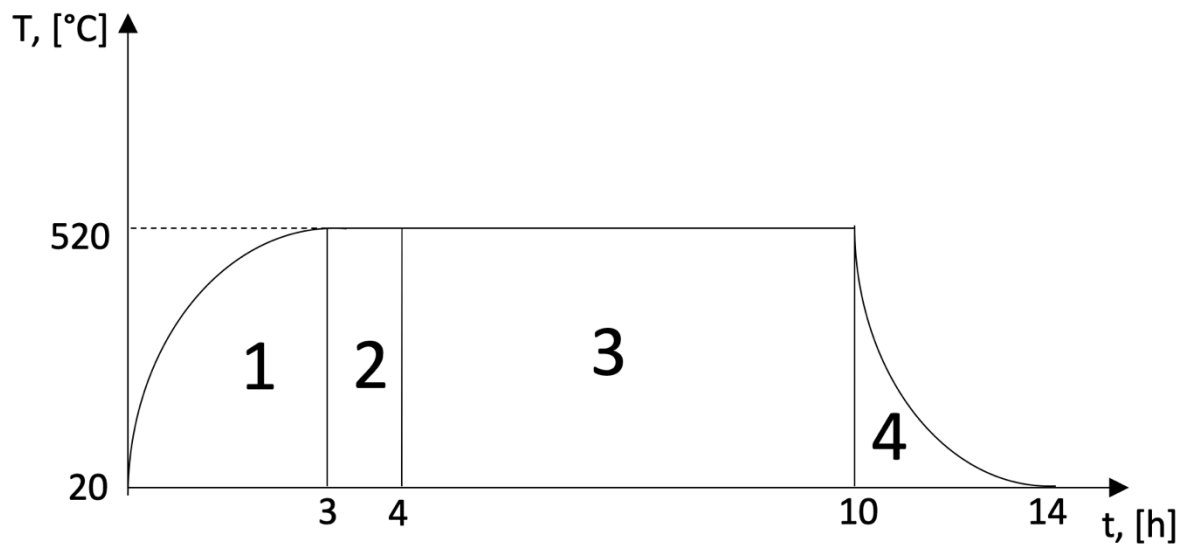
Postupak	T [°C]	t [h]	p [mbar]	N <sub>2</sub> [l/h]	H <sub>2</sub> [l/h]	Ar [l/h]	TiCl <sub>4</sub> [l/h]	P [W]
Grijanje	510	3	2	/	/	/	/	/
Ionsko otprašivanje	520	1	2	20	200	10	/	/
Prevlačenje	520	6	2	45	200	10	7	3000
Hlađenje	20	4	2	/	/	/	/	/

Tlak u vakuumskoj komori za prevlačenje je konstantan i iznosi 2 mbar, a temperatura je približno jednaka do procesa hlađenja. Dušik, vodik i argon prolaze kroz komoru tijekom procesa ionskog otprašivanja i prevlačenja, dok se titanov-IV-klorid propušta isključivo tijekom procesa prevlačenja (faza 3 na slici 7.5.).



Slika 7.4. Postrojenje za PACVD postupak





Slika 7.5. Dijagram PACVD postupka

Završetkom tokarenja i PACVD procesa mjeri se hrapavost površina, a naknadno se provode razorna ispitivanja koja obuhvaćaju određivanje debljine prevlake metodom kalotest, određivanje adhezivnosti prevlake VDI metodom te ispitivanje mikrotvrdoće.

## 8. REZULTATI ISPITIVANJA

### 8.1. Obradivost površine EBM uzorka finim tokarenjem

Tokarenjem uzorka konstantnom brzinom rezanja i posmacima prema tablici 7.1. dovodi do slijedećih rezultata. Slika 8.1. prikazuje uzorak S1 proizveden metodom taljenja elektronskim snopom i tokaren najmanjim posmakom.



*Slika 8.1. Fino tokaren uzorak S1*

Kao što možemo vidjeti, zbog maloga posmaka alata stvara se velika količina odvojenih čestica. Obradivost uzorka S1 je umjerena jer treba pripaziti da je nož konstantno u zahvatu, odnosno da se materijal ne nakuplja oko alata u obliku klupka. Slika 8.2. prikazuje uzorak S2. Uzorak S2 se osim po većoj brzini posmaka od uzorka S1 razlikuje i po drugačijoj geometriji odvojenih čestica.



*Slika 8.2. Fino tokaren uzorak S2*

Odvojene čestice uzorka S2 nešto su grublje (šire) od onih uzorka S1 te to olakšava sam proces tokarenja jer je manja vjerojatnost da se odvojene čestice namataju na alat. Slika 8.3. prikazuje posljednji uzorak proizveden aditivnom metodom, uzorak S3. Uzorak S3 ima najveću brzinu posmaka što sa sobom nosi najšire odvojene čestice koje se ne namataju na tokarski nož te je samim time najlakše obradiv.



*Slika 8.3. Fino tokaren uzorak S3*

Slika 8.4. prikazuje uzorak K1 proizveden konvencionalnim metodama. Uzorak K1 obrađivan je jednakim parametrima kao uzorak S1, no odvojena čestica je izrazito dugačka te se namata na alat što iziskuje zaustavljanje procesa i micanje čestice. Uzorak K1 je najlošije obradiv.



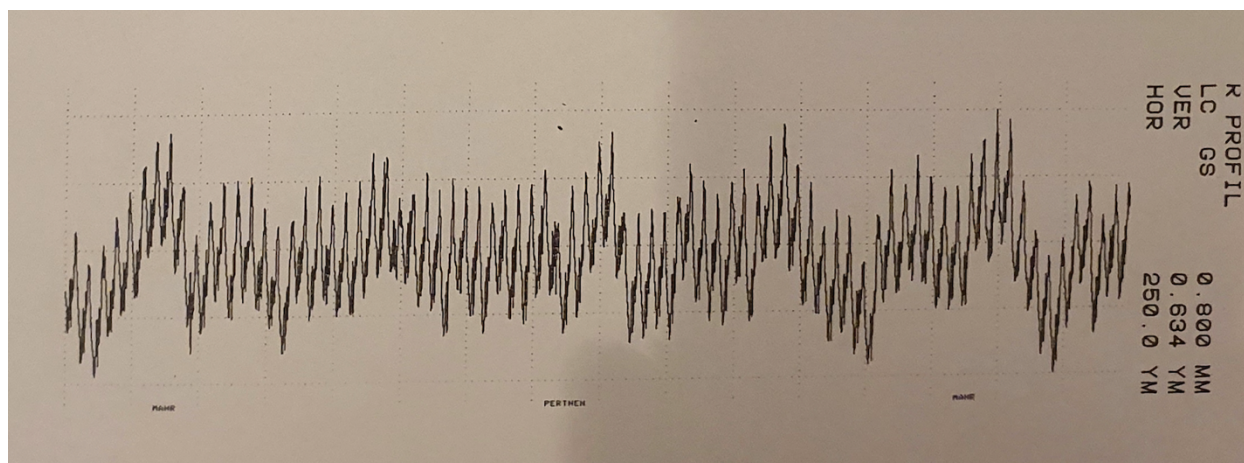
*Slika 8.4. Fino tokaren uzorak K1*

Iz rezultata je vidljivo da aditivno proizvedeni uzorci imaju bolju mogućnost obrade od onih proizvedenim konvencionalnim metodama. Manja brzina posmaka osigurava manju hrapavost površine, no uzorci obrađivani na taj način imaju problema sa odvojenim česticama kod kojih je velika vjerojatnost da će se krenuti namatati na alat te će to dodatno usporiti proces jer će čestice morati biti uklonjene.

