

# Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine

---

Mlinarić, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:969104>

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

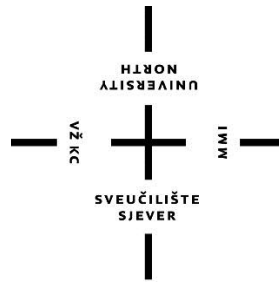
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

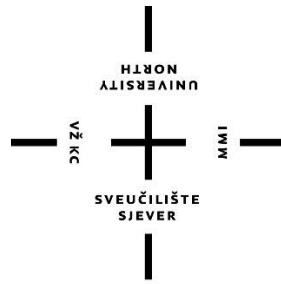
**Završni rad br. 199/PS/2016**

## **Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine**

**Nikola Mlinarić, 2169/601**

Varaždin, rujan 2016. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

199/PS/2016

## Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine

### Student

Nikola Mlinarić, 2169/601

### Mentor

Marko Horvat, dipl.ing.

Varaždin, rujan 2016. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
PRISTUPNIK	Nikola Mlinarić	MATIČNI BROJ	2169/601
DATUM	28.09.2016.	KOLEGIJ	Materijali II
NASLOV RADA	Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Reconditioning of gas turbine combustion chamber		
MENTOR	Marko Horvat, dipl. ing.	ZVANJE	predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač		
	2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač		
	3. Božo Bujanić, dipl.ing., viši predavač		
	4. _____		
	5. _____		

VŽKC

MMI

## Zadatak završnog rada

BROJ	199/PS/2016
OPIS	U radu je potrebno obraditi: <ul style="list-style-type: none"><li>- uvod u temu i problematiku zadatka završnog rada</li><li>- opisati superlegure, rad plinskih turbina zajedno sa komorom izgaranja te opisati postupke ispitivanja</li><li>- za konkretni zadani primjer navesti svrhu i plan izvođenja ispitivanja materijala</li><li>- opisati i dokumentirati provedena ispitivanja na konkretnom zadanom primjeru</li><li>- u zaključku rada osvrnuti se na dobivene rezultate u eksperimentalnom dijelu rada</li></ul>

ZADATAK URUČEN

29.09.2016.



POTPIS MENTORA

## **Predgovor**

Zahvaljujem mentoru dipl. ing. Marku Horvatu koji je pratio cijeli proces nastajanja završnog rada i svojim savjetima usmjeravao me kako da prevladam probleme koji bi se pojavili prilikom izrade završnog rada. Hvala tvrki Inpirio koja mi je ustupila potrebne podatke te dokumente koji su bili potrebni u nastajanju završnog rada. Želim spomenuti i nesebičnu pomoć Bože Bujanića, dipl. ing. koji je svojim savjetima pomogao u izradi završnog rada.

## Sažetak

U izradi strojnih dijelova plinskih turbina koja su izložena radu na visokim temperaturama najčešće se koriste superlegure na bazi nikla. Jedna od tih superlegura na bazi nikla je superlegura 617, bolje poznata po komercijalnom nazivu Inconel 617 ili Nicrofer 300.

Teoretski dio završnog rada nalazi se u prvom dijelu. U njemu se govori o superleguri 617, plinskom postrojenju, dijelovima plinske turbine te o postupcima ispitivanja.

U drugom dijelu opisano je ispitivanje svojstva te mikrostruktura superlegure 617 koje se provodilo u svrhu određivanja stanja materijala komponente komore izgaranja, Zone 2.

Ispitivanje se provodi na komponenti koja je provela 32,000h na temperaturama većim od 1000°C. Dobiveni rezultati uspoređuju se sa svojstvima istog materijala u originalnom stanju.

Na temelju rezultata ispitivanja donesen je zaključak o stanju komponente te prikazana degradacija materijala tijekom rada komponente.

**Ključne riječi:** plinska turbina, superlegura 617, mehanička ispitivanja

## Popis korištenih kratica

<b>FCC</b>	Kubična plošno centrirana kristalna rešetka
<b>°C</b>	Celzijevi stupnjevi
<b>MW</b>	Megawatt
<b>FSR</b>	Field Service Report Terenski izvještaj
<b>LPIS</b>	Lower Part of CC Zone 2 Inner Shell Donji dio unutarnje oplata kućišta izgaranja Zone 2
<b>LPOS</b>	Lower Part of CC Zone 2 Outer Shell Donji dio vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2
<b>PO</b>	Purchase order Narudžbenica
<b>GT24</b>	Tip plinske turbine oznake 24
<b>GT13</b>	Tip plinske turbine sa oznakom 13
<b>XRF</b>	X-Ray florescentna spektroskopija
<b>RECO</b>	Reconditioning Rekondicioniranje
<b>HCl</b>	Klorovodična kiselina
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Dušična kiselina
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials Američko društvo za ispitivanje i materijale
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization Međunarodna organizacija za standardizaciju



# Sadržaj

1.	Uvod.....	6
2.	Superlegura 617 .....	8
2.1.	Fizička i toplinska svojstva .....	9
2.2.	Mehanička svojstva.....	10
2.2.1.	Vlačna svojstva.....	10
2.2.2.	Dinamička izdržljivost.....	11
2.2.3.	Statička izdržljivost .....	12
2.3.	Plinskoturbinsko postrojenje.....	14
2.3.1.	Komora izgaranja .....	18
2.4.	Kombinirani proces plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja.....	21
2.5.	Ispitivanje uzorka .....	23
2.5.1.	Statičko rastezno ispitivanje.....	23
2.5.2.	Ispitivanje žilavosti.....	30
2.5.3.	Spektroskopska analiza / Kemijski sastav .....	32
2.5.4.	Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala svjetlosnim mikroskopom.....	32
3.	Uvod i opći podaci ispitivanja.....	35
4.	Specifikacija materijala.....	38
4.1.	Svrha dokumenta.....	38
4.2.	Oznaka materijala .....	38
4.3.	Kemijski sastav .....	38
4.4.	Mehanička svojstva materijala pri sobnoj temperaturi .....	38
4.5.	Mehanička svojstva materijala pri sobnoj temperaturi .....	39
4.6.	Dodatni zahtjevi .....	39
4.7.	Stanje isporuke .....	39
4.8.	Posebne napomene .....	40
4.9.	Dokumentacija za kvalitetu.....	40
5.	Uzimanje uzorka materijala za razorno ispitivanje .....	41
5.1.	Upute .....	41
5.2.	Ispitivanja provedena na uzorcima.....	41
5.2.1.	Uzorak u nađenom stanju.....	41
5.2.2.	Uzorak nakon toplinske obrade.....	41
5.3.	Opći zahtjevi za ispitivanje .....	42
5.4.	Veličina uzorka .....	42
5.5.	Stanje površina komponente s koje se uzima uzorak.....	43
5.6.	Dokumentiranje uzorka i njegove pozicije .....	43
5.7.	Povijest komponente .....	44
5.8.	Dokumentacija .....	44
6.	Uzimanje uzorka materijala te vizualno ispitivanje .....	45
7.	Uzorci materijala LPIS i LPOS u stvarnom stanju .....	47
7.1.	Rezultati ispitivanja materijala / metalurška analiza kućišta izgaranja Zone 2 uzorka u stvarnom stanju .....	48
7.1.1.	Mikrostruktura materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju.....	48
7.1.2.	Mikrostruktura materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju .....	50

