

# Eksperimentalna karakterizacija dinamike penetranta u pukotinama

---

Čobanov, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2010

*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:235:708809>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## ZAVRŠNI RAD

Marko Čobanov

Zagreb, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Josip Stepanić

Marko Čobanov

Zagreb, 2010.

# Sažetak

Ovaj rad sastoji se od dva osnovna dijela, teorijskog i praktičnog.

U teorijskom dijelu rada opisana je penetrantska metoda nerazornih ispitivanja, značajna u primjeni u zrakoplovstvu, te kapilarni učinak kao princip metode.

U praktičnom dijelu rada promatrana je dinamika prodiranja penetranta kroz pukotine nepravilne geometrije. Eksperiment je izveden pomoću četiri uzorka na kojima se uočava promjena vremena uspinjanja penetranta s promjenom karakterističnih veličina uzoraka. Svi rezultati mjerenja prikazani su u tablicama i grafovima u poglavlju 4.

# Sadržaj

Uvod.....	1
1. Metoda ispitivanja tekućim penetrantima .....	3
1.1 Kapilarni efekt .....	3
1.2 Ispitivanje tekućim penetrantima.....	5
1.3 Koraci penetrantske metode .....	9
2. Penetranti.....	10
2.1 Močivost površine .....	11
2.2 Viskoznost .....	12
2.3 Boja i fluorescentnost .....	13
2.3.1 Ultraljubičasta (UV) i toplinska stabilnost.....	13
3. Penetrantska metoda u zrakoplovstvu .....	13
3.1 Uvod.....	13
3.2 Primjene penetrantske metode u zrakoplovstvu .....	15
3.2.1 Sustavi za ispitivanje penetrantima u održavanju zrakoplova.....	15
3.2.2 Odabir metode .....	16
3.2.3 Ispitivanje dijelova .....	16
3.3 Zahtjevi na ispitno osoblje.....	16
4 Eksperimentalni dio.....	17
4.2 Utjecaj geometrije pukotine na prostiranje penetranta .....	17
4.3 Izvođenje mjerenja .....	19
4.3.1 Uzorak 1 .....	19
4.3.2 Uzorak 2 .....	21
4.3.3 Uzorak 3 .....	23
4.3.4 Uzorak 4 .....	25
Zaključak.....	28
Literatura .....	30

# Izjava

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno i odgovorno, uz stručnu pomoć doc.dr.sc. Josipa Stepanića. Pri izradi završnog rada koristio sam se znanjem stečenim tijekom studija kao i navedenom literaturom.

---

Marko Čobanov

# Popis slika

Slika 1-2 Primjeri prikaza indikacije.....	7
Slika 1-1 Odstranjivač, penetrant i razvijlač u spreju .....	7
Slika 1-3 Prikaz indikacije primjer 2.....	8
Slika 1-4 Nanošenje penetranta.....	10
Slika 2-1 Močivost površine. ....	11
Slika 2-2 Slika iz procesa određivanja kontaktnog kuta .....	11
Slika 3-1 Airbus A320 u proizvodnom procesu.....	14
Slika 3-2 Space Shuttle .....	15
Slika 4-1 Slika uzoraka sa različitim izbočenjima .....	17
Slika 4-2 Elementi postava.....	18
Slika 4-3 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s.....	19
Slika 4-4 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 10 s.....	19
Slika 4-5 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s.....	20
Slika 4-6 Razina penetranta nakon 50 s .....	20
Slika 4-7 Dijagram za Uzorak 1 .....	20
Slika 4-8 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s.....	21
Slika 4-9 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 20 s.....	21
Slika 4-10 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s.....	22
Slika 4-11 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s.....	22
Slika 4-12 Dijagram za Uzorak 2 .....	22
Slika 4-13 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s.....	23
Slika 4-14 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 20 s.....	23
Slika 4-15 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s.....	24
Slika 4-16 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s.....	24
Slika 4-17 Razina penetranta nakon 70 s .....	24
Slika 4-18 Dijagram za Uzorak 3 .....	25
Slika 4-19 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s.....	26
Slika 4-20 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Novo penetranta nakon 20 s.....	26
Slika 4-21 a) Razina penetranta nakon 30 s c) Razina penetranta nakon 40 s.....	26
Slika 4-22 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s.....	27
Slika 4-23 a) Razina penetranta nakon 90 s b) Razina penetranta nakon 120 s.....	27

Slika 4-24 Dijagram za Uzorak 4 .....	27
Slika 5- 1 Usporedba vremena prodiranja svih uzoraka .....	28



## Popis tablica

Tablica 1. Rezultati za Uzorak 1 .....	20
Tablica 2. Rezultati za Uzorak 2 .....	22
Tablica 3. Rezultati za Uzorak 3 .....	25
Tablica 4. Rezultati za Uzorak 4 .....	27

## Popis oznaka i mjernih jedinica

W - težina stupca tekućine (N)

r - radijus kapilare (m)

h – visina (m)

$\theta$  – kontaktni kut između tekućine i krutine

$\rho$  – gustoća tekućine (kg/m<sup>3</sup>)

g – gravitacija (9,81 m/s<sup>2</sup>)

l – dubina kapilare (m)

$\eta$  – dinamička viskoznost (Ns/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  – površinska napetost (J/m<sup>2</sup> ili N/m)

# Uvod

Nerazorna ispitivanja (NDT) je naziv za bilo koji oblik ispitivanja ili pregleda koji mogu provjeriti strukturalni integritet komponente bez narušavanja njene funkcionalnosti. To je već, ili jako brzo postaje, neizostavna metoda za ispitivanje sigurnosti kritičnih komponenti u primjenama kao što su zrakoplovstvo, naftna i plinska industrija, posude pod tlakom i nuklearne elektrane, za provjeru kvaliteta zavarenih spojeva ili praćenje korozivskih oštećenja u eksploataciji.

Metode i tehnike dosad su dosegle visoku razinu sofisticiranosti. Sve metode zahtijevaju upravljanje opremom i interpretaciju rezultata od strane školovanog i iskusnog osoblja.

Tehnike površinskog ispitivanja i praćenja stanja uključuju:

- Vizualni pregled
- Penetrantsko ispitivanje
- Ispitivanje magnetskim česticama

Druge metode koje se koriste za ispitivanje dijela, cijele komponente ili strukture su:

- Radiografija
- Ultrazvučna inspekcija
- Akustična emisija
- Ispitivanje propusnosti

Odabir najprikladnijih NDT metoda za pojedine komponente ovisi o nizu čimbenika kao što su:

- Materijal komponente
- Debljina sekcije
- Vrsta kvara koji se ispituje
- Troškovi inspekcije opreme
- Spretnost operatora

U Zrakoplovnoj industriji nerazorna ispitivanja nezaobilazni su dio provjere funkcionalnosti zrakoplova i njegovih komponenti. Zrakoplovne komponente se ispituju prije stavljanja u zrakoplov, a nakon toga se periodički ispituju tijekom njihovog vijeka upotrebe. Ispitivanje tekućim penetrantima je jedna od nerazornih metoda ispitivanja, te je u širokoj primjeni u održavanju zrakoplova.

Svrha ispitivanja tekućim penetrantima je dobiti vidljiv dokaz pukotina ili bilo kojih drugih površinskih nepravilnosti brzo i ekonomično, uz dovoljno visok stupanj pouzdanosti.

U ovom radu ispitana je dinamika prostiranja penetranta kroz pukotinu koja nije pravilne geometrije. Tim pristupom se približavamo stvarnim slučajevima gdje je geometrija pukotine u pravilu proizvoljnog i unaprijed nepoznatog oblika.

Ispitan je specifični oblik pukotine koji predstavlja tek jedan od bezbroj mogućnosti koje možemo susresti u prirodi.

# 1. Metoda ispitivanja tekućim penetrantima

## 1.1 Kapilarni efekt

Temelj ispitivanja penetrantima je kapilarni učinak koji uzrokuje prodiranje penetrantske tekućine u otvor prekidnosti na površini. Kapilarni učinak se javlja kao kapilarna depresija ili kapilarna elevacija. Za nerazorna ispitivanja bitna je kapilarna elevacija. Ona se javlja pri kontaktu kapljevine i krute tvari kad je privlačna sila između molekule tekućine i krute tvari (adhezija) jača od privlačne sile između molekula tekućine (kohezija). Posljedica toga je pojačano močenje stijenki površine krute tvari. Učinak je to izraženiji što je manji promjer cijevi. Primjer je uronjena staklena kapilara u vodi.

Tekućina se penje dok težina stupca vode ne savlada vertikalnu komponentu sile adhezije:

težina stupca tekućine  $W = r^2 \pi h \rho g$

vertikalna potporna sila adhezije u opsegu kapilare  $= 2 r \pi \sigma \cos \theta$

gdje je:

$\sigma$  – površinska napetost ( $\text{J/m}^2$  ili  $\text{N/m}$ )

$\theta$  – kontaktni kut između tekućine i krutine

$\rho$  – gustoća tekućine ( $\text{kg/m}^3$ )

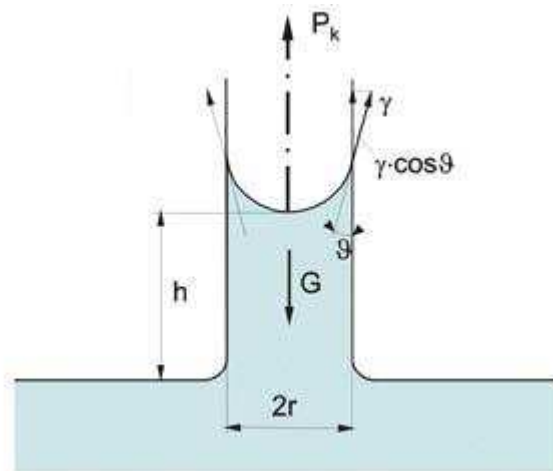
$r$  – radijus kapilare (m)

$g$  – gravitacija ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

pa je:

$$\pi r^2 h g = 2 \pi r \gamma \cos \theta$$

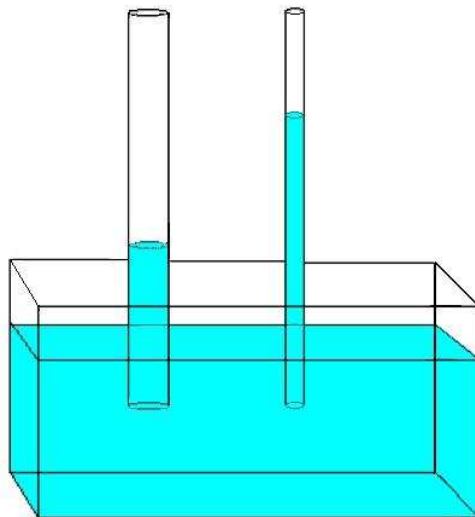
$$h = 2 \gamma \cos \theta / r \rho g$$



Slika 1-5 Kapilarni efekt u vertikalnoj cjevčici

Iz ove formule se može zaključiti da će visina biti veća što je veća površinska napetost, a manji radijus kapilare i gustoća tekućine.

