Trošenje rotorskih lopatica parne turbine

Gregur, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:051180

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Gregur

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Luka Gregur

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Suzani Jakovljević, dipl. ing. na pruženoj pomoći, strpljenju, zadanoj temi i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i asistentu Draženu Mezdiću, mag. ing. mech. na pruženoj pomoći, strpljenju i savjetima kod izrade ovog rada i kod provođenja ispitivanja.

Također zahvaljujem i asistentima i suradnicima Ivanu Vovku, Ivanu Martinku, Zrinki Švagelj, mag. appl. chem., Marinu Kurteli,mag. ing. i Ivani Bunjan, mag. ing. na pružanoj pomoći i savjetima.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali kroz studij.

Zahvaljujem se i tvrtci ESCO Fofonjka d.o.o. na pomoći pri izradi ovog rada.

Luka Gregur

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA GREGUR** Mat. br.: 0035206579

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje rotorskih lopatica parne turbine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The wear of steam turbine rotor blades**

Opis zadatka:

Erozijska oštećenja uzrokovana protokom pare smanjuju učinkovitost rotorskih lopatica parne turbine i predstavljaju jedan od najčešćih uzroka prekida rada turbine. Životni vijek lopatica parne turbine ovisi o odabiru vrste materijala, postupcima zaštite materijala lopatice od erozijskog trošenja, vlažnosti pare, dok se uvjeti rada turbine mogu razlikovati tijekom duljeg vijeka eksploatacije. Zato je visoka pouzdanost lopatica od velike važnosti za siguran i ekonomičan rad parne turbine.

U ovom je radu potrebno:
1) Dati pregled materijala koji se primjenjuju za izradu lopatica parnih turbina.
2) Provesti ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje odabranih uzoraka rotorske lopatice parne turbine.
3) Provesti elektrokemijska ispitivanja na odabranim uzorcima.
4) Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
6. svibnja 2021.	8. srpnja 2021.	12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednica Povjerenstva: prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. PARNE TURBINE 2
2.1. Općenito o parnim turbinama 2
2.2. Dijelovi parne turbine 5
2.2.1. Rotorske lopatice parne turbine 5
2.2.2. Rotor parne turbine 6
2.2.3. Stator parne turbine 8
2.2.4. Brtvljenje parne turbine 9
2.2.5. Ležajevi parne turbine 9
2.3. Materijali za izradu parnih turbina 9
2.4. Vrste trošenja kod parnih turbina 10
2.5. Problemi kod parnih turbina 13
3. EROZIJA 14
3.1. Erozija kapljevinom 14
3.1.1. Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom 15
3.2. Erozija česticama 16
3.2.1. Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju česticama 17
4. PREGLED LITERATURE 20
4.1. Mehanizmi i vrste erozije kod lopatica rotora parnih turbina 20
4.2. Erozija rotorskih lopatica turbina u NE Krško 21
4.3. Erozija česticama i zaštitni slojevi za lopatice parnih turbina 21
4.4. Eksperimentalno istraživanje utjecaja veličine kapljice na eroziju lopatice niskotlačne parne turbine 22
4.5. Erozijski umor kod lopatica parnih turbina 22
4.6. Erozija kapljevinom lopatica parne turbine od nehrđajućeg čelika 23
4.7. Mehanizmi erozije česticama lopatice parne turbine i ključni parametri za minimiziranje erozije lopatice 23
4.8. Mehanizmi oštećenja erozijom u turbinskom stupnju sa zakrivljenom lopaticom rotora 24
5. EKSPERIMENTALNI DIO 25
5.1. Određivanje kemijskog sastava GDOES-om 26
5.2. Analiza mikrostrukture 27

5.3. SEM analiza prevlake 29
5.4. Mjerenje tvrdoće 30
5.5. Ispitivanje otpornosti na trošenje erozijom 32
5.5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti materijala na trošenje erozijom 34
5.6. Elektrokemijsko ispitivanje 41
6. ZAKLJUČAK 43
LITERATURA 44
PRILOZI 46

POPIS SLIKA

Slika 1 Rotor kondenzacijske parne turbine [2] 3
Slika 2 Profil lopatica: a) impulsnih i b) reakcijskih turbina [4] 4
Slika 3 Postavljanje lopatica rotora na disk turbine [2] 6
Slika 4 Dvostrujni rotor niskotlačnog kućišta [2] 7
Slika 5 Dvostrujni rotor visokotlačnog kućišta [2] 8
Slika 6 Brtveni sustav parne turbine [2] 9
Slika 7 Oštećenje lopatice parne turbine uzrokovano erozijom kapljevinom [8] 11
Slika 8 Zaštitne stelitne pločice na lopatici parne turbine [8] 12
Slika 9 Shema tribosustava erozije kapljevinom [8] 14
Slika 10 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom [12] 15
Slika 11 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom [8] 16
Slika 12 Shema tribosustava erozije česticama [8] 16
Slika 13 Ovisnost erodiranja krutih i duktilnih materijala o upadnom kutu čestice [11] 17
Slika 14 Shema ispitivanja erozije česticama u struji plina prema ASTM G 76-83 [8] 18
Slika 15 Shema ispitivanja otpornosti materijala na eroziju česticama suhim pijeskom [8] ... 19
Slika 16 Usporedba trošenja nezaštićene lopatice parne turbine (gore) i lopatice prevučene boridnim slojem (dolje) erozijom krutim česticama [17] 22
Slika 17 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 1 25
Slika 18 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 2 25
Slika 19 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 3 25
Slika 20 Shema rezanja uzoraka lopatice rotora parne turbine 26
Slika 21 Uređaj za brušenje PRESI Minitech 233 27
Slika 22 Uređaj za poliranje Struers DAP-V 27
Slika 23 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 28
Slika 24 Miktrostruktura jezgre materijala snimljena svjetlosnim mikroskopom 28
Slika 25 Skenirajući elektronski mikroskop TESCAN VEGA 5136 MM 29
Slika 26 SEM slika prevlake na osnovnom materijalu 30
Slika 27 Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu Indentec ZHV μ-ST 31
Slika 28 Uzorak na kojem je mjerena tvrdoća 31
Slika 29 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju česticama suhim pijeskom 33
Slika 30 Vaga Pioneer Ohaus Analytical Balances 34
Slika 31 Grafički prikaz prosječne promjene mase uzoraka 38

Slika 32 Ekvivalentni strujni krug..... 41
Slika 33 Nyquistov dijagram s pridruženim vrijednostima..... 42
Slika 34 Bodeov dijagram s pridruženim vrijednostima..... 42

POPIS TABLICA

Tablica 1 Rezultat GDS analize osnovnog materijala 26
Tablica 2 Tvrdoća izmjerena u jezgri uzorka 32
Tablica 3 Tvrdoća izmjerena na površini uzorka 32
Tablica 4 Očitane mase uzoraka bez prevlake 34
Tablica 5 Promjena mase uzoraka bez prevlake za upadne kutove 30°, 60° i 90° 35
Tablica 6 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 30° 35
Tablica 7 Promjena mase kod upadnog kuta 30° 35
Tablica 8 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 60° 36
Tablica 9 Promjena mase uzorka kod upadnog kuta 60° 36
Tablica 10 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 90° 37
Tablica 11 Promjena mase kod upadnog kuta 90° 37
Tablica 12 Prosječna promjena mase uzoraka 38
Tablica 13 Slike sa SEM-a površine prije i nakon trošenja erozijom suhim pijeskom 40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	V	električni potencijal
f	Hz	frekvencija
HV1	GPa	tvrdoća po Vickers-u
l	mm	dužina
m	g	masa
n	min^{-1}	broj okretaja
Q	l/s	protok
R	Ω	električni otpor
t	s	vrijeme
v	m/s	brzina
Z	Ω	impedancija
α	°	kut
ϑ	°C	temperatura

SAŽETAK

Lopatice parne turbine važan su dio parnih turbina. Njihovo oštećivanje dovodi do nepravilnog, neefikasnog i nestabilnog rada parnih turbina. Jedan od mogućih načina oštećenja lopatica parnih turbina je oštećenje uzrokovano trošenjem erozijom. U ovom radu opisane su parne turbine, dijelovi parnih turbina i materijali koji se mogu koristiti za izradu dijelova parnih turbina. Također je opisano i trošenje erozijom česticama ili kapljevinom te načini ispitivanja otpornosti materijala na trošenje erozijom česticama ili kapljevinom. Uz eksperimentalni dio rada napravljen je i pregled literature vezan uz trošenje lopatica parnih turbina erozijom kapljevinom ili česticama. U eksperimentalnom dijelu napravljena su ispitivanja otpornosti trošenja na eroziju česticama, elektrokemijska ispitivanja, ispitivanje tvrdoće, određivanje mikrostrukture i kemijskog sastava lopatice rotora parne turbine.

Ključne riječi: lopatica parne turbine, erozija, ispitivanje otpornosti na trošenje erozijom, EIS, GDOES

SUMMARY

Steam turbine blades are an important part of steam turbines. Their damaging can lead to irregular, inefficient and unstable running of steam turbines. Failure caused by erosion wear is one of the possible modes of failure of steam turbine blades. This work describes steam turbines, their parts and materials which can be used for steam turbine parts. Erosion wear by solid particles or liquids is described as well as testing of materials' resistance to erosion wear by solid particles or liquids. Along with the experimental part of this work a literature review related to erosion wear of steam turbine blades by solid particles or liquids is done. The experimental part of this work consists of testing material's resistance to erosion wear by solid particles, electrochemical testing, hardness testing, determining the microstructure as well as the chemical composition of steam turbine rotor blade.

Key words: steam turbine blade, erosion, erosion wear testing, EIS, GDOES

1. UVOD

Parne turbine su toplinske turbine koje se uglavnom koriste za pogonjenje generatora za proizvodnju električne energije. Kako bi parne turbine radile efikasno, ekonomično i stabilno potrebno je voditi brigu o dijelovima parne turbine. Jedna od ključnih komponenti parnih turbina su lopatice u koje prosturjavajuća para udara pokrećući turbinu. Lopatice parnih turbina podložne su trošenju erozijom česticama ili kapljevinom čime se one oštećuju što dovodi do pogoršanja uvjeta rada i smanjenja isplativosti parne turbine. Oštećenjem lopatica erozijom može doći i do prekomjernih naprezanja u lopatici. Za izradu takvih lopatica koriste se materijali kao neki nehrđajući čelici, titanijeve legure poput Ti6Al4V, a na lopatice se nanose i zaštitne prevlake od stelita, superlegure na bazi kobalta.

Za pravilan rad turbina bitna je otpornost materijala za izradu lopatica na eroziju kapljevinom i česticama što je moguće unutar turbine. Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom ili česticama moguće je na više standardiziranih i nestandardiziranih načina. Parne turbine se nakon određenog broja sati i otvaraju kako bi se utvrdila moguća oštećenja i stupanj potrošenosti lopatica.

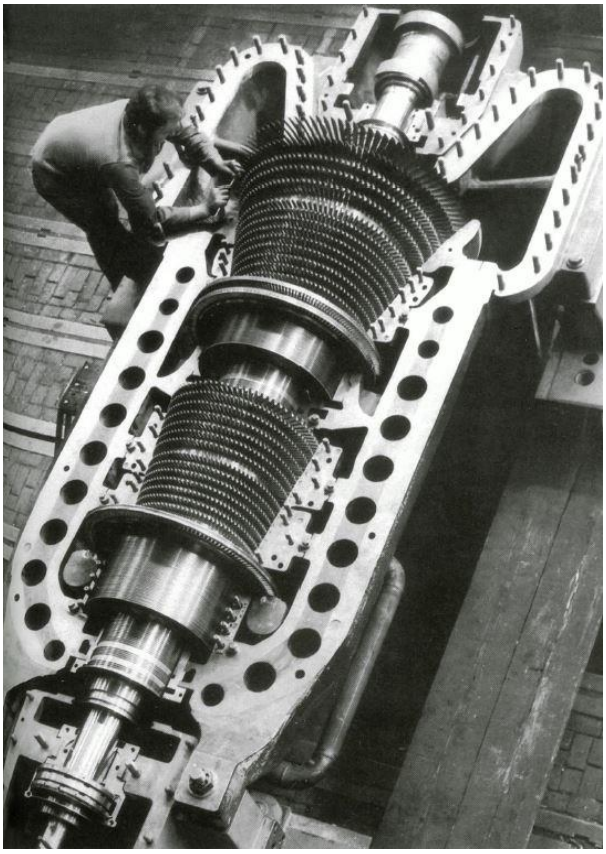
2. PARNE TURBINE

2.1. Općenito o parnim turbinama

Parna turbina je vrsta toplinske turbine koja mehanički rad, tj. vrtnju rotora dobiva pretvorbom kinetičke energije pare koja struji kroz turbinu, tj. udara u lopatice montirane na rotor turbine. Kinetička energija pare dijelom je dobivena iz pretvorbe dijela toplinske energije pare. Uz te pretvorbe u pari dolazi do naglog pada tlaka, sniženja temperature i povećanja obujma pare. Parne turbine imaju lopatice koje rotiraju s rotorom i nepokretne lopatice statora koje zajedno čine jedan stupanj turbine. Na lopaticama statora dolazi do ubrzanja pare dok se na lopaticama rotora dobiva mehanički rad [1–3].

Turbine kakve se najviše koriste uglavnom su višestupanjske turbine dok jednostupanjske turbine služe za male snage i kao pomoćni ili rezervni strojevi. Kod višestupanjskih turbina dolazi do postupne ekspanzije pare i do pada tlaka pare, a od stupnja do stupnja raste i moment, tj. snaga na vratilu. Odabirom prikladnog broja stupnjeva, promjera stupnjeva i pada tlaka u pojedinim stupnjevima turbine dobiva se turbina koja radi optimalnom efikasnošću. Broj stupnjeva turbine ovisi i kakva je turbina prema mjestu ekspanzije: reakcijska ili impulsna [1–4].