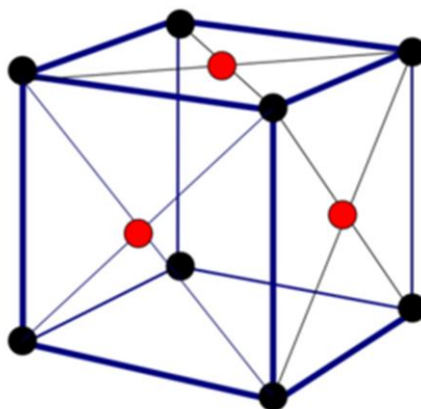
7.2. Rezultati ispitivanja materijala / metalurška analiza uzorka kućišta izgaranja Zone 2 nakon toplinske obrade .....	51
7.2.1. Mikrostruktura materijala uzorka LPIS nakon toplinske obrade .....	51
7.2.2. Mikrostruktura materijala uzorka LPOS nakon toplinske obrade .....	53
7.3. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka komore izgaranja Zone 2 u stvarnom stanju ....	55
7.3.1. Rastezno ispitivanje uzorka LPIS u stvarnom stanju.....	55
7.3.2. Rastezno ispitivanje uzorka LPOS u stvarnom stanju.....	56
7.4. Rezultati ispitivanja žilavosti uzorka komore izgaranja Zone 2 u stvarnom stanju .....	57
7.4.1. Ispitivanje žilavosti uzorka LPIS u stvarnom stanju.....	57
7.4.2. Ispitivanje žilavosti uzorka LPOS u stvarnom stanju.....	58
7.5. Rezultati spektroskopske analize / kemijskog sastava uzorka komore izgaranja Zone2 u stvarnom stanju .....	59
7.5.1. Spektrografska analiza / kemijski sastav uzorka LPIS u stvarnom stanju.....	59
7.5.2. Spektrografska analiza / kemijski sastav uzorka LPOS u stvarnom stanju .....	60
7.6. Sažetak / Procjena ispitivanja materijala / metalurška analiza .....	61
8. Zaključak.....	63
9. Literatura.....	64

# 1. Uvod

Od početka razvijanja plinskih turbina inženjeri su tražili najveći mogući stupanj djelovanja procesa. Povećanjem temperature turbine dobiva se veći stupanj djelovanja procesa pa su se povodom toga i javile potražnje za materijalom koji mogu izdržati rad, koroziju i naprezanja na povišenim temperaturama. Upravo zbog tog potraživanja razvijaju se superlegure. Zahtjevi za superlegurama javljaju se radi otpornosti materijala koji prikazuje izvrsnu mehaničku čvrstoću, otpornost na koroziju te otpor puzanju pri visokim temperaturama.

Superlegure su materijali na bazi nikla i kobalta koji se upotrebljavaju pri visokim radnim temperaturama. U usporedbi s ostalim metalnim materijalima ove legure koriste se za rad na temperaturama do 1100°C.

Glavno obilježje superlegura na bazi nikla i kobalta je kubična plošno centrirana (FCC) kristalna struktura (Slika 1.1) u području povišenih i visokih temperatura.



*Slika 1.1.1 Kubična plošno centrirana (FCC) kristalna struktura*

Ove legure imaju visoku gustoću, oko 8400 kg/m<sup>3</sup>, što je značajno više u usporedbi s aluminijskim i titanovim legurama, pa i čelikom. Tale se pri relativno visokim temperaturama. Talište čistog nikla iznosi 1453°C, a kobalta 1495°C. Superlegure su materijali visoke krutosti određene vrijednošću modula elastičnosti koji za niklove legure iznosi 210000 N/mm<sup>2</sup>, dok je kod kobaltovih legura Youngov modul samo neznatno niži, 209000 N/mm<sup>2</sup>. Većina superlegura (osim nekih na bazi kobalta) se prilikom toplinskih postupaka, homogenizacijskog žarenja, gašenja i naknadnog dozrijevanja učvršćuje. Toplinskom obradom precipitacijskog očvršnuća znatno se može povisiti čvrstoća. Visoku mehaničku otpornost ove legure zadržavaju i u području povišenih i visokih temperatura te pokazuju vrlo veliku otpornost puzanju. I nikel i kobalt su metali s feromagnetičnim svojstvima. S time je povezana magnetostrikcija koja označava malu promjenu volumena koja se javlja uslijed magnetne uzbuđe. Superlegure na bazi nikla izvanredno su postojane na koroziju, otporne su na atmosferske utjecaje, postojane u

morskoj vodi, neoksidirajućim hladnim kiselinama, lužnatim otopinama i rastaljenim jakim lužinama. Zbog kristalne građe zadržavaju žilavost pri niskim temperaturama, hladno su oblikovljive, ali se zbog velike brzine hladnog očvrnuća moraju se odžarivati tijekom prerade. Kobaltove superlegure su dobro toplo oblikovljive i ograničeno hladno oblikovljive. [1,2,3]

## 2. Superlegura 617

Superlegura 617 je legura nikla, kroma, legure kobalt-molibdena, s dodatkom aluminijsa, koji je osmišljen kako bi se dobila kombinacija povećane snage i stabilnosti na povišenoj temperaturi, dok se zadržava visoka temperaturna otpornost na koroziju. Ograničavajući kemijski sastav superlegure 617 naveden je u tablici 2.1. Visoki sadržaj nikla i kroma daje veliku otpornost na razne oksidirajuće medije. Aluminijs, zajedno s kromom, daje oksidirajuću otpornost na visokim temperaturama dok čvrstoću daje eutektoidna mješavina kobalta i molibdena. [1]

Tabela 2.1 Kemijski sastav superlegure 617[1]

MATERIJAL	%
Nikal (Ni)	44.5
Krom (Cr)	20 – 24
Kobalt (Co)	10 – 15
Molibden (Mo)	8 – 10
Željezo (Fe)	≤ 3
Aluminijs (Al)	0.8 – 1.5
Mangan (Mn)	≤ 1
Silicij (Si)	≤ 1
Titanij (Ti)	≤ 0.6
Bakar (Cu)	≤ 0.5
Ugljik (C)	0.05 – 0.15
Sumpor (S)	≤ 0.015
Fosfor (F)	≤ 0.012
Bor (B)	≤ 0.006

Superlegura 617 je pogodna kod prisutnosti visoke temperature i naročito visokih mehaničkih naprezanja. Daje jako dobra mehanička svojstva, odličnu otpornost na oksidaciju te koroziju na temperaturi do 1000°C kada se koristi bez površinske zaštite (keramika). Tipične primjene su za industrijske i zrakoplovne plinske turbine, kao što su unutarnje obloge, kućišta izgaranja, turbinski prstenovi, turbinske lopatice i drugi dijelovi koji su izloženi visokim temperaturama i mehaničkim naprezanjima. Druge svrhe materijala mogu se naći u pećima, grijačima cijevi, visokih temperaturnim izmjenjivačima topline, plinsko hlađenim nuklearnim reaktorima, u opremi za kemijsku i petrokemijsku industriju. [1]

## 2.1. Fizička i toplinska svojstva

Područja taljenja te fizičke osobine na sobnoj temperaturi prikazane su u tablici 2.2. Niska gustoća legure, u usporedbi sa legurama koje sadrže volfram slične čvrstoće, značajne su kod aplikacija kao što su avionske turbine radi poželjog omjera visoke čvrstoće te težine. [1]

Toplinska svojstva legure 617 pri temperaturama do 1095°C dane su u tablici 2.3. Izračunate su vrijednosti za toplinsku vodljivost i specifičnu temperaturu dok su druge vrijednosti izmjerene.