Ova jednadžba ne uzima u obzir zrak/plin unutar pukotine koji također može imati velik utjecaj u zatvorenoj kapilari.



Slika 1-6 Prikaz kapilarnog efekta u cjevčicama različitog promjera

## 1.2 Ispitivanje tekućim penetrantima

Osim vizualnog pregleda ovo je vjerojatno najstarija i najraširenija od svih NDT metoda. Može se koristiti za bilo koji ne-porozni materijal. Najčešće se upotrebljava za ispitivanje metala, ali i ostalih materijala koji kemijski ne reagiraju s ispitnim medijima i nisu previše porozni. Ipak, njegova je uporaba ograničena tek na otkrivanje površinskih grešaka.

Obojeni ili fluorescentni penetrant, kada se primjenjuje na čistu površinu i ostavi da djeluje 10 do 30 minuta, bit će uvučen u diskontinuitet pomoću kapilarnog tlaka. Kapilarni tlak određuje širina diskontinuiteta, površinska napetost i kontaktni kut penetranta na površini. Višak boje se uklanja s površine te se primijenjuje razvijač.

Razvijač ima dvije funkcije: izvlačenje penetranta iz pukotine natrag na površinu te stvaranje podloge koja poboljšava kontrast i povećava uočljivost indikacije.

Nakon nekog vremena, obično najmanje 10 minuta, površina se vizualno pregledava. Bijelo svjetlo se koristi za penetrante crvene boje, a ultraljubičasto svjetlo za fluorescentne penetrante.

Iako bi fluorescentni penetranti trebali dati visoki kontrast koji bi trebao napraviti indikacije lakše vidljive, to nije uvijek slučaj. Oni nisu prikladni za komponente sa grubom ili loše obrađenom površinom jer je teško ukloniti višak boje uzrokujući fluorescenciju čitave površine, te tako maskirajući diskontinuitet, sprečavajući njegovo otkrivanje.

Međutim, omogućavaju lakše uočavanje indikacije u izbušenim rupama i slično.

Neke prednosti metode ispitivanja penetrantima su:

- Dostatna osjetljivost kod malih površinskih prekidnosti (moguće je detektirati greške na materijalima dužine do 0.013 mm)
- Moguće je ispitivati sve materijale koji nisu previše porozni, a korozijski su otporni prema ispitnim medijima
- Nema ograničenja u pogledu volumena i geometrije
- Moguće ispitivanje površina koje se mogu obuhvatiti daljinskom primjenom penetrantskog sustava, te pogledom pomoću opreme za vizualni daljinski pregled kao što

su endoskopi i slično (na taj način je ispitivanje penetrantima moguće i na unutarnjim stjenkama cijevi i posude)

- Nema materijalnih ograničenja, te je moguć pregled metalnih i nemetalnih, magnetskih i nemagnetskih, provodljivih i neprovodljivih materijala
- Ispravnom primjenom ispitivanja nema posljedica niti na objektu ispitivanja niti u naknadnom procesu uporabe ispitnog objekta ili njegovih dijelova
- Relativno niska cijena provođenja ispitivanja
- Moguća automatizacija ispitivanja
- Lako odstranjivanje penetranta i razvijanja
- Mogućnost otkrivanja određenih pogrešaka koje se ne mogu uočiti primjenom drugih metoda
- Vrlo je prenosiv zbog mogućnosti upotrebe sprej varijante

Neki od nedostataka ispitivanja penetrantima su:

- Mogu se ispitivati samo površinske prekidnosti.
- Nemogućnost određivanja dubine pukotine.
- Ne mogu se ispitivati porozni materijali.
- Ako se dobro ne obavi prethodno čišćenje, može doći do slabe razlučivosti i do maskiranja greške.
- Ispitivač mora imati direktan pristup do površine koju ispituje ovom metodom.
- Površinski sloj i hrapavost može vrlo lako utjecati na osjetljivost i rezultate inspekcije.
- Temperatura materijala može utjecati na rezultate testa.
- Ako se ispostavi nakon ispitivanja da je komponenta ispravna, treba ju očistiti prije vraćanja u uporabu
- Kemijsko rukovanje i pravilno zbrinjavanje je potrebno.

Sustav za ispitivanje (u bilo kojoj metodi) čine svi elementi koji svojim svojstvima utječu na rezultate ispitivanja, kao što su osjetljivost metode, mjerna nesigurnost te ponovljivost i obnovljivost rezultata ispitivanja.



Penetrantski sustav čine međusobno usklađeni materijali, a elementi tog sustava su:

- Penetrant
- Odstranjivač
- Razvijlač



Slika 1-1 Odstranjivač, penetrant i razvijlač u spreju



Slika 1-2 Primjeri prikaza indikacije

Ispitivač ili operater mora biti osposobljen bar u skladu sa normama HRN EN 473 ili HRN EN ISO 9712.

Ovisno o namjeni ili načinu primjene penetrantski sustavi se dijele:

- prema tehnici ispitivanja
  - obojeni penetrantski sustav
  - fluorescentni penetrantski sustav
  - obojeno – fluorescentni penetrantski sustav
- prema načinu odstranjivanja penetranta s površine
  - vodom perivi penetrant
  - poslijeemulgirajući penetrant (emulgatorom odstranjivi penetrant)
  - otapalom odstranjivi penetrant
- prema osjetljivost
  - penetrantski sustav ultra niske osjetljivosti
  - penetrantski sustav niske osjetljivosti
  - penetrantski sustav srednje osjetljivosti
  - penetrantski sustav visoke osjetljivosti
  - penetrantski sustav izrazito visoke osjetljivosti



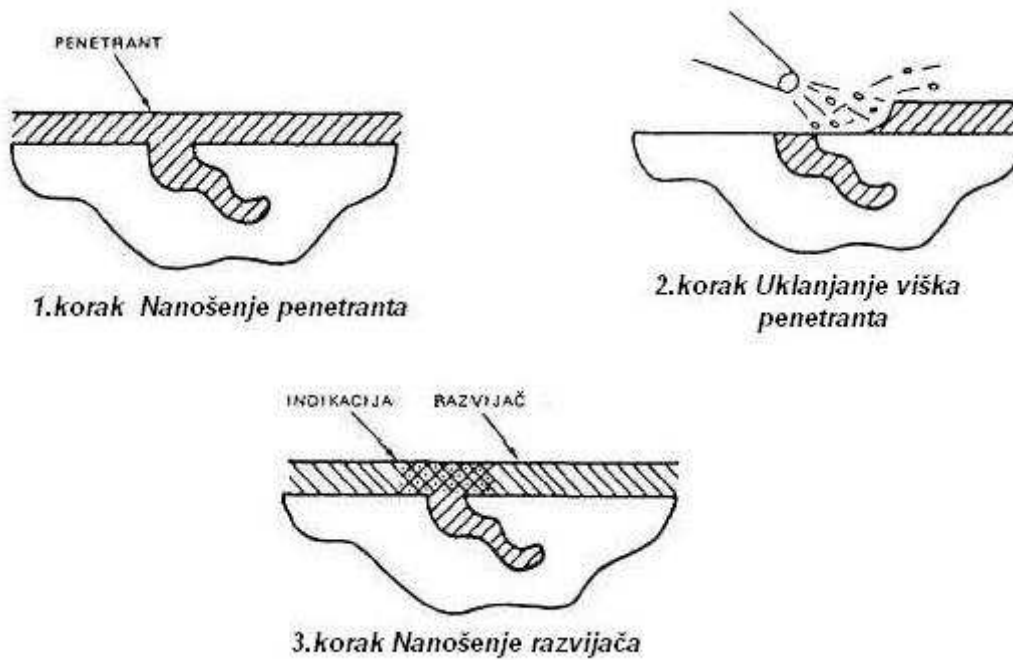
**Slika 1-3 Prikaz indikacije primjer 2**

U međunarodnim normama HRN EN ISO 3452-2 i HRN EN ISO 3452-3 opisana je klasifikacija upotreba i provjera penetranata.

Iz norme HRN EN 571-1 preuzeta je klasifikacija penetranata.