Parne turbine uglavnom se koriste za pogon generatora kod proizvodnje električne energije. Prema izlaznom tlaku parne turbine dijele se na kondenzacijske i protutlačne parne turbine koje mogu biti bez ili s oduzimanjem pare. Turbine koje imaju mogućnost reguliranog oduzimanja pare, tj. opskrbu tehnološke pare određenih tlakova i temperatura za industrijske procese zovu se kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare. Kondenzacijske turbine, čiji je rotor prikazan na slici 1, moguće je koristiti i kao turbine za toplane koje mogu gradsku mrežu opskrbljivati toplom vodom [2].



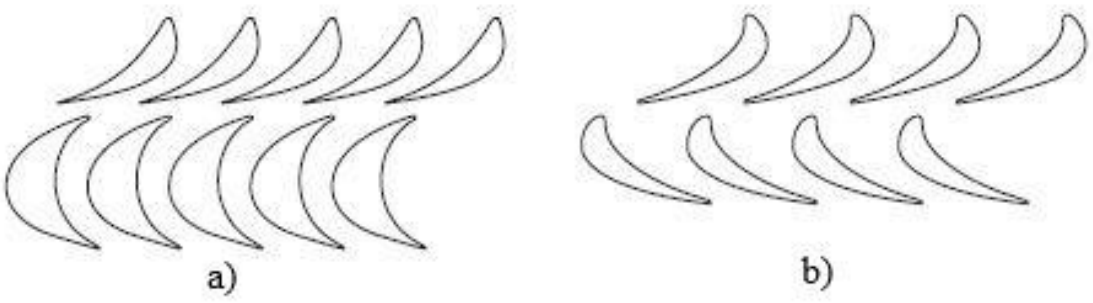
Slika 1 Rotor kondenzacijske parne turbine [2]

Protutlačne turbine samo dio toplinske energije pretvaraju u mehaničku tako da se prekida ekspanzija pare kod određenog tlaka. Takve turbine parom opskrbljuju industrijske potrošače, a imaju trećinu cijene i mase te jednaku nazivnu snagu u usporedbi s kondenzacijskim turbinama. Kombinacije protutlačnih i kondenzacijskih turbina nazivaju se parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare i s kondenzacijom. Parne turbine mogu se koristi i za pogon brodova [2].

Postoje dvije vrste turbina prema mjestu ekspanzije: reakcijske i impulsne turbine. Kod reakcijskih turbina do ekspanzije pare dolazi i kod stacionarnih i pokretnih lopatica. Pokretne lopatice služe kako bi iskoristile energiju pare za pokretanje rotora, ali istovremeno služe i kao rotirajuće mlaznice na kojima se zbog pada tlaka dobiva reakcijska sila koja dalje usmjerava paru što pojačava strujanje pare dobiveno na lopaticama statora. Kako bi bile efikasne, ovakve turbine moraju imati što manju zračnost između vrhova lopatica rotora i kućišta turbine kako bi se smanjilo propuštanje oko lopatica rotora. Propuštanje oko lopatica smanjuje se korištenjem dijafragmi. Kod impulsnih turbina na lopaticama rotora ne dolazi do pada tlaka.

Energija pare se prenaša u potpunosti na lopatice tako što struja pare udara u njih te nisu potrebne male zračnosti između lopatica turbine i kućišta turbine. Zbog toga je ovaj tip turbina izdržljiv i trajan i može podnijeti teške uvjete rada [1,5].

Reakcijske i impulsne turbine imaju različite profile lopatice, što je prikazano na slici 2.



Slika 2 Profil lopatica: a) impulsnih i b) reakcijskih turbina [4]

Lopatice turbina konstruiraju se ili biraju prema ulaznim i izlaznim kutovima pare na lopaticu. Veličina lopatice ovisi o stupnju turbine na koji se lopatica stavlja [4].

Turbine se također mogu podijeliti:

- prema ulaznom tlaku pare na niskotlačne turbine, srednjetlačne turbine i visokotlačne turbine
- prema ulaznoj temperaturi pare na turbine za srednje, visoke i najviše temperature
- prema broju vratila dijele se na turbine s jednim vratilom ili na turbine s više vratila
- prema tlaku u kućištu na turbine s niskotlačnim, srednjetlačnim ili visokotlačnim kućištem
- prema broju kućišta na turbine s jednim kućištem i na višekućišne turbine
- prema smjeru strujanja pare na radijalne turbine i aksijalne turbine [2].

Parne turbine razvijaju se kako bi im se poboljšala efikasnost. Tako se u današnje vrijeme u parnim turbinama radi na povećanju tlaka i temperature pare koja ulazi u turbinu. Razvijaju se i visokoefikasne lopatice za zadnje stupnjeve turbina, ali se isto tako pokušava povećati korisnost kratkih lopatica na prvim stupnjevima turbina kod visokotlačnih parnih turbina. Kod srednjetlačnih parnih turbina do povećanja efikasnosti stupnjeva turbina dolazi korištenjem novih tehnologija brtvljenja [3].

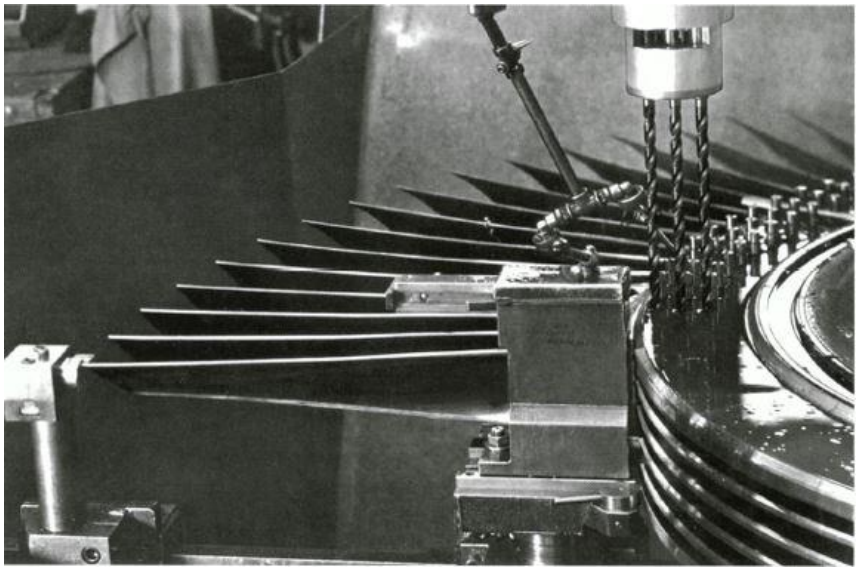
2.2. Dijelovi parne turbine

Osnovni dijelovi svih toplinskih turbina pa tako i parne su stator i radno kolo s lopaticama rotora koje se nalaze na obodu diska. Radni fluid struji kroz kanale koji su formirani od statorskih i rotorskih lopatica i dolazi do pretvorbe energije. Radna kola turbine pričvršćena su na vratilo turbine. Rotor se sastoji od vratila s radnim kolom ili vratila s nekoliko radnih kola, a nalazi se u nosivom i odrivnom ležaju. Kućište štiti unutrašnjost turbine od vanjski utjecaja, tj. oštećenja, a i sprječava izlazak radnog fluida iz turbine. To sprječavaju i labirintne brtve koje se nalaze na mjestima prolaska rotora kroz kućište turbine [2].

2.2.1. Rotorske lopatice parne turbine

Rotorske lopatice sastoje se od radnog dijela lopatice i korijena lopatice. Radni dio lopatice je profiliran i oblikuje rotorske kanale dok se korijenom lopatica pričvršćuje na disk. Profil lopatice i dimenzije radnog dijela lopatice ovise o strujanju pare i potrebnoj čvrstoći lopatice. Postavljanje lopatica na disk prikazano je na slici 3. Površina radnog dijela lopatice je polirana kako bi se smanjila opasnost od umora materijala, ali i kako bi se smanjili gubitci. Ulazni i izlazni kutovi na lopatici utječu na čvrstoću lopatice i vibracijska svojstva. Težište korijena lopatice kao i težište presjeka lopatice moraju biti pravilno raspoređeni kako ne bi došlo do savojnih naprezanja uzrokovanih centrifugalnim silama. Konstruktori lopatica mogu lopatice prilagoditi tako da savojno naprezanje uzrokovano centrifugalnim silama neutralizira, tj. da je protuteža savojnim naprezanjima nastalim protokom pare. Savojna naprezanja nastala protokom pare više utjecaja imaju na lopatice statora reakcijskih parnih turbina. Kod visokih tlakova ta savojna naprezanja su velika zbog velike razlike tlakova dok su kod niskih tlakova velika zbog dužina lopatica niskotlačnih turbina. Lopatice rotora imaju veliku tvrdoću i otporne su na visoke temperature, a podložne su erozijskom djelovanju pare kojim dolazi do trošenja površine lopatice. Postoje razne vrste korijena lopatica, koji su i najopterećeniji dijelovi lopatice: T-korijen, jahaći korijen, viličasti korijen, ozubljeni korijen, Lavalov korijen i jela korijen. Ozubljeni korijen koristi se za lopatice turbina kod kojih je brzina vrtnje velika. Rotorske lopatice obično nemaju veliku toplinsku vodljivost i stoga je za hlađenje lopatica rotora djelotvorno hlađenje zrakom ili kapljevinom. Mogu se hladiti unutrašnjim konvektivnim hlađenjem, filmskim hlađenjem ili poroznim hlađenjem. Filmskim hlađenjem se kroz provrte na vanjsku površinu dovodi tanki sloj zraka koji hladi dijelove lopatice koji su toplinski

najopterećeniji. Kako bi se lopatica hladila poroznim hlađenjem potrebno je koristiti porozni materijal kroz koji može strujati sredstvo za hlađenje lopatice [2,6].



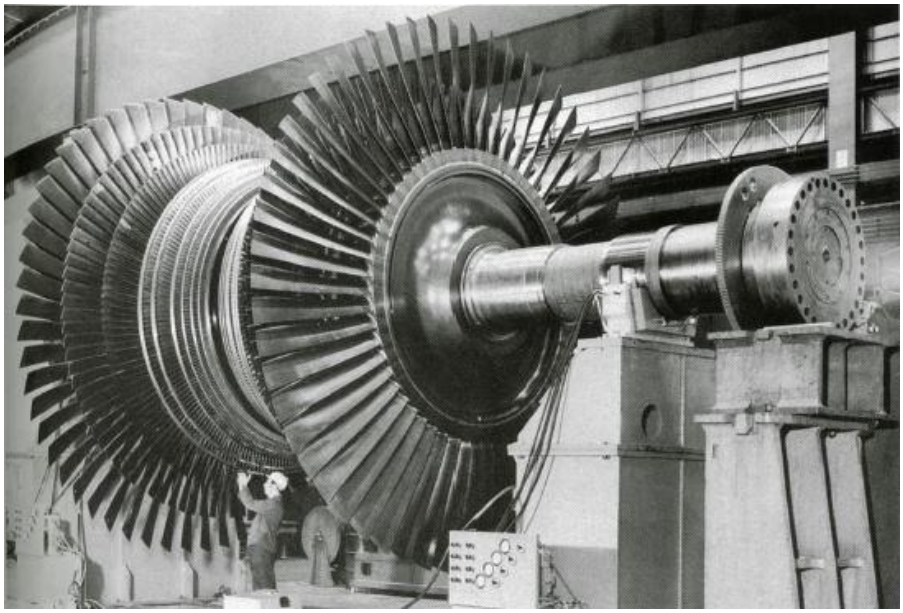
Slika 3 Postavljanje lopatica rotora na disk turbine [2]

2.2.2. Rotor parne turbine

Vratilo turbine, koje pogoni generator ili radni stroj, i radna kola turbine čine turbinski rotor, a radno kolo čine lopatice rotora i diskovi. Okretni momenti pojedinih stupnjeva turbine zbrajaju se na vratilu turbine, a zatim se taj okretni moment prenosi na generator ili neki drugi stroj koji turbina pogoni. Rotor turbine mora biti otporan na umor materijala i pojave pukotina koji mogu nastupiti zbog brzih promjena temperature koji uzrokuju naprezanja u materijalu. Ako turbina ima više kućišta rotorom turbine nazivaju se svi rotori pojedinih kućišta spojenih spojkom [2].

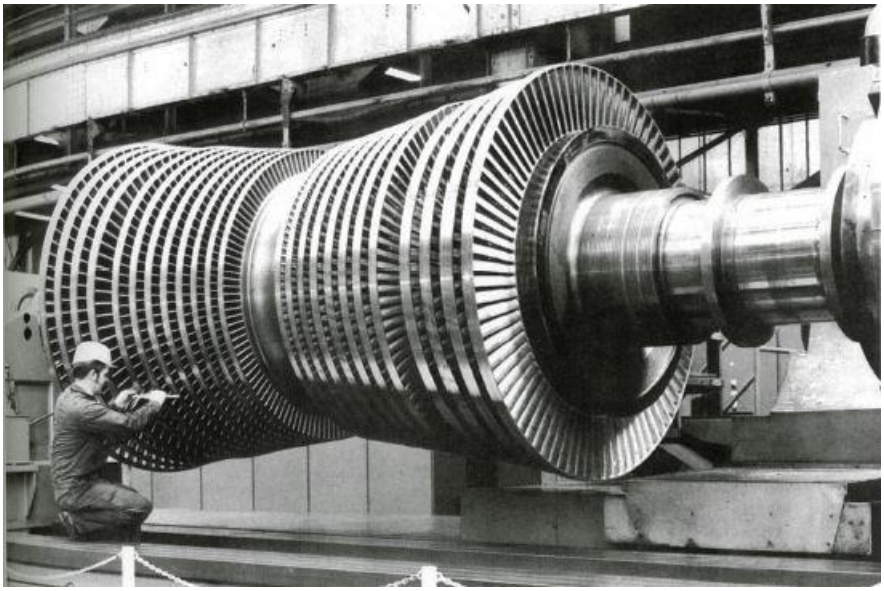
Rotor niskotlačnog kućišta, prikazanog na slici 4, karakteriziraju velike dimenzije zbog velike izlazne strujne površine na posljednjem stupnju turbine, što je potrebno kako bi se povećala snaga ili kako bi se smanjili gubitci. Ovaj tip rotora izrađuje se zavarivanjem, zavareni rotor, ili montiranjem diskova na stupnjevano vratilo, montažni rotor. Montažni rotori mogu biti velikih dimenzija i velike kvalitete vratila i diskova, a ako dođe do oštećenja diskova oni se mogu zamijeniti novim. Nedostaci ovih rotora su što može doći do slabljenja diskova i do pojave pukotina nastalih napetosnom korozijom. Diskovi i prstenasti dijelovi međusobno su

zavareni kod zavarenih rotora. Kod zavarenih rotora naprezanja su manja od montažnih rotora, ali je pri remontu turbine teško kontrolirati stanje materijala [2].