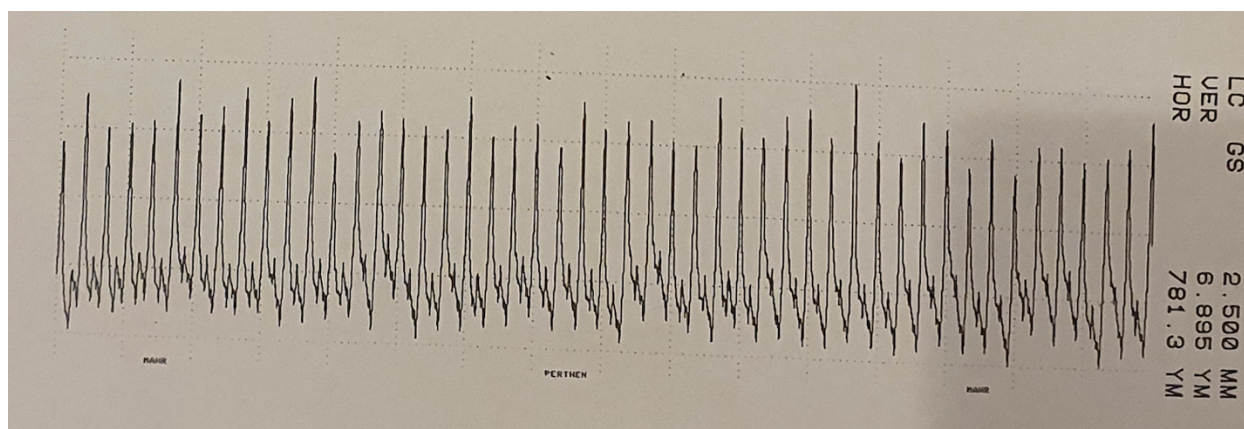
## **8.2. Ispitivanje hrapavosti tokarenih površina**

### **8.2.1. Ispitivanje hrapavosti nakon površinskih obrada**

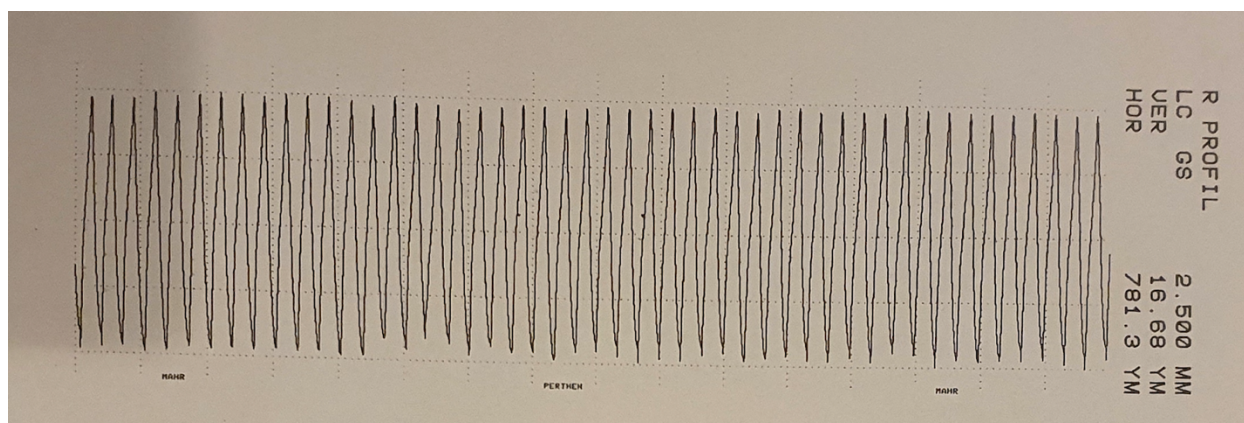
Ispitivanje hrapavosti započinje ispitivanjem hrapavosti aditivno proizvedenih uzoraka nakon tokarenja. Profili hrapavosti ispitivanih uzoraka nalaze se na slici 8.5. za uzorke S1, S2 i S3.



a)



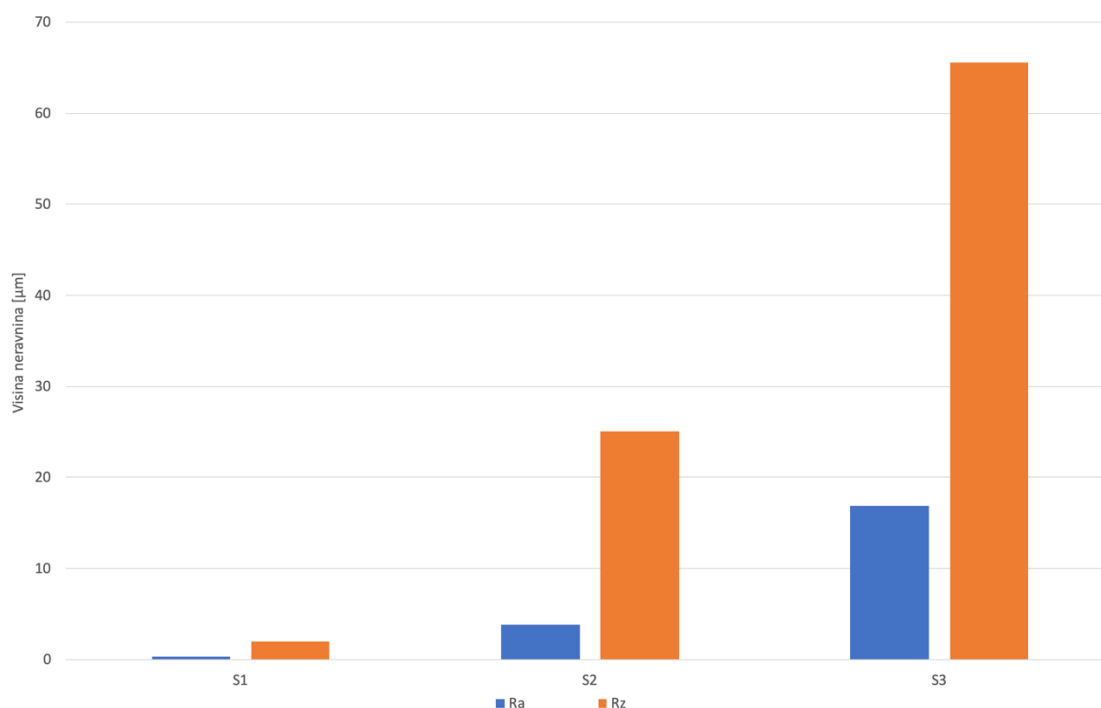
b)



c)

*Slika 8.5. Profili hrapavosti: a) uzorak S1 b) uzorak S2 c) uzorak S3*

Iz slike 8.5. vidljivo je da uzorak s najvećom brzinom posmaka ima najmanju kvalitetu površine, odnosno površina uzorka S3 je najhrapavija. Uzrok tomu je nepravilno i nedovoljno skidanje materijala koje za sobom ostavlja brojne neravnine. Grafički prikaz srednjih ( $R_a$ ) i maksimalnih ( $R_z$ ) visina neravnina aditivno proizvedenih uzorka prikazan je na slici 8.6.