## 1.3 Koraci penetrantske metode

2. Priprema površine: Provodi se prije nanošenja penetranta. Površina mora biti očišćena od ulja, masti, vode ili drugih kontaminanata koji mogu spriječiti penetrantima ulazak u površinsku prekidnost. Površina se mora dobro osušiti prije prelaska na sljedeći korak.
3. Nanošenje penetranta: Nakon čišćenja i sušenja površine, primjenjuje se penetrant prskanjem, četkom ili uranjajući dio u penetrantsku kupku. Penetrant se ostavlja na površini dovoljno vremena kako bi se što više penetranta moglo uvući u pukotinu. Vrijeme penetriranja obično se preporučuje od strane proizvođača ili prema specifikaciji kriterija koje se slijedi. Vrijeme penetriranja može varirati ovisno o primjeni, vrsti penetranta, materijalu i obliku ispitivanog materijala, te vrsti kvara koji se ispituje. Vrijeme penetriranja obično iznosi od 5 do 60 minuta. Opće pravilo je da je duže vrijeme penetriranja u redu ako se penetrantu ne dozvoli da se osuši. Idealno vrijeme obično se određuje eksperimentalno, empirijski ili može biti točno određeno za određenu primjenu.
4. Uklanjanje viška penetranta: U ovom koraku mora se ukloniti višak penetranta s površine ispitivanja uz uvjet da se ukloni što je moguće manje penetranta iz same pukotine. Ovaj korak može uključivati čišćenje s otapalom, ispiranje direktno s vodom ili prvo dodavanje emulgatora, a zatim ispiranja penetranta s vodom.
5. Nanošenje razvijača: Tanki sloj razvijača se potom nanese na testni komad da izvuče penetrant zarobljen u prekidnostima materijala natrag na površinu, gdje onda prekidnost postane vidljiva. Razvijač se može nanijeti prašenjem (suhi u prahu), uranjanjem ili prskanjem (mokri razvijač).
6. Razvijanje indikacije: Razvijač se tada ostavlja na površini ispitnog komada određeno razdoblje vremena. To vrijeme mora biti dovoljno da omogući izvlačenje zarobljenog penetranta iz bilo kakve prekidnosti površine. To je vrijeme razvoja obično najmanje 10 minuta. Dulje vrijeme može biti potrebno za jako uske pukotine.
7. Inspekcija: Tehničar je zatim u mogućnosti obaviti inspekciju, pod odgovarajućom rasvjetom, za otkrivanje indikacije bilo kakve prekidnosti koje mogu biti prisutne na ispitnom komadu.
8. Čišćenje: Nakon završetka pregleda, sav se razvijač čisti s ispitnog komada.



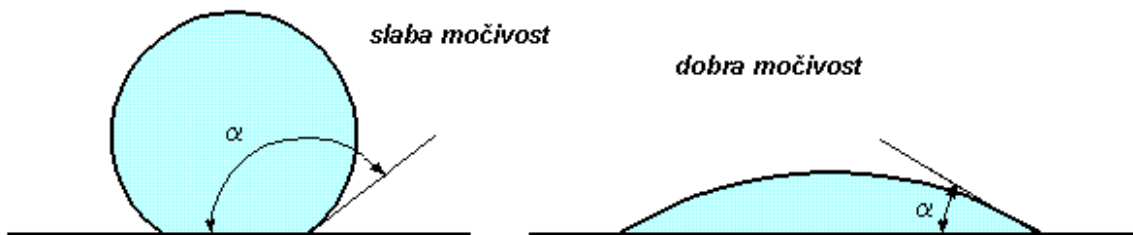
Slika 1-4 Nanošenje penetranta

## 2. Penetranti

Penetrant je višekomponentna smjesa čiji su sastojci odabrani radi postizanja zahtijevanih svojstava penetranta. Da bi dobro djelovali penetranti moraju imati niz vrlo važnih karakteristika:

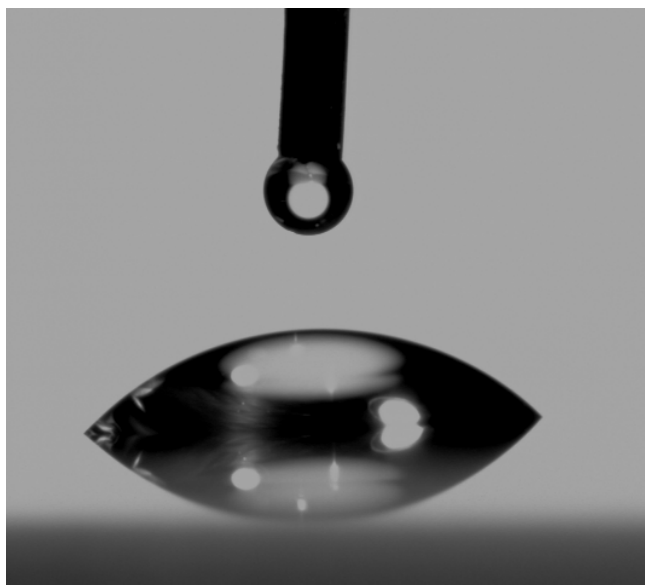
- moraju se lako i jednolično moći razmazati po ispitivanoj površini
- moraju ulaziti u pukotine pomoću kapilarnog učinka ili nekog drugog mehanizma
- moraju ostati u pukotini, ali se lako odstraniti s površine materijala
- moraju ostati u tekućem stanju da bi ih razvijач mogao izvući na površinu
- moraju biti dobro vidljivi ili fluorescentni kako bi ispitivač lako odredio mjesto i veličinu pukotine
- ne smiju biti štetni za materijal koji se ispituje

## 2.1 Močivost površine



Slika 2- 1 Močivost površine: Kontaktni kut između tekućine i krutine se koristi kao mjera za močivost. Za kut  $\alpha < 90^\circ$  tekućina dobro moči površinu (npr. voda na staklu), za  $\alpha > 90^\circ$  tekućina ne moči površinu (npr. živa na staklu). Ako je  $\alpha = 0^\circ$  tekućina savršeno moči površinu.

Karakteristike močenja penetranata su uvelike odgovorne za mogućnosti punjenja pukotine. Penetranti dobre močivosti će lakše doprijeti do svih mjesta na često vrlo složenoj geometriji objekta. Do močenja površine dolazi kad su adhezijske sile jače od privlačnih sila između molekule i tekućina. U suprotnom, kad su privlačne sile između molekula i tekućina jače od adhezijskih, tekućina tvori kuglicu i ne moči površinu. Jedan od načina određivanja močivosti površine je mjerenje kontaktnog kuta kapljice tekućine smještene na površinu ispitivanog materijala. Kontaktni kut je kut koji tvore čvrsta površina i tekućina. Kad je taj kut manji od 90 stupnjeva tekućina moči površinu. Penetrant treba stvarati što manji kontaktni kut. Ova karakteristika je uvelike odgovorna za mogućnost penetranta da uđe u pukotinu.



Slika iz procesa određivanja kontaktnog kuta

Tekući penetrant ulazi u pukotinu sve dok se kapilarni tlak ne izjednači sa silom koja djeluje u suprotnom smjeru. Ta sila je obično tlak zraka koji se nalazi u pukotini jer pukotine najčešće imaju otvor samo na površini materijala koji se ispituje. Budući da zrak nema kamo izaći, a ne može ni proći kroz sloj penetranta, on se tlači na kraju pukotine.

## 2.2 Viskoznost

Viskoznost penetranta ima velik utjecaj na brzinu kojom penetrant puni pukotinu.

Jednadžba za vrijeme ispunjavanja pukotine je:

$$t = \frac{2 l^2 \eta}{r \cos \theta \sigma}$$

Gdje su:  $l$  – dubina kapilare (m)

$\eta$  – viskoznost (Ns/m<sup>2</sup>)

$r$  – radijus (m)

$\theta$  – kontaktni kut

$\sigma$  – površinska napetost (J/m<sup>2</sup> ili N/m)

Iz jednadžbe se vidi da se vrijeme potrebno za punjenje pukotine smanjuje sa smanjenjem viskoznosti.

Gore navedena jednadžba odnosi se na podizanje tekućine u kapilari jer je jednostavnija, a uz dovoljnu točnost se može primijeniti i na podizanje tekućine u pukotini.

## 2.3 Boja i fluorescentnost

Boja i fluorescentnost su tako odabrane da je penetrant u kontrastu sa razvijanjem ili površinom ispitivanog objekta, te je indikacija lako uočljiva. Obojeni penetrant gledan pod bijelim svjetlom može biti crven, narančast ili tamnocrven, a fluorescentni penetrant gledan pod ultraljubičastim svjetlom fluorescira žuto-zeleno ili zeleno.

### 2.3.1 Ultraljubičasta (UV) i toplinska stabilnost

Zbog niza utjecaja iz okoline dolazi do degradacije svojstava penetranta i smanjenja njegove sposobnosti penetriranja. Rezultat studije (Britain) u kojoj je mjerena fluorescentnost penetranta kad je bio izložen više UV ciklusa pokazuje da penetranti izbljeđuju pod utjecajem ultraljubičaste svjetlosti. Nakon osam izlaganja UV svjetlosti indikacija je bila 50 % manja od originalne vrijednosti.

O toplinskoj stabilnosti penetranta raspravlja se u studiji Mullera i Fantozzija „Advances in improving the heat-fade Resistance of fluorescent penetrants“. Oni su zaključili da se pod utjecajem povišene temperature penetranti počinju raspadati. Penetrant mora biti temperaturno stabilan unutar zadanog temperaturnog područja . za standardne penetrante ovo područje je u rasponu od -15°C do 50°C.

## 3. Penetrantska metoda u zrakoplovstvu

### 3.1 Uvod

U programu održavanja zrakoplova važno je provjeravati mehanička oštećenja i procijeniti veličinu popravka. Kod održavanja zrakoplova, nerazorna ispitivanja su jedini način provođenja pregleda i otkrivanja grešaka.

Ispitivanje tekućim penetrantima u širokoj je upotrebi u održavanju zrakoplova i tom metodom dobiva se vizualizacija pukotina ili bilo kojih drugih površinskih nepravilnosti brzo i ekonomično uz visok stupanj pouzdanosti. Ispitivanje penetrantima poboljšava pouzdanost

djelova konstrukcije zrakoplova detektiranjem površinskih neprekidnosti čvrstim materijalima i strukturama.

