

# Sanacija lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmatskim lukom

---

**Manestar, Marin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:291861>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



MARIN MANESTAR

**SANACIJA LOPATICA TURBINSKOG KOLA ZAVARIVANJEM PLAZMATSKIM  
LUKOM**

Završni rad

Pula, veljača 2024. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli

**MARIN MANESTAR**

**SANACIJA LOPATICA TURBINSKOG KOLA ZAVARIVANJEM PLAZMATSKIM  
LUKOM**

Završni rad

**JMB: 0069048696, izvanredni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Tehnologija III**

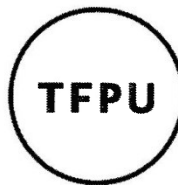
**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: 2.11 Strojarsvo**

**Znanstvena grana: 2.11.03 Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: Dario Bognolo, viši predavač**

Pula, veljača 2024. godine



Tehnički fakultet u Puli

Dario Bognolo, viši predavač  
(Ime i prezime nastavnika)

Tehnologija III  
(Predmet)

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**  
**ZADATAK TEME ZAVRŠNOG RADA**

Pristupniku Marinu Manestru

MBS: 0069048696

Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:

Sanacija lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmatskim lukom

**Sadržaj zadatka:** Napisati osnovnu hipotezu, predmet i problem istraživanja te sukladno odabranoj hipotezi postaviti ciljeve istraživanja. Obraditi proces sanacije pukotina na lopaticama Pelton turbinskog kola. Prikazati način nastanka oštećenja na lopaticama. Navesti metode provjere površinskih i dubinskih pukotina te prikazati način sanacije istih. Obraditi nakon sanacije završne obrada površine te provjera zavarenih dijelova.

Donijeti zaključak u kojemu se odražavaju bitne spoznaje u radu i kritički osvrt autora.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

**Izvanredni, Strojstvo**

Datum: srpanj, 2023.

Potpis nastavnika



### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani MARIN MANESTAR, kandidat za prvostupnika PROIZVODNOG STROJARSTVA ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

U Puli, veljača 2024 g.



## IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOGA DJELA

Ja, Marin Manestar, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, nositelju prava korištenja, da moj završni rad pod nazivom „Sanacija lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmatskim lukom“ upotrijebi da tako navedeno autorsko djelo objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te preslika u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu sa Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Potpis

U Puli, veljača 2024.g.

## ZAHVALA

Želim iskazati duboku zahvalnost mentoru Dariu Bognolu na pomoći, stručnim savjetima te konstruktivnim kritikama bez kojih ovaj rad nebi bio moguć. Također se želim zahvaliti mojim kolegama sa faksa te kolegama iz firme TSI na pomoći i idejama pri pisanju završnog rada.

Zahvaliti se želim i HEP-Proizvodnja, HE Vinodol i firmama Končar – institut za elektrotehniku te Titan Sisak d.o.o. na radnim materijalima, izvorima, slikama i primjerima.

Najveće zahvale želim izraziti mojoj obitelji i prijateljima, na njihovoj beskonačnoj podršci, ohrabrenju i strpljenju usprkos svim izazovima tijekom mog akademskog puta.

## **SAŽETAK**

Tema obrađena u ovom radu odnosi se na proces sanacije pukotina na lopaticama Pelton turbinskog kola. Prikazan je način nastanka oštećenja na lopaticama, navedene su metode provjere površinskih i dubinskih pukotina te je prikazan način sanacije istih. Nakon sanacije se vrši završna obrada površine te provjera zavarenih djelova.

**Ključne riječi:** plazma zavarivanje, Pelton turbina, Pelton lopatice, kavitacija, inspekcija oštećenja



## **SUMMARY**

The topic addressed in this paper relates to the process of repairing cracks on Pelton turbine blade. The way damages occur on the blades is presented, methods for inspecting surface and subsurface cracks are mentioned, and the repair procedure is illustrated. Following the repair, final surface finishing is performed, and the welded surfaces are inspected.

**Keywords:** plasma welding, Pelton turbine, Pelton blades, cavitation, damage inspection

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1. Svrha rada</b> .....	1
<b>1.2. Teza</b> .....	1
<b>1.3. Hipoteza</b> .....	1
<b>1.4. Metodologija</b> .....	1
<b>1.5. Zavarivanje plazmom</b> .....	2
<b>1.6. Lopatice Pelton turbine</b> .....	3
<b>1.7. Nastanak oštećenja na lopaticama turbinskog kola</b> .....	5
1.7.1. <i>Kavitacija</i> .....	5
1.7.2. <i>Erozija</i> .....	7
1.7.3. <i>Korozija</i> .....	7
1.7.4. <i>Termalni stresovi</i> .....	8
<b>2. POSTUPAK SANACIJE OŠTEĆENJA</b> .....	9
<b>3. ISPITIVANJA OŠTEĆENJA</b> .....	11
<b>3.1. Vizualno ispitivanje</b> .....	11
<b>3.2. Penetrantsko ispitivanje</b> .....	13
<b>3.3. Ispitivanje magnetskim česticama</b> .....	16
<b>3.4. Ispitivanje ultrazvukom</b> .....	20
<b>4. OPREMA KOJA SE KORISTI PRI ZAVARIVANJU</b> .....	22
<b>5. PRIPREMA PRIJE ZAVARIVANJA</b> .....	24
<b>6. PROCES ZAVARIVANJA</b> .....	25
<b>6.1. Parametri zavarivanja</b> .....	25
<b>6.2. Predgrijavanje lopatica prije zavarivanja</b> .....	27
<b>7. NADZOR ZA VRIJEME ZAVARIVANJA</b> .....	30
<b>8. POST-ZAVARIVAČKA OBRADA</b> .....	31
<b>9. LOŠE IZVEDEN ZAVAR</b> .....	33
<b>9.1. Uzroci pogrešaka</b> .....	33
<b>9.2. Analiza lošeg zavara</b> .....	34
<b>10. ZAKLJUČAK</b> .....	35
<b>11. POPIS LITERATURE</b> .....	36
<b>12. POPIS SLIKA</b> .....	37
<b>13. POPIS SIMBOLA</b> .....	38

# 1. UVOD

Rad je izrađen u suradnji s firmom Titan Sisak d.o.o. te je proces izveden u hidroelektrani HE Vinodol pod nadzorom Končar – instituta za elektrotehniku.

U radu je opisan nastanak oštećenja na lopaticama turbinskog kola Pelton turbine, način ispitivanja te proces sanacije.

## 1.1. Svrha rada

Svrha ovog završnog rada je istražiti i opisati postupak sanacije oštećenih lopatica turbinskog kola primjenom zavarivanja plazmatskim lukom. Cilj istraživanja je razumjeti kako ova tehnika može poboljšati strukturni integritet i funkcionalnost lopatica te doprinijeti produženju njihovog radnog vijeka.

## 1.2. Teza

Glavna teza ovog završnog rada je da se primjenom zavarivanja plazmatskim lukom može učinkovito sanirati oštećenja na lopaticama turbinskog kola, čime se osigurava pouzdanost i funkcionalnost turbinske opreme.

## 1.3. Hipoteza

Hipoteza ovog istraživanja temelji se na pretpostavci da će korištenje zavarivanja plazmatskim lukom rezultirati poboljšanjem strukturne stabilnosti lopatica, smanjenjem rizika od oštećenja uzrokovanih erozijom i kavitacijom te produženjem radnog vijeka lopatica Pelton turbine.

## 1.4. Metodologija

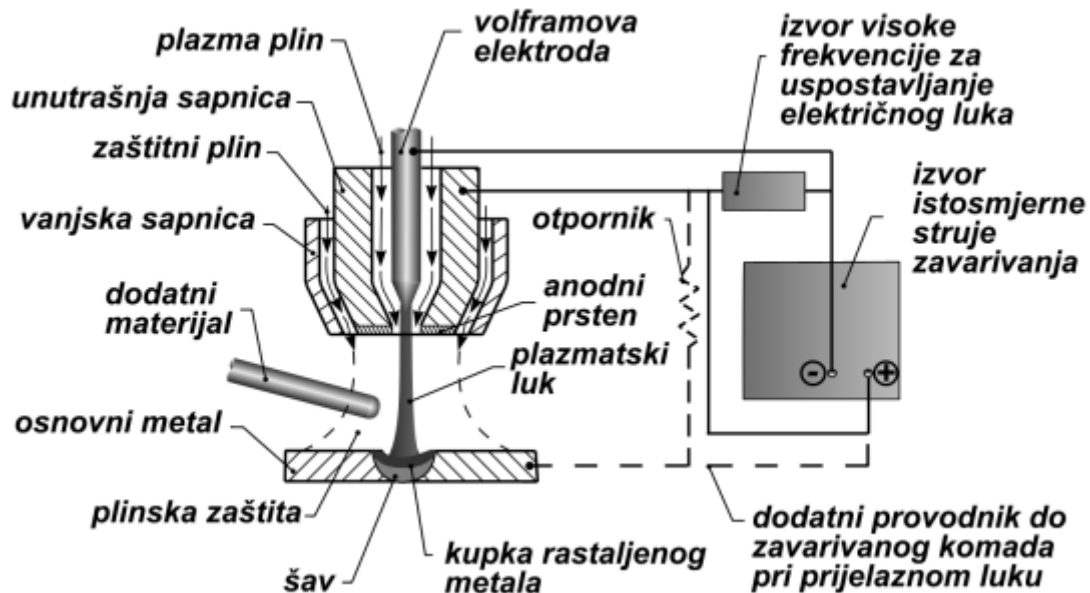
Metodologija istraživanja uključuje sljedeće korake:

- Prikupljanje relevantne literature: Analizirat će se dostupna znanstvena i tehnička literatura o plazmatskom zavarivanju i sanaciji turbinskih lopatica.
- Studija stvarnih slučajeva: Analizirat će se stvarni primjeri sanacije lopatica Pelton turbine zavarivanjem plazmatskim lukom, uključujući tehničke postavke, rezultate i ishode.
- Intervjuiranje stručnjaka: Stručnjaci u području sanacije lopatica i plazmatskog zavarivanja bit će intervjuirani kako bi se dobila njihova stručna mišljenja i iskustva.

## 1.5. Zavarivanje plazmom

Plazma zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja koje proizvodi topljenje metala zagrijavanjem električnim lukom između netaljive elektrode i obratka.

Slika 1: Zavarivanje plazmatskim lukom



(Izvor: predavanje "Zavarivanje")

U plazma zavarivanju postoje dva odvojena strujanja plina. Plazmatski plin koji teče oko netaljive volframove elektrode tvoreći jezgru plazmenog luka, općenito nije dovoljan za zaštitu luka, otopljenog bazena i materijala izloženog zagrijavanju iz atmosfere. Iz tog razloga, drugi zaštitni plin osigurava se kroz kućište pištolja, koje obavlja sklop, koji sprječava onečišćenje rastaljene kupke. Plazma plinovi koji se koriste su: argon (Ar), helij (He), vodik (H) ili mješavina pojedinih plinova.