*Tabela 2.2 Fizičke konstante superlegure 617[1]*

Gustoća	8.36 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura topljenja	1332-1380 °C
Specifična toplina	419 J/kg-°C
Električni otpor	1,22 μΩm
Modul elastičnosti	212kN/mm <sup>2</sup>
Koeficijent toplinskog širenja (pri 100°C)	11,6 10 <sup>-6</sup> /K

Toplinsko produljenje legure 617 je niže od onih za većinu drugih austenitnih legura, dok se smanjenje toplinskog produljenja dešava kada je legura u sklopljenom stanju sa čelikom ili nisko legiranim čelicima. [1]

*Tabela 2.3 Električna i toplinska svojstva superlegure 617[1]*

Temperatura	Električna otpornost	Toplinska provodljivost	Koeficijent toplinskog širenja	Specifični toplinski kapacitet
°C	μΩ-m	W/m-°C	μΩ /m-°C	J/kg-°C
20	1.222	13.4	-	419
100	1.245	14.7	11.6	440
200	1.258	16.3	12.6	465
300	1.268	17.7	13.1	490
400	1.278	19.3	13.6	515
500	1.290	20.9	13.9	536
600	1.308	22.5	14.0	561
700	1.332	23.9	14.8	586
800	1.342	25.5	15.4	611
900	1.338	27.1	15.8	636
1000	1.378	28.7	16.3	662

Tabela 2.4 Modul elastičnosti[1]

Temperatura °C	Modul elastičnosti GPa	Modul smičnosti GPa	Poissonov faktor
25	211	81	0.3
100	206	80	0.3
200	201	77	0.3
300	194	75	0.3
400	188	72	0.3
500	181	70	0.3
600	173	66	0.3
700	166	64	0.3
800	157	61	0.3
900	149	57	0.3
1000	139	53	0.31
1100	129	49	0.32

Modul elastičnosti legure 617 zajedno s Poissonovim faktorom (izračunatim iz modula elastičnosti) prikazan je u tablici 2.4. Vrijednosti modula određene su dinamičkom metodom. [1]

## 2.2. Mehanička svojstva

Superlegura 617 ima visoke mehaničke osobine u širokom rasponu temperatura. Jedna od glavne karakteristike je održavanje visoke čvrstoće na povišenoj temperaturi. Otpor legure na koroziju kod visokih temperatura povećava korisnost svoje primjene. [1]

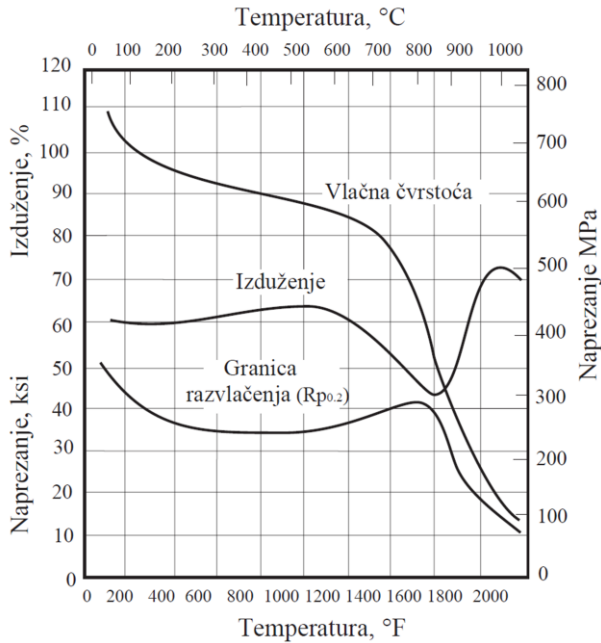
### 2.2.1. Vlačna svojstva

Tipična vlačna svojstva legure na sobnoj temperaturi, različitih proizvoda, prikazana su u tablici 2.5. Sve prikazane vrijednosti odnose se na odžareni materijal. Svojstva prikazana za ploče, trake te limove odnose se na poprečan smjer. [1]

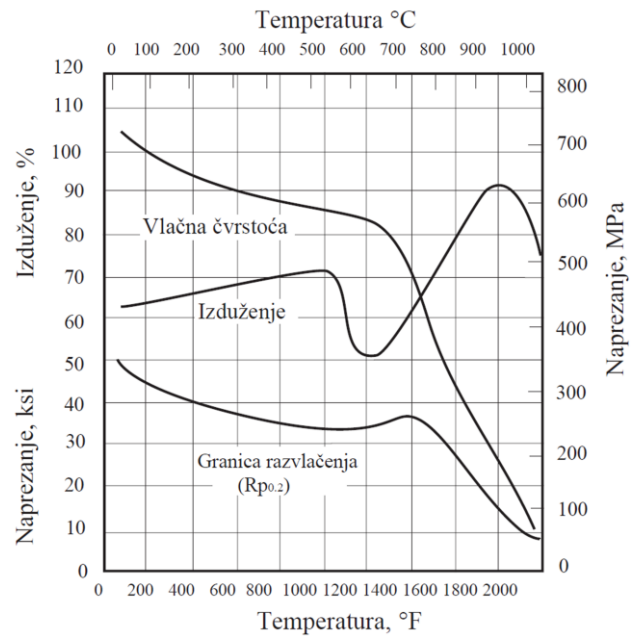
Tabela 2.5 Tipična mehanička svojstva legure 617 na sobnoj temperaturi u odžarenom stanju[1]

Tip produkta	Metoda proizvodnje	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ MPa	Vlačna čvrstoća MPa	Izduženje %	Tvrdoća po Brinellu HB
Ploča	Vruće valjano	322	734	62	172
Šipka	Vruće valjano	318	769	56	181
Cijev	Hladno deformirano	383	758	56	193
Lim	Hladno valjano	351	755	58	173

Vlačna svojstva na vruće valjane šipke u odžarenom stanju prikazana su na slici 2.1. Diametar uzorka šipke koji se odnosi na ispitivanje je 13mm. Visoko temperaturna svojstva hladno valjanog lima u odžarenom stanju prikazana su na slici 2.2. Ispitivanje uzorka odnosi se za poprečan smjer te debljinu lima 4.75mm.