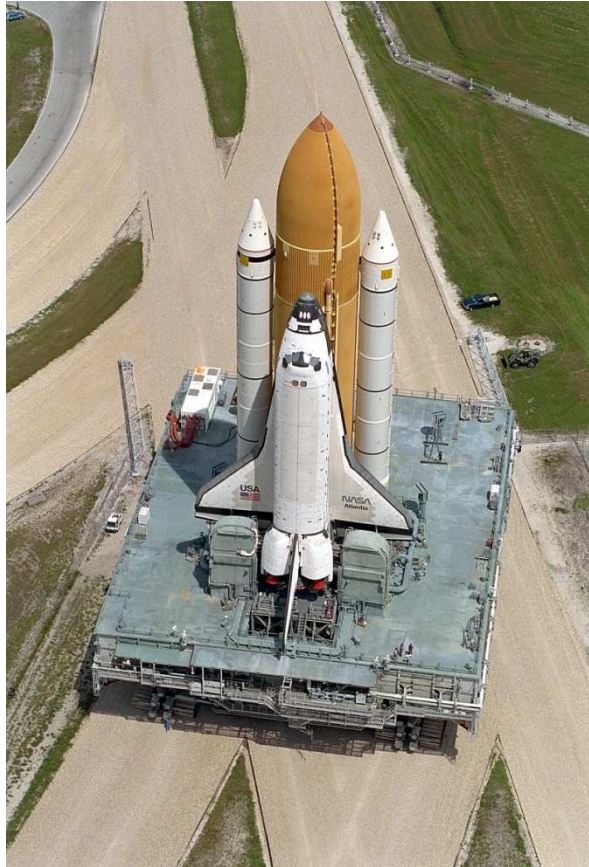


**Slika 3 - 1 Airbus A320 u proizvodnom procesu**

U današnje vrijeme se 70% do 80% nerazornih ispitivanja provodi na strukturi zrakoplova i podvozju, a ostalo se provodi na motorima i motornim dijelovima. Struktura i dijelovi zrakoplova načinjeni su od različitih materijala kao što su aluminijske slitine, čelik, titanij i kompozitni materijali.

Osim u zrakoplovstvu penetrantska metoda ispitivanja provodi se i u svemirskim programima. Neki od svemirskih programa koji su certificirali korištenje penetrantske metode su Saturn I, IB&V, Apollo, Skylab, te programi Marshall Space Flight centra kao što su vanjski spremnik za gorivo Space Shuttle-a, glavni motori te potisne raketa Space Shuttle-a.





Slika 3 - 2 Space Shuttle

## 3.2 Primjene penetrantske metode u zrakoplovstvu

### 3.2.1 Sustavi za ispitivanje penetrantima u održavanju zrakoplova

U održavanju zrakoplova koriste se različiti sustavi za ispitivanje penetranta:

- a) prijenosni sustavi: penetrantski materijali dostupni su u malim sprej dozama za nanošenje četkom ili prskanjem. Na ovakav način penetrantsko ispitivanje se provodi na dijelovima koji se nalaze na zrakoplovnoj strukturi ili pogonskom dijelu.
- b) Stacionarni sustavi: ova vrsta opreme sastoji se od dubokih spremnika za penetrant, emulgator i razvijlač, područje za cijedenje penetranta, mjesta na kojem se ispitivani dio ostavlja za vrijeme penetriranja, područja za čišćenje s odgovarajućom rasvjetom, peći za sušenje te područja za pregled, ocjene indikacije i dokumentiranje. Stacionarni sustavi mogu biti i automatizirani. Kod njih se nanošenje penetranta, čišćenje i sušenje

obavlja automatski, a nanošenje razvijača i interpretacija indikacija provode se manualno.

### 3.2.2 Odabir metode

Višestruki su razlozi za odabir penetrantskog ispitivanja. To je površinska metoda kojom je moguće ispitivati sve materijale koji nisu previše porozni, a nema ograničenja u pogledu volumena i geometrije što je pogodno za ispitivanje velikih zrakoplovnih komponenti. Kod nekih modela zrakoplova penetrantska metoda je propisana redovitom održavanju dok se kod ostalih koristi samo u slučaju sumnje na postojanje površinskih oštećenja.

U Hrvatskoj penetrantska metoda se u redovnom održavanju koristi za zrakoplove Canadair CL-415 Waterbomber. Kod održavanja zrakoplova tipa Airbus 319 i 320, te ATR 42 ta se metoda primjenjuje samo u slučajevima udaraca (npr. stepenica u usisnik motora).

### 3.2.3 Ispitivanje dijelova

Tipični dijelovi koji se ispituju penetrantskom metodom na zrakoplovu tipa Canadair CL-415 Waterbomber su cjevasta osovina kormila pravca i vertikalna potporna noga motora.

## 3.3 Zahtjevi na ispitno osoblje

Unatoč prividnoj jednostavnosti izvođenja penetrantske metode, vrlo male varijacije u izvođenju ispitivanja mogu ispitivanje učiniti nevaljanim, jer može doći do izostanka indikacije greške na materijalu. Stoga je nužno da osoblje koje izvodi ispitivanje penetrantima bude školovano i iskusno. Sve osobe koje nanose penetrantske materijale ili pregledavaju komponente tražeći indikacije, trebaju biti osposobljene u skladu s normom HRN EN 4179 te trebaju imati certifikate.

## 4 Eksperimentalni dio

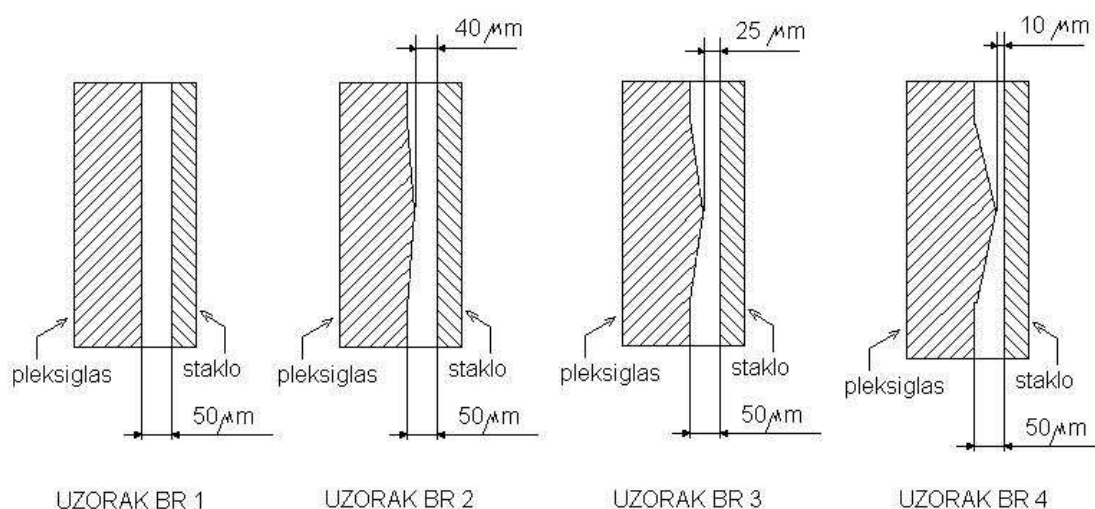
### 4.2 Utjecaj geometrije pukotine na prostiranje penetranta

Da bi se pokazalo prostiranje penetranta u prostoru nepravilne, reducirane geometrije, napravljen je sljedeći model.

Ravna pločica od pleksiglasa je izbrušena tako da joj na krajevima bude ravna površina, a u središnjem dijelu izbočenje. Ispred pločice je postavljeno staklo tako da bi rezultati pokusa bili vidljivi, te da ih je moguće mjeriti. Gornji i donji kraj pločice jednako su udaljeni od stakla. Na taj način se dobije prostor sa izbočinom na pola visine pločice između pleksiglasa i stakla. Razmak između pločice i stakla iznosi  $50\ \mu\text{m}$ . On se postiže metalnim pločicama (tvz. špijunima) koje su točno te debljine i stavljaju se između pleksiglasa i stakla.

Četiri pločice su izrezane iz malo veće metalne pločice debljine  $50\ \mu\text{m}$ , te su postavljene na četiri vrha spoja pleksiglas-staklo tako da se omogući prolazak penetranta pri pokusu sa što manje interferencije s metalnim pločicama.

Napravljena su 4 uzorka sa 4 različita iznosa izbočenja u središnjem dijelu.



Slika 4- 1 Slika uzoraka sa različitim izbočenjima

Eksperimenti su izvršeni koristeći obojeni penetrant u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.

Pleksiglas pločice su debljine 5 mm, a staklo koje se stavlja s prednje strane debljine je 2 mm.

Rezultati su snimani digitalnom kamerom, te je za svaki uzorak mjerena visina na 3 različita mjesta u određenom vremenskom razmaku. U tablicama su prikazane srednje vrijednosti visine koju je dostigao penetrant u određenom trenutku.

Postav za promatranje i bilježenje prostiranja penetranta u prostoru reducirane i nepravilne geometrije sastoji se od:

- 4 pločice od pleksiglasa dimenzija 50x50x5mm
- staklene ploče debljine 2 mm
- mjernih traka u centimetrima sa milimetarskom podjelom
- metalnih limova za fiksiranje udaljenosti krajeva pločica
- štipaljki za pridržavanje ploča jedne uz drugu
- plitke posude za penetrant
- penetrant
- digitalna kamera

Na slici (Slika 4- 2) prikazani su elementi postava prije izvođenja mjerenja.