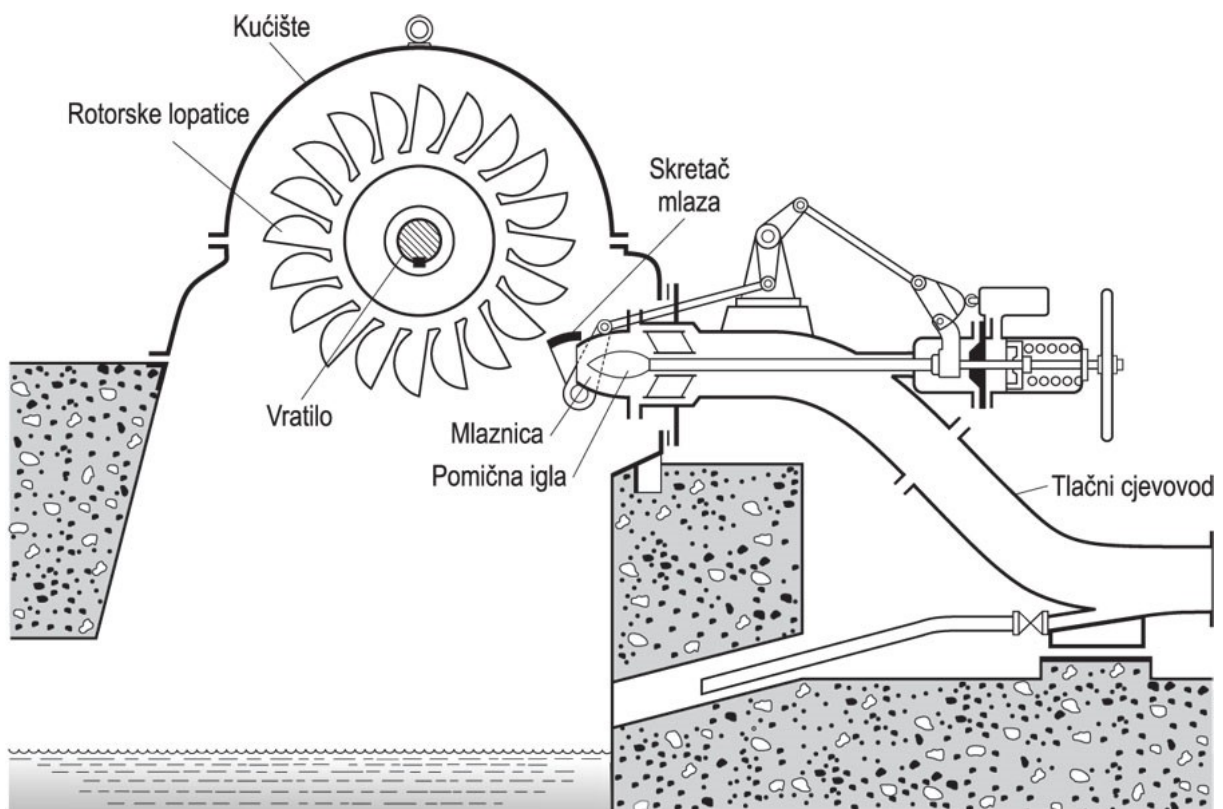
Plazma zavarivanje koristi iste principe kao i TIG zavarivanje te je iz istog razvijeno, ali za razliku od TIG postupka, temperatura i gustoća energije u ovom su procesu mnogo veće. Plazmatsko se stanje postiže kada se plin zagrije na dovoljno visoku temperaturu da se postigne njegova ionizacija, razdvajajući tako element na katione i elektrone. Temperature koje se postižu znaju biti i iznad 28 000 °C. Najveća prednost zavarivanja plazmom je u tome što je njegova zona udara dva ili tri puta niža u odnosu na TIG zavarivanje, što ga čini optimalnom tehnikom za zavarivanje metala

male debljine. Mogu se zavarivati svi metali, a najčešće se koristi za čelik, aluminij, titan, bakar i njihove legure, ne veće od 3 mm.

### 1.6. Lopatice Pelton turbine

Kolo Pelton turbine se obično sastoji od 12 do 40 lopatica, a svaka lopatica je oštrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna dijela.

**Slika 2: Pelton turbina**



(Izvor: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak.aspx?id=4955>)

Princip rada Pelton turbine temelji se na kinetičkoj energiji visokobrzinskih mlaznica vode koje ju usmjeravaju na lopatice rotora. Voda se prikuplja iz izvora (rijeka, jezera), te da bi se osigurala veća kinetička energija pri pokretanju turbine, ona se usmjerava kroz cijevi ili kanale kako bi se povećala brzina protoka. Voda se onda dovodi u tlačni cjevovod gdje se povećava tlak te se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku. Ubrzana i visokotlačna voda iz mlaznice udara u lopatice

turbine. Oblikom lopatica postiže se da one režu mlaz vode u dva dijela od kojih svaki napušta lopaticu pod kutom od gotovo 180°.

**Slika 3: Lopatica Pelton turbine**



(Izvor: [https://i.ytimg.com/vi/qbyL--6q7\\_4/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/qbyL--6q7_4/maxresdefault.jpg))

Lopaticice su izrađene od izdrživih materijala (nehrđajući čelik ili druge legure) koji mogu izdržati sile generirane vodenim mlazom pri velikim brzinama, najviše zbog njihovog otpora na koroziju i mehaničkih svojstva.

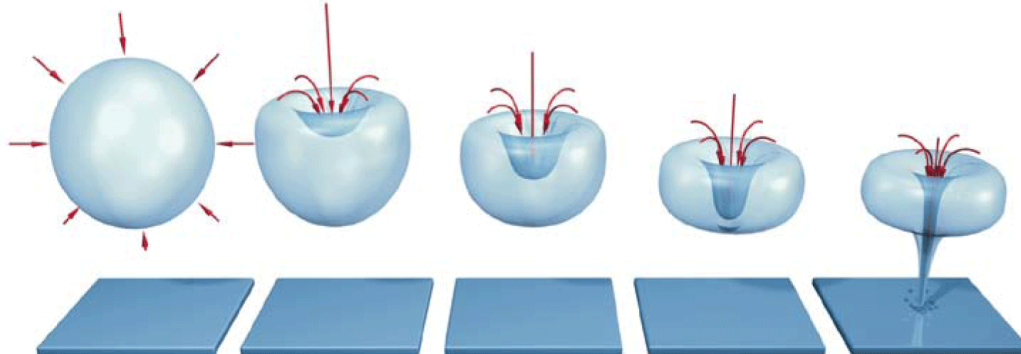
## 1.7. Nastanak oštećenja na lopaticama turbinskog kola

Oštećenja na lopaticama turbinskog kola mogu se pojaviti iz različitih razloga te uzrokovati smanjenje učinkovitosti i performansi turbine. Neki od uobičajenih uzroka nastanka oštećenja na lopaticama turbinskog kola su kavitacija, erozija, korozija, termalni stresovi.

### 1.7.1. Kavitacija

Kavitacija je najčešći uzrok nastanka oštećenja na površini lopatica. Ona je pojava kod koje brze promjene tlaka u tekućini dovode do stvaranja malih šupljina ispunjenih parom na mjestima gdje je tlak relativno nizak. Kad su podvrgnuti višem tlaku, ove šupljine, nazvane mjehurići, kolabiraju i mogu stvoriti udarni val koji je vrlo blizu mjehurića jak, ali brzo slabi udaljavanjem od mjehurića. Ako su šupljine pare blizu ili izravno na stijenci lopatice rotora, implozija stvara mlaz tekućine koji velikom brzinom udara u stijenkku ili oštricu lopatice.

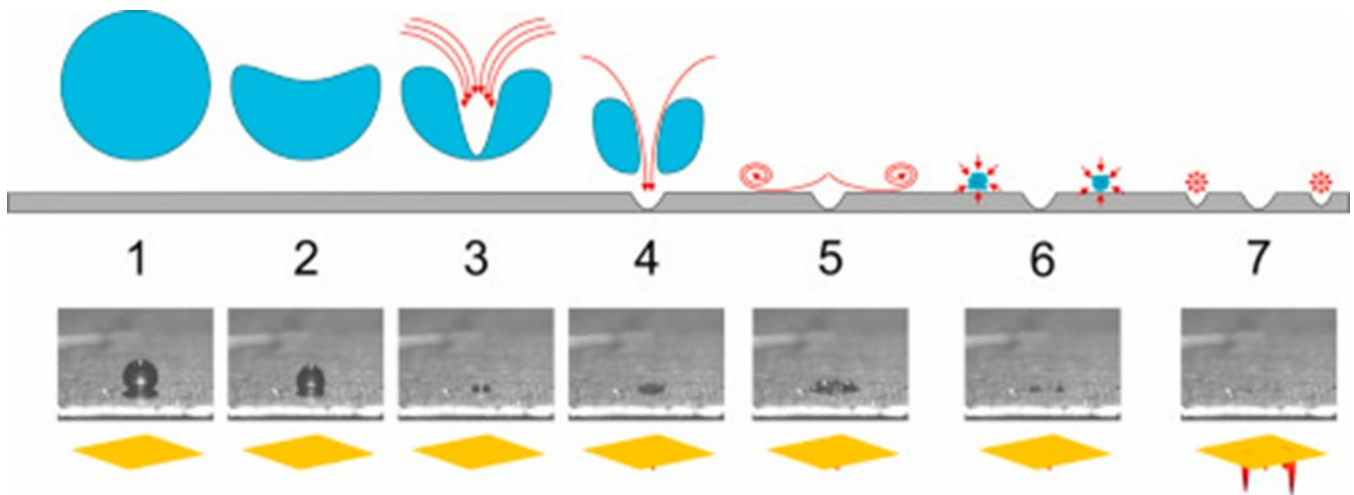
**Slika 4: Kavitacija**



(Izvor: predavanje "Zavarivanje")

Mjehurići koji se skupljaju i implodiraju u blizini metalne površine uzrokuju ciklički stres ponovljenom implozijom.