Slika 4 Dvostrujni rotor niskotlačnog kućišta [2]

Rotori visokotlačnog kućišta uglavnom su monoblok rotori izrađen od diskova i vratila u jednom komadu te su oni malih dimenzija i mogu se izraditi sa središnjim provrtom koji omogućuje periodične kontrole grešaka nastalih tijekom eksploatacije, ali i površinu provrta i druge greške. Kod visokotlačnih rotora su prisutne visoke temperature ulazne pare i dolazi do intenzivnog puzanja. Oštećene dijelove monoblok rotora nije moguće zamijeniti što im je nedostatak. Rotor visokotlačnog kućišta prikazan je na slici 5 [2].



Slika 5 Dvostrujni rotor visokotlačnog kućišta [2]

Za rotore srednjetlačnih kućišta koriste se prije opisane vrste rotora. Na izbor vrste rotora utječu omjer protoka pare na ulazu i izlazu iz kućišta, ali i ulazna temperatura pare [2].

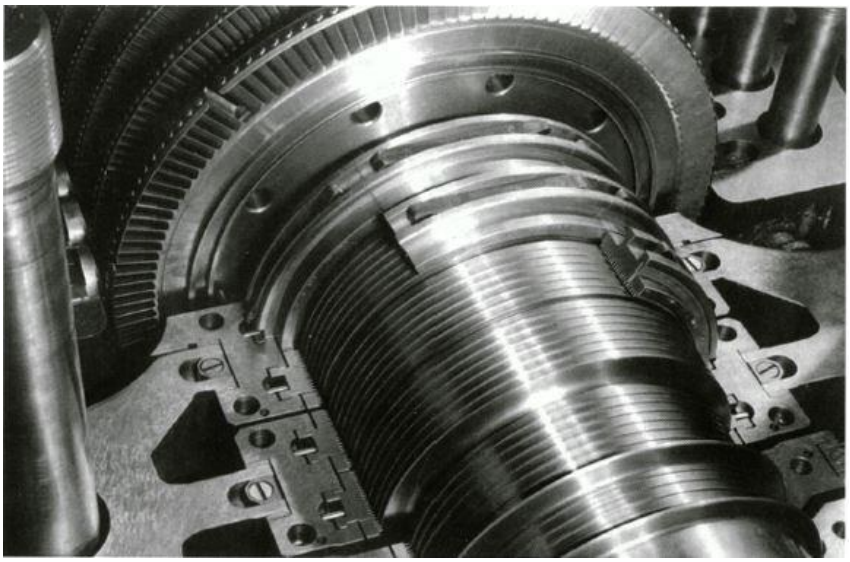
2.2.3. Stator parne turbine

Statorom parne turbine smatraju se dijelovi turbine koji nisu pomični. Dijafragme s lopaticama, unutrašnja kućišta ili umetci koji dijafragme učvršćuju, brtve, kućište turbine i kućišta ležajeva se ubrajaju u nepomične dijelove turbine. Stator parne turbine nije opterećen centrifugalnom silom kao što je rotor parne turbine, ali statori parnih turbina moraju biti čvrsti na temperaturama pri kojima može doći do puzanja materijala, kruti, kako bi se onemogućilo međusobno dodirivanje statora i rotora, i nepropusni, kako bi se osigurao zadovoljavajući stupanj korisnosti i smanjila erozija dijelova statora. Kućišta statora visokotlačnih i srednjetlačnih turbina mogu biti s jednom ili s dvije stijenke, ovisno o ulaznim parametrima. Kod kućišta s dvije stijenke visoka temperatura utječe samo na unutarnju stijenku kućišta. Kod niskotlačnih turbina kućišta statora rade se od tankih čeličnih ploča, poduprtih ukrutama, koje su međusobno zavarene zbog velikih dimenzija kućišta [2].

Dijafragme parne turbine građene su od dvije polovice dijafragme i sastoje se od tijela dijafragme, oboda kojim su vezani s umetcima ili kućištem i statorskih lopatica. Polovice dijafragmi učvršćene su klinovima. Dijafragme mogu biti lijevane, za niže temperature i tlakove, ili zavarene, za više temperature i tlakove [2].

2.2.4. Brtvljenje parne turbine

Parne turbine se brtve kako bi se onemogućio neželjeni izlazak pare iz turbine i kako bi se odvojili dijelovi turbine u kojma je smjer tokova pare različit. Vrsta brtvi koje se koriste u parnim turbinama su labirintne brtve koje smanjuju prostrujavanje. Šiljci brtve ne smiju se dodirivati s rotorom, a ako dođe do zapinjanja kod vibracija ne smije doći do zagrijavanja vratila ni do prekomjernog trošenja brtvi. Slika 6 prikazuje sustav za brtvljenje parne turbine [2].



Slika 6 Brtveni sustav parne turbine [2]

2.2.5. Ležajevi parne turbine

Kod parnih turbina za odrivne i nosive ležajeve koriste se klizni ležajevi. Ležajevi kod parnih turbina osiguravaju stalni i stabilni položaj rotora turbine. Nosivi ležajevi turbine prenose radijalna opterećenja nastala centrifugalnim silama dok odrivni ležajevi primaju i prenose aksijalne sile s rotora na statorske dijelove turbine [2].

2.3. Materijali za izradu parnih turbina

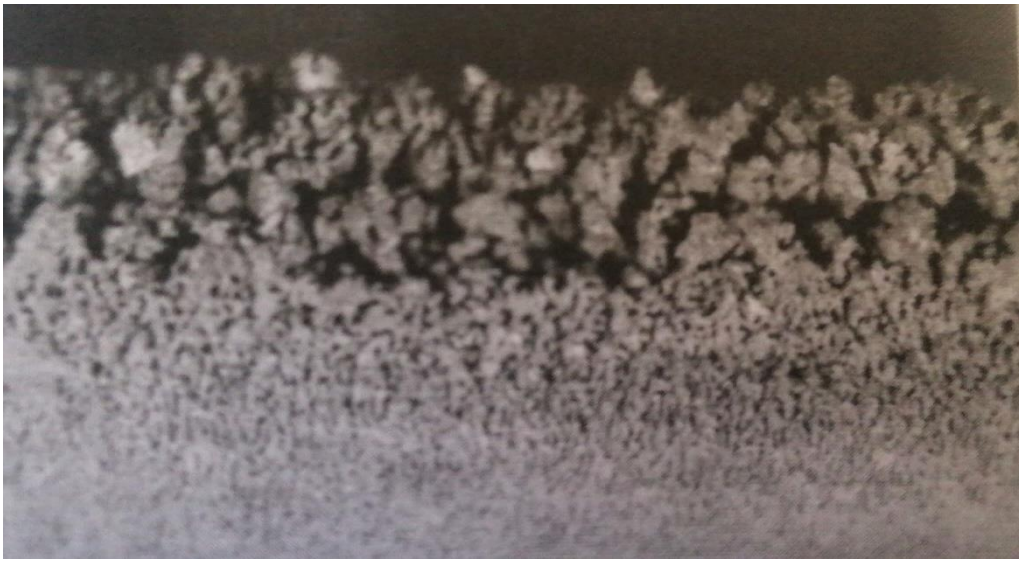
Materijal lopatica parnih turbina ovisi o radu parne turbine s obzirom na tlak i temperaturu u turbini. Lopatice koje rade na visokim ili srednjim tlakovima u pravilu se izrađuju od X13CrMo12 nehrđajućeg čelika. Takvi čelici dobro prigušuju vibracije i otporni su na koroziju, a upotrebljavaju se do temperatura od 480 °C. Pri višim temperaturama koriste se čelici koji su legirani molibdenom, vanadijem, volframom i niobijem. Titanijeve legure, poput

Ti6Al4V, koriste se u niskotlačnim turbinama od 1960-ih. Gustoća titanijevih legura manja je od gustoće čelika što produljuje vijek trajanja lopatica i povećava efikasnost turbine bez povećanja naprezanja, a uz to titanijeve legure su otpornije na koroziju od čelika. Materijal od kojeg je lopatica izrađena utječe na čvrstoću lopatice, otpornost na koroziju i elastičnost. Za izradu lopatica parnih turbina može se koristiti i stelit poput Haynes Stellite Alloy Number 31. To je superlegura na bazi kobalta koja se koristi na temperaturama između 480 i 650 °C. Isto tako se na lopatice mogu staviti i zaštitni „štitovi" od stelita (engl. *stellite shield*) [1–3,6].

Statorski elementi mogu biti izrađeni od legiranih vatrootpornih čeličnih ljevova koji se koriste zbog visokih temperatura unutar turbine. Za dijelove kod kojih je važna otpornost na eroziju mogu se koristiti nehrđajući čelični ljevovi. Uporaba boljih čelika za vanjska kućišta omogućuje smanjenje dimenzija stijenke kućišta naspram jeftinijih čeličnih ljevova koji se mogu također koristiti [2].

2.4. Vrste trošenja kod parnih turbina

Kod rotorskih lopatica u parnim turbinama dolazi do erozijskog trošenja kapljevinom i česticama površine lopatice čime ta površina postaje hrapava [7]. Erozijom lopatice parne turbine pada čvrstoća lopatice turbine, dolazi do promjene vibracijskih karakteristika lopatice turbine, utječe se na korisnost turbine, a u slučajevima teže erozije može doći do loma lopatice turbine. Oštećenje lopatice parne turbine uzrokovano erozijom kapljevinom prikazano je na slici 7 [2].



Slika 7 Oštećenje lopatice parne turbine uzrokovano erozijom kapljevinom [8]

Kako bi se smanjio utjecaj erozije na lopatice rotora mogu se poduzeti aktivne i pasivne mjere zaštite. Aktivne mjere zaštite su:

- smanjenje vlažnosti ispred turbinskog stupnja
- povišenje temperature pare i sniženje tlaka na ulazu u turbinu
- primjena međupregrijanja pare
- djelotvorna vanjska i unutrašnja separacija
- smanjenje udarnog djelovanja kapljica vlage povećanjem zazora između statorske i rotorske rešetke
- postizanje krupno porozne strukture ili radijalnih kanala na ulaznim bridovima lopatice
- smanjenje obodne brzina na vanjskom promjeru stupnja uz iste ostale parametre.

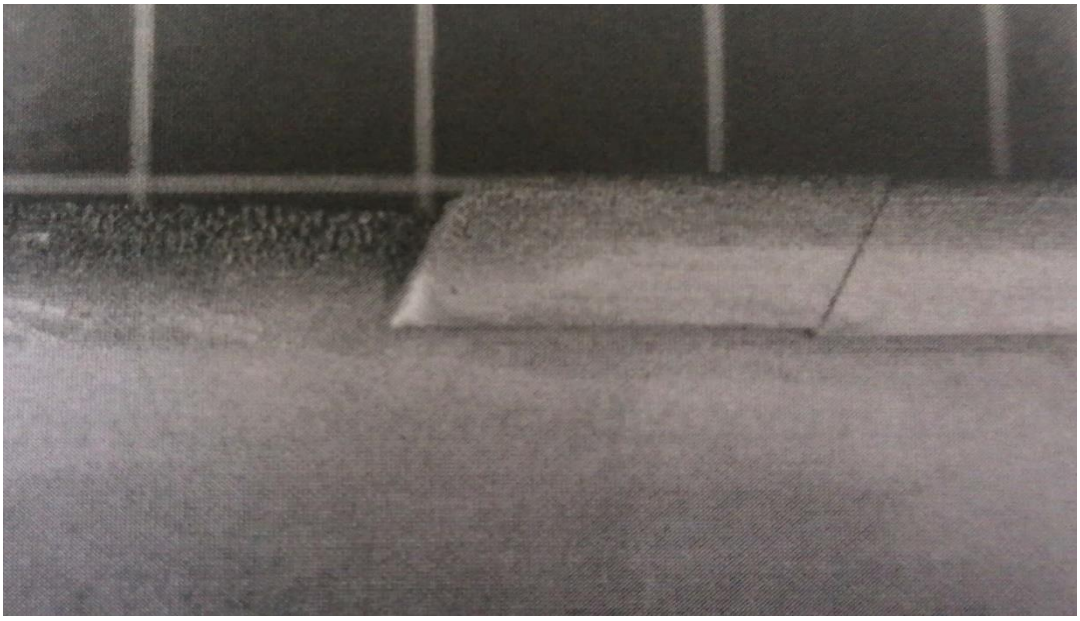
Pasivne mjere zaštite od erozije su:

- primjena lopatica od tvrdih materijala
- ugradnja pločica od stelita
- toplinska obrada kaljenja dijelova lopatice ili cijele lopatice
- nanošenje tvrdog sloja na lopaticu [2].