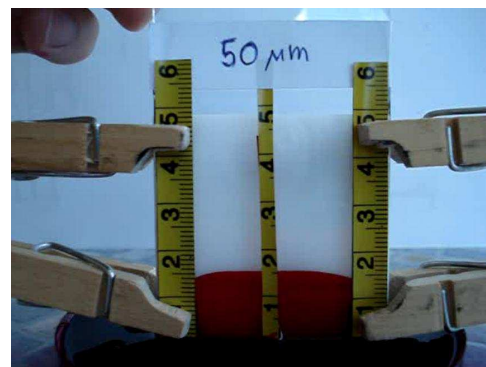
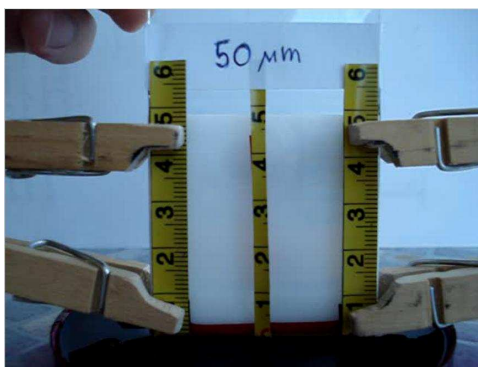
Slika 4- 2 Elementi postava

## 4.3 Izvođenje mjerenja

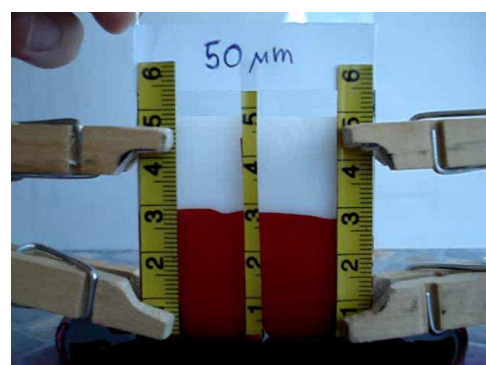
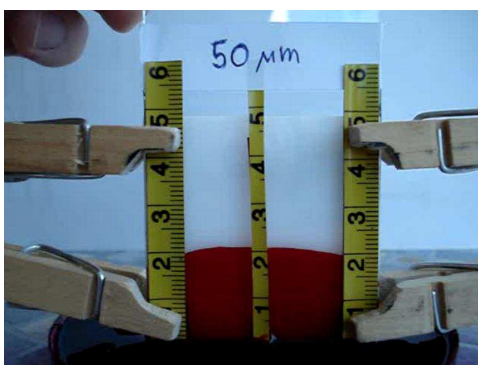
### 4.3.1 Uzorak 1

Uzorak 1 sastoji se od pleksiglas ploče nasuprot koje je stavljeno staklo. Razmak ploča je 50  $\mu\text{m}$ . Postav je namješten tako da pločice budu planparalelne. Ovaj uzorak predstavlja pukotinu koja nema na sebi nikakve neravnine ni suženja, te kao takva služi za bilježenje tzv. idealnog slučaja. U ovom eksperimentu služi kao usporedbeni primjerak na kojem bi trebalo biti jednoliko i nesmetano penjanje penetranta uz pukotinu. U tablicama i grafovima su prikazani rezultati. U svakom polju tablice upisana je srednja vrijednost tri visine koje su izmjerene na tri pozicije (prikazane na slikama) tijekom jednog uspinjanja penetranta.

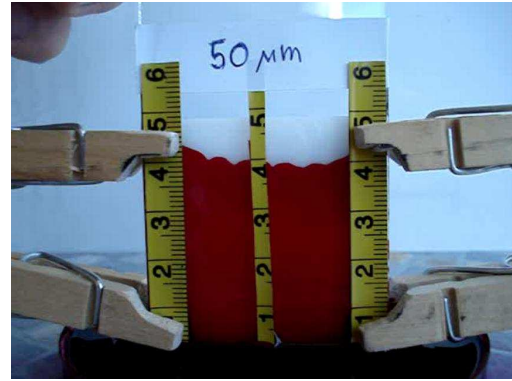
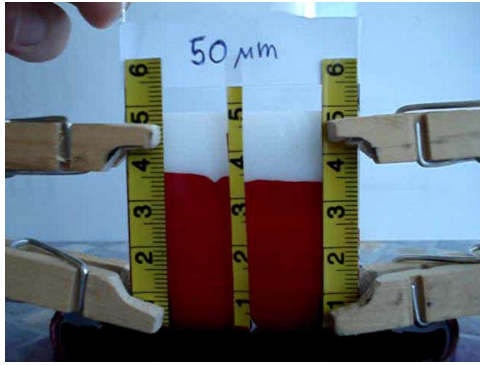
Sljedeće slike prikazuju prodiranje penetranta u različitim vremenima.



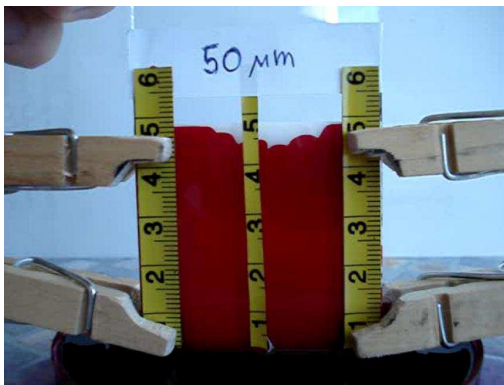
Slika 4- 3 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s



Slika 4- 4 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 10 s



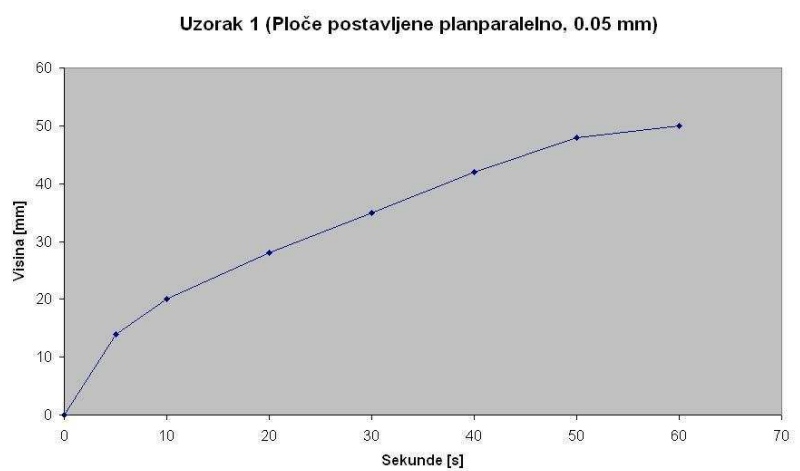
Slika 4- 5 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s



Slika 4- 6 Razina penetranta nakon 50 s

Tablica 1. Rezultati za Uzorak 1

Vrijeme (s)	Visina (mm)
0	0
5	14
10	20
20	28
30	35
40	42
50	58
53	50



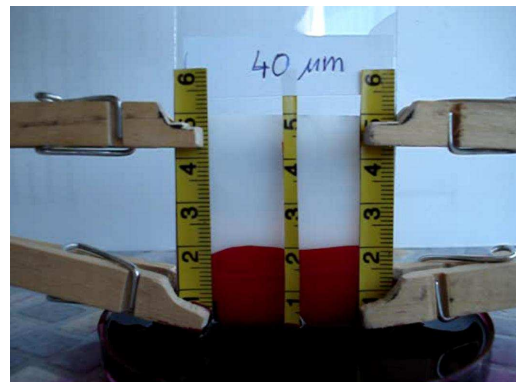
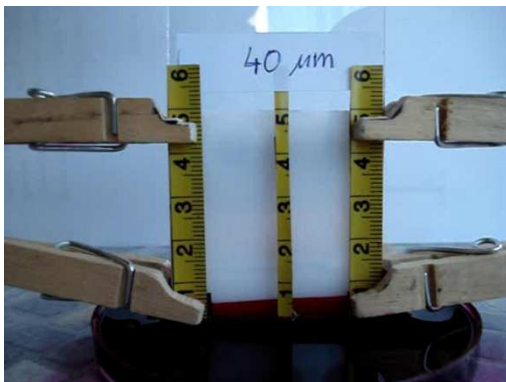
Slika 4- 7 Dijagram za Uzorak 1

### 4.3.2 Uzorak 2

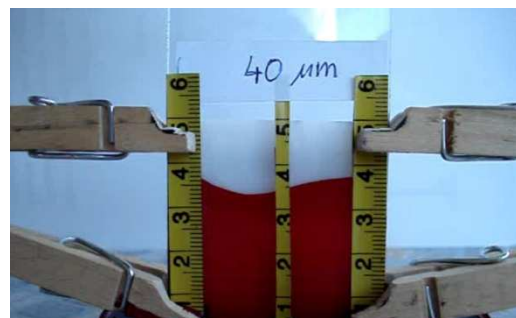
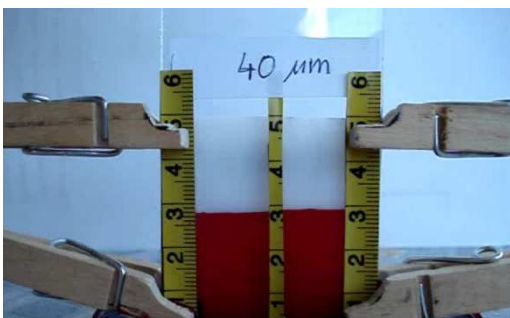
Uzorak 2 je izrađen tako da pločica od pleksiglasa ima po sredini površine uzvišenje veličine  $10\ \mu\text{m}$ , što nakon slaganja uzorka za mjerenje ostavlja najmanji razmak od  $40\ \mu\text{m}$ . U ovom radu ta veličina se koristi kao karakteristična veličina ili opisni atribut pojedinih pločica.

Očekivanje prije izvođenja mjerenja je bilo da će ovom uzorku trebati više vremena za podizanje do razine  $50\text{mm}$  nego što je trebalo prvom uzorku. Razlog tome je što uslijed kapilarnog efekta razina u kapilari se popne više što je kapilara uža, ali zbog geometrije izratka, suženje na sredini puta smanjuje protočnost penetranta kroz pukotinu, te mu zbog toga treba više vremena da ispuni prostor.