**Slika 5: Implozija mjehurića na metalnoj površini**

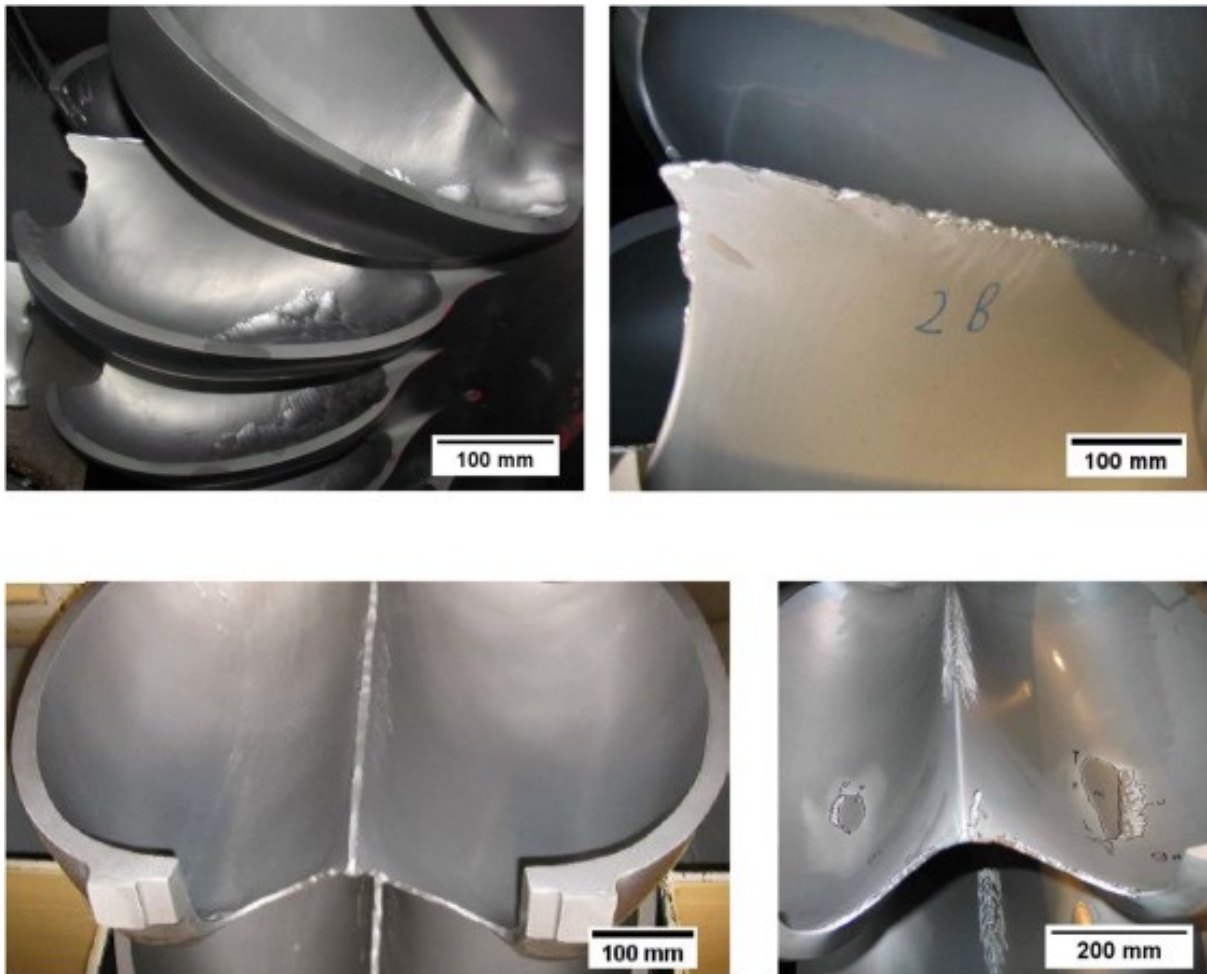


(Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164818308044>)

Budući da su udarni valovi nastali kolapsom šupljina dovoljno jaki da nanose značajne štete dijelovima, kavitacija je nepoželjna pojava u strojevima i značajan je uzrok habanja kod propelera, pumpi i lopatica u hidroelektranama. Iako je kolaps male šupljine relativno nisko energetski događaj, jako lokalizirani kolaps s vremenom može nagrizzati metale, poput čelika. Nakon što kavitacija u početku zahvati površinu, ona uveliko ubrzava eroziju. Kavitacijske jame povećavaju turbulenciju protoka tekućine i stvaraju pukotine koje djeluju kao mjesta skupljanja za dodatne kavitacijske mjehuriće. Jame također povećavaju površinu komponenata i ostavljaju za sobom zaostala naprezanja. To čini površinu sklonijom koroziji pod naponom.



**Slika 6: Posljedice kavitacije i erozije na lopaticama Pelton turbine**



(Izvor: Izvještaj oštećenja)

### 1.7.2. Erozija

Erozija se događa kada čestice abrazivnih materijala, poput pijeska, šljunka ili drugih čvrstih čestica prisutnih u vodi, udaraju u površinu lopatica s visokom brzinom. Također se pojavljuje kada mlaz vode velikom brzinom udara o površinu lopatice pod oštrijim i većim kutovima. Ovaj proces može rezultirati postupnim oštećenjem površine lopatica.

### 1.7.3. Korozija

Korozija predstavlja proces degradacije materijala uzrokovan reakcijom metala s okolnim vodenim sredstvom, obično s prisutnošću kisika i drugih agresivnih

elemenata, stvarajući korozivne produkte kao što su metalni oksidi i hidroksidi. Voda koja sadrži soli, mineralne spojeve i druge agresivne tvari može ubrzati proces korozije. Ovaj proces može ozbiljno utjecati na trajnost i učinkovitost turbine.

#### *1.7.4. Termalni stresovi*

Termalni stresovi na lopaticama Pelton turbine predstavljaju napon koji se generira unutar materijala lopatica uslijed brzih i značajnih promjena temperature. Ovakvi stresovi mogu uzrokovati deformacije, napetosti ili čak pukotine u materijalu lopatica. Termalni stresovi posebno su izraženi kada lopatice dolaze u kontakt s vodom različitih temperatura ili kada su izložene promjenama temperature u okruženju, stoga je vrlo bitna regulacija temperature vode, temperature okoline te postepeno hlađenje lopatica nakon rada.

## 2. POSTUPAK SANACIJE OŠTEĆENJA

Kako bi se osigurala kontinuirana efikasnost i sigurnost turbine, periodički se obavlja remont cijelog sustava te se u sklopu njega provjeravaju i lopatice. Provjere i sanacija oštećenja na lopaticama ključne su u osiguravanju optimalnih performansi i produljenja životnog vijeka turbine. Koraci koji su uključeni u sanaciju oštećenja lopatica turbinskog kola podrazumijevaju:

**Inspekcija oštećenja:** Prije početka pripreme zavora, oštećena područja lopatica temeljito se pregledavaju kako bi se utvrdila priroda i obim oštećenja. To uključuje vizualni pregled, penetrantsko ispitivanje, ispitivanje magnetskim česticama, ultrazvučni pregled ili neka druga vrsta ispitivanja kako bi se procijenila dubina i širina oštećenja.

**Uklanjanje oštećenja:** Sljedeći korak je uklanjanje oštećenog materijala s površine lopatica. Ovo uključuje uklanjanje pukotina, lomova ili drugih nepravilnosti. Uobičajeni postupci uklanjanja oštećenja mogu uključivati brušenje, rezanje, glodanje ili primjenu drugih tehnika za uklanjanje materijala do dubine koja je potrebna za pripremu zavora.

**Priprema zavarne površine:** Nakon uklanjanja oštećenog materijala, potrebno je pripremiti površine koje će biti zavarene. To uključuje čišćenje površine od prljavštine, masnoće, oksida ili drugih kontaminacija koje mogu narušiti kvalitetu zavarenog spoja. Površina se obično čisti četkanjem, brušenjem ili primjenom posebnih otapala kako bi se osiguralo dobro prijanjanje zavarivanog materijala.

**Odabir zavarivačkog materijala:** Prije zavarivanja, potrebno je odabrati odgovarajući zavarivački materijal. Ovo uključuje odabir zavarivačke elektrode, žice ili punila koji su kompatibilni s materijalom lopatica turbinskog kola i pružaju optimalnu čvrstoću i otpornost na toplinske i mehaničke utjecaje. Odabir pravog zavarivačkog materijala važan je faktor u osiguravanju kvalitete zavarenog spoja.

**Postavljanje zavarnih pripravaka:** Priprema zavarnih pripravaka obuhvaća postavljanje elemenata za podršku ili dodatne materijale koji će pomoći u održavanju pravilne geometrije zavarenog spoja. Ovo može uključivati upotrebu držača, vodiča,

odljevaka ili drugih pomagala koja osiguravaju stabilnost tijekom postupka zavarivanja i sprječavaju deformaciju materijala.

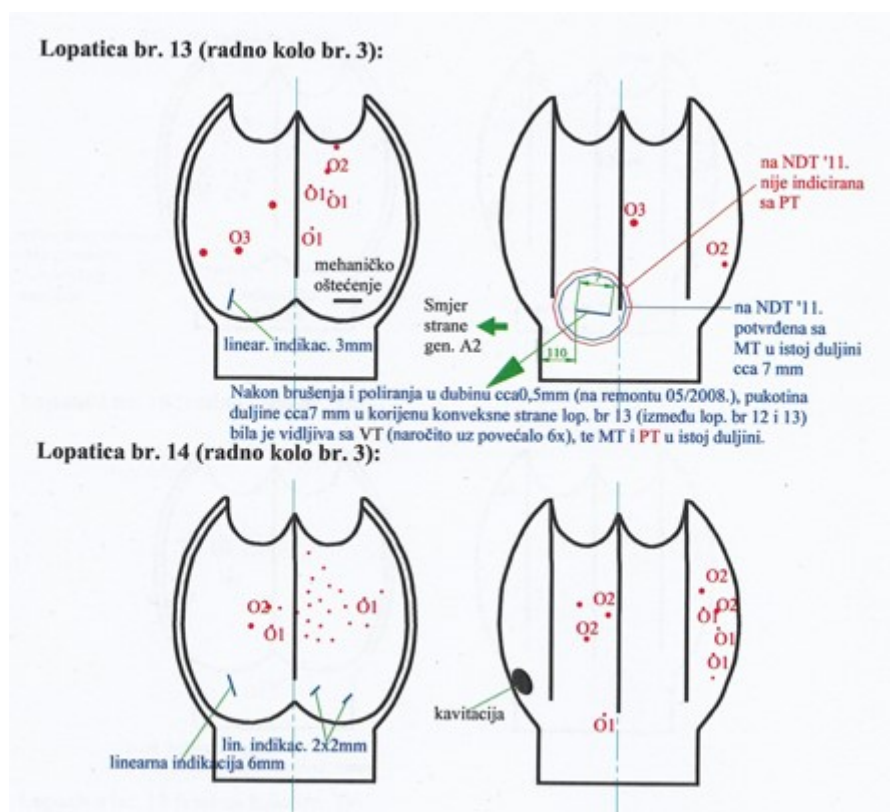
Postupak zavarivanja: Nakon pripreme zavara, provodi se postupak zavarivanja. To može uključivati primjenu različitih zavarivačkih tehnika, uz primjenu odgovarajućih parametara zavarivanja, kao što su struja, napon, brzina napredovanja i zaštitni plinovi.

Post-zavarivačka obrada: Nakon zavarivanja, obavlja se provjera područja prepravljenih oštećenja te ako su svi spojevi adekvatni i prihvatljivi, zavarni spoj prolazi kroz post-zavarivačku obradu koja može uključivati brušenje, ravnanje ili ostale postupke kako bi se postigla željena površinska glatkoća i oblik lopatica.

### 3. ISPITIVANJA OŠTEĆENJA

Ispitivanje oštećenja na lopaticama turbinskog kola je važan postupak u inspekciji i održavanju turbinskih sustava. Lopatice su ključne komponente turbinskog kola koje pretvaraju energiju strujanja fluida u mehaničku energiju rotacije. Budući da su izložene visokim brzinama, ekstremnim temperaturama i kemijski agresivnim okruženjima, podložne su oštećenjima koja mogu utjecati na performanse turbine i sigurnost rada.

Slika 7: Prikaz oštećenja



(Izvor: Izvještaj oštećenja)

#### 3.1. Vizualno ispitivanje

Vizualno ispitivanje (VT) provodi stručnjak koji ima iskustvo i znanje o turbinskim sustavima. Postupak uključuje temeljiti pregled svake pojedinačne lopatice turbinskog kola kako bi se identificirala moguća oštećenja. Ključni koraci u procesu vizualnog ispitivanja su:

Priprema: Prije početka ispitivanja, potrebno je osigurati sigurno okruženje i pristup lopaticama turbinskog kola. To uključuje isključivanje energije i uklanjanje svih potrebnih zaštitnih poklopaca ili prepreka.