Slika 2.1 Vlačna svojstva vruće valjane šipke u odžarenom stanju[1]



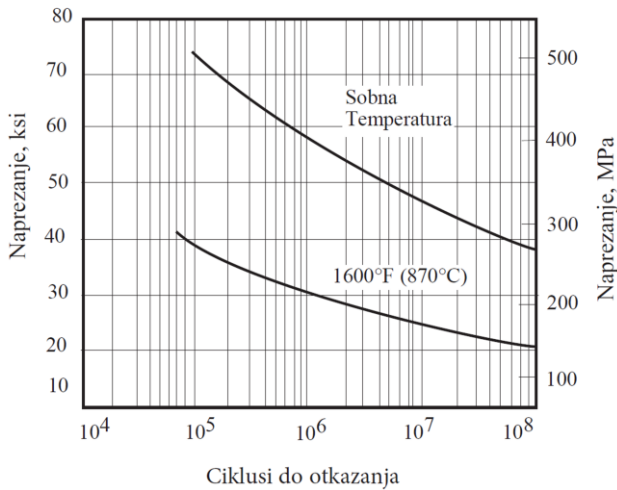
Slika 2.2 Visokotemperaturna svojstva hladno valjanog lima u odžarenom stanju[1]

## 2.2.2. Dinamička izdržljivost

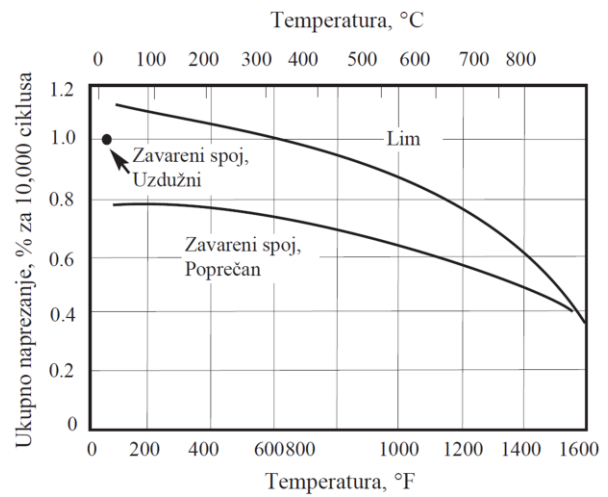
Visokociklička dinamička izdržljivost superlegure 617 na sobnoj temperaturi te na temperaturi od 870°C prikazana je krivuljom na slici 2.3. Podaci testa prikazani su za vruće valjanu šipku, u odžarenom stanju, promjera 14mm.

Rezultati niskocikličke dinamičke izdržljivosti prikazani su na slici 2.4. Podaci testa odnose se za lim koji se nalazi u odžarenom stanju uključujući rezultate zavarenih spojeva, radi usporedbe. [1]





Slika 2.3 Visokociklička dinamička izdržljivost[1]

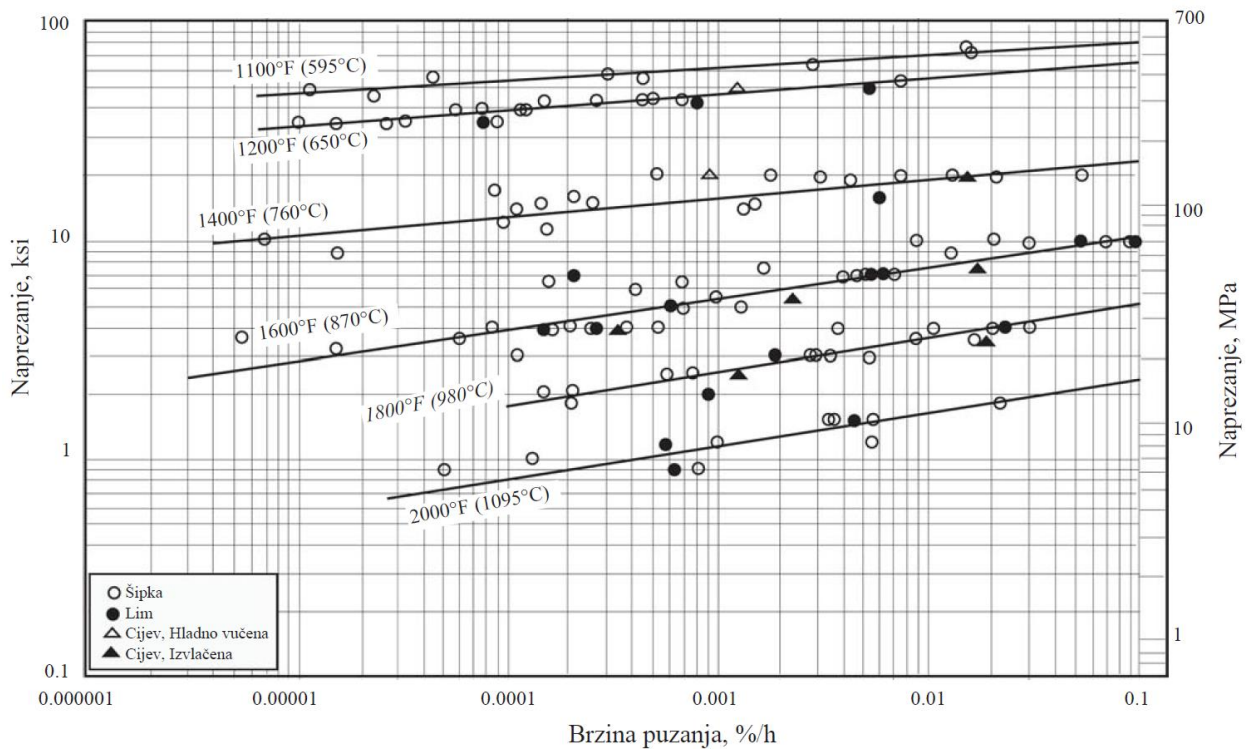


Slika 2.4 Niskocikličke dinamičke izdržljivosti[1]