Slika 8.6. Grafički prikaz visina neravnina aditivno proizvedenih uzoraka

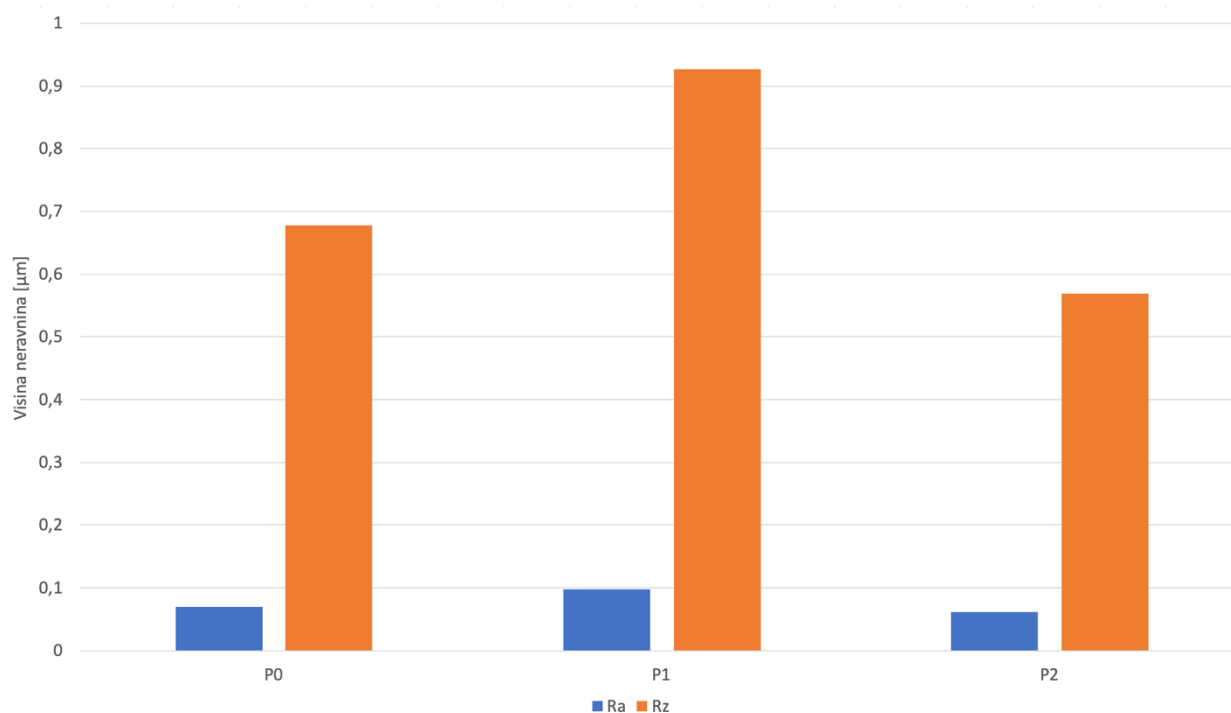
### 8.2.2. Ispitivanje hrapavosti površine prevlake PACVD TiN

Rezultati ispitivanja površinskih hrapavosti prevučenih uzoraka dani su u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Rezultati ispitivanja površinskih hrapavosti prevučenih uzoraka

Trag. br	P0 (uzorak K1 ne prevučeno)			P1 (uzorak K1 s prevlakom TiN)			P2 (uzorak S1 s prevlakom TiN)		
	Ra	Rz	Rp	Ra	Rz	Rp	Ra	Rz	Rp
1	0,062	0,578	0,474	0,109	1,167	1,133	0,064	0,546	0,404
2	0,079	0,758	0,398	0,095	0,902	0,840	0,061	0,450	0,409
3	0,080	0,704	0,532	0,102	0,883	0,798	0,063	0,641	0,504
4	0,058	0,670	0,442	0,081	0,751	0,619	0,056	0,640	0,525
Srednja vrijednost	0,070	0,678	0,462	0,097	0,926	0,848	0,061	0,569	0,461
Rasipanje	0,022	0,180	0,134	0,028	0,416	0,514	0,008	0,191	0,121

Uzorak P0 proizveden je konvencionalnim metodama te nije prevučen nego je hrapavost površine mjerena nakon tokarenja. Uzorak P1 također je proizveden konvencionalnim metodama, no uzorak P1 prevučen je slojem TiN prevlake. Uzorak P2 izrađen je metodom taljenja elektronskim snopom te je on također prevučen slojem TiN prevlake. Grafički prikaz srednjih ( $R_a$ ) i maksimalnih ( $R_z$ ) visina neravnina prevučenih uzoraka prikazan je na slici 8.7.

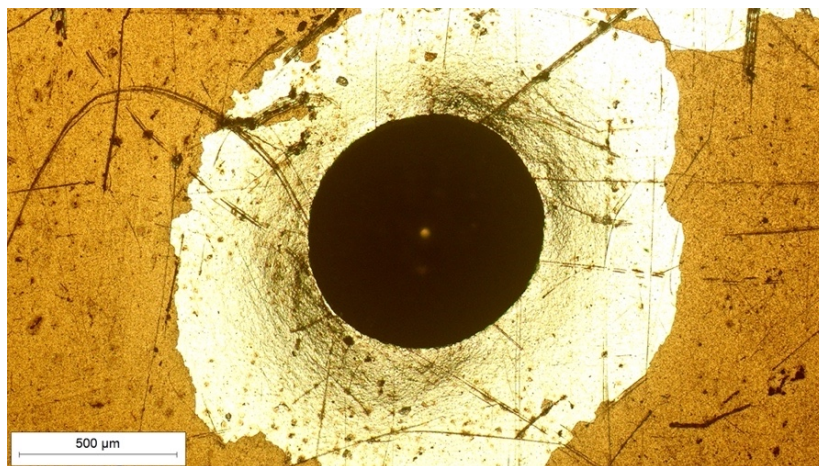


*Slika 8.7. Grafički prikaz visina neravnina prevučenih uzoraka*

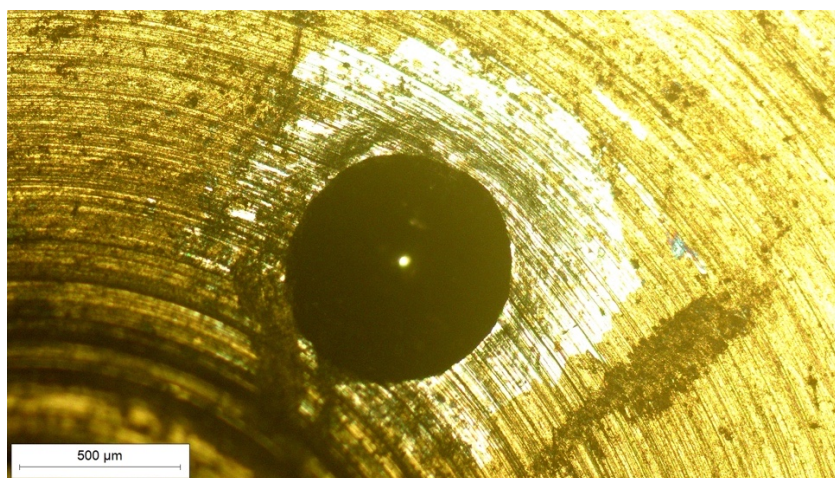
Uzorak P2, proizveden metodom taljenja elektronskim snopom i naknadno prevučen slojem titan-nitrida PACVD postupkom, ima najmanju srednju i maksimalnu hrapavost površine. Razlog tomu može biti jer je površina uzorka dobivenog aditivnom metodom lakše obradiva metodama odvajanja čestica što rezultira boljom kvalitetom površine prije prevlačenja te samim time boljom kvalitetom površine nakon prevlačenja.

### **8.3. Ispitivanje adhezivnosti i debljine sloja prevlake**

Ispitivanje adhezivnosti provodi se nad uzorcima u koje je utisnut dijamantni indenter oblika stožca na tvrdomjeru. Prvi uzorak proizveden je konvencionalnim metodama te je prevučen TiN slojem, drugi uzorak aditivno je proizveden metodom taljenja elektronskim snopom te je potom također prevučen TiN slojem PACVD postupkom. Rezultate ispitivanja redom za prvi odnosno drugi uzorak prikazuju slike 8.8. i 8.9.