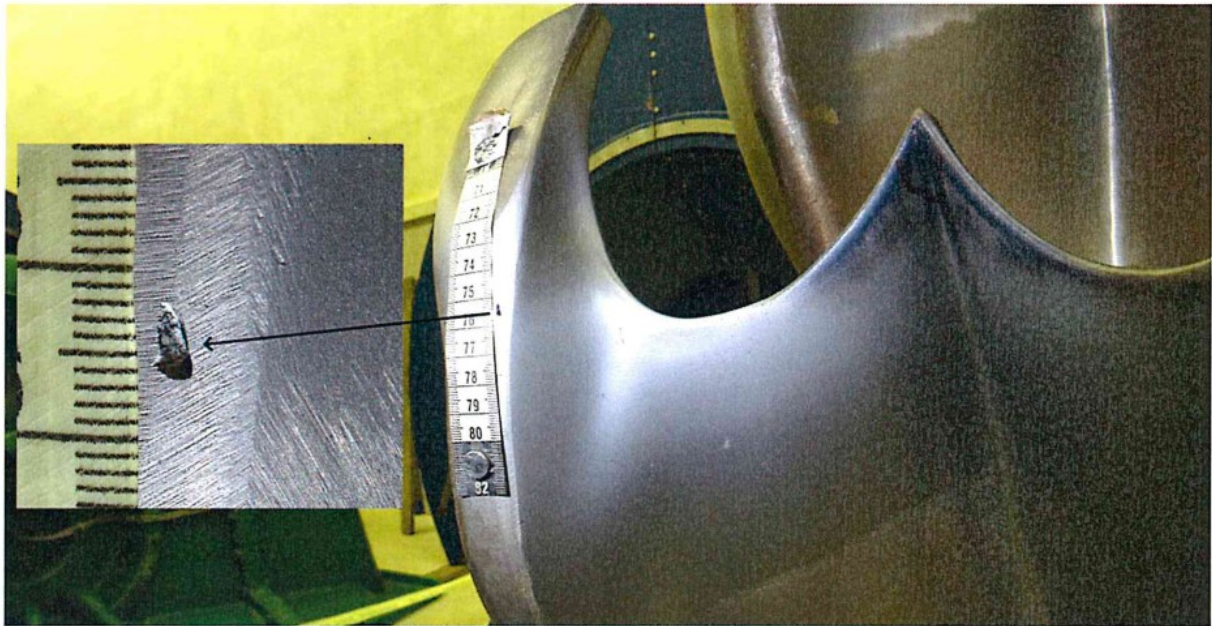
Vanjski pregled: Prvi korak je provjera vanjskih površina lopatica. Stručnjak će pažljivo pregledati svaku lopaticu kako bi identificirao bilo kakve vidljive pukotine, lomove ili deformacije. Također će provjeriti površine na prisutnost korozije, erozije ili bilo kakvih drugih oblika oštećenja.

Unutarnji pregled: Nakon vanjskog pregleda, može biti potrebno provesti unutarnji pregled lopatica. To se obično postiže pomoću specijalnih uređaja, poput fleksibilnih endoskopa ili sličnih alata koji omogućuju stručnjaku da pregleda unutarnje dijelove lopatica. Ovo je posebno važno za identifikaciju skrivenih oštećenja koja nisu vidljiva izvana.

Mjerenje i dokumentacija: Tijekom vizualnog ispitivanja, stručnjak će često koristiti mjerne instrumente poput šublera, mikroskopa ili drugih alata kako bi mjerio dimenzije oštećenja, poput duljine pukotine ili dubine korozije. Ti podaci se zatim dokumentiraju i bilježe za daljnju analizu.

Procjena oštećenja: Nakon završetka vizualnog ispitivanja, stručnjak će procijeniti prirodu oštećenja i utvrditi njihovu ozbiljnost. To može uključivati određivanje je li oštećenje kritično i treba li poduzeti hitne popravke ili zamjene lopatica. Osim toga, stručnjak će možda preporučiti dodatne testove ili inspekcije, poput testiranja materijala ili analize ciklusa opterećenja.

## Slika 8: Oštećenje lopatice



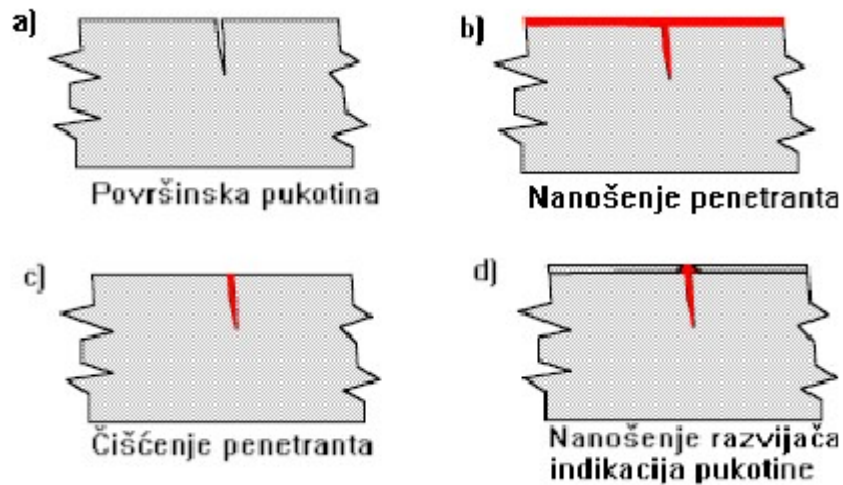
Slika 3, turbinsko kolo T2, mehaničko oštećenje na lopatici broj 13

(Izvor: Izvještaj oštećenja)

### 3.2. Penetrantsko ispitivanje

Penetrantsko ispitivanje (PT) je jedna od metoda koja se često koristi za detekciju površinskih oštećenja na lopaticama turbinskog kola. Ova tehnika omogućuje otkrivanje pukotina, nepravilnosti, poroznosti ili drugih nedostataka koji su prisutni na površini materijala. Jednostavno je za primjenu i vrlo osjetljivo na oštećenja, što ga čini korisnim alatom u vizualnom ispitivanju turbinskih lopatica. Penetrantsko ispitivanje sastoji se od:

## Slika 9: Penetrantsko ispitivanje



(Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:261573>)

Priprema (Slika 9a): Prije početka ispitivanja, lopatice turbinskog kola moraju biti temeljito očišćene od prljavštine, masnoće ili ostataka premaza. To se obično postiže primjenom posebnih otapala za čišćenje ili sredstava za odmašćivanje. Čišćenje je ključno jer omogućuje penetrantu da prodre u potencijalne pukotine ili oštećenja.

Nanošenje penetranta (Slika 9b): Nakon čišćenja, penetrant se nanosi na površinu lopatica. Penetrant je tekućina koja se sastoji od boje koja je vidljiva i fluorescentnog pigmenta koji se može vidjeti pod UV svjetlom. Penetrant se ravnomjerno raspršuje, šprica ili nanosi četkom na površinu lopatica i ostavlja se da djeluje određeno vrijeme. To vrijeme zvano je vrijeme penetracije i omogućuje penetrantu da prodre u eventualna oštećenja.

Uklanjanje viška penetranta (Slika 9c): Nakon završetka vremena penetracije, višak penetranta pažljivo se uklanja s površine lopatica. To se može obaviti brisanjem, ispiranjem vodom ili primjenom posebnih sredstava za uklanjanje. Važno je temeljito ukloniti višak penetranta kako ne bi ometao sljedeći korak.

Nanošenje razvijaa (Slika 9d): Nakon uklanjanja viška penetranta, na površinu lopatica nanosi se razvijaa. Razvijaa apsorbira penetrant iz oštećenja i stvara kontrast koji omogućuje vizualno otkrivanje oštećenja. Razvijaa se obično nanosi kao sprej ili pomoću četke.



Vizualna inspekcija: Nakon nanošenja razvijaača, provodi se vizualna inspekcija lopatica. Oštećenja ili nepravilnosti koje su prethodno bile nevidljive postaju vidljive kao crvene ili fluorescentne mrlje na površini lopatica. Inspektor pažljivo pregledava svaku lopaticu kako bi identificirao prisutnost oštećenja i procijenio njihovu veličinu, oblik i ozbiljnost.

Čišćenje i dokumentacija: Nakon završetka penetrantskog ispitivanja, penetrant i razvijaač se temeljito uklanjaju s površine lopatica. Rezultati ispitivanja, uključujući fotografije ili bilješke o otkrivenim oštećenjima, dokumentiraju se za kasniju analizu i potrebne popravke.

### Slika 10:Rezultat penetrantskog ispitivanja

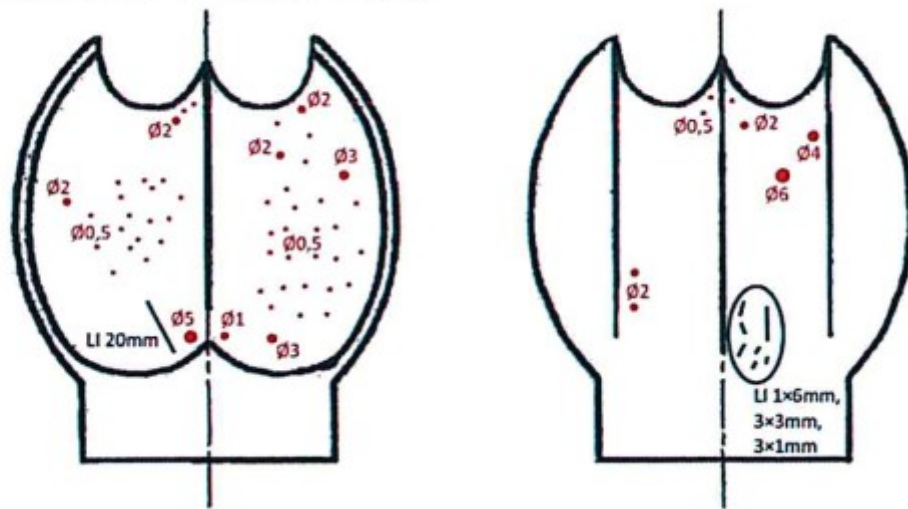


Slika 4, turbinsko kolo T2, lopatica broj 15

(Izvor: Izvještaj oštećenja)

## Slika 11: Prikaz oštećenja

### Lopatica br.15(radno kolo br.2, 135/2):

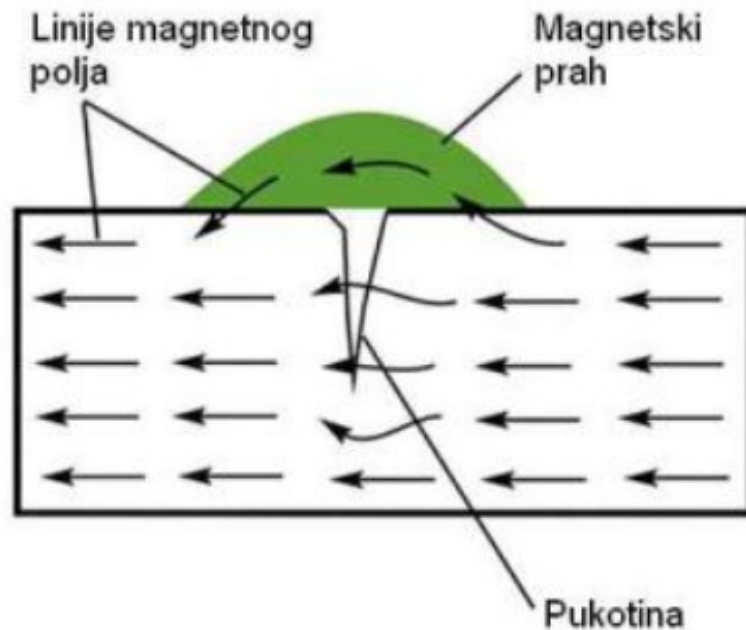


(Izvor: Izvještaj oštećenja)

### 3.3. Ispitivanje magnetskim česticama

Ispitivanje magnetskim česticama (MT), poznato i kao ispitivanje magnetskom praskavinom (MPI), je još jedna učestala metoda za otkrivanje površinskih oštećenja na lopaticama turbinskog kola. Ova tehnika se koristi za otkrivanje pukotina, lomova, nepravilnosti ili drugih nedostataka koji mogu biti prisutni na površini materijala. Ispitivanje magnetskim česticama je vrlo osjetljivo i može otkriti i najmanja oštećenja, što ga čini ključnim alatom u inspekciji turbinskih lopatica te obuhvaća sljedeće korake:

**Slika 12: Magnetsko ispitivanje**



(Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:978848>)

**Priprema:** Prije početka ispitivanja, lopatice turbinskog kola trebaju biti temeljito očišćene od prljavštine, masnoće ili ostataka premaza. Ovaj korak je važan jer čistoća površine omogućuje bolje prijanjanje magnetskih čestica i povećava osjetljivost ispitivanja.