Erozija uvelike utječe na efikasnost parnih turbina. Erozijom lopatica turbine dolazi do neželjenih promjena u strujanju pare na lopaticama. Može doći i do povećane hrapavosti

površine što povećava gubitke nastale zbog trenja, ali i do povećanja zračnosti u dijelovima koji su tolerirani što može omogućiti strujanje pare kroz te zračnosti i dovodi do smanjenja efikasnosti. Erozija pojačava i vibracije rotora turbine [3].

Na erozijsko trošenje dijelova u turbini utječu tvrdoća materijala, oblik erodiranog dijela, dimenzije čestica, kut upada čestica u dijelove i brzina čestica. Pri ispitivanju erozije dijelova u industriji se može koristiti prah željezovog oksida. Erozija dijelova najveća je pri kutu od 30°, a ako je kut manji od 10° dolazi do klizanja čestica na površini dijelova. Povećanjem brzine čestica povećava se i brzina erodiranja dijelova. Kako bi se smanjio utjecaj erozije koriste se tvrđi materijali, a materijale je također moguće prevući prevlakama. Boridne prevlake smanjuju otpornost materijala na umor materijala i dolazi do povećanja hrapavosti površine što smanjuje efikasnost. Korištenjem prevlaka od kromovog karbida koje imaju slabiju otpornost na eroziju od boridnih prevlaka ne smanjuje se otpornost materijala na umor. Erozijsko trošenje može se smanjiti i promjenom oblika profila lopatica. Na lopatice se mogu nalemiti i stelitni „štitovi“ (engl. *stellite shield*), tj. zaštitne stelitne pločice što je prikazano na slici 8 [3].



Slika 8 Zaštitne stelitne pločice na lopatici parne turbine [8]

Također do trošenja može doći kod dijelova u dodiru čime se povećavaju zračnosti u turbini. Povećanjem zračnosti između dijelova turbine dolazi do curenja pare i smanjenja efikasnosti turbine [5].

2.5. Problemi kod parnih turbina

Dijelovi turbina koji su visoko opterećeni pri pokretanju turbine također moraju biti otporni na lom pri nižim temperaturama na kojima se turbina pokreće. Potrebno je znati i brzinu rasta malih pukotina koje su ispod granice detektiranja kod ispitivanja nerazornim metodama u uvjetima umora materijala i puzanja. Očekivani vijek trajanja turbinskih dijelova otpornih na puzanje je 200 000 sati zbog čega je ispitivanje na puzanje materijala za izradu turbinskih dijelova dugotrajno i skupo. Također je problem i oksidacija materijala u uvjetima rada turbina, dolazi do erozije na usisnim dijelovima i lopaticama turbine te do trošenja dodirnih površina što dovodi do povećanja zračnosti [5].

Do umora materijala u turbinama dolazi na dva načina naprezanja: niske amplitude vrijednosti naprezanja i visoke frekvencije ili visoke vrijednosti amplitude naprezanja i niske frekvencije. Do visokih frekvencija vibracija dolazi kod normalnog stalnog rada parne turbine što najviše utječe na lopatice i rotor turbine. Amplituda vibracija ograničena je konstrukcijom lopatica koje su konstruirane tako da se izbjegnu rezonantne frekvencije. Ciklusi naprezanja niskih frekvencija javljaju se pri pokretanju i zaustavljanju turbine što postaje bitno za konstrukciju novih turbina kako bi se njihov rad prilagodio potrebama elektroenergetske mreže [5].

Kod konstruiranja dijelova parnih turbina treba uzeti u obzir da se pri niskim temperaturama u obzir trebaju uzeti vlačna čvrstoća materijala, umor materijala, lomna žilavost, otpornost na nastajanje pukotina zbog djelovanja napetosne korozije, korozijski umor i eroziju lopatica [5].

Istraživanja pokazuju da su lopatice niskotlačnih turbina podložnije havarijama nego lopatice srednjetlačnih i visokotlačnih turbina. Glavni uzrok havarija turbinskih lopatica je umor materijala uzrokovan prekomjernim vibracijama čiji su rezultat promjenjiva naprezanja zajedno sa savojnim naprezanjem lopatice uzrokovanim strujanjem fluida i centrifugalnim silama u turbini [9].

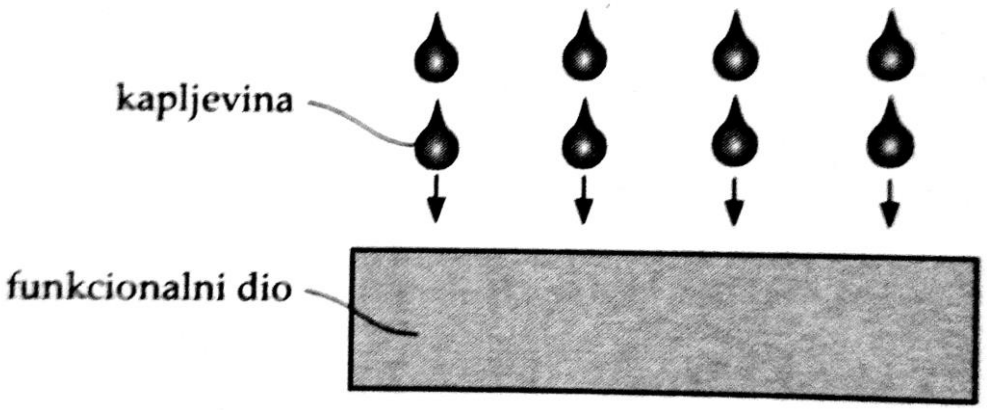
3. EROZIJA

Erozija se može definirati kao postupno trošenje materijala s čvrste površine uslijed mehaničkog djelovanja između površine materijala i tekućine (kapljevine), višekomponentne tekućine, udarajuće kapljevine ili krutih čestica. Erozija materijala ovisi o raznim parametrima, neki od kojih su: duktilnost materijala, gustoća i tvrdoća, masa, veličina i brzina čestica te tvrdoća, gustoća, modul elastičnosti, lomna žilavost, toplinska vodljivost i talište erodiranog materijala [10,11].

Erozija koja se javlja kod lopatica parnih turbina je erozija kapljevinom ili erozija česticama te će te dvije vrste erozije biti opisane kao i neki načini ispitivanja otpornosti materijala na takve vrste erozije [7].

3.1. Erozija kapljevinom

Erozija kapljevinom, čija je shema tribosustava prikazana na slici 9, uzrokovana je udaranjem kapljica kapljevine u površinu materijala pri velikim brzinama. Kod erozije kapljevinom nema krute faze u struji kapljevine što uklanja abrazijski mehanizam trošenja. Ako je medij agresivan može doći i do tribokorozije. Udaranje kapljica u površinu materijala uzrokuje visoke tlakove koji mogu prijeći granicu razvlačenja materijala što dovodi do plastične deformacije ili pukotine. Više takvih udara dovodi do stvaranja rupica i erozijskog trošenja materijala [8,10]



Slika 9 Shema tribosustava erozije kapljevinom [8]

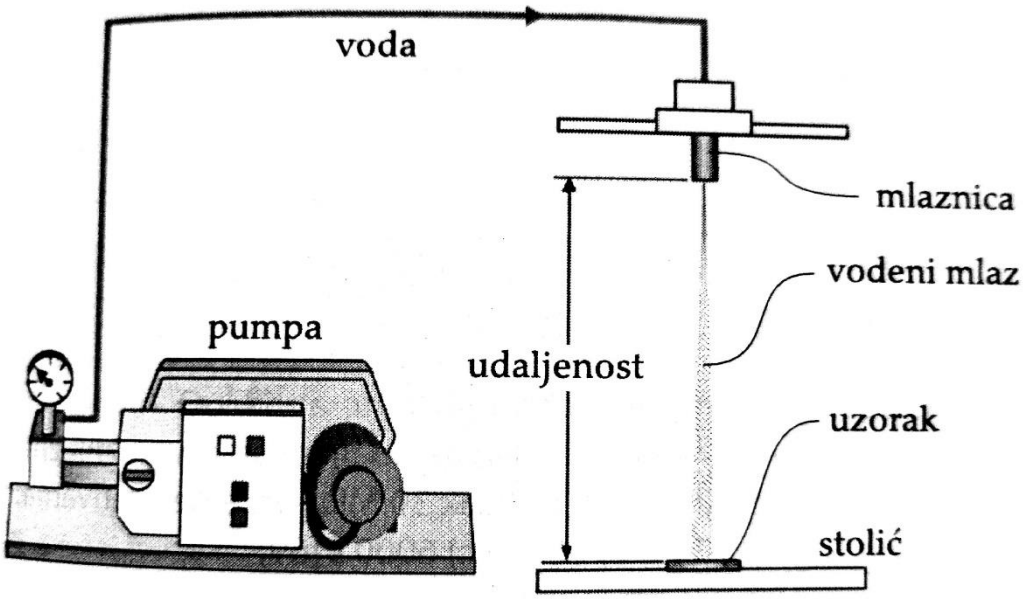
3.1.1. Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom

Ispitivanje otpornosti na eroziju kapljevinom prema ASTM G73 izvodi se u komori promjera 700 mm u kojoj je disk od nehrđajućeg čelika na čiji su obod pričvršćeni uzorci. Disk se okreće frekvencijom od 79,166 Hz kako bi se dobila tangentna brzina uzorka od 147,0 m/s. Dva vodena mlaza udaraju u cilindrične uzorke uzrokujući eroziju kapljevinom. Nakon ispitivanja mjeri se masa uzoraka kako bi se utvrdila promjena mase. Na slici 10 prikazan je takav uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom [12,13].



Slika 10 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom [12]

Za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom može se koristiti i uređaj prikazan na slici 11. Uređaj se sastoji od pumpe, mlaznice i stolića. Na stoliću se nalazi uzorak u koji udara vodeni mlaz te se nakon ispitivanja mjeri gubitak mase uzoraka kao i maksimalna dubina oštećenja. Parametri ispitivanja poput pritiska vode, otvora mlaznice i udaljenosti između uzorka i mlaznice te vrijeme ispitivanja su promjenjivi [8].

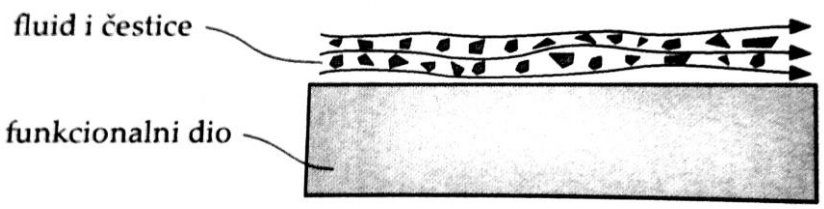


Slika 11 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju kapljevinom [8]

Za mjerenje otpornosti materijala na trošenje erozijom kapljevinom mogu se koristiti i neke druge standardizirane i nestandardizirane metode [10].

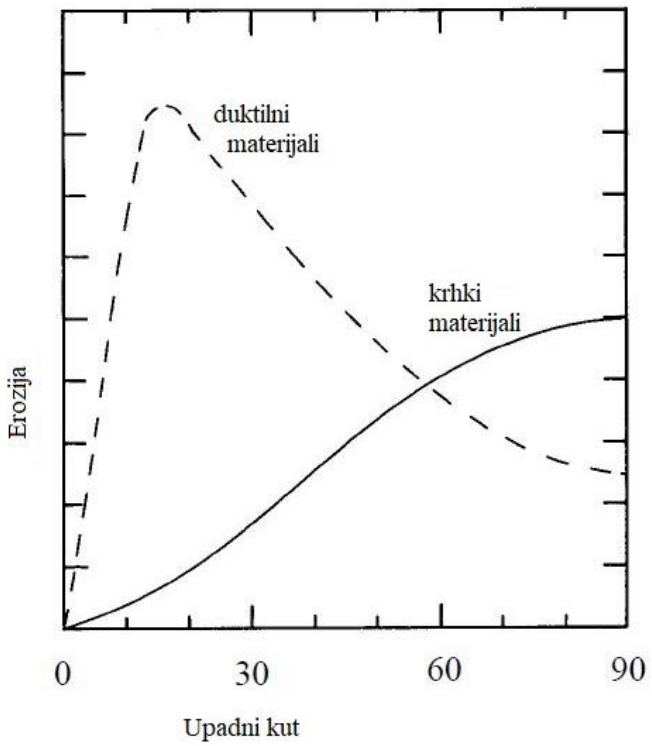
3.2. Erozija česticama

Erozija česticama, čija je shema tribosustava prikazana na slici 12, je vrsta erozije čiji je uzrok udaranje krutih čestica koje se nalaze u tekućem ili plinovitom mediju u površinu materijala. Krute čestice udaraju u površinu materijala te se odbijaju. Kod erozije česticama dolazi do abrazije i umora površine [8,10].



Slika 12 Shema tribosustava erozije česticama [8]

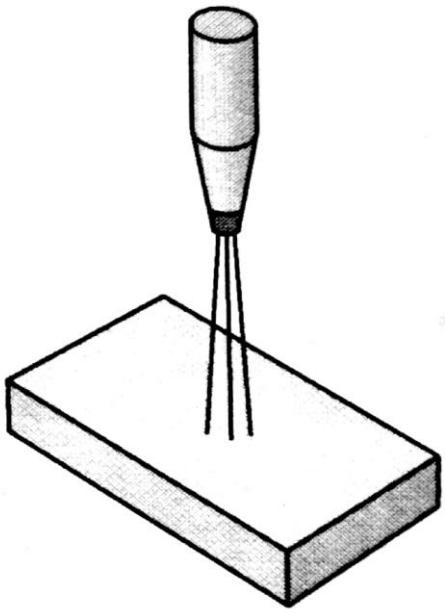
Na samu eroziju i trošenje utječu: protok čestica, brzina čestica, kut upada, rotacija čestica, udio čestica u mediju, tip medija i njegova temperatura, oblik, masa, veličina i tvrdoća čestica te oblik, zaostala naprezanja, temperatura, tvrdoća, lomna žilavost, talište, mikrostruktura i stanje površine materijala u koji čestica udara. Kut upada čestice ili kut udara α je kut između materijala koji se troši erozijom i putanje erodiranih čestica. Duktilni i krhki materijali različito erodiraju pri većim ili manjim kutovima. Duktilni materijali više erodiraju pri manjim vrijednostima kutova dok krhki materijali najviše erodiraju pri kutu od 90°, što je prikazano na grafu na slici 13. Erozija česticama može biti i korisna te se primjerice koristi za pjeskarenje materijala [8,10].