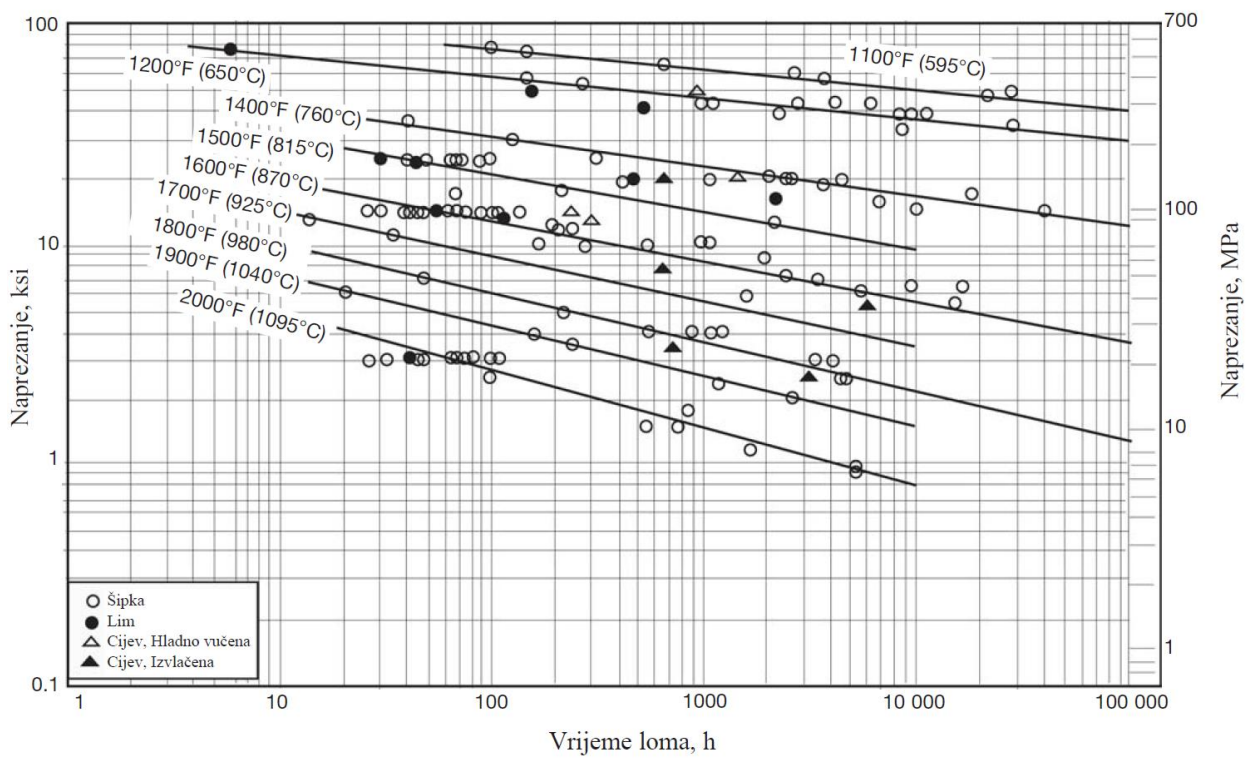
### 2.2.3. Statička izdržljivost

Superlegura 617 pokazuje iznimno visoku statičku izdržljivost, čak i na temperaturama od  $980^{\circ}\text{C}$  i više. Ta karakteristika, kombinirana sa dobrom otpornošću na oksidaciju i pougljičenje, čini leguru posebno pogodnu za dugotrajan rad pri visoko opterećenim povišenim temperaturama.

Slika 2.5 prikazuje svojstvo puzanja legure 617 na temperaturama do  $1095^{\circ}\text{C}$  u odžarenom stanju, dok je svojstvo loma prikazano na Slici 2.6. Ispitivanje je bilo provedeno na uzorku s poprečnim presjekom šipke, cijevi te lima. [1]



Slika 2.5 Svojstvo puzanja legure 617 u odžarenom stanju[1]

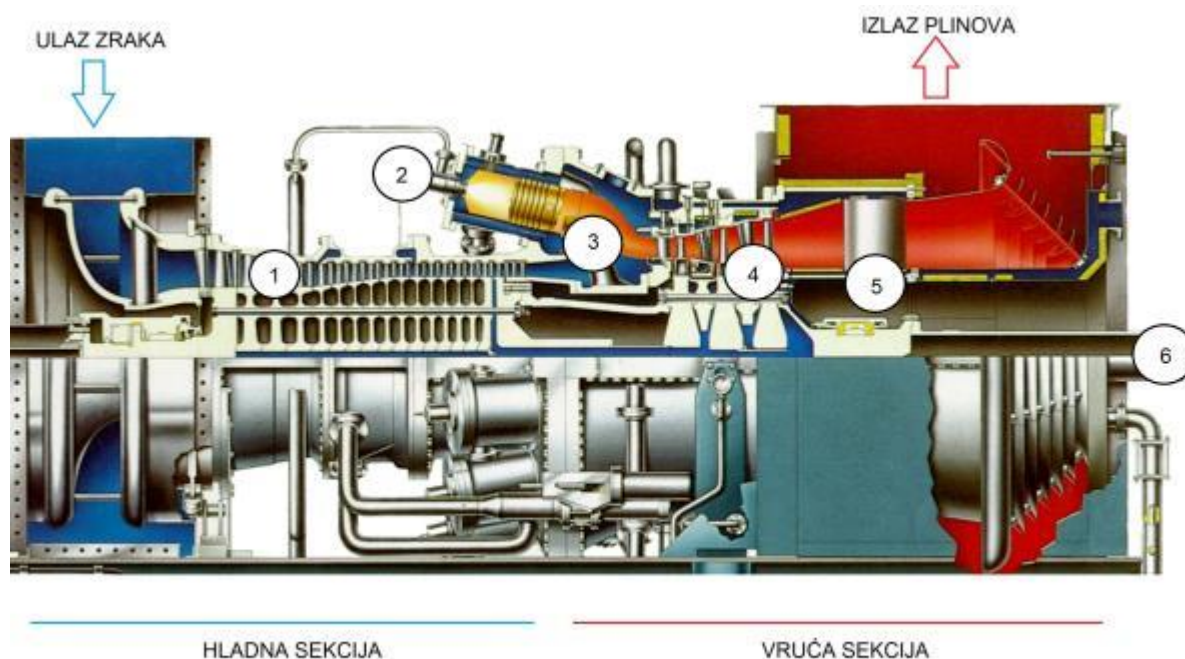


Slika 2.6 Svojstvo loma legure 617 u odžarenom stanju[1]

### 2.3. Plinskoturbinsko postrojenje

Plinska turbina je elektrana, koja naspram svoje veličine i težine proizvodi veliku količinu energije. Plinska turbina pronašla je povećanje usluge u posljednjih 40 godina u energetskej industriji među sredstvima s određenim ekonomskim aspektima iskoristivosti turbine. Njena kompaktnost, mala težina i više aplikacija za gorivo čine je prirodnom elektranom za offshore platforme. Danas postoje plinske turbine koje rade na prirodni plin, dizelsko gorivo, benzin, metan, naftu i plinove od biomase.

Zadnjih 20 godina vidljiv je velik pomak u razvoju te tehnologiji plinskih turbina. Razvoj tehnologije predvodi poboljšanje tehnologije materijala, novi premazi te nova rješenja i dizajn za hlađenje plinske turbine. To je, zajedno sa poboljšanjem omjera tlaka kompresora, podiglo toplinku iskoristivost plinske turbine sa otprilike 15% do preko 45%. [2]



Slika 2.7 Prikaz plinskoturbinskog postrojenja

Plinske turbine upotrebljavamo kao samostalne strojeve za proizvodnju energije. U njima vrše radnju gorive smjese, iz kojih se izgaranjem stvaraju radni plinovi. Ovi plinovi prolaze u mlazu kroz lopatice turbine i tamo vrše mehaničku radnju, tzv. otvoreni sustavi, ili zagrijevaju komprimirani zrak, koji tu radnju obavlja, tzv. zatvoreni sustavi. Postrojenja ovih vrsta nazivamo turbinama na svježe plinove.