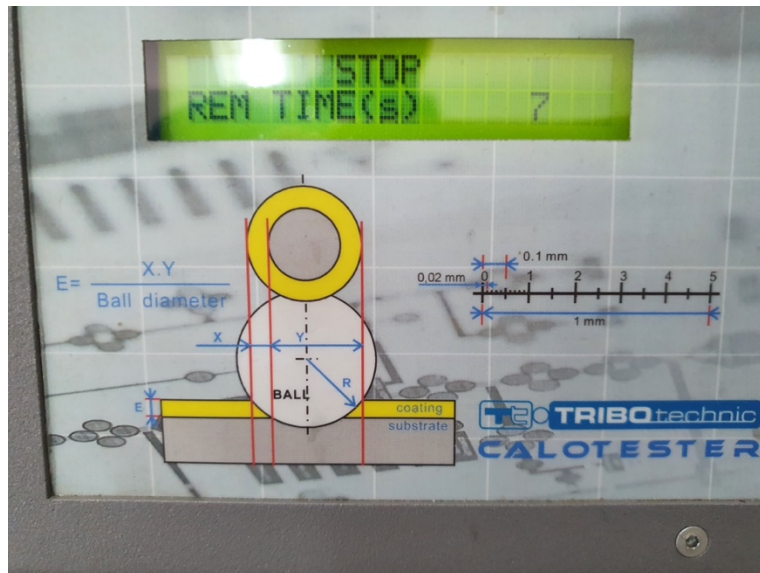
*Slika 8.8. Ispitivanje adhezivnosti prevlake konvencionalno proizvedenog uzorka VDI metodom*



*Slika 8.9. Ispitivanje adhezivnosti prevlake aditivno proizvedenog uzorka VDI metodom*

Kod obje vrste uzoraka došlo je do potpunog raslojavanja prevlake. Konvencionalno proizvedeni uzorak ima naizgled nešto bolju prevlaku, dok je kod aditivno proizvedenog uzorka sloj prevlake izuzetno tanak i sklon krhanju. Debljina sloja prevlake ispituje se metodom kalotest. Korišteni uzorci isti su kao oni kod kojih je ispitivana adhezivnost prevlake VDI metodom. U procesu je korištena kuglica od tvrdoga metala promjera 15 mm koja je rotirana pomoću vratila koje je imalo frekvenciju vrtnje od 300 okr/min, a vrijeme trajanja procesa iznosilo je 20 sekundi. Slika 8.10. prikazuje način određivanja veličina X i Y.



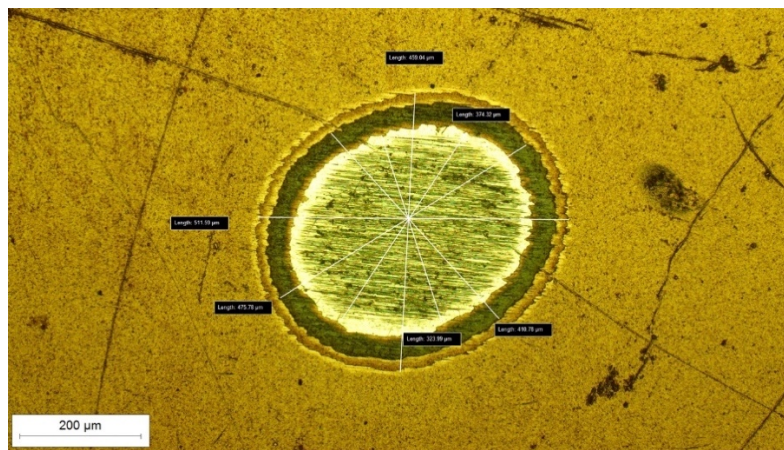


Slika 8.10. Način određivanja veličina  $X$  i  $Y$

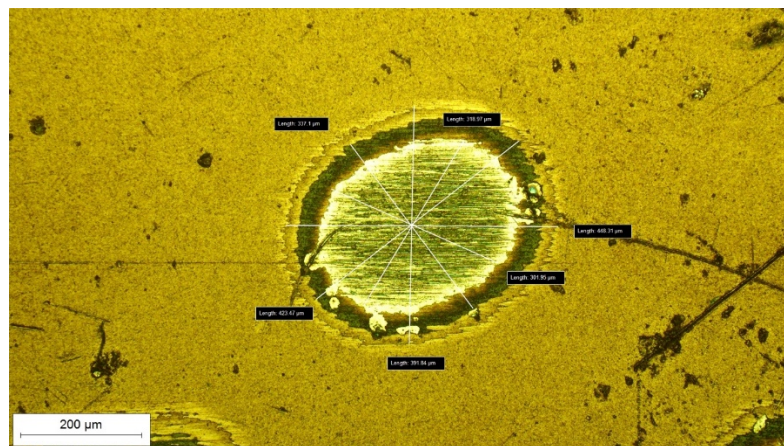
Izmjerene veličine  $X$  i  $Y$  potrebno je uvrstiti u formulu (8.1.) kako bi se izračunala tražena debljina sloja.

$$E = \frac{X \cdot Y}{d} \quad (8.1.)$$

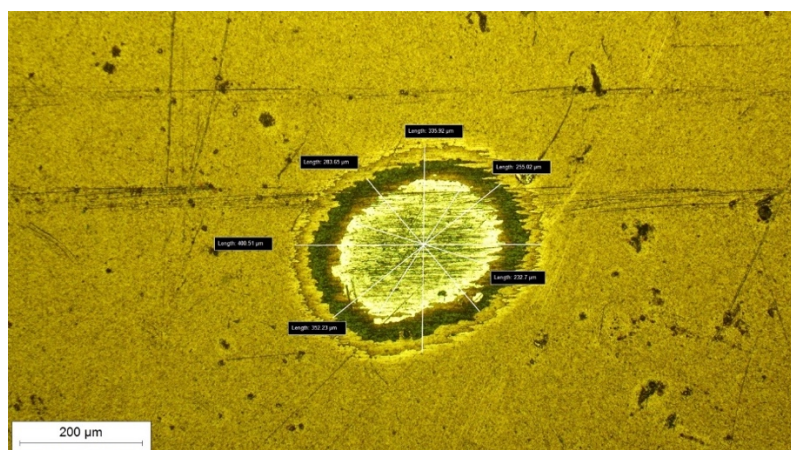
Slika 8.11. prikazuje *tri* mjesta na konvencionalno izrađenom uzorku na kojima je ispitivana otpornost na trošenje metodom kalotest i na kojima je provedeno ispitivanje debljine sloja prevlake.



a)



b)



c)

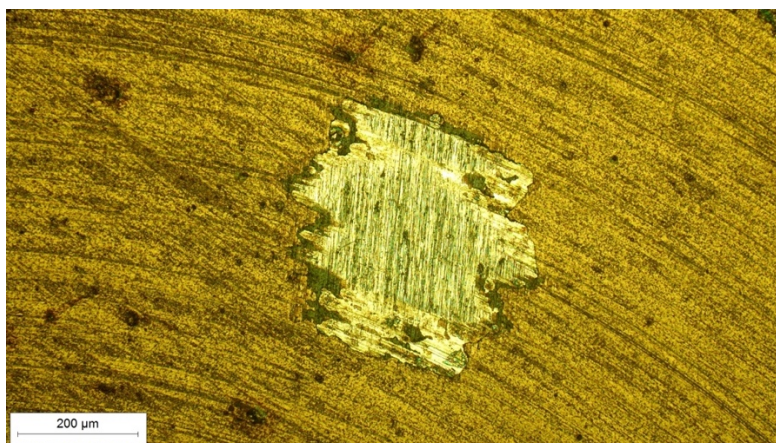
*Slika 8.11. Ispitivanje otpornosti na trošenje konvencionalno proizvedenog uzorka: a) prvo mjesto b) drugo mjesto c) treće mjesto*

Izmjerene dužine veličina X i Y ispitivanih mjesta, kao i debljine sloja prevlake nalaze se u tablici 8.2. Za svako ispitivano mjesto napravljena su *dva* mjerenja kako bi izračun debljine sloja bio točniji. Tamnozeleni dijelovi prevlake, koji tvore vijenac oko sredine metalne boje, zapravo su mješavina titanovog oksida i nitrida prevlake.