Slika 13 Ovisnost erodiranja krutih i duktilnih materijala o upadnom kutu čestice [11]

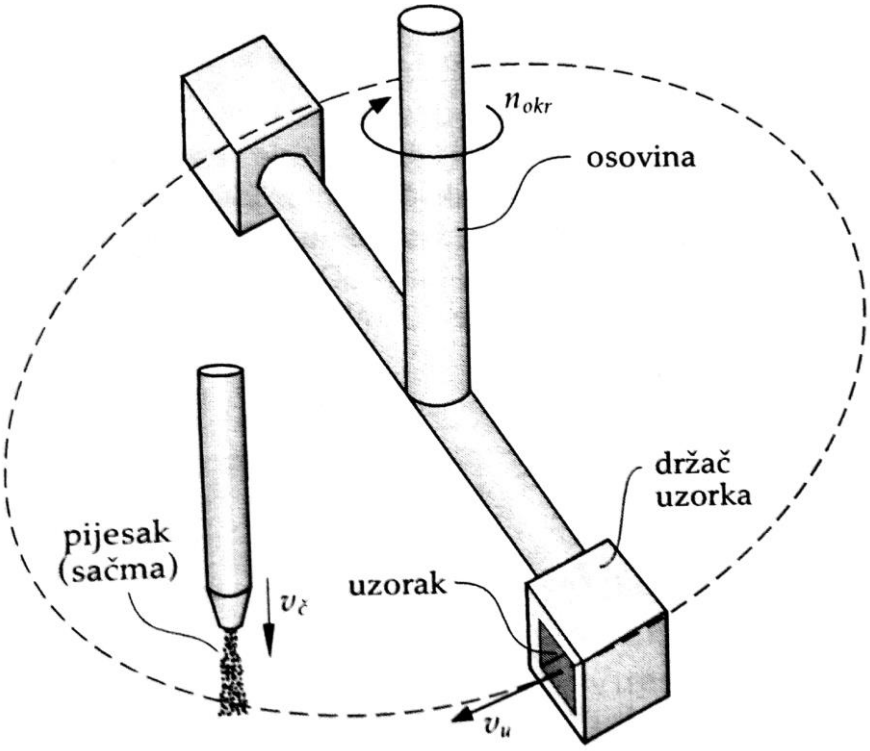
3.2.1. Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju česticama

Ispitivanje otpornosti materijala na eroziju krutim česticama može se odrediti metodom erozije česticama u struji plina prema ASTM G 76-83. Shema ispitivanja prikazana je na slici 14. Kod ovakvog ispitivanja mjere se gubitak mase i prosječna vrijednost erodiranja [8].



Slika 14 Shema ispitivanja erozije česticama u struji plina prema ASTM G 76-83 [8]

Za ispitivanje otporonosti na eroziju česticama može se koristiti uređaj za ispitivanje erozije suhim pijeskom. Uzorcima, postavljenim u držačima koji vrtnjom udaraju u abraziv, se mjeri promjena mase. Shema ispitivanja otpornosti materijala na eroziju česticama suhim pijeskom prikazana je na slici 15 [8].



Slika 15 Shema ispitivanja otpornosti materijala na eroziju česticama suhim pijeskom [8]

Također postoje i druge standardizirane i nestandardizirane metode za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju česticama koje se mogu koristiti [10,14]

4. PREGLED LITERATURE

U ovom radu napravljen je i pregled literature vezane uz trošenje i eroziju lopatica parnih turbina.

4.1. Mehanizmi i vrste erozije kod lopatica rotora parnih turbina

(engl. *Erosion behaviour and mechanisms for steam turbine rotor blades)*

U ovom radu [15] ispitano je erozijsko trošenje kapljevinom rotorskih lopatica zadnjih stupnjeva impulsne parne turbine. Materijal lopatice koji se ispitivao je X20Cr13. Na lopatice je za zaštitu od erozije kapljevinom nalemljena zaštita od stelita. Kako bi se odredio utjecaj erozije kapljevinom na lopaticu turbine, povremeno je kroz 10 godina parna turbina otvarana te je provjeravano stanje lopatica turbine. Praćeni su: stupanj oštećenja na prednjem rubu lopatice, dužina i širina rupa na zaštitama od stelita kao i na osnovnom materijalu na 7 lopatica rotora turbine. Kako bi se odredila vrsta erozije napravljen je presjek erodiranih lopatica turbine. Također su praćeni i uvjeti rada turbine.

Najveće oštećenje na lopatici turbine pronađeno je pri vrhu lopatice turbine dok su bliže korijenu lopatice turbine oštećenja jedva vidljiva zbog različitih veličina kapljica vode u tim dijelovima, kao i smanjene koncentracije kapljica pri korijenu lopatice. Na lopaticama kod kojih je oštećena stelitna zaštita dolazilo je do pojačanog trošenja osnovnog materijala lopatice. Neke lopatice turbine su, zbog loše konstrukcije ili loše montaže, bile 2 mm izvan promjera stupnja turbine što je pojačalo njihovo oštećivanje erozijom kapljevinom. Kapljice su uzrokovale i pukotine ispod površine materijala te male provrte promjera do 200 μm i duljine od 200 do 1000 μm. Erozijsko trošenje lopatice turbine podijeljeno je na tri faze. U prvoj fazi dolazi do smanjenog trošenja nakon čega slijedi pojačano trošenje te na kraju opet faza smanjenog trošenja u odnosu na drugu fazu. Lopatice turbine rade uglavnom u trećoj fazi smanjenog trošenja. Na kraju je dano procijenjeno vrijeme nakon kojeg bi lopatice trebale biti zamijenjene koje iznosi 112 960 sati rada.

4.2. Erozija rotorskih lopatica turbina u NE Krško

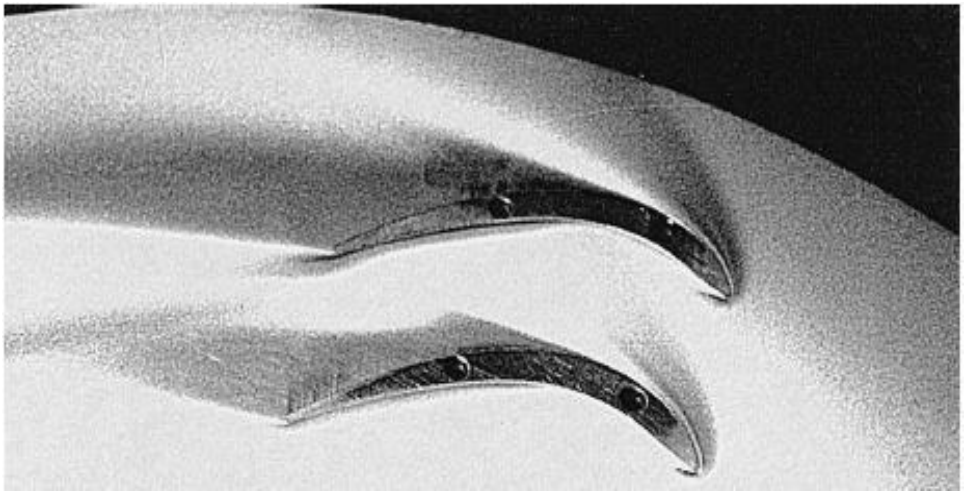
(engl. *Erosion behaviour of turbine rotor blades installed in the Krsko nuclear power plant*)

U radu [16] napravljena je analiza i dugotrajno praćenje erozijskih procesa i mehanizama na posljednjem stupnju lopatica parne turbine u nuklearnoj elektrani Krško. Na lopatice turbine stavljena je stelitna zaštita kako bi se smanjilo erozijsko djelovanje na lopatice turbine. Za dodatnu zaštitu od erozijskog djelovanja na lopatice turbine između lopatica statora i rotora napravljeno je odvajanje pare. Praćen je režim rada parne turbine, oštećenja nastala na ulaznoj strani lopatice rotora turbine te dužina i širina oštećenja nastalih na stelitnoj zaštiti i osnovnom materijalu lopatice. Značajnije erozijsko oštećenje lopatica uočeno je na zadnjim stupnjevima parne turbine. Proces erozije lopatice rotora podijeljen je u tri faze. Prva faza, do oko 4 000 h, ne pokazuje očita oštećenja na lopatici turbine. Do najbržeg trošenja dolazi u drugoj fazi (oko 28 000 h) erozijskog trošenja te na kraju dolazi do treće faze smanjenog trošenja. Procijenjeni vijek trajanja lopatica u ovoj turbini veći je od početnog očekivanog vijeka trajanja prije ispitivanja zbog dobre pasivne i aktivne zaštite.

4.3. Erozija česticama i zaštitni slojevi za lopatice parnih turbina

(engl. *Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading*)

Kod parnih turbina korištenih u termoelektranama može doći do erozije česticama. Do ovog tipa erozije kod parnih turbina uglavnom dolazi zbog odvajanja čestica magnetita, željeznog oksida nastalog u turbini. Najveće oštećenje javlja se na područjima najveće brzine protoka pare kao što je ulazni dio turbine. Trošenje lopatica turbine uslijed ovakvog erozijskog djelovanja ovisi o svojstvima protoka pare, a djelotvorna zaštita je nanošenjem tvrdih prevlaka na materijal lopatice turbine. U ovom radu ispitana je otpornost na eroziju česticama boridnih slojeva nanesenih na materijal u odnosu na materijal bez zaštitne prevlake. Otpornost na eroziju česticama bila je znatno veća kod lopatica na koje je nanesena prevlaka te je na slici 16 prikazana usporedba. Upadni kut, tj. kut udara čestica bio je između -23 ° i -46 °. Kod manjih kutova dolazi do trošenja na usisnoj strani lopatice dok kod većih kutova dolazi do trošenja na potisnoj strani lopatice [17].



Slika 16 Usporedba trošenja nezaštićene lopatice parne turbine (gore) i lopatice prevučene boridnim slojem (dolje) erozijom krutim česticama [17]

4.4. Eksperimentalno istraživanje utjecaja veličine kapljice na eroziju lopatice niskotlačne parne turbine

(engl. *Experimental investigation of droplet size influence on low pressure steam turbine blade erosion*)

U radu [18] istražen je utjecaj veličine kapljica pare na eroziju kapljevinom lopatica parne turbine. Ispitivanja su rađena na tri vrste čelika: X20Cr13, X5CrNiCuNb16-4 i X10CrNiMoV12-2-2 te titanijevoj leguri Ti6Al4V s kapljicama veličine 200 μm, 300 μm, 375 μm i 500 μm te uz protoke od 0,136 l/s, 0,108 l/s, 0,114 l/s i 0,058 l/s. Pokazano je da trošenje erozijom kapljevinom raste s povećanjem promjera kapljice iako dolazi do manjeg broja udaraca u lopaticu povećanjem promjera kapljice.

4.5. Erozijski umor kod lopatica parnih turbina

(engl. *Erosion-fatigue of steam turbine blades*)

Uzrok kvara na lopatici rotora turbine izrađenog od martenzitnog nehrđajućeg čelika istražen je u radu [7] . Lopatice su skinute sa zadnjeg stupnja parne turbine iz termoelektrane. Do havarije je došlo uslijed erozije česticama na izlaznoj strani lopatice rotora. Erozija

česticama uzrokovala je deformaciju, pucanje i odvajanje materijala lopatice turbine. Došlo je do povećanja naprezanja zbog nastajanja utora na mjestima trošenja što je dovelo do nastajanja pukotina umorom materijala. Također, na vrhovima lopatica nađena su i oštećenja nastala erozijom kapljevinom. Pronađene su željezne čestice čije porijeklo nije određeno.

4.6. Erozija kapljevinom lopatica parne turbine od nehrđajućeg čelika

(engl. *Water droplet erosion of stainless steel steam turbine blades*)

U radu [19] ispitana je erozija kapljevinom lopatice turbine nakon njezinog vijeka rada u parnoj turbini. Materijal lopatica turbine je martenzitni nehrđajući čelik. Na lopaticama su pronađeni tragovi trošenja nastali erozijom kapljevinom. Prije nastajanja pukotina na lopaticama je uočena povećana hrapavost površine lopatice turbine. Na površini lopatice uočena su oštećenja veličine 200 μm što je povezano s veličinom kapljica 50 – 200 μm. Tragovi erozije uočeni na lopaticama turbine skinutih s turbine nakon rada slični su tragovima nastalim laboratorijskim ispitivanjima. Iz tog razloga je zaključeno da je moguće predvidjeti prava erozijska oštećenja korištenjem eksperimentalnih rezultata u laboratoriju ako se uzme u obzir razlika između brzina udara kapljica u parnim turbinama i u laboratoriju što se može kompenzirati promjenom veličine kapljica.