**Nanošenje magnetske praskavine:** Nakon čišćenja, magnetska praskavina se ravnomjerno nanosi na površinu lopatica. Magnetska praskavina je fini prah koji sadrži magnetne čestice. Može se nanijeti raspršivanjem, špricanjem ili primjenom pomoću četke. Praskavina se rasprostrani preko površine lopatica i prekriva sva područja koja se žele ispitati.

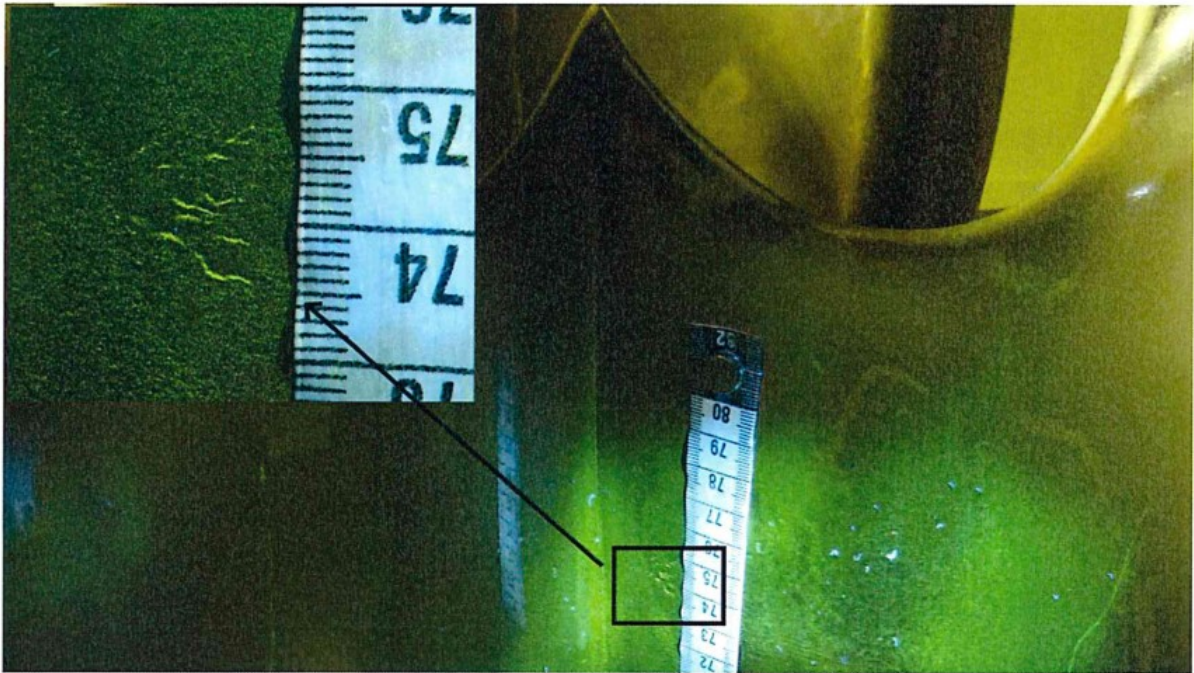
**Stvaranje magnetskog polja:** Nakon nanošenja magnetske praskavine, stvara se magnetsko polje koje prolazi kroz lopatice. To se može postići korištenjem elektromagneta ili trajnih magneta koji su smješteni oko lopatica.

**Vizualna inspekcija:** Kada je magnetsko polje aktivirano, magnetske čestice se usmjeravaju prema područjima površinskih nedostataka. Bilo kakvo oštećenje,

pukotina ili lom na površini lopatica privlačit će magnetske čestice i stvarati karakteristične crte ili mrlje. Inspektor pažljivo pregledava površinu lopatica kako bi identificirao prisutnost ovih magnetnih znakova.

Čišćenje i dokumentacija: Nakon završetka inspekcije, magnetska praskavina se pažljivo uklanja s površine lopatica. Ovo se obično postiže četkanjem ili brisanjem. Rezultati ispitivanja, uključujući fotografije ili bilješke o otkrivenim oštećenjima, dokumentiraju se za daljnju analizu i potrebne popravke.

Slika 13: Rezultat magnetskog ispitivanja

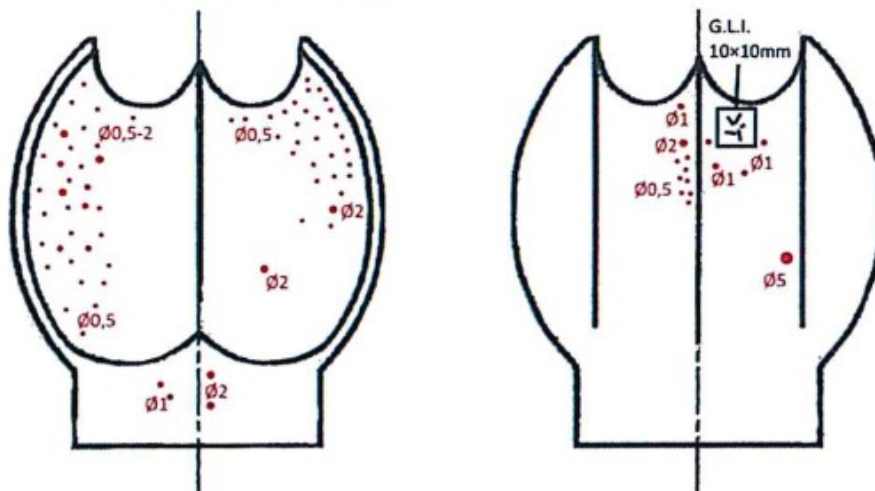


Slika 3, linearne indikacije na lopatici broj 13

(Izvor: Izvještaj oštećenja)

Slika 14: Prikaz oštećenja

Lopatica br.13(radno kolo br.2, 135/2):



(Izvor: Izvještaj oštećenja)

### 3.4. Ispitivanje ultrazvukom

Ispitivanje ultrazvukom je visoko sofisticirana i vrlo pouzdana metoda za otkrivanje oštećenja na lopaticama turbinskog kola. Ova tehnika koristi ultrazvučne valove visoke frekvencije kako bi se prodrlo u materijal i identificirala prisutnost unutarnjih oštećenja poput pukotina, lomova ili drugih nepravilnosti. Ispitivanje ultrazvukom je neinvazivno, što znači da ne zahtijeva fizički kontakt s materijalom, što je posebno važno kod inspekcije osjetljivih komponenti kao što su lopatice turbinskog kola. Opći postupak ispitivanja ultrazvukom obuhvaća sljedeće procese:

**Priprema:** Prije početka ispitivanja, lopatice turbinskog kola trebaju biti očišćene kako bi se uklonili ostaci prljavštine, masnoće ili premaza. Čistoća površine osigurava bolji kontakt ultrazvučne sonde s površinom lopatica i poboljšava kvalitetu rezultata ispitivanja.

**Primjena kontaktnog gela:** Na površinu lopatica nanosi se poseban kontaktni gel. Kontaktni gel omogućuje bolji prijenos ultrazvučnih valova između ultrazvučne sonde i površine lopatica, poboljšavajući tako kvalitetu i preciznost ispitivanja.

**Primjena ultrazvučne sonde:** Ultrazvučna sonda je uređaj koji generira i prima ultrazvučne valove. Sonda se postavlja na površinu lopatica i pomjera se preko područja koje se ispituje. Ultrazvučni valovi prodiru u materijal lopatica i odbijaju se od unutarnjih struktura, stvarajući povratni odraz.

**Analiza povratnog odraza:** Povratni odraz ultrazvučnih valova analizira se pomoću posebnog uređaja, koji se naziva ultrazvučni ispitivač. Ovaj uređaj pretvara povratne signale u grafikone i prikazuje ih na zaslonu. Inspektor proučava ove grafikone kako bi identificirao prisutnost oštećenja, kao što su pukotine, lomovi ili druge nepravilnosti. Također se mjeri dubina i veličina oštećenja kako bi se procijenila ozbiljnost i potrebne popravke.