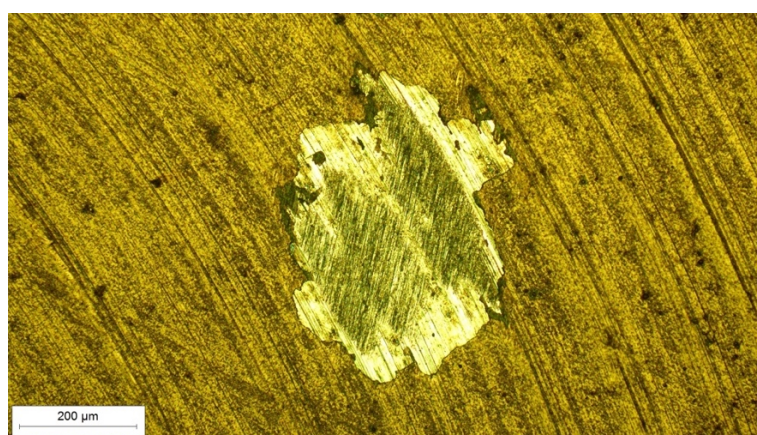
Tablica 8.2. Rezultati mjerenja i debljine prevlake

Izmjerene veličine	X <sub>1</sub> [μm]	Y <sub>1</sub> [μm]	E <sub>1</sub> [μm]	X <sub>2</sub> [μm]	Y <sub>2</sub> [μm]	E <sub>3</sub> [μm]
Ispitivano mjesto 1	68,635	442,955	2,03	67,525	391,515	1,76
Ispitivano mjesto 2	64,67	383,64	1,65	44,95	346,89	1,04
Ispitivano mjesto 3	51,61	284,31	0,98	72,75	327,77	1,59

Zbrajanjem debljina izračunatih u tablici i dijeljenjem sa brojem mjerenja, srednja debljina sloja prevlake iznosi  $E = 1.58 \mu\text{m}$ . Zamjena uzoraka proizvedenih konvencionalnim metodama onim proizvedenim aditivnim postupkom i ponavljanje postupka ispitivanja uz jednake parametre daje rezultate vidljive na slici 8.12.



a)



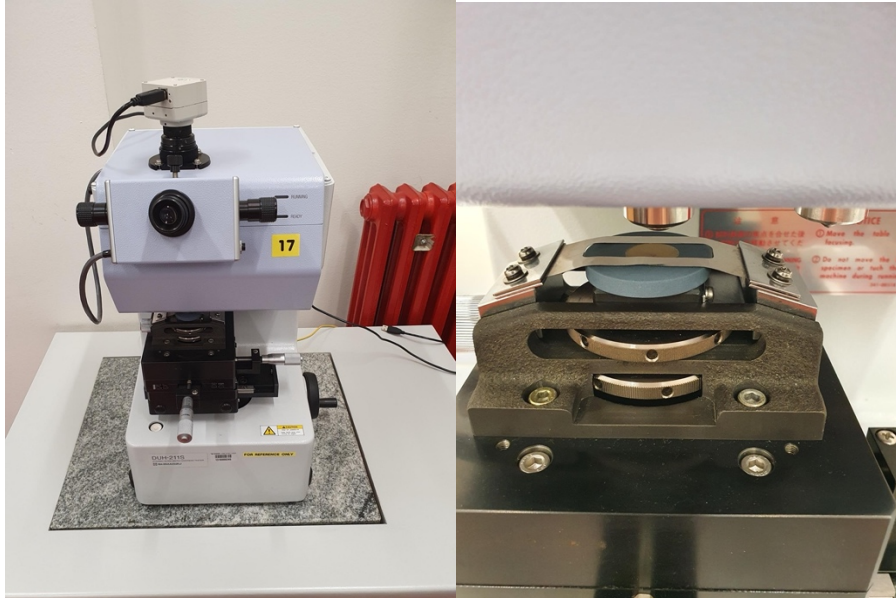
b)

Slika 8.12. Ispitivanje otpornosti na trošenje aditivno proizvedenog uzorka

Sloj prevlake na uzorcima proizvedenim aditivnim postupkom je pretanak te nije moguće izračunati njegovu debljinu pomoću formule (8.1.). Kuglica prilikom kontakta sa uzorkom nije napravila pravilan oblik kalote jer je došlo do ljuštenja prevučenog sloja. Ukoliko želimo ostvariti bolju adhezivnost i bolju debljinu prevlake potrebno je povećati kvalitetu površine, odnosno smanjiti hrapavost. Uz to, valjalo bi smanjiti količinu titanovog oksida na površini osnovnog materijala jer snižava mehaničke sposobnosti prevlake.

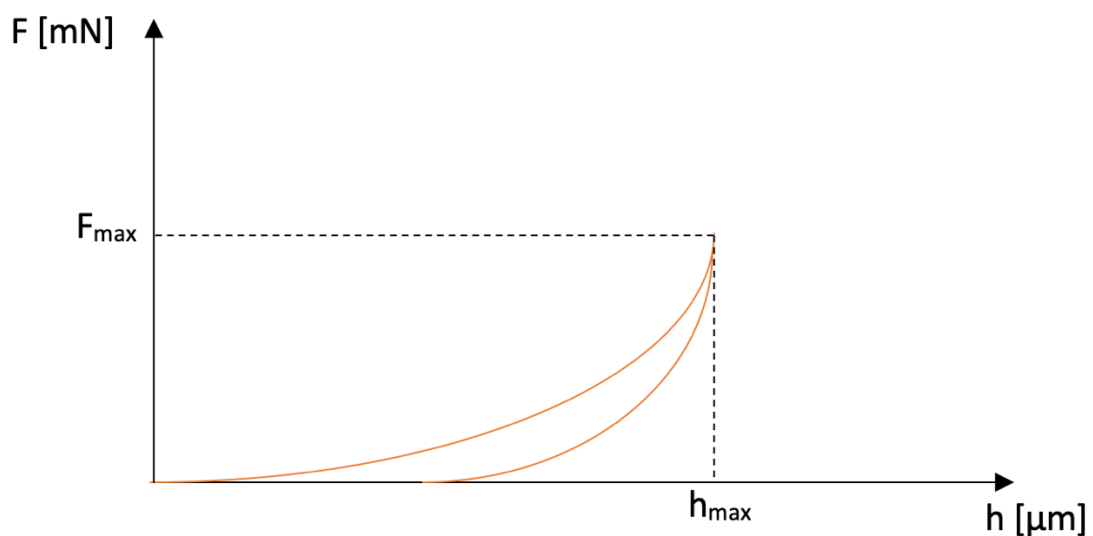
#### 8.4. Ispitivanje mikrotvrdoće prevlake

Mikrotvrdoća uzoraka mjerena je na uređaju DUH-211/211S (slika 8.13.) proizvođača Shimadzu Corporation, serijskoga broja I62304700117 prema normi EN ISO 14577-2:2002.



Slika 8.13. DUH-211/211S

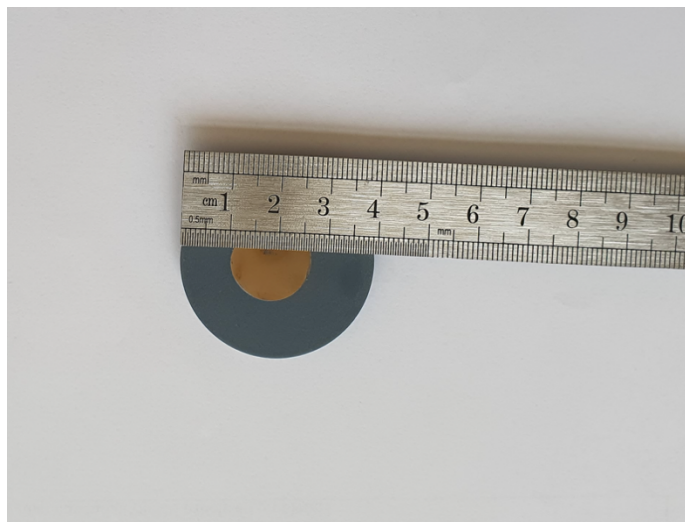
Proces ispitivanja mikrotvrdoće prikazan je na slici 8.14., a sastoji se od dvije faze. U prvoj fazi, sloj prevlake se probija indentorom, dok se u drugoj fazi indentor uklanja i dolazi do relaksacije sloja prevlake i osnovnoga materijala. Tijekom ispitivanja dubina prodiranja nije bila veća od  $0,2\ \mu\text{m}$  što je otprilike petina ukupne debljine prevlake. Rezultati ispitivanja, koji se sastoje od srednje vrijednosti i standardne devijacije, dani su u tablici 8.3., dok je aditivno proizveden uzorak, na kojemu je ispitivana mikrotvrdoća, prikazan na slici 8.15.