4.7. Mehanizmi erozije česticama lopatice parne turbine i ključni parametri za minimiziranje erozije lopatice

(engl. *Mechanisms of steam turbine blade particle erosion and crucial parameters for minimizing blade erosion*)

Erozijsko trošenje česticama lopatica parne turbine analizirano je u radu [20]. Trošenje lopatica parne turbine puno je veće pri prvom udaru čestice u lopaticu u odnosu na daljnje udarce. Kut upada čestica utvrđen je kao važan parametar kod erozije česticama u parnim turbinama. Promjenom tog kuta može se utjecati na mjesto udaranja čestica o lopaticu. Povećanjem kuta može se udarac preusmjeriti na ulaznu stranu lopatice parne turbine, ali uz određenu promjenu rasporeda i razmaka lopatica u stupnju parne turbine.

4.8. Mehanizmi oštećenja erozijom u turbinskom stupnju sa zakrivljenom lopaticom rotora

(engl. *Erosion failure mechanisms in turbine stage with twisted rotor blade*)

U radu [21] ispitana je erozija kapljevinom i njezin utjecaj na efikasnost parne turbine koja radi u nuklearnoj elektrani. Dokazano je da stupanj erozije lopatice turbine ovisi o vlažnosti pare, kutu protoka, brzini protoka i promjeni profila lopatice od korijena do vrha. Do erozije kapljevinom u parnim turbinama dolazi zbog prisutnosti velikih kapljica vode koje je teže ubrzati što dovodi do pogoršanja aerodinamičkih svojstava i smanjenja efikasnosti turbine. Kako bi se smanjio taj utjecaj potrebno je smanjiti vlažnost pare u zadnjim stupnjevima turbine te bi vijek trajanja lopatica turbine bio produljen.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su provedena na lopatici rotora parne turbine koja je prikazana na slikama 17, 18 i 19.



Slika 17 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 1

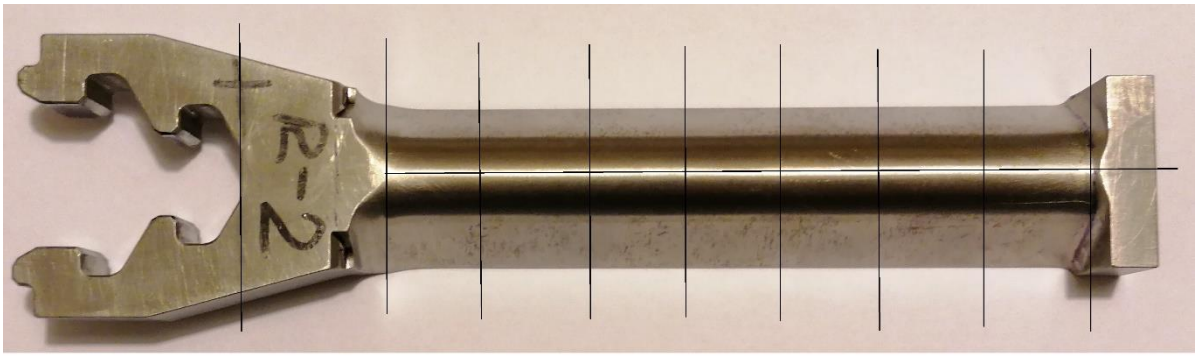


Slika 18 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 2



Slika 19 Lopatica rotora parne turbine prije rezanja - 3

Lopatica rotora parne turbine izrezana je na ispitne uzorke prema shemi prikazanoj na slici 20. Rezanje je odrađeno elektroerozijom žicom (EDM) na stroju Fanuc α-C600iB u tvrtci ESCO Fofonjka u Bjelovaru. Uzorci za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju suhim pijeskom su rezani na širinu 17 mm.



Slika 20 Shema rezanja uzoraka lopatice rotora parne turbine

5.1. Određivanje kemijskog sastava GDOES-om

Glow Discharge Optical Emission Spectrometry – GDOES postupak je određivanja kemijskog sastava te raspodjele kemijskih elemenata po dubini uzorka. Postupak je proveden u Laboratoriju za analizu metala. GDOES postupkom je određen kemijski sastav osnovnog materijala lopatice. U tablici 1 prikazan je rezultat analize osnovnog materijala GDOES-om.

Tablica 1 Rezultat GDS analize osnovnog materijala

%								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0.24	0.27	0.89	0.019	<0.01	14.24	0.86	0.68	ostatak

Iz tablice 1 se vidi da je osnovni materijal analiziranog uzorka visokolegirani čelik s 14,24% kroma i 0,24% ugljika te ostalim legirnim elementima poput mangana, molibdena, nikla, silicija te manjeg udjela fosfora i sumpora.

GDEOS metodom na odabranom uzorku nije utvrđeno postojanje prevlake te je za pretpostaviti da nije odabran optimalan uzorak za analizu.

5.2. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za metalografiju. Uzorak izrezan iz lopatice rotora parne turbine zaliven je u vodljivu masu nakon čega je brušen na stroju PRESI Minitech 233 prikazanom na slici 21. korištenjem brusnih papira granulacija: P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Zatim se uzorak polirao na stroju Struers DAP-V prikazanom na slici 22 korištenjem dijamantne paste granulacija 3 μm i 0,03 μm.



Slika 21 Uređaj za brušenje PRESI Minitech 233



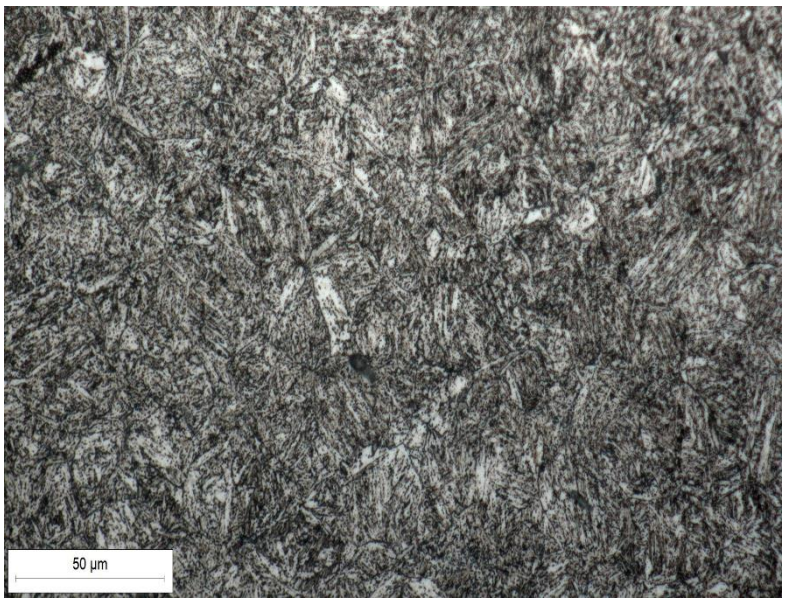
Slika 22 Uređaj za poliranje Struers DAP-V

Nakon poliranja uzorak je elektrokemijski nagrizan zbog čega je prethodno zaliven u masu te su na kraju snimljene slike mikrostrukture uzorka na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 prikazanom na slici 23.



Slika 23 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Dobivena je slika mikrostrukture pri uvećanju 500x koja je prikazana na slici 24.



Slika 24 Miktrostruktura jezgre materijala snimljena svjetlosnim mikroskopom

Prema slici 24 mikostrukture jezgre materijala dobivenom na svjetlosnom mikroskopu i kemijskom sastavu iz tablice 1 i usporedbom s [22] mikrostruktura analiziranog uzorka odgovara čeliku X20Cr13 koji pripada martenzitnim nehrđajućim čelicima. Navedeni čelik odgovara literaturnim navodima [23,24] čelika koji se primjenjuju za izradu lopatica parnih turbina.

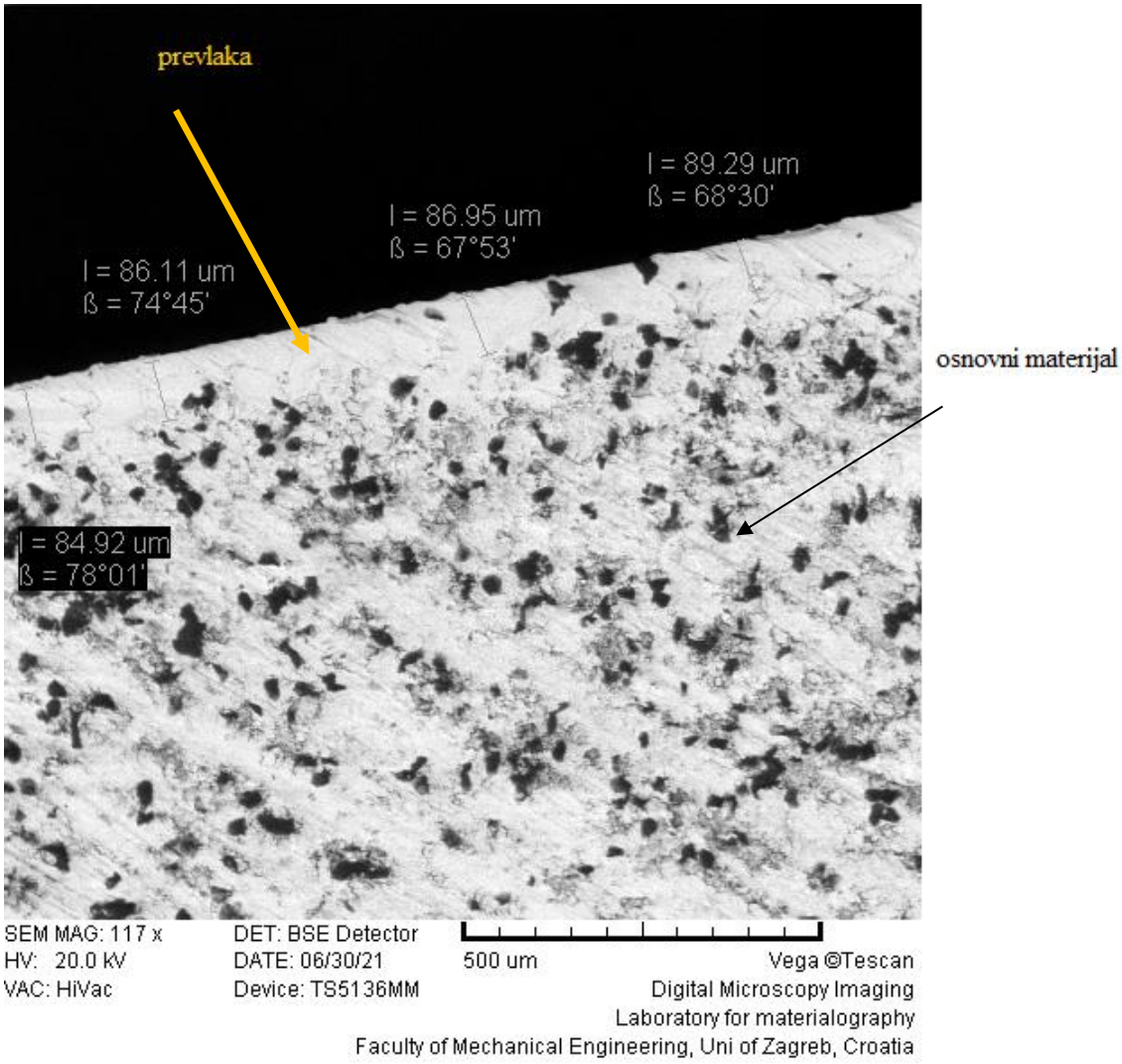
5.3. SEM analiza prevlake

Skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) TESCAN VEGA 5136 MM, prikazanom na slici 25, napravljena je analiza uzorka.



Slika 25 Skenirajući elektronski mikroskop TESCAN VEGA 5136 MM

Na slici 26 prikazana je SEM slika prevlake na osnovnom materijalu.



Slika 26 SEM slika prevlake na osnovnom materijalu

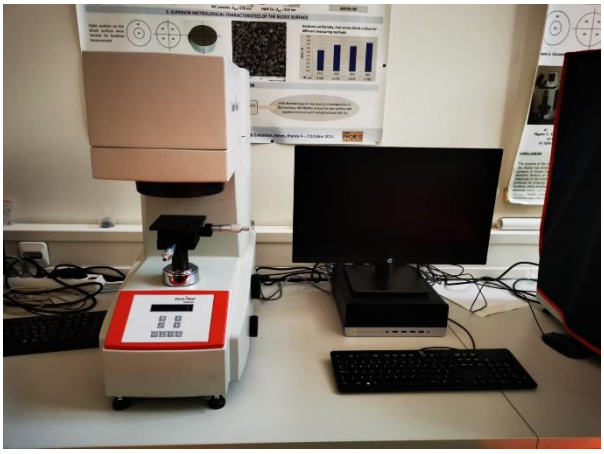
Na SEM slici 26 prikazan je poprečni presjek odabranog uzorka rotorske lopatice na kojem je izmjerena debljina prevlake te ona iznosi 87 µm.

U poglavlju 5.1, GDEOS metodom na odabranom uzorku nije utvrđeno postojanje prevlake ali je za pretpostaviti da je materijal prevlake stelit kojim se inače lopatice parnih turbina prevlače kao zaštita od trošenja erozijom kapljevinama ili česticama.

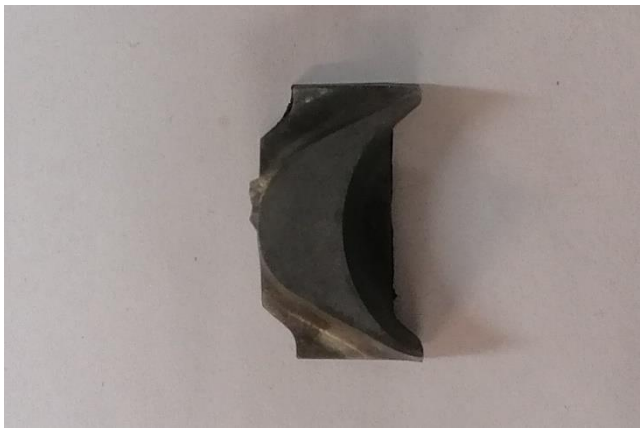
5.4. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće po Vickersu (HV1) provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Tvrdoća je izmjerena uređajem Indentec ZHV µ-ST, prikazanom na slici

27, prema normi HRN EN ISO 6507-1. Tvrdoća jezgre je mjerena na uzorku izrezanom iz lopatice rotora parne turbine prikazanom na slici 28.