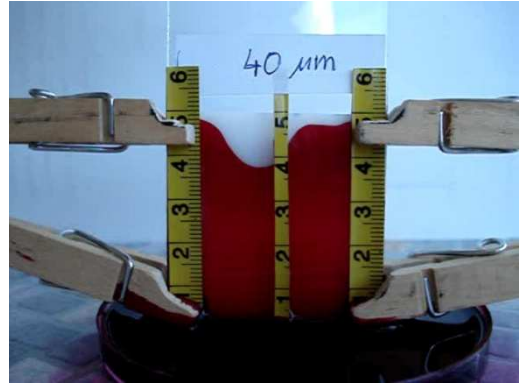
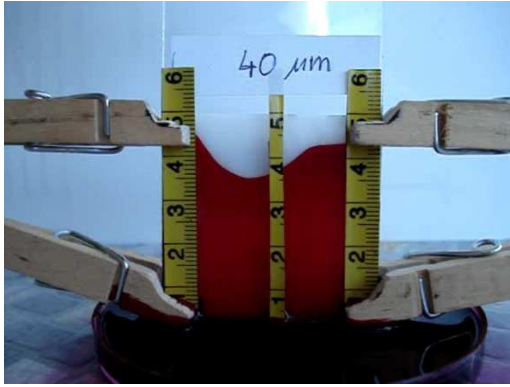
Sljedeće slike predstavljaju prodiranje penetranta za Uzorak 2 u različitim vremenima:



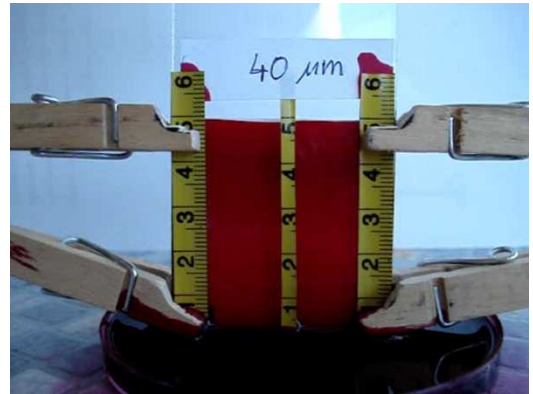
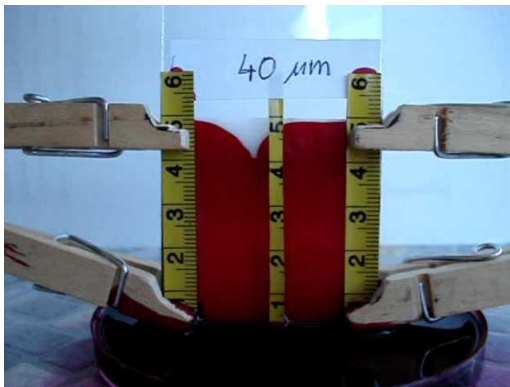
Slika 4- 8 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s



Slika 4- 9 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 20 s



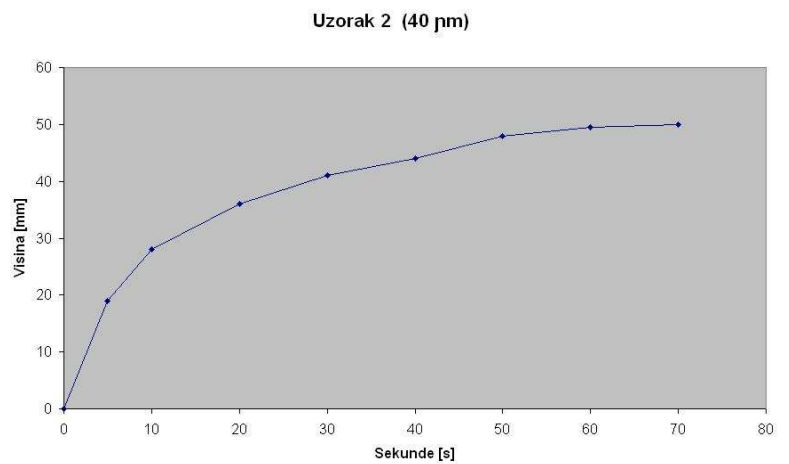
Slika 4- 10 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s



Slika 4- 11 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s

Tablica 2. Rezultati za Uzorak 2

Vrijeme (s)	Visina (mm)
0	0
5	19
10	28
20	36
30	41
40	44
50	48
60	49.5
63	50



Slika 4- 12 Dijagram za Uzorak 2

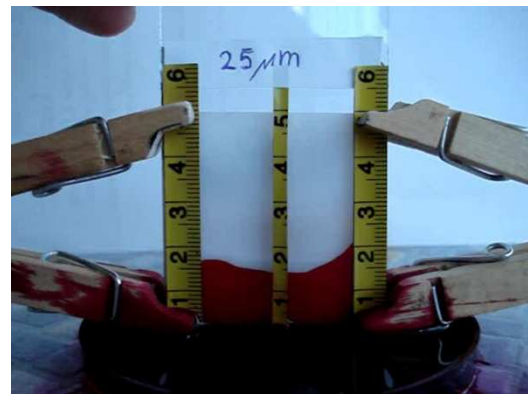
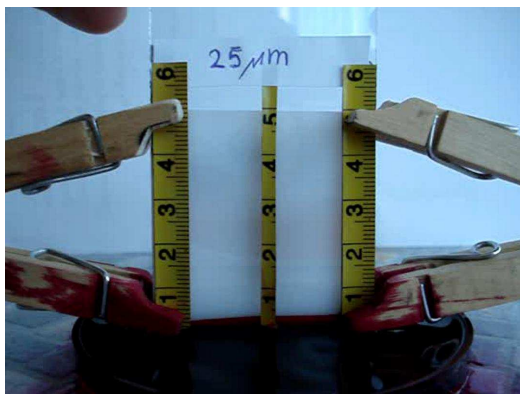


### 4.3.3 Uzorak 3

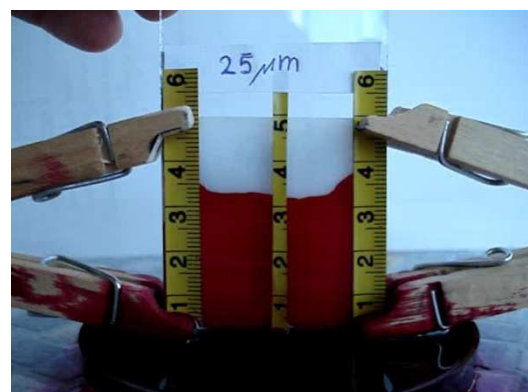
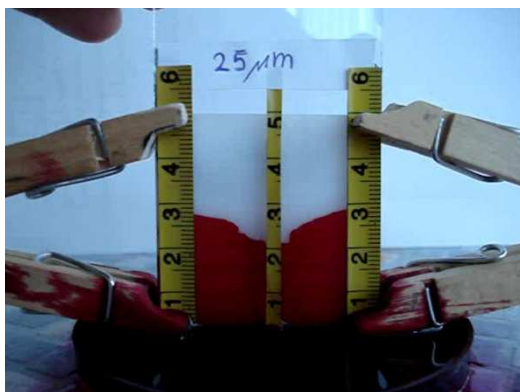
Uzorak 3 ima karakterističnu veličinu  $25\mu\text{m}$ , što znači da je u najužem dijelu razmak između ploča  $25\mu\text{m}$ , dok je na dnu i vrhu razmak  $50\mu\text{m}$ .

U ovom testu je penetrant još sporije prodirao kroz umjetnu pukotinu, iako se konačno vrijeme nije previše razlikovalo od prethodnog uzorka.

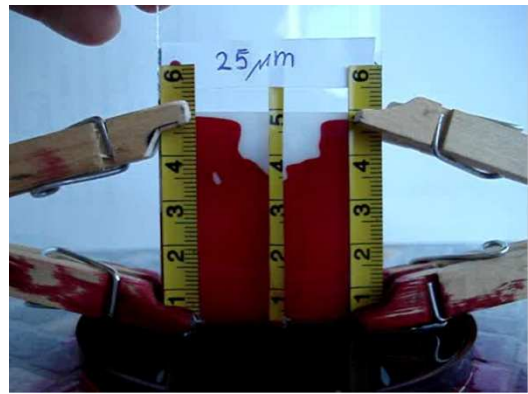
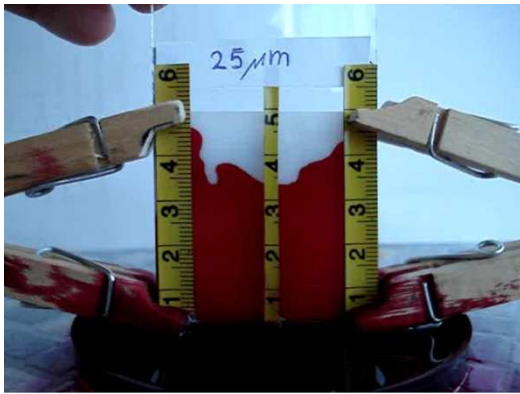
Sljedeće slike predstavljaju prodiranje penetranta za Uzorak 3 u različitim vremenima:



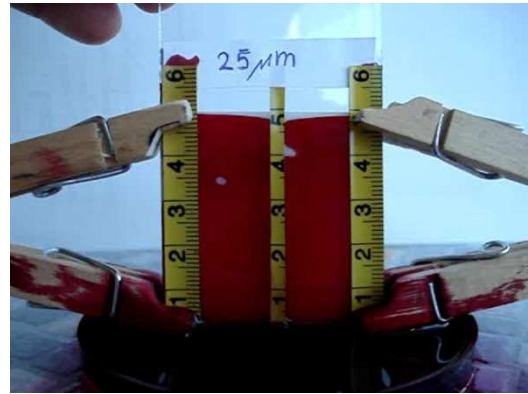
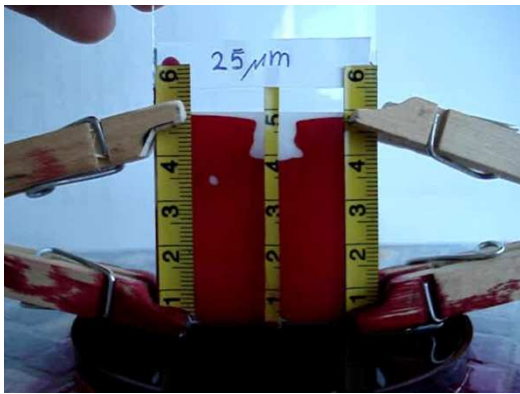
Slika 4- 13 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s