Slika 8.14. Proces ispitivanja mikrotvrdoće

Tablica 8.3. Rezultati srednjih vrijednosti mikrotvrdoća

Uzorak	HV 0,01
P1-Konvencionalno proizveden uzorak	2440,3 ± 644,4
P2-Aditivno proizveden uzorak	2183,2 ± 418,7



Slika 8.15. Aditivno proizveden uzorak za ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanjima je pokazano da konvencionalno proizveden uzorak TiAl6V4 legure prevučeni slojem TiN ima 12 % veću tvrdoću od uzorka iste legure dobivenog postupkom taljenja elektronskim snopom prevučeni slojem TiN. Razlog tomu potencijalno može biti visoka poroznost uzorka dobivenog aditivnom proizvodnjom te samim time smanjena tvrdoća osnovnoga materijala koja direktno smanjuje i tvrdoću prevlake.

## 9. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada su opisane klasifikacija i primjene titanovih legura, EBM i SLM postupci aditivne proizvodnje te PACVD proces prevlačenja. Kombinacijom ovih tehnologija moguće je izraditi komponente sa dobrom kombinacijom mehaničkih svojstava te visokom geometrijskom točnosti. U eksperimentalnom dijelu rada ispitivane su kvalitete površina uzoraka izrađenih konvencionalnim metodama i EBM postupkom nakon finog tokarenja. Aditivno proizveden uzorak sa najboljom kvalitetom površine odrezan je u dvije serije diskova koji su prevučeni titan-nitrid prevlakom PACVD postupkom. Prevučenim diskovima kao i prevučenim konvencionalno izrađenim uzorcima ispitivana je površinska hrapavost, adhezivnost sloja prevlake VDI metodom, otpornost na trošenje metodom kalotest, debljina sloja prevlake i finalno mikrotvrdoća.

Rezultatima ispitivanja je pokazano da aditivno proizvedeni uzorci legure TiAl6V4 imaju veće sposobnosti obradivosti od konvencionalno proizvedenih, no kako bi povećali adhezivnost prevlake kao i njezinu debljinu trebalo bi dodatno smanjiti hrapavost površine radi bolje prionjivosti. Srednja vrijednost debljine postignutog sloja prevlake konvencionalno proizvedenog uzorka iznosi svega 1.58  $\mu\text{m}$  dok određivanje srednje debljine sloja prevlake aditivno proizvedenog uzorka nije bilo moguće zbog visokog stupnja raslojavanja i njegove krhkosti. Kako bi se povećala kvaliteta prevučenog sloja, trebalo bi smanjiti količinu titanovog oksida na površini jer smanjuje adhezivnost i mehanička svojstva prevlake te prilikom PACVD procesa preporučuje se mijenjati parametre kako bi optimizirali proces za željene dimenzije obratka jer proces prevlačenja ovisi i o geometriji komponente. Ispitivanje mikrotvrdoće pokazuje da konvencionalno proizveden uzorak prevučen slojem titan-nitrida PACVD postupkom ima 12 % veću tvrdoću od aditivno proizvedenog uzorka prevučenog istom metodom i prevlakom. Razlog tomu je porozna struktura uzorka proizvedenog metodom taljenja elektronskim snopom koja ima smanjenu tvrdoću osnovnog materijala, naspram konvencionalno proizvedenog, te samim time slabije djeluje kao potpora sloju prevlake i smanjuje njegovu tvrdoću.

**LITERATURA**

- [1] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [2] Leyens, C. and M. Peters, Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. 2003: Wiley.
- [3] <https://energy-ti.com/solutions/medical-and-surgical/>, 03.07.2022.
- [4] <https://www.stomatologiawichlinscy.pl/en/modern-technologies/certified-implants/>, 03.07.2022.
- [5] Samant, R. and Medina, F.: Electron Beam Melting: From Powder to Part, 2018.
- [6] Markl, M. and C. Körner: Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing. Annual Review of Materials Research 46 (2016), pp. 93/123.
- [7] Markl, M., Lodes, M., Franke, M. and Körner, C.: Additive manufacturing using selective electron beam melting, Welding and Cutting, pp. 177-184, 2017.
- [8] P.-H. Li, W.-G. Guo, W.-D. Huang, Y. Su, X. Lin, K.-B. Yuan, Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti-6Al-4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures, Mater. Sci. Eng. A 647 (2015) 34–42.
- [9] H. Galarraga, D.A. Lados, R.R. Dehoff, M.M. Kirka, P. Nandwana, Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM), Addit. Manuf. 10 (2016) 47–57.
- [10] P.A. Kobryn, E.H. Moore, S.L. Semiatin, The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V, Scr. Mater. 43 (4) (2000) 299–305.
- [11] Y. Yang, H.C. Man, Microstructure evolution of laser clad layers of W-C-Co alloy powders. This paper is sponsored by The Natural Science Foundation of Guangdong Province, China, Surf. Coat. Technol. 132 (2) (2000) 130–136.
- [12] A. Bauereiß, T. Scharowsky, C. Körner, Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting, J. Mater. Process. Technol. 214 (11) (2014) 2522–2528.
- [13] G.K.L. Ng, A.E.W. Jarfors, G. Bi, H.Y. Zheng, Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition, Appl. Phys. A 97 (3) (2009) 641–649.
- [14] J. Choi, Y. Chang, Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel, Int. J. Mach. Tools Manuf. 45 (4–5) (2005) 597–607.
- [15] S. Tammam-Williams, H. Zhao, F. Léonard, F. Derguti, I. Todd, P.B. Prangnell, XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V com-



- ponents manufactured by selective electron beam melting, *Mater. Charact.* 102 (2015) 47–61.
- [16] T. Vilaro, C. Colin, J.D. Bartout, As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting, *Metall. Mater. Trans. A* 42 (10) (2011) 3190–3199.
- [17] C. de Formanoir, S. Michotte, O. Rigo, L. Germain, S. Godet, Electron beam melted Ti-6Al-4V: microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material, *Mater. Sci. Eng. A* 652 (2016) 105–119.
- [18] S.M. Gaytan, L.E. Murr, F. Medina, E. Martinez, M.I. Lopez, R.B. Wicker, Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting, *Mater. Technol.* 24 (3) (2009) 180–190.
- [19] P.-H. Li, W.-G. Guo, W.-D. Huang, Y. Su, X. Lin, K.-B. Yuan, Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti-6Al-4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures, *Mater. Sci. Eng. A* 647 (2015) 34–42.
- [20] P. Mercelis, J.P. Kruth, Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyp. J.* 12 (5) (2006) 254–265.
- [21] L. Parry, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman, Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 1–15.
- [22] Y. Liu, Y. Yang, D. Wang, A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 87 (1) (2016) 647–656.
- [23] L.D. Bobbio, S. Qin, A. Dunbar, P. Michaleris, A.M. Beese, Characterization of the strength of support structures used in powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V, *Addit. Manuf.* 14 (2017) 60–68.
- [24] J.-P. Järvinen, V. Matilainen, X. Li, H. Piili, A. Salminen, I. Mäkelä, O. Nyrhilä, Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel, *Phys. Procedia* 56 (2014) 72–81.
- [25] G. Vastola, G. Zhang, Q.X. Pei, Y.W. Zhang, Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 231–239.
- [26] H. Weiwei, J. Wenpeng, L. Haiyan, T. Huiping, K. Xinting, H. Yu, Research on preheating of titanium alloy powder in electron beam melting technology, *Rare Metal Mater. Eng.* 40 (12) (2011) 2072–2075.