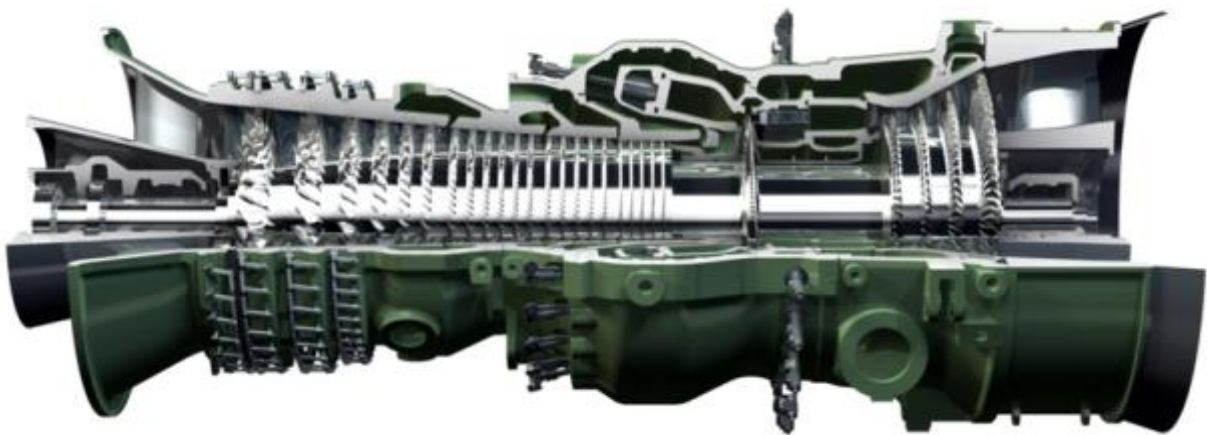
Osim tih turbina također imamo i turbine na ispušne plinove, koje služe kao pomoćni strojevi kod stapnih toplinskih strojeva ili kotlovnih uređaja na vodenu paru. Radni proces plinske turbine, kao samostalnog stroja sastoji se od sljedećeg; Plin i zrak komprimiraju se svaki

zasebno, ili samo zrak, na određeni pritisak. Zatim se oboje miješa u komori, u kojoj se goriva smjesa upali i izgara kod konstantnog tlaka, a izgorjele plinove, koji su tako nastali, dovodimo turbini. Teoretski je svejedno kakve je vrste gradnje sama turbina. Ekspanzija plinova može se prethodno produžiti do atmosferskog tlaka. [3]

U glavne dijelove plinskoturbinskog postrojenja ubrajaju se (prema slici 2.7):

1. kompresor zraka
2. sustav goriva sa plamenicima
3. komora izgaranja
4. plinska turbina
5. ispušno kućište
6. rotor

Plinske turbine mogu se izvoditi na zajedničkoj osovini s kompresorom. Na slici 2.8. pikazan je presjek turbine GT24 koja daje izlaznu snagu od 235 MW.



*Slika 2.8 Presjek plinske turbine GT24[4]*

Kod plinskih turbina za brodski pogon, najčešće se glavna plinska turbina izvodi odvojeno. Pogon kompresora tada se izvodi preko plinske turbine snage samo za pogon kompresora. Takve se turbine nazivaju pomoćne ili kompresorske turbine.

Ekspanzija smjese plinova izgaranja i zraka, izvodi se u aksijalnom ili radijalnom protoku plinske turbine.

Ispušni plinovi iz glavne turbine imaju veoma visoku temperaturu (od 350°C do 550°C). Energija ispušnih plinova mora se iskoristiti, posebno kod turbina koje rade pri niskome kompresijskom omjeru. Već je utvrđeno da se dio topline sadržan u ispušnim plinovima može

iskoristiti za predgrijavanje komprimiranog zraka za izgaranje prije nego što uđe u komoru za izgaranje. Izmjenjivač topline korišten za tu svrhu naziva se regeneratorski. [5]

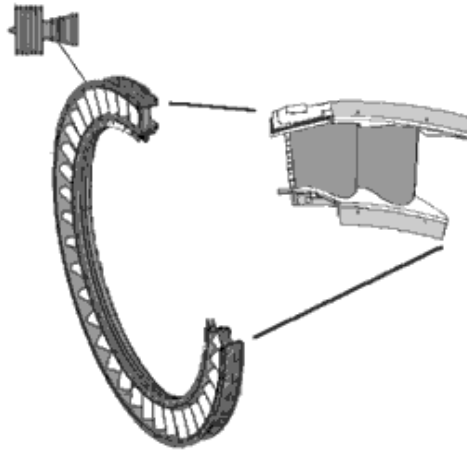
Princip rada plinske turbine u velikom dijelu slični onome u parnoj turbini. Kao i kod parnih turbina, radni medij (plin) ekspandira duž puta strujanja, tako da se toplina pretvara u kinetičku energiju plina, a ona se nakon toga u rotoru pretvara u mehanički rad. Obzirom da se radna svojstva plinova razlikuju od istih za paru, postoje i određene razlike u konstrukciji između plinskih i parnih turbina, tako da se, općenito gledano, sheme plinsko turbinskih postrojenja i njihova oprema značajno razlikuju od onih za parnoturbinska postrojenja. Postrojenja plinskih turbina imaju određene prednosti u usporedbi s parnoturbinskim postrojenjima, prije svega: [5]

1. Ona su mnogo kompaktnija, obzirom da gorivo izgara izravno u maloj komori izgaranja uz samu plinsku turbinu, a ne u ogromnom generatoru pare. Osim toga, plinska turbina nema kondenzatora.
2. Plinske turbine možemo vrlo brzo startati i opteretiti u roku od 30s do 30min.
3. Plinske turbine su jednostavnije konstrukcije i lakše za održavanje.
4. Za njihovu konstrukciju i izvedbu troši se manje materijala za istu snagu stroja.
5. Njihova cijena je manja nego za parnoturbinsko postrojenje.
6. Za razliku od parnih turbina, one nemaju potrebu za rashladnom vodom.

S druge strane, plinske turbine imaju i nedostatke u usporedbi s parnim turbinama:

1. Njihova specifična snaga je manja.
2. Njihov stupanj djelovanja je manji, iako se mnogo radi na njegovu povećanju.
3. Imaju češću potrebu za servisiranjem i održavanjem.
4. Mnogo su osjetljivije na kvalitetu goriva. One na primjer nisu osjetljive na korištenje ugljena i tu se radi na pronalaženju novih tehnologija. S druge strane one su vrlo osjetljive na korištenje teških goriva, pri čemu se susrećemo s teškim i nerješivim problemima.

Sapnice prvog stupnja turbine su najopterećeniji dijelovi turbine. One se sastoje od posebno oblikovanih dijelova sastavljenih u prsten. Na Slici 2.9 prikazane su sapnice plinske turbine.