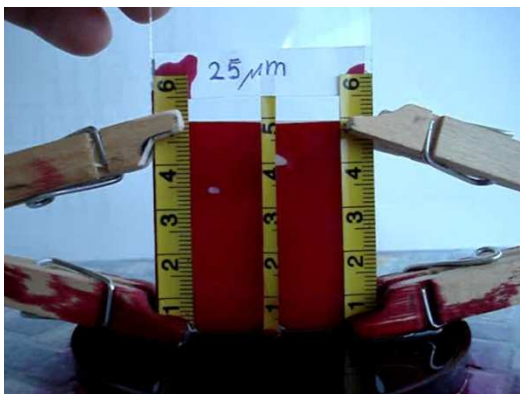
Slika 4- 14 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Razina penetranta nakon 20 s



Slika 4- 15 a) Razina penetranta nakon 30 s b) Razina penetranta nakon 40 s



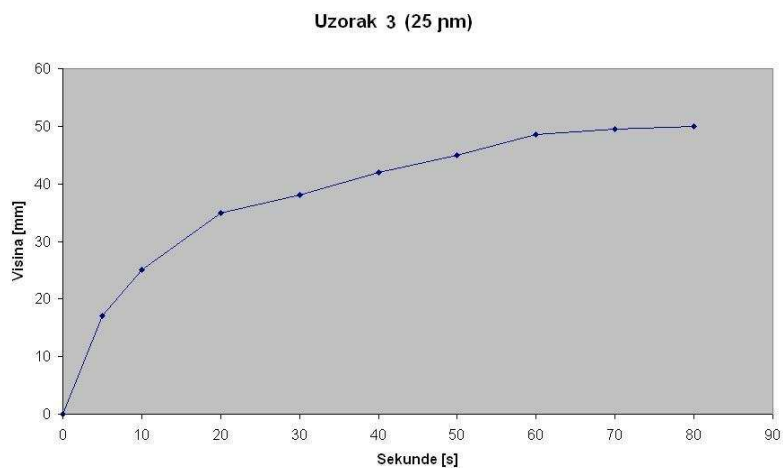
Slika 4- 16 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s



Slika 4- 17 Razina penetranta nakon 70 s

Tablica 3. Rezultati za Uzorak 3

Vrijeme (s)	Visina (mm)
0	0
5	17
10	25
20	35
30	38
40	42
50	45
60	48.5
70	49.5
71	50

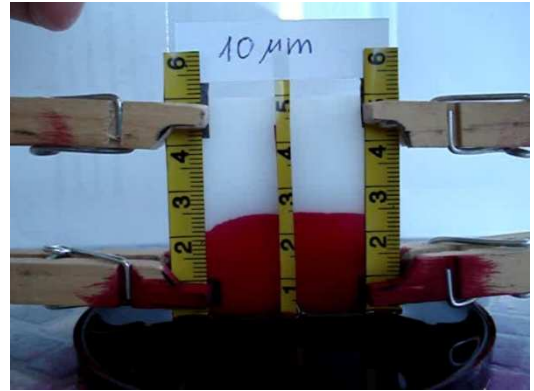
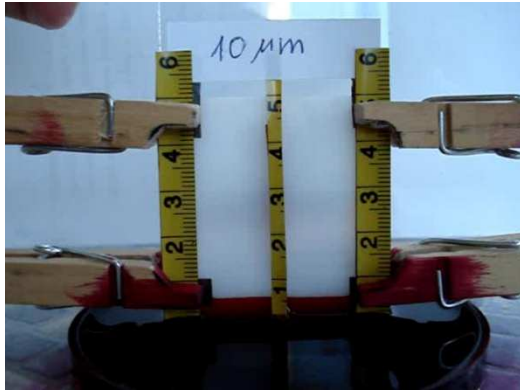


Slika 4- 18 Dijagram za Uzorak 3

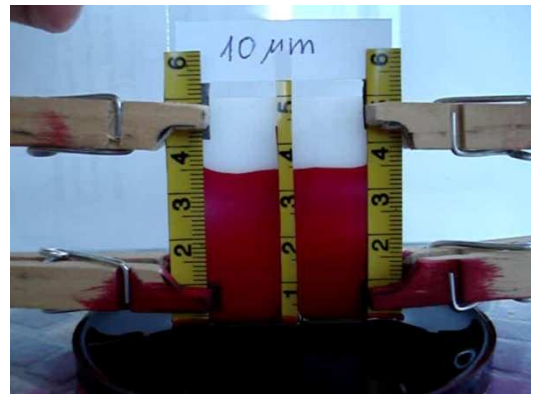
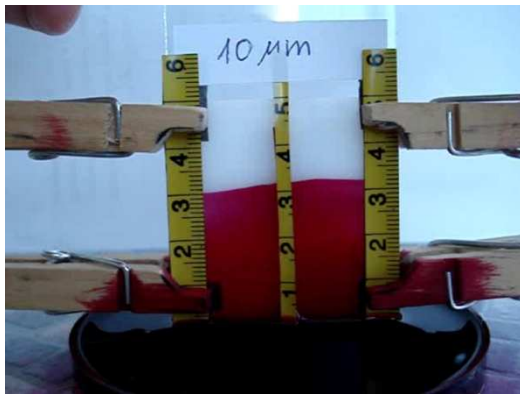
#### 4.3.4 Uzorak 4

Uzorak 4 predstavlja pukotinu velike dubine, ali sa suženjem koje drastično utječe na propagaciju penetranta kroz istu. Vrijeme penetriranja za ovaj uzorak je bilo dosta duže nego za prethodne uzorke. Razlog tome je jako mala karakteristična veličina koja iznosi samo  $10\mu\text{m}$  te gotovo onemogućava penetrantu da se penje, barem u vremenskoj domeni koja je korištena za prethodne uzorke. Kod stvarnih ispitivanja penetrantima vrijeme penetriranja se uzima mnogo duže nego što je bilo potrebno kod ovih ispitivanja. Razlog tome je što se kod jako uskih pukotina penetrant jako sporo kreće zbog svoje viskoznosti pa se uzima vrijeme za koje će penetrant sigurno prodrijeti i u najužu pukotinu (što može iznositi i nekoliko desetaka minuta).

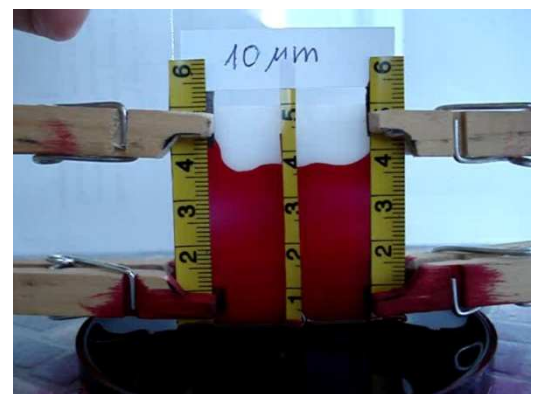
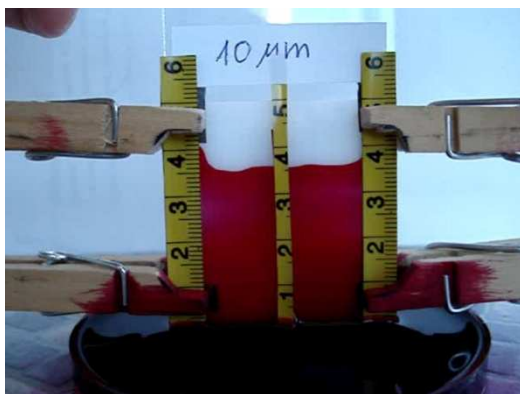
Sljedeće slike predstavljaju prodiranje penetranta za Uzorak 2 u različitim vremenima:



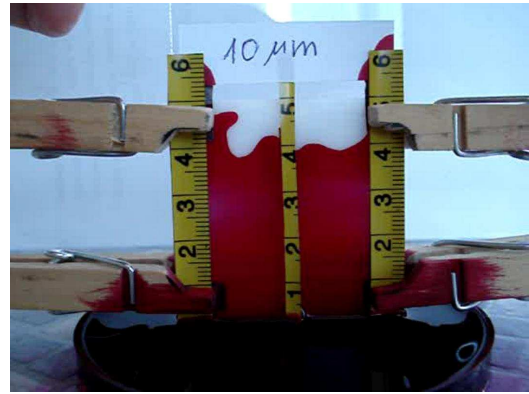
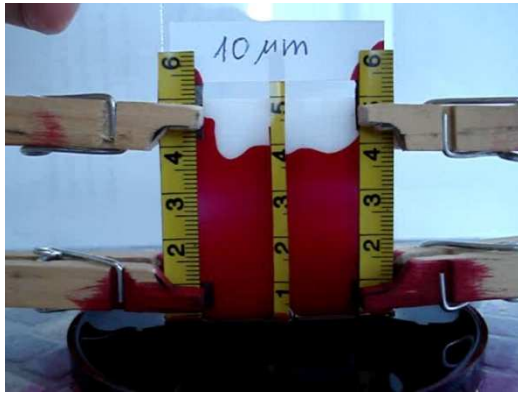
Slika 4- 19 a) Razina penetranta u trenutku uranjanja b) Razina penetranta nakon 5 s