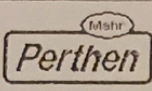
- [27] V. Chastand, P. Quaegebeur, W. Maia, E. Charkaluk, Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM), *Mater. Charact.* 143 (2018) 76–81.
- [28] Y. Zhai, H. Galarraga, D.A. Lados, Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM, *Eng. Fail. Anal.* 69 (2016) 3–14.
- [29] Trevisan, F., Calignano, F., Aversa, A., Marchese, G., Lombardi, M., Biamino, S., Ugues, D., Manfredi, D.: Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications, *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 2016.
- [30] Osakada, K. and M. Shiomi, Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006. 46(11): p. 1188-1193.
- [31] H.K. Rafi, N.V. Karthik, H. Gong, T.L. Starr, B.E. Stucker, Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *J. Mater. Eng. Perform.* 22 (12) (2013) 3872–3883.
- [32] Mogensen, K.S., Thomsen, N.B., Eskildsen, S.S., Mathiasen, C., Bottiger, J.: A parametric study of the microstructural, mechanical and tribological properties of PACVD TiN coatings, 1997.
- [33] K.S. Mogensen, S.S. Eskildsen, C. Mathiasen, J. Bottiger, *Surf. Coat. Technol.* (in press).
- [34] Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M.: Design and evaluation of tribological coatings, pp. 21-33, 1999.
- [35] <https://turntechprecision.com/clueless-machinist/2020/8/25/10-machining-operations-performed-on-a-lathe>, 03.07.2022.
- [36] <https://www.mech4study.com/2018/11/what-is-centerless-grinding-what-are-difference-between-centered-and-centerless-grinding-process.html>, 03.07.2022.
- [37] [https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/various\\_grinding.html](https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/various_grinding.html), 03.07.2022.
- [38] Axinte, D.A., Kwong, J., Kong, M.C.: Workpiece surface integrity of Ti-6-4 heat-resistant alloy when employing different polishing methods, *Journal of materials processing technology* 209, pp. 1843-1852, 2009.

- [39] <https://www.bossabrasive.com/waterproof-sand-paper/>, 03.07.2022.
- [40] [https://www.researchgate.net/figure/Main-different-types-of-ball-cratering-systems-a-fixed-ball-and-b-free-ball\\_fig6\\_223276964](https://www.researchgate.net/figure/Main-different-types-of-ball-cratering-systems-a-fixed-ball-and-b-free-ball_fig6_223276964), 03.07.2022.
- [41] <https://www.bluestar-ee.com/micro-vickers-hardness-tester/>, 03.07.2022.
- [42] Vidakis, N., Antoniadis, A. and Bilalis, N.: The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, *Journal of materials processing technology* 143-144, pp. 481-485, 2003.

# PRILOG

## Prilog 1. Rezultati ispitivanja površinske hrapavosti: a) uzorak S1 b) uzorak S2 c) uzorak S3

perthometer S8P 4.5

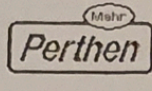
		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: UZORAK 19  HR.: 22.10.2020. NAME: G.BARSIC  MESS.-HR.: 4 T1 RHT 6-50 50 6
LT	5.600 MM		
LM	4.000 MM		
UB	12.50 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 4						
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX		YM	2.300	0.164	0.365	2.535	2.171		
2	RZ		YM	1.975	0.184	0.424	2.196	1.772		
3	RA		YM	0.319	0.022	0.052	0.341	0.209		
4	RP		YM	1.185	0.134	0.327	1.356	1.029		
5	RPM		YM	1.033	0.114	0.267	1.177	0.910		
6	WT		YM	1.048	0.273	0.620	1.357	0.737		
7	RT		YM	2.330	0.152	0.365	2.535	2.171		
8	PT		YM	3.072	0.112	0.258	3.197	2.939		

a)

perthometer S8P 4.5

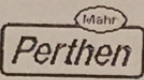
		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: UZORAK 10  HR.: 16.11.2020. NAME: G.BARSIC  MESS.-HR.: 4 T8 FRU-750 750 26
LT	17.50 MM		
LM	12.50 MM		
UB	625.0 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 4						
	LC	GS	2.500 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX		YM	26.6	1.2	3.0	28.0	25.0		
2	RZ		YM	25.1	1.2	3.0	26.5	23.5		
3	RA		YM	3.0	0.2	0.3	3.9	3.5		
4	RP		YM	19.3	0.5	1.2	20.0	18.0		
5	RPM		YM	17.7	0.6	1.3	18.1	16.8		
6	WT		YM	2.5	1.0	2.2	3.9	1.7		
7	RT		YM	27.6	1.3	2.8	29.4	26.6		
8	PT		YM	28.4	1.2	2.9	30.0	27.2		

b)

perthometer S8P 4.5

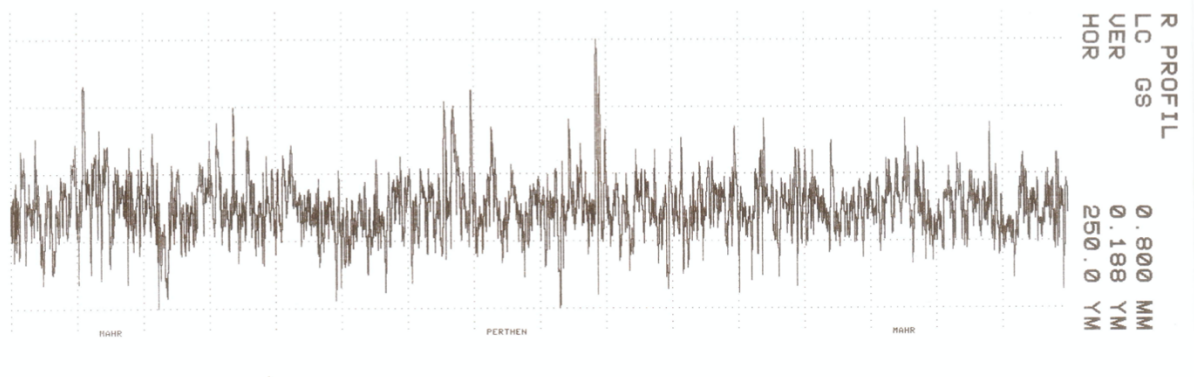
 LT 17.50 MM LM 12.50 MM UB 625.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: UZORAK TI2 NR.: 16.11.2020. NAME: G.BARSIC  MESS.-HR.: 4 T8 FRW-750 750 26
--	---	---

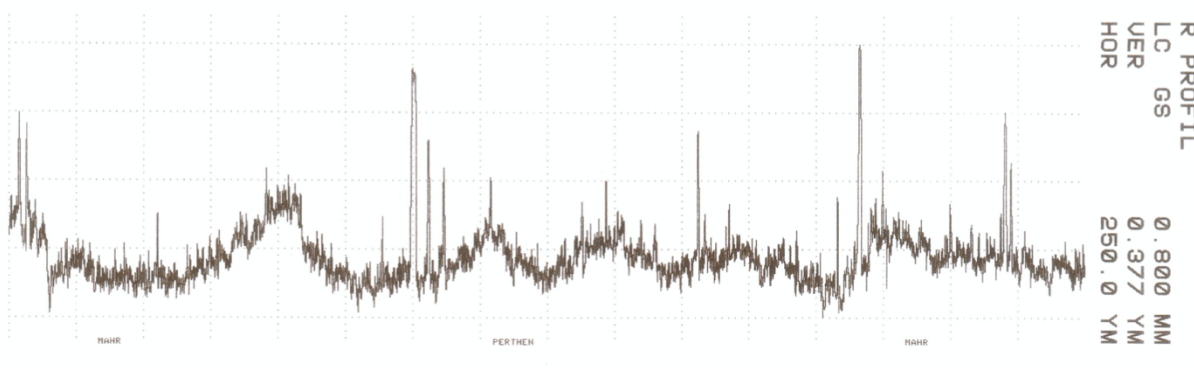
KENNWERT				STATISTIK N = 4						
LC	GS	2.500	MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1	RMAX		YM	66.4	0.2	0.6	66.7	66.1		
2	RZ		YM	65.6	0.3	0.8	66.8	65.2		
3	RA		YM	16.9	0.1	0.2	17.0	16.9		
4	RP		YM	34.5	0.4	0.9	35.1	34.2		
5	RPM		YM	33.9	0.2	0.4	34.1	33.8		
6	WT		YM	2.2	0.7	1.4	2.9	1.5		
7	RT		YM	66.8	0.5	1.1	67.2	66.1		
8	PT		YM	67.7	0.3	0.8	68.2	67.4		

c)