*Slika 2.9 Prikaz sapnica turbine[6]*

Segmenti sapnice imaju aerodinamički oblikovanu pregradu. One su šuplje i zrak iz kompresora ulazi u dijelove sapničkih krilaca koji su smješteni u turbinskim pregradama. Zrak struji kroz sapnice i kroz seriju provrta završava u komorama za izgaranje. Ta zračna struja hladi cijelu pregradu, a s njima i sapnice, omogućavajući mnogo višu ulaznu temperaturu plinova izgaranja u turbini. Sapnice drugog stupnja rotacijska su krilca smještena u strujnom kanalu plinova odmah nakon prvog stupnja. Sapnice i njihove osovine montirane su na turbinsko kućište tako da se odžava minimum zazora između sapnica i zaštite kada turbina dostigne svoju radnu temperaturu. [6]

Kod plinskih turbina sigurnosni regulator služi za zaštitu turbine od prekoračenja brzine vrtnje, slično kao i kod parnih turbina. Također lopatice plinskih turbina izvedene su slično kao i lopatice parnih turbina (slici 2.10).



*Slika 2.10 Prikaz prvog reda lopatice plinske turbine s rupama za hlađenje[7]*

### 2.3.1. Komora izgaranja

Proces izgaranja se izvodi u jednoj ili više komora za izgaranje koje su postavljene između turbine i kompresora. Osnovni princip rada sekcije za izgaranje jest podjela relativno hladnog izlaznog zraka iz kompresora (od 120°C do 320°C) u dvije ili više koaksijalnih struja, od kojih centralna ili primarna struja ulazi u primarnu zonu izgaranja gdje je uštrcano sitno raspršeno gorivo. Izgaranje se izvodi uz pomoć visokonaponske svjeće koja pali mješavinu zraka i goriva. [8]

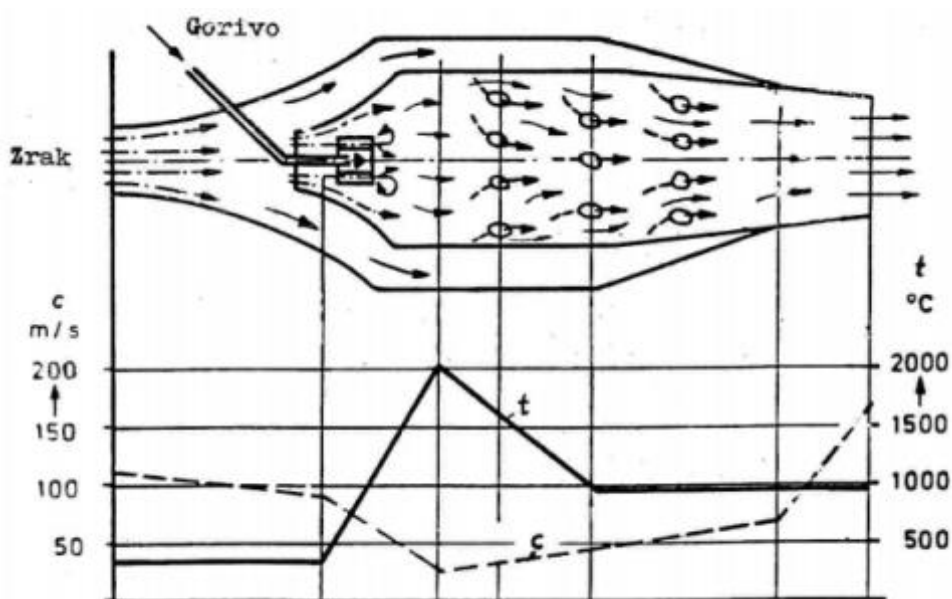
Kada se jednom provede izgaranje, mješavina će stalno izgarati bez pomoći električne svjeće. Količina primarnog zraka je takva da će mješavina biti dovoljna za stalan i brz proces izgaranja za vrijeme rada.

Komore izgaranja dijelimo prema broju plamenih cijevi na: [2]

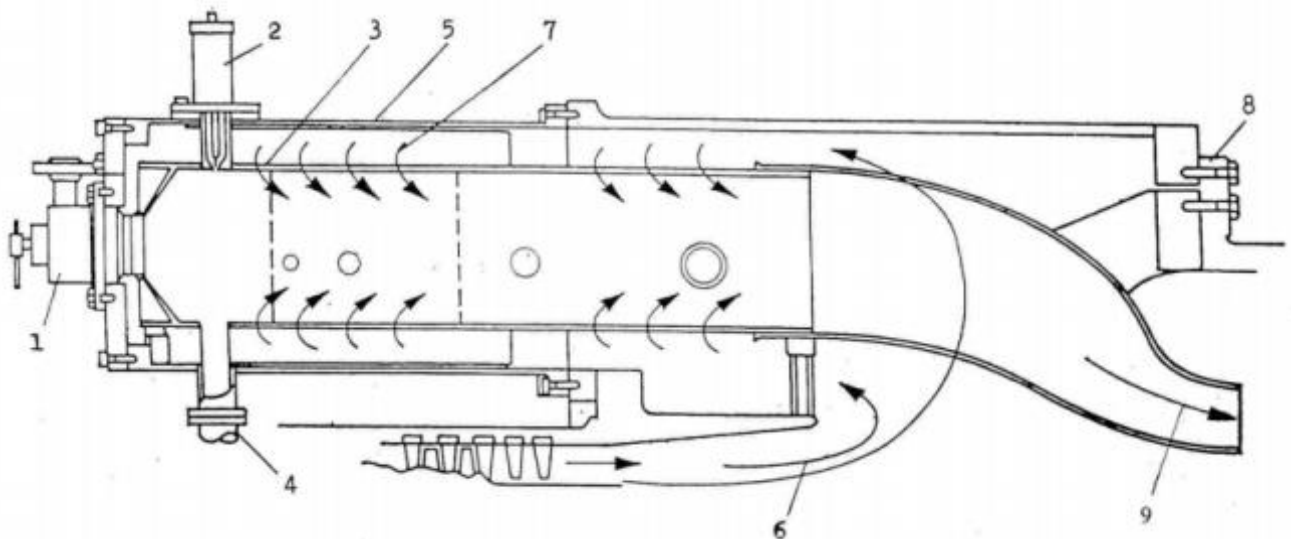
- izdvojene s jednom plamenom cijevi u kućištu (slika 2.11)
- cijevne smještene oko kućišta kompresora i turbine (slika 2.12)
- prstenaste s više plamenih cijevi smještenih u prstenastom kućištu (slika 2.13).

Prema položaju plamenih cijevi:

- horizontalne
- vertikalne.