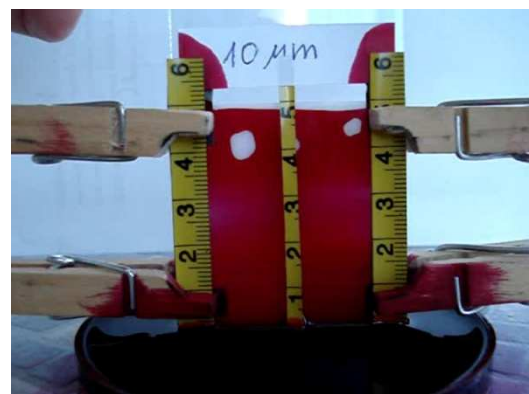
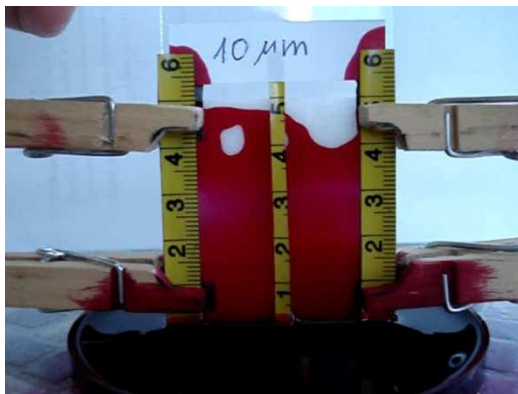
Slika 4- 20 a) Razina penetranta nakon 10 s b) Novo penetranta nakon 20 s



Slika 4- 21 a) Razina penetranta nakon 30 s c) Razina penetranta nakon 40 s



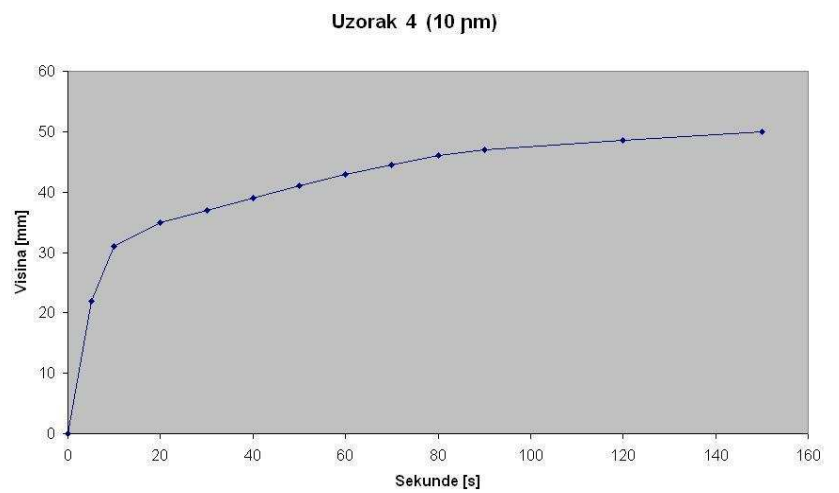
Slika 4- 22 a) Razina penetranta nakon 50 s b) Razina penetranta nakon 60 s



Slika 4- 23 a) Razina penetranta nakon 90 s b) Razina penetranta nakon 120 s

Tablica 4. Rezultati za Uzorak 4

Vrijeme (s)	Visina (mm)
0	0
5	22
10	31
20	35
30	37
40	39
50	41
60	43
90	47
120	48.5



Slika 4- 24 Dijagram za Uzorak 4

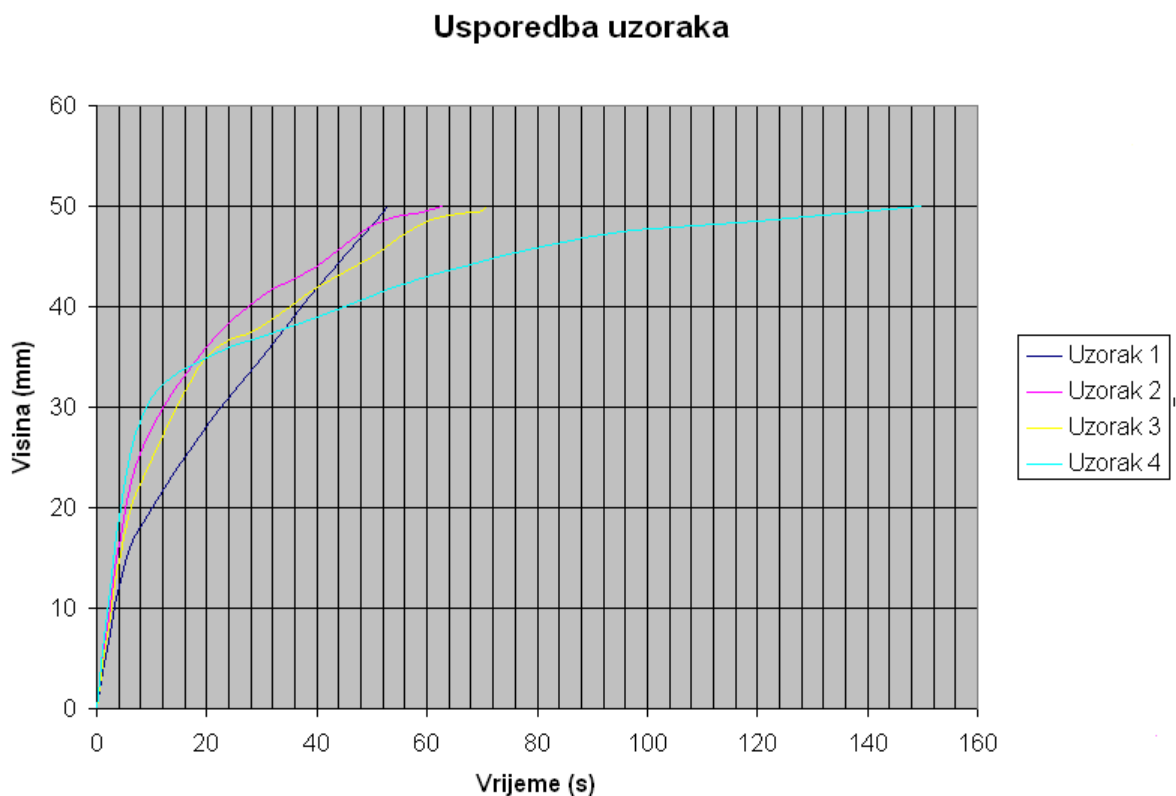
# Zaključak

U ovom završnom radu promatrana je dinamika prodiranja penetranta kroz pukotine nepravilne geometrije.

Nepravilna geometrija je stvorena obradom odvajanjem čestica na 4 uzorka na način da su sa donje i gornje strane brušene površine uz pomno mjerenje izbrušene veličine zbog vrlo uskih tolerancija od samo par mikrometara, što je za ručnu izradu jako precizno i teško dostižno.

Odvajanjem čestica sa donje i gornje strane ostavilo je u sredini pločice jednu izbočinu koja se pruža od lijeve do desne strane pločice. Ta izbočina predstavlja nepravilnu geometriju za razliku od pravilne geometrije koju bi predstavljale planparalelno postavljene ploče.

Kod 4 uzorka, na koliko je izveden ovaj eksperiment, vidljivo je produženje vremena penetriranja sa smanjenjem minimalne udaljenosti (s povećanjem izbočine u pukotini). Ova tendencija porasta vremena sa suženjem središnjeg dijela uzoraka prikazana je na sljedećem grafu.



Slika 5- 1 Usporedba vremena prodiranja svih uzoraka

Na grafu je vidljiva gore spomenuta promjena vremena, ali je također vidljiv i utjecaj izbočine na sredini visine na način prodiranja penetranta kroz pukotinu.

Vidljivo je da na Uzorku 1 nakon naglog starta, što je normalno i prisutno na svim uzorcima, postoji gotovo linearno povećanje visine penetranta s vremenom. To je zbog toga što kod Uzorka 1 nema promjene geometrije po visini pa su uvjeti za prodiranje isti cijelo vrijeme.

Kod ostalih uzoraka vidimo na početku vrlo brz start, te sve do sredine veći gradijent penjanja nego što je kod Uzorka 1. To je tako zbog načina izrade pločice. Naime, ručno izrađujući pločice brušenjem, izbočina ne počinje na točno fiksnom dijelu ploče. Taj se prijelaz iz ravnog u uzvišenje ne može točno odrediti nego, globalno gledajući, prva polovica visine djeluje kao da su ploče postavljene na klin. To pospješuje kapilarni efekt, pa se do tog dijela penetrant popne brzo, nakon čega slijedi usporavanje jer dolazi do druge polovice kad ulazi u obrnuti klin.

Nakon sredine penetrant prolazi kroz suženje i dolazi na proširenje gdje zbog povećanja razmaka pada sila uspinjanja uz kapilaru, a također je i protok ograničen zbog suženja, pa je prodiranje sporije nego kod planparalelnog uzorka.

Uzorak 4 pokazuje drastično povećanje vremena prodiranja. To se može objasniti tako što je zbog uskih tolerancija, a ručne obrade uzoraka, vjerovatno u području suženja došlo gotovo do spajanja ploča, a time i do vrlo velikog prigušenja protoka penetranta. Razmak između ploča kod ovog izratka iznosi  $10\mu\text{m}$ , a pri ručnoj obradi brušenjem uz korištenje najfinijeg brusnog papira, nesigurnost iznosi  $\pm 5\mu\text{m}$ . Zbog toga je moguće da je na mjestima razmak bio tek oko  $5\mu\text{m}$ , a to je jako mala udaljenost, gotovo na granici djelovanja penetranta.

# Literatura

[1] Darija, Vuković, Diplomski rad, Zagreb, 2006.

[2] <http://www.unze.ba/am/ip/3%20Ispitivanje%20penetrantima.pdf>

[3] <http://www.unze.ba/am/idk/2007seminarski/Besic%20Alen%20ISPITIVANJE%20PENETRANTIMA.pdf>

[4] <http://www.pomacom.unze.ba/pdf/TPC/03%20Penetrants.pdf>

[5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dye\\_penetrant\\_inspection](http://en.wikipedia.org/wiki/Dye_penetrant_inspection)