Slika 27 Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu Indentec ZHV µ-ST



Slika 28 Uzorak na kojem je mjerena tvrdoća

Dobivene vrijednosti tvrdoće u jezgri uzorka su prikazane u tablici 2.

Tablica 2 Tvrdoća izmjerena u jezgri uzorka

Broj mjerenja	Tvrdoća, HV1
1	283
2	281
3	279
4	287
5	281
Prosječna tvrdoća	**282**

Prosječna izmjerena tvrdoća jezgre nakon 5 mjerenja iznosi 282 HV1 što odgovara tvrdoći popuštenog martenzita.

Tvrdoća je mjerena i na površini uzorka. Rezultati mjerenja tvrdoće na površini uzorka prikazani su u tablici 3.

Tablica 3 Tvrdoća izmjerena na površini uzorka

Broj mjerenja	Tvrdoća, HV0,5
1	276
2	282
3	274
4	279
5	276
Prosječna tvrdoća	**277**

Prosječna vrijednost tvrdoće na površini uzorka nakon 5 mjerenja iznosi 277 HV0,5.

5.5. Ispitivanje otpornosti na trošenje erozijom

Ispitivanje otpornosti na trošenje erozijom metodom sa suhim pijeskom provedeno je u Laboratoriju za tribologiju. Pijesak korišten za ispitivanje je kvarcni pijesak granulacije 0,25-0,50 μm. Ispitivanje otpornosti na trošenje erozijom je provedeno na 11 uzoraka izrezanih iz lopatice raspodijeljeno tako da je za svaki od 3 upadna kuta korišteno 3 uzoraka za ispitivanje

uzoraka s prevlakom, a za ispitivanje bez prevlake su korištena 2 uzorka. Uređaj na kojem je ispitivanje provedeno je prikazan na slici 29. Pijesak se stavlja u lijevak s gornje strane uređaja te on ulazi u stroj gdje curi i udara u uzorak pod određenim kutom. Shema ovog ispitivanja prikazana je ranije u poglavlju 3.2.1 na slici 15. Ispituju se 2 uzorka istovremeno. Brzina vrtnje u uređaju je 1440 min^{-1}, a brzina uzorka je 24,3 m/s.



Slika 29 Uređaj za ispitivanje otpornosti materijala na eroziju česticama suhim pijeskom

Kutovi upada čestica iznosili su 30°, 60° i 90°, a vremena ispitivanja iznosila su 15, 30 i 60 minuta. Uzorci su prije ispitivanja izvagani na vagi Pioneer Ohaus Analytical Balances koja je prikazana na slici 30. Nakon svakog ispitivanja uzorci su ispuhani kompresorom kako bi se uklonio pijesak s površine te su nakon toga izvagani na vagi. Za ispitivanje trošenja erozijom suhim pijeskom korištena je ista površina uzorka u istom smjeru za različita vremena ispitivanja.



Slika 30 Vaga Pioneer Ohaus Analytical Balances

5.5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti materijala na trošenje erozijom

U tablici 4 prikazane su očitane mase uzoraka bez prevlake pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnih kutova 30°, 60° i 90°.

Tablica 4 Očitane mase uzoraka bez prevlake

Očitane mase [g]				
	0 min	15 min	45 min	105 min
30°	19,0581	19,0568	19,0520	19,0468
60°	18,9117	18,9087	18,9032	18,8999
90°	19,0667	19,0647	19,0618	19,0581

U tablici 5 prikazane su promjene mase pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnih kutova 30°, 60° i 90° za uzorke bez prevlake.

Tablica 5 Promjena mase uzoraka bez prevlake za upadne kutove 30°, 60° i 90°

Promjena mase [mg]			
	15 min	45 min	105 min
30°	1,3	6,1	11,3
60°	3,0	8,5	11,8
90°	2,0	4,9	8,6

U tablici 6 prikazane su očitane mase uzoraka s prevlakom pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 30°.

Tablica 6 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 30°

Očitane mase [g]				
30°	0 min	15 min	45 min	105 min
1	11,4755	11,4726	11,4689	11,4651
2	13,1467	13,1440	13,1422	13,1364
3	11,7236	11,7217	11,7203	11,7169

U tablici 7 prikazana je promjena mase pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 30°.

Tablica 7 Promjena mase kod upadnog kuta 30°

Promjena mase [mg]			
30°	15 min	45 min	105 min
1	2,9	6,6	10,4
2	2,7	4,5	10,3
3	1,9	3,3	6,7
Prosječno	**2,5**	**4,8**	**9,1**

U tablici 8 prikazane su očitane mase uzoraka pri trošenju erozijom kod upadnog kuta 60°.

Tablica 8 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 60°

Očitane mase [g]				
60°	0 min	15 min	45 min	105 min
1	12,6613	12,6578	12,6555	12,6494
2	12,6466	12,6435	12,6418	12,6369
3	12,8096	12,8073	12,8051	12,8005

U tablici 9 prikazana je promjena mase pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 60°.

Tablica 9 Promjena mase uzorka kod upadnog kuta 60°

Promjena mase [mg]			
60°	15 min	45 min	105 min
1	3,5	5,8	11,9
2	3,1	4,8	9,7
3	2,3	4,5	9,1
Prosječno	**3,0**	**5,0**	**10,2**

U tablici 10 prikazane su očitane mase uzoraka pri trošenju erozijom kod upadnog kuta 90°.

Tablica 10 Očitane mase uzoraka kod upadnog kuta 90°

Očitane mase [g]				
90°	0 min	15 min	45 min	105 min
1	11,3590	11,3575	11,3537	11,3495
2	11,5692	11,5689	11,5675	11,5618
3	11,4131	11,4128	11,4113	11,4089

Tablica 11 prikazuje promjenu mase pri trošenju erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 90°.

Tablica 11 Promjena mase kod upadnog kuta 90°

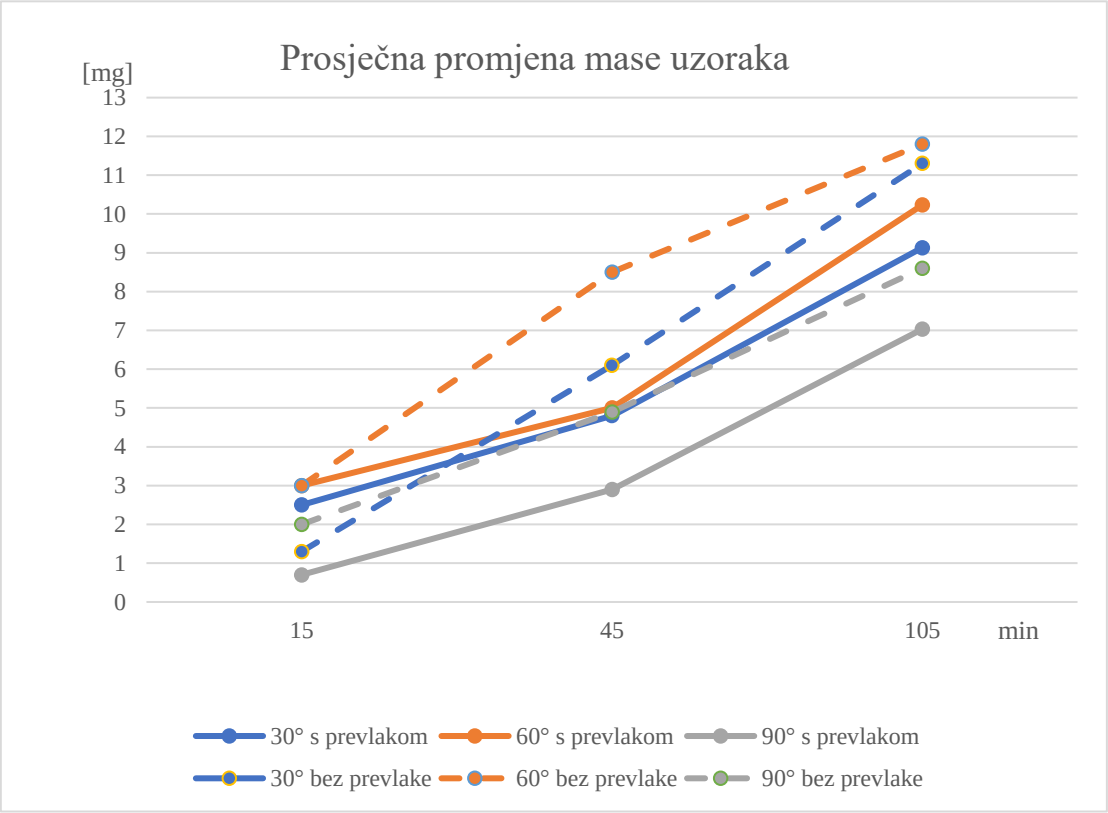
Promjena mase [mg]			
90°	15 min	45 min	105 min
1	1,5	5,3	9,5
2	0,3	1,7	7,4
3	0,3	1,8	4,2
Prosječno	**0,7**	**2,9**	**7,0**

Prosječna promjena mase u vremenskim intervalima 15 min, 45 min i 105 min za upadne kutove od 30°, 60° i 90° za uzorke s i bez prevlake prikazana je u tablici 12.

Tablica 12 Prosječna promjena mase uzoraka

	15 min [mg] s prevlakom	45 min [mg] s prevlakom	105 min [mg] s prevlakom	15 min [mg] bez prevlake	45 min [mg] bez prevlake	105 min [mg] bez prevlake
30°	2,5	4,8	9,1	1,3	6,1	11,3
60°	3,0	5,0	10,2	3,0	8,5	11,8
90°	0,7	2,9	7,0	2,0	4,9	8,6

Također prosječna promjena mase za različite kutove s i bez prevlake prikazana je na grafu na slici 31.



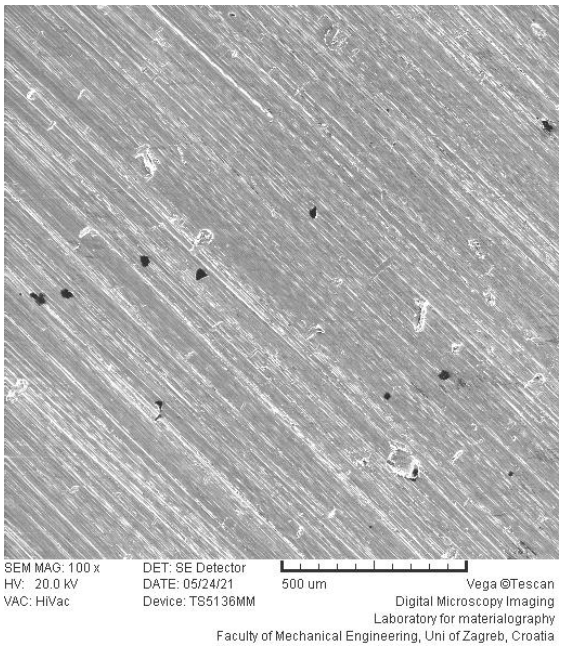
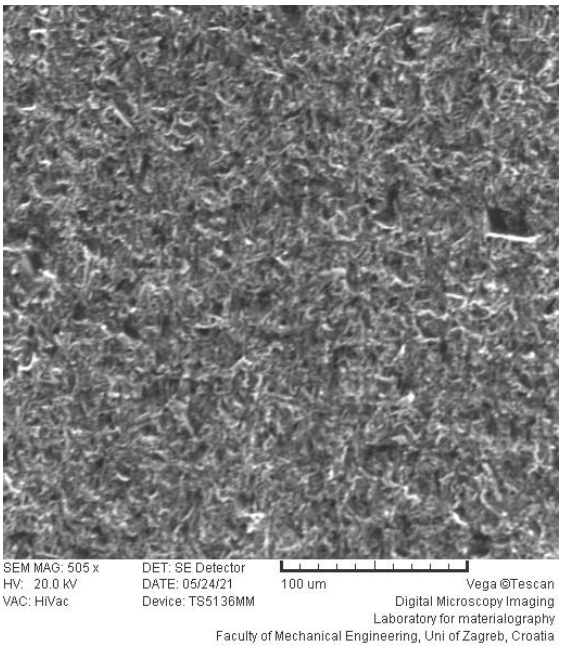
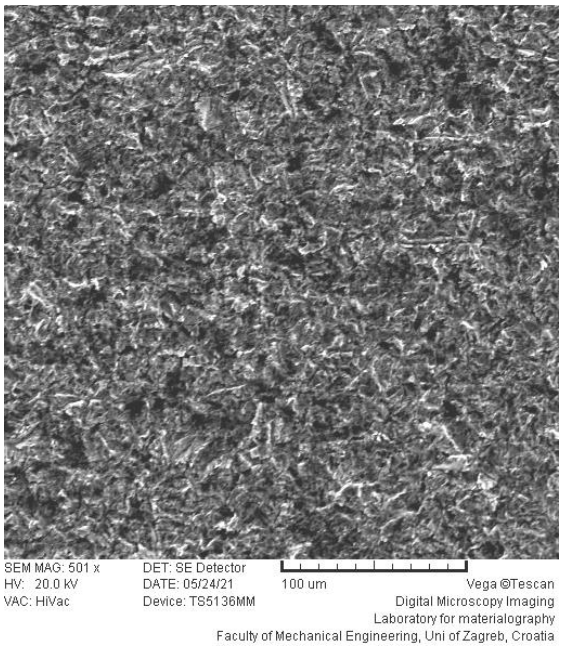
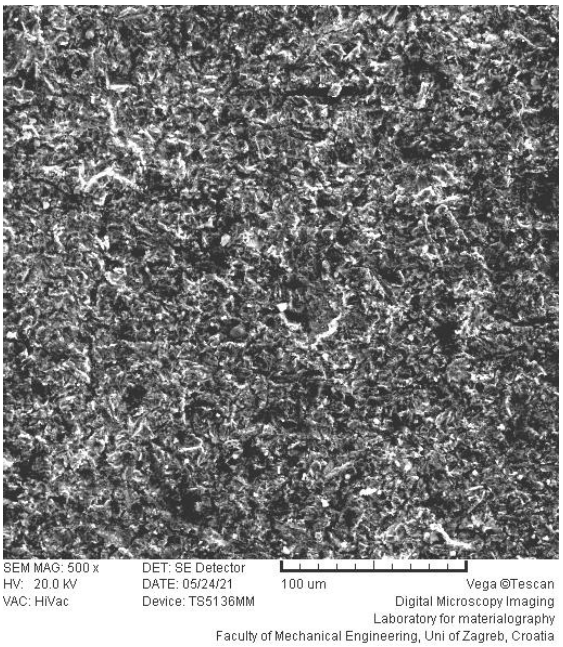
Slika 31 Grafički prikaz prosječne promjene mase uzoraka

Prema grafu na slici 31 uzorci bez prevlake pokazuju manju otpornost na erozijsko trošenje pri svim upadnim kutovima. Najveća promjena mase trošenjem erozijom česticama

kod uzoraka bez prevlake je kod upadnog kuta 60°. Nakon 45 minuta kod uzorka od 30° došlo je do intenzivnijeg trošenja i povećava se nagib krivulje trošenja. Kod uzoraka s prevlakom do najvećeg trošenja erozijom česticama kod uzoraka sa stelitnom prevlakom je kod upadnog kuta 60°. Nagibi krivulja trošenja kod kutova 30° i 90° su približno jednaki, a kod kuta 60° nakon 45 minuta dolazi do intenzivnijeg trošenja, tj. povećava se nagib krivulje trošenja.