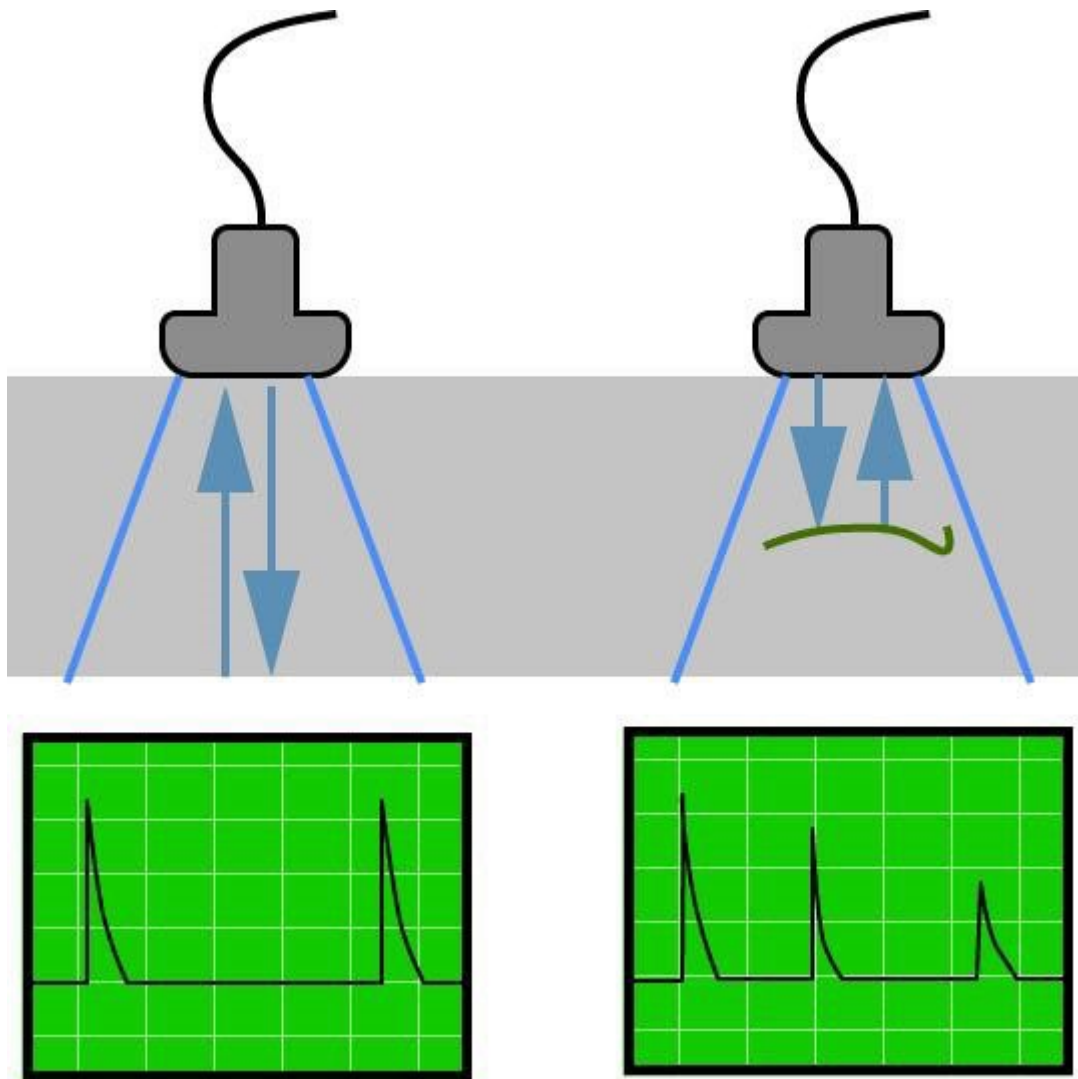
**Dokumentacija rezultata:** Rezultati ispitivanja ultrazvukom dokumentiraju se fotografijama, zapisima i izvješćima. Ovi dokumenti služe kao referenca za kasniju analizu i odlučivanje o potrebnim popravcima ili zamjeni lopatica.

Ispitivanje ultrazvukom pruža detaljne informacije o unutarnjem stanju lopatica turbinskog kola. Ona je vrlo osjetljiva i može otkriti i najmanje pukotine ili



nepravilnosti koje nisu vidljive golim okom. Ova tehnika omogućuje precizno procjenjivanje stanja lopatica i pravovremeno otkrivanje potencijalnih problema, osiguravajući siguran i pouzdan rad turbinskih sustava.

**Slika 15: Ispitivanje ultrazvukom**



(Izvor: <https://gcotter.com/ultrasonic-testing>)

#### 4. OPREMA KOJA SE KORISTI PRI ZAVARIVANJU

Sanacija lopatica zahtijeva posebnu zavarivačku opremu i tehniku kako bi se osigurala visoka kvaliteta zavara. Kombinacija ručne plazmatske baklje, generatora, zaštitne opreme, alata za pripremu površine i drugih pomoćnih uređaja ključna je za preciznu i uspješnu sanaciju lopatica, osiguravajući njihovu funkcionalnost i trajnost u turbinskom sustavu.

Ručna plazmatska baklja - koristi plazmu za generiranje topline potrebne za zavarivanje. Ručna baklja omogućuje zavarivaču precizno usmjeravanje plazme prema oštećenom području i kontrolu nad parametrima zavarivanja kao što su struja, napon i protok plina.

**Slika 16: Zavarivački generator**



(Izvor: <https://www.migatronic.com/en/products-and-solutions/welding-machines/pi-plasma/>)



Zavarivački generator – koristi se za napajanje plazmatske baklje te omogućuje regulaciju struje i napona potrebnih za stvaranje i održavanje plazme. Generatori često imaju mogućnost podešavanja različitih zavarivačkih programa i parametara ovisno o materijalu i oštećenju.

Rukavice i zaštitna oprema - kod ručne sanacije lopatica, zavarivač mora biti opremljen odgovarajućom osobnom zaštitnom opremom, uključujući rukavice, zaštitne naočale, odijelo od otpornih materijala i respirator ako je potrebno. Ova oprema štiti zavarivača od opasnih zračenja, iskri, prašine i kemikalija.

Ručni alati za pripremu površine - prije zavarivanja, površina mora biti temeljito pripremljena. Ručni alati poput brusilice, četki, abrazivnih materijala i drugih alata koriste se za uklanjanje korozije, premaza i nečistoća te za pripremu površine za zavarivanje.

Pomoćni uređaji za praćenje i kontinuiranu kontrolu - mogu biti uređaji koji mjere struju, napon, protok plina i druge relevantne parametre kako bi se osigurala dosljednost i kvaliteta zavara tijekom cijelog procesa.

Uređaji za termičku obradu - nakon zavarivanja, može biti potrebno provesti termičku obradu kako bi se smanjili termalni stresovi i poboljšala strukturna stabilnost materijala. Ručni uređaji poput peći za ublažavanje napetosti ili indukcijskih grijača mogu se koristiti za kontroliranu termičku obradu.

## 5. PRIPREMA PRIJE ZAVARIVANJA

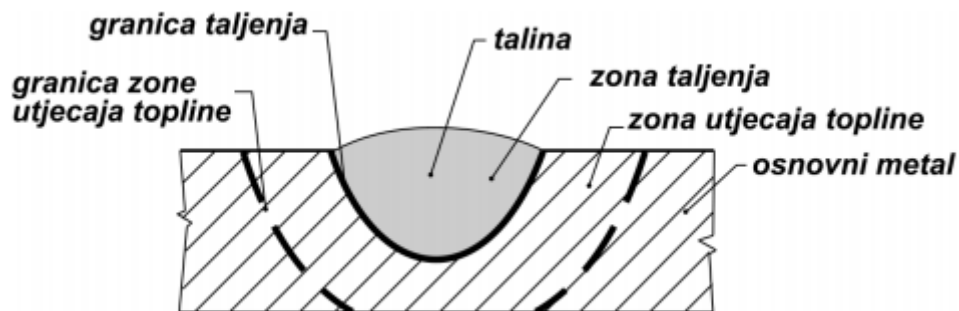
Nakon inspekcije, potrebno je temeljito čišćenje površine oštećenja. Uklanjanje prljavštine, korozije ili ostatka oštećenog materijala osigurava dobar kontakt između zavara i materijala lopatica. Čistoća površine je temeljni preduvjet za uspješno zavarivanje i trajnu sanaciju.

Poslije čišćenja površine, potrebno je pripremiti mjesto zavara žlijebljenjem. Ova tehnika je ključna kod popravka oštećenja jer se njime stvara dodatna površina za prijanjanje dodatnog materijala čime se osigurava čvrstoća i stabilnost zavara kako bi zavar bio izdržljiv i pouzdan pod visoko hidrodinamičkim opterećenjem.

## 6. PROCES ZAVARIVANJA

Kod plazma navarivanja prahom, taljenje dodatnog materijala se zbiva u plazma luku vrlo visoke temperature (cca. 20 000°C) što znači olakšano i brže taljenje dodatnog materijala, uz niske jakosti struje, tako da sami postupak slični tvrdom lemljenju. Zbog karakteristike plazmatskog luka i brzine zavarivanja, miješanje materijala je vrlo nisko u odnosu na TIG postupak. Olakšano taljenje dodatnog materijala također smanjuje vrijeme interakcije sa osnovnim materijalom pa će u slučaju navarivanja temperaturno osjetljivih materijala izbjeći pojava stvaranja grubo-zrnate strukture, a sama struktura metala zavara će ostati vrlo gusta.

**Slika 17: Zone kod zavarivanja**



(Izvor: predavanje "Zavarivanje")

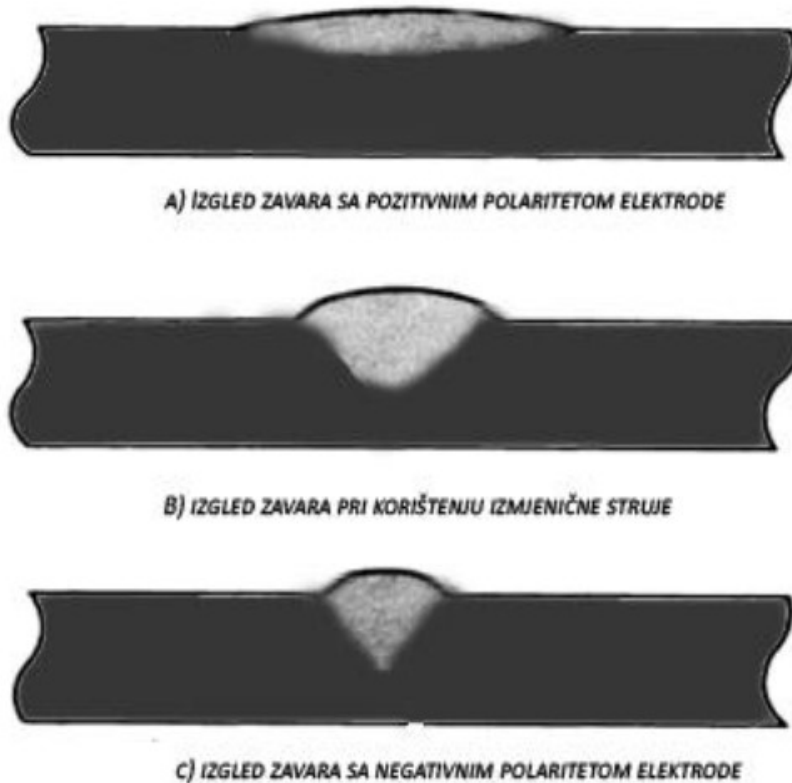
### 6.1. Parametri zavarivanja

Parametri plazma zavarivanja odnose se na kontrolirane varijable koje utječu na proces plazma zavarivanja. Pravilan odabir i podešavanje ovih parametara ključni su za postizanje kvalitetnog zavarenog spoja. Osnovni parametri plazma zavarivanja uključuju:

Napon (V): Napon je električni potencijal između elektrode i osnovnog materijala. On utječe na dužinu i stabilnost plazma luka. Visoki napon može rezultirati dubljim prodiranjem, dok nizak napon može pružiti širi i plići zavareni spoj. Odabir napona ovisi o debljini materijala i željenim karakteristikama zavarenog spoja.

Amperaža (A): Struja je jedan od najvažnijih parametara plazma zavarivanja. Ona određuje količinu električne energije koja prolazi kroz plazma luk i utječe na brzinu topljenja metala. Struja se odabire ovisno o debljini i tipu materijala koji se zavaruje.

**Slika 18: Utjecaj polariteta elektrode na zavar**



(Izvor: predavanje "Zavarivanje")

Brzina napredovanja (mm/min): Brzina napredovanja odnosi se na brzinu kretanja zavarivačke opreme duž spoja. To utječe na količinu dodatnog materijala koji se dodaje, kao i na toplinsku kontrolu zavarenog spoja. Odabir brzine napredovanja ovisi o debljini materijala i željenom obliku zavarenog spoja.