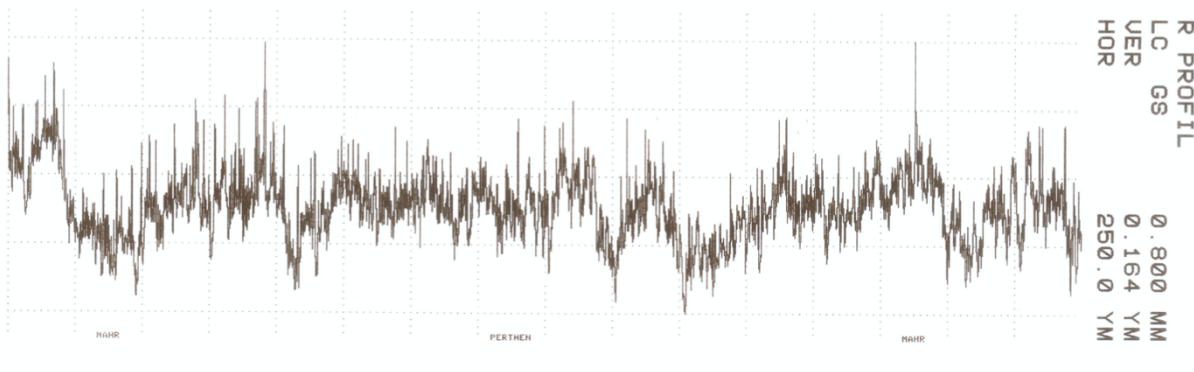
Prilog 2. Profili hrapavosti: a) uzorak P0 b) uzorak P1 c) uzorak P2



a)

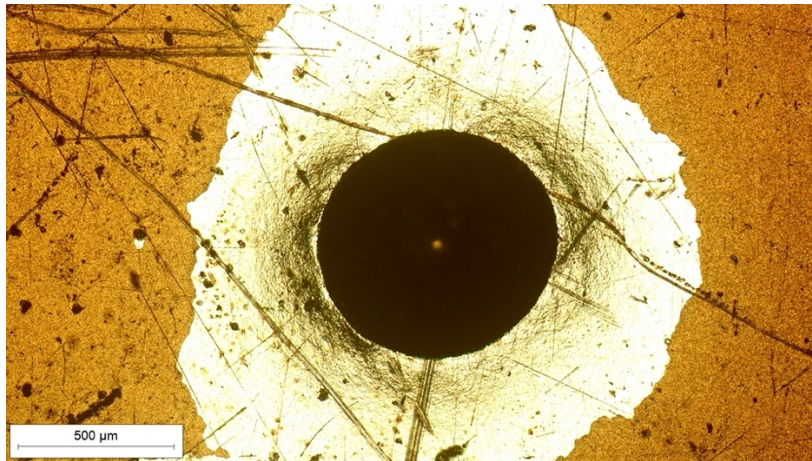


b)

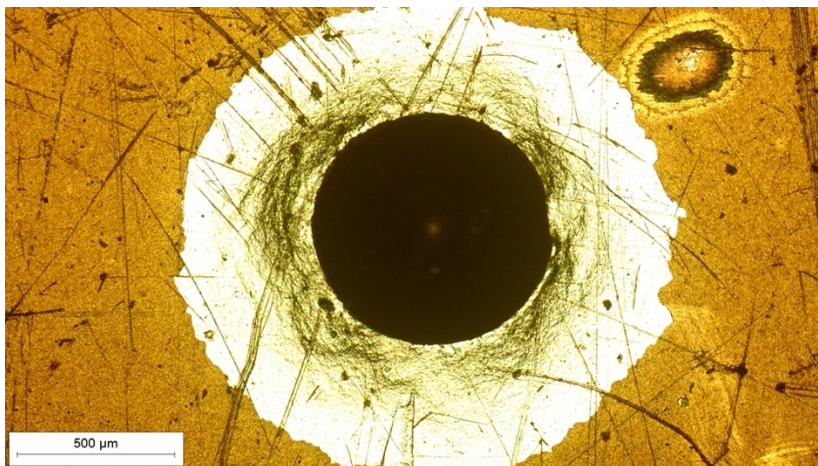


c)

*Prilog 3. Ispitivanje adhezivnosti konvencionalno proizvedenih uzoraka prevučeni slojem nitrida VDI metodom: a) ispitivanje 2 b) ispitivanje 3*

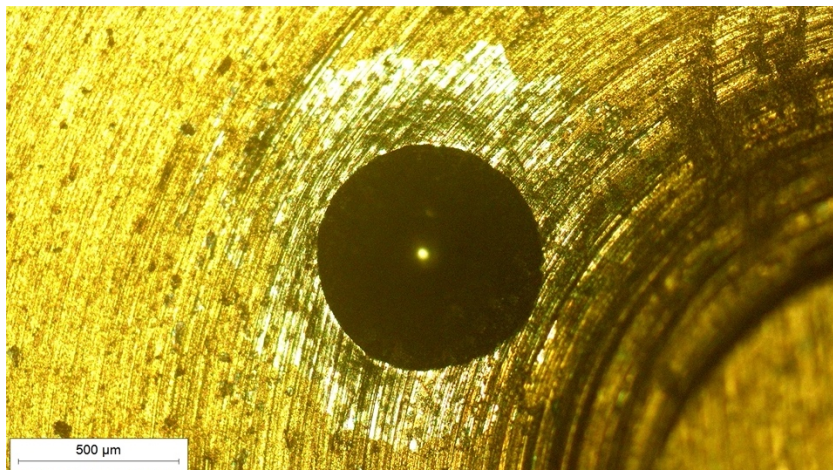


a)



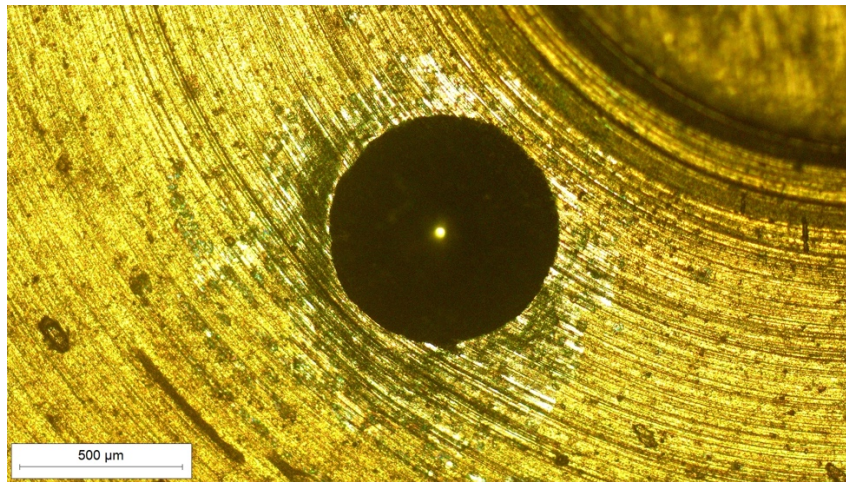
b)

*Prilog 4. Ispitivanje adhezivnosti aditivno proizvedenih uzoraka prevučeni slojem nitrida VDI metodom: a) ispitivanje 2 b) ispitivanje 3*



a)





b)

*Prilog 5. Ispitivanje otpornosti na trošenje i debljine sloja nitridne prevlake na aditivno proizvedenim uzrocima: a) ispitivanje 2 b) ispitivanje 3*



a)



b)