Skenirajućim elektronskim mikroskopom dobivene su slike tragova trošenja uzoraka za kutove 30°, 60° i 90°, ali i slike uzorka prije trošenja. Slike su prikazane u tablici 13.

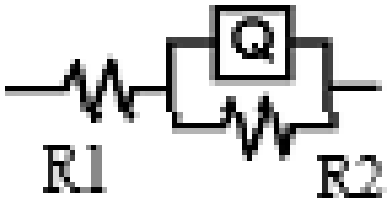
Tablica 13 Slike sa SEM-a površine prije i nakon trošenja erozijom suhim pijeskom

SEM slika površine uzorka prije trošenja erozijom suhim pijeskom	Slika površine uzorka nakon trošenja erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 30°
	
Slika površine uzorka nakon trošenja erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 60°	Slika površine uzorka nakon trošenja erozijom suhim pijeskom kod upadnog kuta 90°
	

U tablici 13 na slici površine uzorka prije trošenja erozijom suhim pijeskom vide se oštećenja na površini uzorka. Slike površina uzoraka nakon trošenja erozijom suhim pijeskom kod upadnih kutova 30°, 60° i 90° prikazuju „raščerupanu“ površinu, a na površini se nalaze krateri, žlijebovi na rubovima kratera i pore.

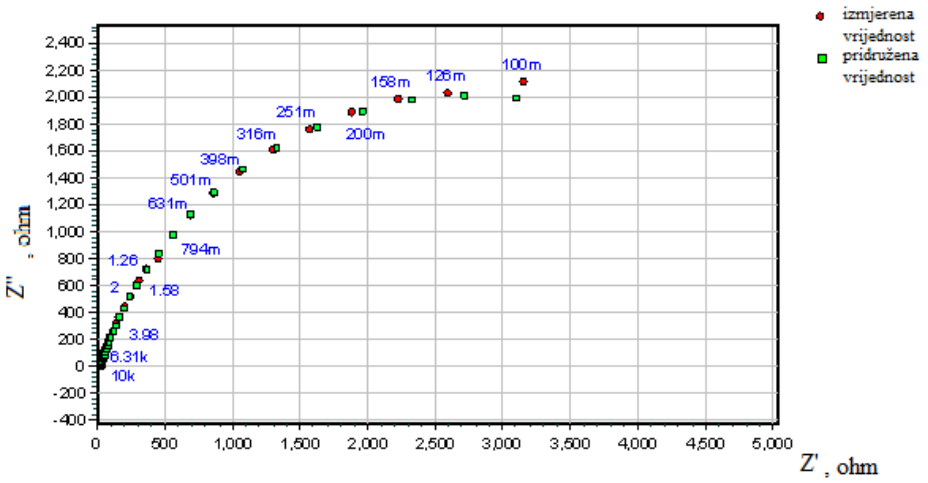
5.6. Elektrokemijsko ispitivanje

Elektrokemijsko ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom (EIS) na uređaju VersaSTAT 3 koristeći software VersaSTUDIO. Software korišten za obradu podataka je ZsimpWin. Ispitivanje je provedeno u 0,5%-noj otopini NaCl. Zasićena kalomel elektroda (ZKE) korištena je kao referentna elektroda. Uzorak prestavlja radnu elektrodu. Ispitivanjem su dobiveni Nyquistov i Bodeov dijagram. Korišteni strujni krug na bazi Randleovog ekvivalentnog strujnog kruga prikazan je na slici 32.

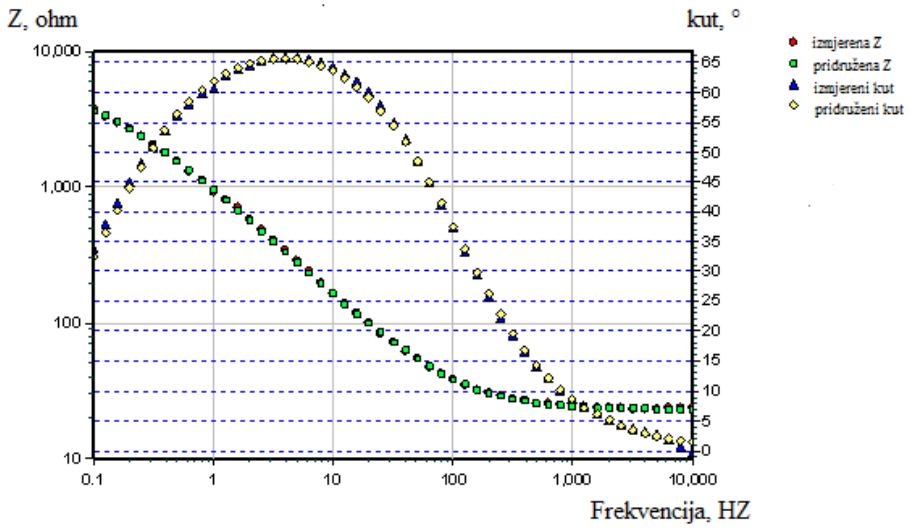


Slika 32 Ekvivalentni strujni krug

U ekvivalentnom strujnom krugu Q predstavlja kapacitet uzorka dok je R1 otpor elektrolita, a R2 otpor uzorka. Na slikama 33 i 34 su prikazani dobiveni Bodeov i Nyquistov dijagram s pridruženim (fitanim) vrijednostima strujnog kruga.



Slika 33 Nyquistov dijagram s pridruženim vrijednostima



Slika 34 Bodeov dijagram s pridruženim vrijednostima

Odabrani strujni krug poklapa se ispitanom materijalu što se vidi po tome što se izmjerene vrijednosti poklapaju s pridruženim vrijednostima iz strujnog kruga za nehrđajući čelik X20Cr13. Nije otkrivena razlika između osnovnog materijala i prevlake pa se može zaključiti da je površina puna pora kao što se vidi iz tablice 13 (SEM slika površine uzorka prije trošenja erozijom suhim pijeskom). Otpor elektrolita iznosio je 2,228 Ω dok je otpor osnovnog materijala iznosio 5,464 x 10^3 Ω.

6. ZAKLJUČAK

Prema ispitivanjima provedenim na uzorcima izrezanim iz lopatice rotora parne turbine može se zaključiti:

- lopatica rotora parne turbine izrađena je od nehrđajućeg martenzitnog čelika X20Cr13
- otpornost uzoraka bez prevlake na erozijsko trošenje je manja od otpornosti uzoraka s prevlakom
- najveće erozijsko trošenja česticama lopatice parne turbine dolazi kod upadnog kuta čestica 60° dok do najmanjeg erozijskog trošenja česticama dolazi pri upadnom kutu 90°
- izmjerena tvrdoća jezgre je 282 HV1, a izmjerena tvrdoća na površini je 277 HV0,5
- elektrokemijskim ispitivanjem nije otkrivena razlika između osnovnog materijala i prevlake.

LITERATURA

[1] Paul M. Muchinsky. Steam Turbines Design, Applcations and Re-rating. Vol. 53, Psychology Applied to Work: An Introduction to Industrial and Organizational Psychology, Tenth Edition Paul. New York; 2012. 1689–1699 p.

[2] Štefanović D, editor. Tehnička Enciklopedija 13.: Ter-Ž. Zagreb: Leksikografski zavod "Miroslav Krleža"; 1997. 222–254 p.

[3] Tanuma T, editor. Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants. London: Woodhead Publishing; 2017.

[4] Singh MP, Lucas GM. Blade Design and Analysis for Steam Turbines. New York: McGraw-Hill; 2011.

[5] Osgerby S. Steam turbines: Operating conditions, components and material requirements. In: Shirzadi A, Jackson S, editors. Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperature Materials. Woodhead Publishing; 2014. p. 22–35.

[6] Zhu M. Design and analysis of steam turbine blades. J Phys Conf Ser. 2019 Aug;1300(1):012056. doi:10.1088/1742-6596/1300/1/012056

[7] Azevedo CRF, Sinátora A. Erosion-fatigue of steam turbine blades. Eng Fail Anal. 2009 Oct;16(7):2290–303. doi:10.1016/j.engfailanal.2009.03.007

[8] Grilec K, Jakovljević S, Marić G. Tribologija u strojarstvu. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[9] Saxena S, Pandey JP, Solanki RS, Gupta GK, Modi OP. Coupled mechanical, metallurgical and FEM based failure investigation of steam turbine blade. Eng Fail Anal. 2015 Jun;52:35–44. doi:10.1016/j.engfailanal.2015.02.012

[10] Helle A, Andersson P, Ahlroos T, Kupiainen V. Erosive wear of coatings and methods to monitor coating wear – A literature study. Technology. 2004.

[11] Gee MG, Neale MJ. General Approach and Procedures for Erosive Wear Testing. Meas Good Pract Guid. 2002;51(56).

[12] Mann BS, Arya V, Pant BK, Agarwal M. High Power Diode Laser Surface Treatment to Minimize Droplet Erosion of Low Pressure Steam Turbine Moving Blades. J Mater Eng Perform. 2009 Oct 1;18(7):990–8. doi:10.1007/s11665-008-9329-y

[13] Mann BS. Water Droplet Erosion Behavior of High-Power Diode Laser Treated 17Cr4Ni PH Stainless Steel. J Mater Eng Perform. 2014 May 5;23(5):1861–9.

doi:10.1007/s11665-014-0927-6

[14] Budinski KG. Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing. West Conshohocken: ASTM International; 2007.

[15] Staniša B, Ivušić V. Erosion behaviour and mechanisms for steam turbine rotor blades. Wear. 1995 Aug;186–187(PART 2):395–400. doi:10.1016/0043-1648(95)07136-9

[16] Staniša B, Schauperl Z, Grilec K. Erosion behaviour of turbine rotor blades installed in the Krsko nuclear power plant. Wear. 2003 Apr;254(7–8):735–41. doi:10.1016/S0043-1648(03)00260-6

[17] Mann B. Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading. Wear. 1999 Jan;224(1):8–12. doi:10.1016/S0043-1648(98)00305-6

[18] Ahmad M, Schatz M, Casey MV. Experimental investigation of droplet size influence on low pressure steam turbine blade erosion. Wear. 2013 Jun;303(1–2):83–6. doi:10.1016/j.wear.2013.03.013

[19] Kirols HS, Kevorkov D, Uihlein A, Medraj M. Water droplet erosion of stainless steel steamturbine blades. Mater Res Express. 2017;4.

[20] Wang S, Cai L, Mao J, Zhang J, Xu Y. Mechanisms of steam turbine blade particle erosion and crucial parameters for minimizing blade erosion. Proc Inst Mech Eng Part A J Power Energy. 2013 Aug 15;227(5):546–56. doi:10.1177/0957650913495384

[21] Ilieva GI. Erosion failure mechanisms in turbine stage with twisted rotor blade. Eng Fail Anal. 2016 Dec;70(70):90–104. doi:10.1016/j.engfailanal.2016.07.008

[22] Mills K, Davis JR, Destefani JD, Dieterich DA, Crankovic GM, Frissell HJ, et al., editors. ASM Handbook - Volume 9 Metallography and Microstructures. Ninth Edit. ASM International; 2000.

[23] Mirshekari GR, Daee S, Bonabi SF, Tavakoli MR, Shafyei A, Safaei M. Effect of interlayers on the microstructure and wear resistance of Stellite 6 coatings deposited on AISI 420 stainless steel by GTAW technique. Surfaces and Interfaces. 2017 Dec;9(August):79–92. doi:10.1016/j.surfin.2017.08.005

[24] Saeedi R, Shoja Razavi R, Bakhshi SR, Erfanmanesh M, Ahmadi Bani A. Optimization and characterization of laser cladding of NiCr and NiCr–TiC composite coatings on AISI 420 stainless steel. Ceram Int. 2021 Feb;47(3):4097–110. doi:10.1016/j.ceramint.2020.09.284

PRILOZI

I. CD-R disc