Protok plazma plina (l/min): Plazma plin, obično argon, koristi se za stvaranje stabilnog plazma luka i zaštite zavarenog spoja od oksidacije. Protok plina regulira se kako bi se osiguralo dovoljno pokrivanje plinom i spriječilo kontaminacija zavarenog spoja. Optimalni protok plina ovisi o vrsti materijala i uvjetima zavarivanja.

Vrsta elektrode: Odabir odgovarajuće vrste elektrode važan je za postizanje željenih rezultata plazma zavarivanja. Elektrode se izrađuju od različitih materijala, poput volframa, volfram-legura ili drugih materijala otpornih na visoke temperature. Vrsta elektrode može utjecati na stabilnost luka, kvalitetu zavarenog spoja i otpornost na habanje.

Fokusiranje plazma luka: Plazma luk može se fokusirati pomoću odgovarajućeg oblika elektrode ili plazma gorionika. Fokusiranje plazma luka može utjecati na dubinu prodiranja, širinu zavara i kvalitetu zavarenog spoja.

Važno je napomenuti da su ovi parametri međusobno povezani i njihovo podešavanje zahtijeva stručnost i iskustvo. Optimalni parametri plazma zavarivanja ovise o specifičnoj primjeni, debljini materijala, dubini pukotine, vrsti spoja i drugim faktorima. Stoga se preporučuje konzultacija sa stručnjakom za zavarivanje ili inženjerom kako bi se odabrali pravi parametri za postizanje željenih rezultata zavarivanja.

## **6.2. Predgrijavanje lopatica prije zavarivanja**

Predgrijavanje lopatica prije zavarivanja plazmom važan je proces koji doprinosi kvaliteti, pouzdanosti i trajnosti zavara.

Smanjenje termalnih naprezanja: predgrijavanje lopatica pomaže u smanjenju termalnih naprezanja koja se mogu javiti tijekom i nakon zavarivanja. Visoke temperature tijekom zavarivanja uzrokuju brzo hlađenje materijala, što može rezultirati kontrakcijom i deformacijama. Predgrijavanjem se postupno povećava temperatura materijala, smanjujući kontrast između visoke temperature zavara i okolnog materijala, čime se smanjuje rizik od stvaranja naprezanja i deformacija.

Poboljšana fluidnost materijala: proces predgrijavanja pomaže poboljšati fluidnost materijala tijekom zavarivanja. Toplina omekšava materijal i olakšava tečenje metala tijekom postupka zavarivanja. Ovo je posebno važno kod zavarivanja složenih geometrija, kao što su lopatice Pelton turbine, gdje je potrebno precizno dodavanje materijala i postizanje čvrstog spoja.

Smanjenje rizika od pukotina: predgrijavanje smanjuje rizik od stvaranja pukotina u zavaru. Brza promjena temperature može dovesti do pojave hladnih pukotina, osobito kod materijala s visokim udjelom ugljika ili drugih osjetljivih legura. Predgrijavanjem se smanjuje brza promjena temperature i smanjuje se vjerojatnost stvaranja ovakvih defekata.

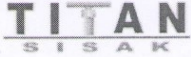
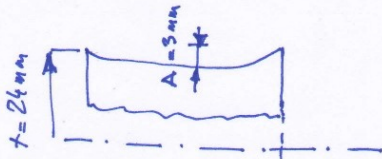
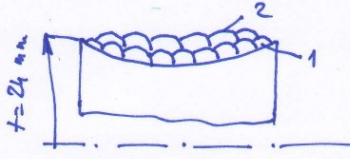
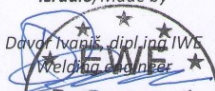
Poboljšanje kvalitete zavora: proces predgrijavanja doprinosi poboljšanju kvalitete zavora. Veća temperatura materijala omogućava bolje prodiranje zavarivačkog materijala i osigurava da se zavarni metal čvrsto veže s osnovnim materijalom. Ovo rezultira većom pouzdanošću, dugovječnošću i strukturnom integritetom zavora.

Povećana kontrola toplinskog utjecaja: predgrijavanje omogućava bolju kontrolu toplinskog utjecaja tijekom zavarivanja. Smanjenje brze promjene temperature pomaže u održavanju željenih svojstava materijala i sprječava nepoželjne promjene strukture koje bi mogle utjecati na performanse komponente.

Upravljanje parametrima zavarivanja: predgrijavanje omogućava bolje upravljanje parametrima zavarivanja. Kada je materijal predgrijan, zavarivač može koristiti preciznije parametre kako bi postigao optimalne rezultate zavarivanja. Ovo je osobito važno kod složenih komponenata kao što su lopatice Pelton turbine.

Smanjenje rizika od defekata: smanjenjem naprezanja, poboljšavanjem fluidnosti materijala i kontroliranjem toplinskog utjecaja, predgrijavanje značajno smanjuje rizik od stvaranja defekata u zavaru, poput poroznosti, pukotina ili inkluzija.

## Slika 19: Radna uputa za zavarivanje

	<b>Radna uputa za zavarivanje</b> Welding Procedure Specification (WPS)	Broj dokumenta / Document No.: <b>WPS-TS 04-16-01</b>																																			
Lokacija/Location: HE Vinodol - Tribalj Proizvođačeva oznaka/WPS: PPAW – PA Atest postupka/for PQR: - Izvođač/Producer: Titan Sisak d.o.o. Zavarivač/Welder's name: Andrija Matić Postupak zavarivanja/Weld.Proc: Plazma prah - 15 Vrsta spoja/Type of joint: Navarivanje/Build up	Nadzor/Supervision: Končar laboratorij Priprema i čišćenje: Strojno- brušenje Specifikacija materijala: Wr. 1.4317 Grupa/Group and Tip/Type: Martenzitni čelik Debljine materijala/Thickness, (mm): 24mm Položaj zavarivanja/Welding position: PA																																				
<b>Detalj Pripreme/Joint Detail</b>	<b>Sekvence zavarivanja/Welding Sequence</b>																																				
																																					
<b>Parametri zavarivanja/Welding parameters</b>																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Broj</th> <th>Oznaka Postupka/</th> <th>Debljina dodatnog materijala/</th> <th>Struja zavarivanja/ Amperage A</th> <th>Napon Zavarivanja/ Voltage V</th> <th>Vrsta i tip struje Current type AC/DC, +/-</th> <th>Brzina žice m/min</th> <th>Brzina zavarivanja Weld speed mm/min</th> <th>Unos topline Heat input KJ/mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>PTA-PPAW</td> <td>-106µm+38µm</td> <td>35-37</td> <td>23-26</td> <td>DC, +</td> <td>-</td> <td>270</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>PTA-PPAW</td> <td>-106µm+38µm</td> <td>25-28</td> <td>21-23</td> <td>DC, +</td> <td>-</td> <td>270</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>PTA-PPAW</td> <td>-106µm+38µm</td> <td>42-45</td> <td>26-28</td> <td>DC, +</td> <td>-</td> <td>270</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Broj	Oznaka Postupka/	Debljina dodatnog materijala/	Struja zavarivanja/ Amperage A	Napon Zavarivanja/ Voltage V	Vrsta i tip struje Current type AC/DC, +/-	Brzina žice m/min	Brzina zavarivanja Weld speed mm/min	Unos topline Heat input KJ/mm	1	PTA-PPAW	-106µm+38µm	35-37	23-26	DC, +	-	270		2	PTA-PPAW	-106µm+38µm	25-28	21-23	DC, +	-	270		3	PTA-PPAW	-106µm+38µm	42-45	26-28	DC, +	-	270		Klasifikacija i trgovački naziv dodatnog materijala Klasifikacija dodatnog materijala Kemijski sastav dodatnog materijala
Broj	Oznaka Postupka/	Debljina dodatnog materijala/	Struja zavarivanja/ Amperage A	Napon Zavarivanja/ Voltage V	Vrsta i tip struje Current type AC/DC, +/-	Brzina žice m/min	Brzina zavarivanja Weld speed mm/min	Unos topline Heat input KJ/mm																													
1	PTA-PPAW	-106µm+38µm	35-37	23-26	DC, +	-	270																														
2	PTA-PPAW	-106µm+38µm	25-28	21-23	DC, +	-	270																														
3	PTA-PPAW	-106µm+38µm	42-45	26-28	DC, +	-	270																														
Sušenje dodatnog materijala Zaštita prašak-plin/protect gas: Protok plazma plina Protok zaštitnog plina Protok nosivog plina Vrsta Wolfram elektrode Detalj žljebljenja/podloge Temperatura predgrijavnja Meduprolazna temperatura Toplinska obrada i/ili Žarenje	da Ar+5%H <sub>2</sub> 0.9l l/min 5-6 l/min 2.2-2.5 l/min W+Th nema /no T <sub>p</sub> =110 °C Max. 160 °C ne	Castolin Eutroloy 19316 PTA metal pulver AISI 316 composite powder 0.03 %C +21 %Cr + 14%Ni +2%Mo																																			
Datum izrade/ Date of issue	Datum izrade/ Date of issue	Kontrolirao/ Controlled by:	Datum odobrenja/ Date of approval	Ostale informacije/Other informations:* Max. Njihanje da /2mm Slobodni kraj žice - Ostalo Čistiti zavar nakon svakog prolaza rotacionom četkom	Odobrilo klas. Društvo Approved by cert. Authority																																
Izradio/Made by Davor Ivančić, dipl.ing IWE Welding Engineer Davor Ivančić EWE HR 0331 	12.04.2016	(Signature)	(Signature)	(Signature)	(Signature)																																

(Izvor: Radna uputa)

## 7. NADZOR ZA VRIJEME ZAVARIVANJA

Nadzor tijekom procesa plazma zavarivanja od iznimne je važnosti kako bi se osigurala kvaliteta zavarenog spoja. Ukoliko dođe do prepoznavanja problema tijekom zavarivanja, važno je odmah prekinuti postupak kako bi se spriječilo daljnje stvaranje defekata i oštećenja. Pravovremenim uočavanjem pogrešaka moguće je spriječiti i prepraviti probleme koji bi se naknadnom provjerom uočili te se odmah mogu korigirati parametri i uvjeti i mogu se planirati korektivne mjere kako nebi došlo do ponavljanja greške. Neki od ključnih aspekata nadzora koji se primjenjuju tijekom plazma zavarivanja su:

**Vizualni nadzor:** Vizualni nadzor uključuje pažljivo promatranje zavarenog spoja tijekom cijelog procesa zavarivanja. Zavarivač ili inspektor treba pratiti izgled plazmatskog luka, ravnotežu dodavanja dodatnog materijala, oblik zavarenog spoja i sve eventualne nepravilnosti ili nedostatke. Vizualni nadzor omogućuje brzo otkrivanje problema i mogućnost promptne intervencije ako je potrebno.

**Kontrola parametara:** Praćenje i kontrola parametara plazma zavarivanja ključni su za održavanje stabilnog procesa. To uključuje praćenje struje, napona, brzine napredovanja i protoka plazma plina. Podešavanje parametara prema specifikacijama i održavanje konstantnosti tijekom cijelog zavarivanja osigurava dosljednost i kvalitetu zavarenog spoja.

**Kontrola temperature:** Temperature su važan faktor kod plazma zavarivanja. Tijekom procesa, važno je kontrolirati temperaturu zavarenog spoja kako bi se izbjeglo pregrijavanje ili prehladno zavarivanje. To se može postići korištenjem termo čuvara, termo elementa ili drugih temperatura-senzitivnih uređaja za praćenje i reguliranje temperature.

**Dodavanje dodatnog materijala:** Tijekom plazma zavarivanja, dodatni materijal u obliku žice ili praha može se dodavati u zonu zavarivanja. Dodatni materijal se topli u plazmatskom luku i taljenjem se spaja s osnovnim materijalom. Ovaj dodatni materijal pomaže u popunjavanju oštećenog područja i obnavljanju strukturnog integriteta lopatice.



## 8. POST-ZAVARIVAČKA OBRADA

Nakon završetka zavarivanja, zavareni spoj treba podvrgnuti ispitivanju kako bi se provjerila njegova kvaliteta. To može uključivati vizualnu inspekciju, testiranje penetrantom, ispitivanje magnetskim česticama, ultrazvučno ispitivanje ili druge metode ispitivanja. Ova ispitivanja provode obučeni inspektori kako bi se osigurala ispravnost i prihvatljivost zavarenog spoja te se uočili mogući nedostaci i pukotine.

**Slika 20: Sanirano oštećenje**



Slika 3, sanirano mjesto na lopatici broj 13

(Izvor: Izvještaj oštećenja)

Nakon provjere zavarenog spoja, vrši se obrada površine lopatice kako bi ista zadovoljavala uvjete potrebne za kvalitetan rad turbine.

**Brušenje:** Brušenje se koristi za uklanjanje viška materijala i izravnavanje površine zavara. Ovaj korak može pomoći u smanjenju neravnina, nepravilnosti i oštrih rubova, čime se povećava sigurnost i estetika.

**Toplinska obrada:** U nekim slučajevima, zavareni spojevi mogu biti podvrgnuti toplinskoj obradi kako bi se osigurala optimalna mikro struktura i mehanička svojstva. Ova obrada može uključivati postupke poput kaljenja i popuštanja kako bi se poboljšala čvrstoća i otpornost materijala.

Premazi i zaštita: Na zavarene površine se često nanose premazi kako bi se zaštitile od korozije ili drugih nepoželjnih utjecaja. Ovi premazi mogu biti boje, premazi za pocinčavanje ili drugi zaštitni slojevi.

Skidanje oksida: Nakon zavarivanja, često se formiraju oksidi na površini metala. Ovi oksidi mogu smanjiti kvalitetu spoja, pa se koriste posebni postupci za njihovo uklanjanje, kao što su kiselinsko čišćenje ili elektrokemijsko čišćenje.

**Slika 21: Sanirano oštećenje nakon završne obrade**



(Izvor: Izvještaj oštećenja)

## 9. LOŠE IZVEDEN ZAVAR

Postoji mogućnost da za se vrijeme ispitivanja zavara ili prilikom završne obrade uoče greške na obrađenim područjima.

### 9.1. Uzroci pogrešaka

Do grešaka može doći zbog različitih faktora, kao što su:

Neprikladni parametri zavarivanja: Jedan od glavnih uzroka lošeg zavara plazmom su neprikladno postavljeni parametri zavarivanja. Pogreške u struji, naponu, brzini dodavača materijala ili vrsti zaštitnih plinova mogu dovesti do nedovoljne ili pretjerane topline, rezultirajući neželjenim efektima kao što su nepotpuno spajanje, prskanje, oksidacija i formiranje pora.

Nedostatna tehnička priprema: Nepotpuna priprema zavarivačkog procesa može dovesti do lošeg zavara. Nedostatak iskustva zavarivača, nepravilno kalibrirane zavarivačke opreme ili neispravno postavljene elektrode ili žice mogu uzrokovati nejednoliku toplinsku distribuciju i slabe strukturalne karakteristike zavara.

Neadekvatna priprema površine: Površina materijala mora biti pravilno pripremljena prije zavarivanja kako bi se osigurao dobar kontakt i adhezija između zavara i osnovnog materijala. Prljavština, masnoće, korozija ili drugi kontaminanti mogu rezultirati neželjenim inkluzijama i slabim zavarima. Kontaminacije poput vlage, ulja, masti ili drugih nečistoća mogu izazvati poroznost, prskanje i druge nedostatke u zavaru. Plazma zavarivanje zahtijeva čiste površine kako bi se spriječila kontaminacija i osigurala kvaliteta zavara.

Loša kontrola kvalitete: Nedostatna ili nedovoljno precizna kontrola kvalitete tijekom i nakon zavarivanja može rezultirati neprepoznatim defektima. Nedostatak vizualne inspekcije, testiranja nepropusnosti ili ultrazvučnog ispitivanja može dovesti do propuštanja loših zavara te se isti uoče tek pri završnoj obradi.

Termalni stresovi i deformacije: Plazmatsko zavarivanje generira visoke temperature, što može uzrokovati termalne stresove i deformacije u okolnom materijalu. Nepravilna kontrola toplinskog utjecaja može dovesti do pogoršanja strukturnih karakteristika i izazvati slab zavar.

Neadekvatna kontrola parametara tijekom zavarivanja: Tijekom zavarivanja, nužno je pažljivo nadzirati i prilagođavati parametre prema uvjetima kako bi se održala stabilnost i kvaliteta zavara. Nedostatak nadzora i prilagodbe može dovesti do variranja parametara i loših zavara.

## **9.2. Analiza lošeg zavara**

Nakon uočavanja greške, važno je analizirati uzroke neadekvatnog zavara. To uključuje procjenu parametara zavarivanja, pripremu površine, tehničke postavke i druge faktore koji su mogli doprinijeti problemima.

Korektivne mjere: Ovisno o identificiranim uzrocima, treba planirati i poduzeti korektivne mjere. To može uključivati ponovno pripremanje površine, drugačije podešavanje parametara zavarivanja i tehničkih postavki. Važno je osigurati da se korektivne mjere provode pažljivo i precizno kako bi se postigla visoka kvaliteta zavara.

Ispravak defekata: Kako su defekti prisutni u već zavarenom području, treba poduzeti korake za njihovo ispravljanje. Ovisno o vrsti defekta, moguće je primijeniti različite tehnike popravka, kao što su brušenje, punjenje, ponovno zavarivanje ili dodatna obrada.

Kontrola kvalitete: Nakon što su korektivne mjere poduzete, potrebno je ponovno provesti kontrolu kvalitete. To uključuje temeljitu vizualnu inspekciju, testiranje nepropusnosti, ultrazvučno ispitivanje ili druge metode kako bi se osigurala pouzdanost i kvaliteta ispravljenog zavara.

Praćenje i dokumentacija: Važno je pratiti i dokumentirati sve korake koje su poduzeti kako bi se korigirao problem lošeg zavara. Ovo je važno za buduću referencu, učenje iz pogrešaka te kako bi se osiguralo kontinuirano poboljšanje zavarivačkih procesa.

## 10. ZAKLJUČAK

Zavarivanje plazmom je tehnika koja se često koristi u industriji za obnovu i sanaciju komponenata, uključujući i lopatice turbinskih kola. Ovaj postupak koristi visokoenergetski plazma luk kako bi se istopili materijali i omogućilo spajanje ili dodavanje novog materijala. Sanacija lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmom korisna je kako bi se produžio vijek trajanja komponente i održala njezina učinkovitost.

Prednosti zavarivanja plazmom:

- Preciznost – zavarivanje plazmom omogućava visoku preciznost i kontrolu prilikom dodavanja novog materijala ili obnove oštećenih dijelova lopatica.
- Minimalna deformacija – visoka temperatura plazme omogućava brzo i učinkovito taljenje materijala bez velike deformacije okolnih područja.
- Snažno spajanje – Plazma zavarivanje stvara snažne i trajne spojeve, što je od ključnog značaja za osiguranje pouzdanosti i sigurnosti turbinskog kola.
- Brzina – plazma zavarivanje je relativno brz postupak, što može smanjiti vrijeme potrebno za sanaciju lopatica i smanjiti zastoje u proizvodnji.
- Materijalna učinkovitost – tehnika omogućava precizno dodavanje materijala samo na potrebna područja, čime se smanjuje gubitak materijala.

Temeljem svega navedenog, u radu je dokazano da je sanacija lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmom korisna i učinkovita tehnika za obnovu oštećenih komponenata. Ni jedna druga vrsta zavarivanja ne može zadovoljiti traženu kvalitetu zavora.

Važno je napomenuti da uspješnost sanacije lopatica turbinskog kola zavarivanjem plazmom ovisi o nekoliko faktora, uključujući vrstu materijala lopatica, obim oštećenja, iskustvo operatera i pravilno prilagođavanje parametara zavarivanja. Osim toga, potrebno je provesti detaljnu analizu kako bi se osiguralo da obnovljene lopatice zadovoljavaju tehničke specifikacije i sigurnosne standarde kako bi se osigurala pouzdanost i trajnost obnovljenih lopatica.

## 11. POPIS LITERATURE

- G. Meden, i dr., "Osnove zavarivanja", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2000
- A. Pavelić, "Rezanje, zavarivanje i ravnanje plinskim plamenom", Školska knjiga, Zagreb, 1991
- prof. dr. sc. Duško Pavletić, Podloge za predavanja iz kolegija „Zavarivanje“, Sveučilište u Rijeci, 2018.
- S. Grudić, "Zavarivanje raznovodnih čelika - MAG postupkom zavarivanja", Završni rad, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula, 2019. Dostupno na:  
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:137:067126>
- I. Belužić, "Postupci zavarivanja metalnih materijala taljenjem", Završni rad, Sveučilište Sjever, Koprivnica, 2015. Dostupno na:  
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:617773>
- Internet stranica <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-vinodol/1536>
- Internet stranica: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>
- Internet stranica: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje\\_plazmom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_plazmom)
- Internet stranica: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak.aspx?id=4955>
- Internet stranica:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164818308044>

## 12. POPIS SLIKA

Slika 1: Zavarivanje plazmatskim lukom .....	2
Slika 2: Pelton turbina.....	3
Slika 3: Lopatica Pelton turbine .....	4
Slika 4: Kavitacija .....	5
Slika 5: Implozija mjehurića na metalnoj površini .....	6
Slika 6: Posljedice kavitacije i erozije na lopaticama Pelton turbine .....	7
Slika 7: Prikaz oštećenja.....	11
Slika 8: Oštećenje lopatice .....	13
Slika 9: Penetrantsko ispitivanje .....	14
Slika 10: Rezultat penetrantskog ispitivanja .....	15
Slika 11: Prikaz oštećenja.....	16
Slika 12: Magnetsko ispitivanje.....	17
Slika 13: Rezultat magnetskog ispitivanja.....	19
Slika 14: Prikaz oštećenja.....	19
Slika 15: Ispitivanje ultrazvukom.....	21
Slika 16: Zavarivački generator .....	22
Slika 17: Zone kod zavarivanja .....	25
Slika 18: Utjecaj polariteta elektrode na zavar .....	26
Slika 19: Radna uputa za zavarivanje .....	29
Slika 20: Sanirano oštećenje .....	31
Slika 21: Sanirano oštećenje nakon završne obrade .....	32

### 13. POPIS SIMBOLA

$V$  = brzina zavarivanja [mm/min].

$s$  = duljina zavora [mm].

$t$  = vrijeme zavarivanja [s].

$Q$  = unesena količina topline [kJ/mm].

$I$  = jakost struje zavarivanja [ A ].

$U$  = napon električnog luka [ V ].

$K$  = koeficijent iskoristivosti električnog luka