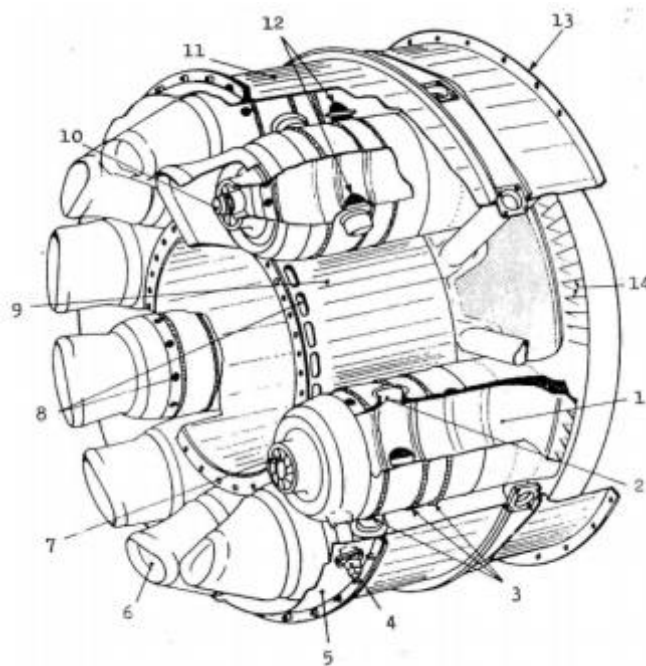


Slika 2.11 Prikaz sheme komore izgaranja i procesa promjene temperature ( $t$ ) i brzine strujanja plinova ( $c$ ) [9]



Slika 2.12 Izvedba horizontalne komore za izgaranje smještene prstenasto oko turbostroja[9]

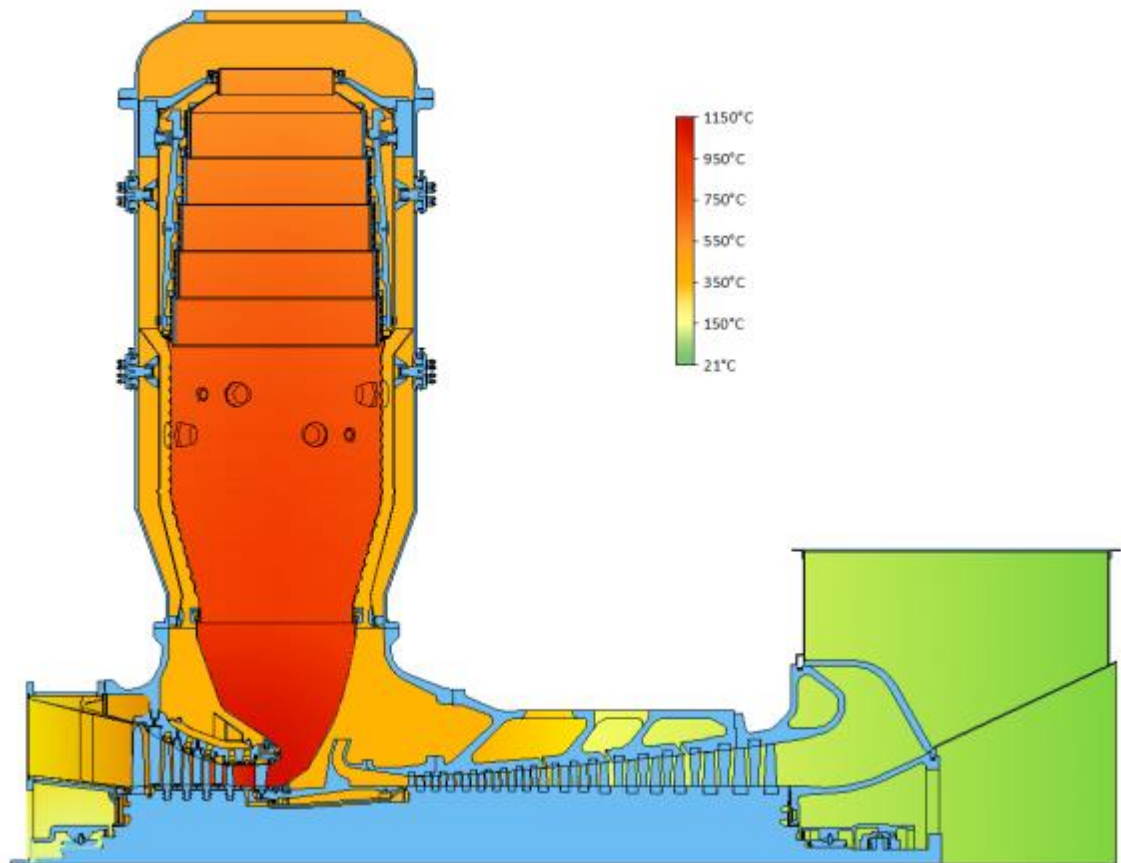
1-sapnica za gorivo; 2-svjećica za paljenje goriva; 3-plamena cijev; 4-cijev za prijenos plamena;  
5-vanjsko kućište; 6-zrak iz kompresora; 7-zrak za hlađenje; 8-kućište turbine; 9-plinovi izgaranja na  
ulazu u turbinu



Slika 2.13 Prikaz komora za izgaranje smještenih prstenasto okolo turbine[9]

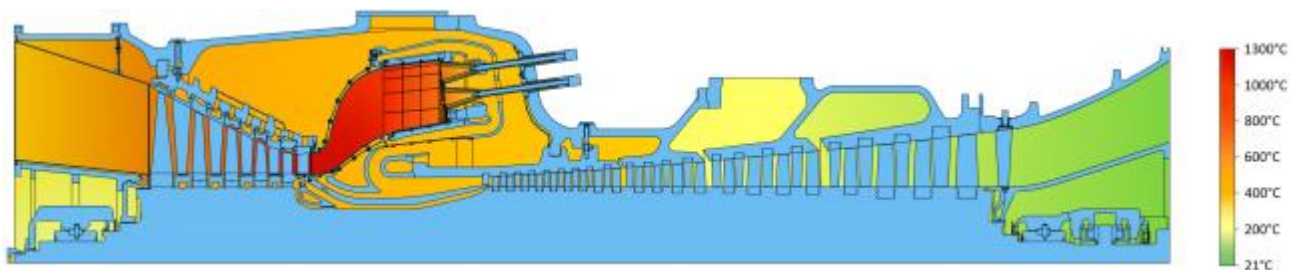
1-plamena cijev; 2-spoje plamenih cijevi za prijenos plamena; 3-valoviti prsten za ulaz sekundarnog  
zraka; 4-svjećica za paljenje goriva; 5-ulazno kućište; 6-ulaz primarnog zraka; 7-vrtložnik primarnog  
zraka; 8-otvori za zrak za hlađenje; 9-unutarnje kućište; 10-sapnica za gorivo; 11-vanjsko kućište;  
12-otvori za sekundarni zrak; 13-prirubnica turbine; 14-prvi stupanj turbine





*Slika 2.24 Prikaz presjeka GT13DM turbine s jednom plamenom cijevi u kućištu*

Na slici 2.14 prikazan je presjek GT13DM turbine s jednom plamenom cijevi u kućištu primjerom (silusna vertikalna komora izgaranja), dok je na slici 2.15 prikazana plinska turbina GT13E2 sa komorom izgaranja smještenom oko kućišta kompresora turbine (aksijalna horizontalna komora izgaranja). Glavna razlika je u tome što plinska turbina sa silusnim principom ima jednu komoru smještenu iznad turbine, dok plinska turbina sa aksijalnim principom ima jednu ili više komora izgaranja smještenih oko rotora. Princip silusne vertikalne komore izgaranja je stariji princip i daje manje izlazne snage od aksijanog principa komore izgaranja.

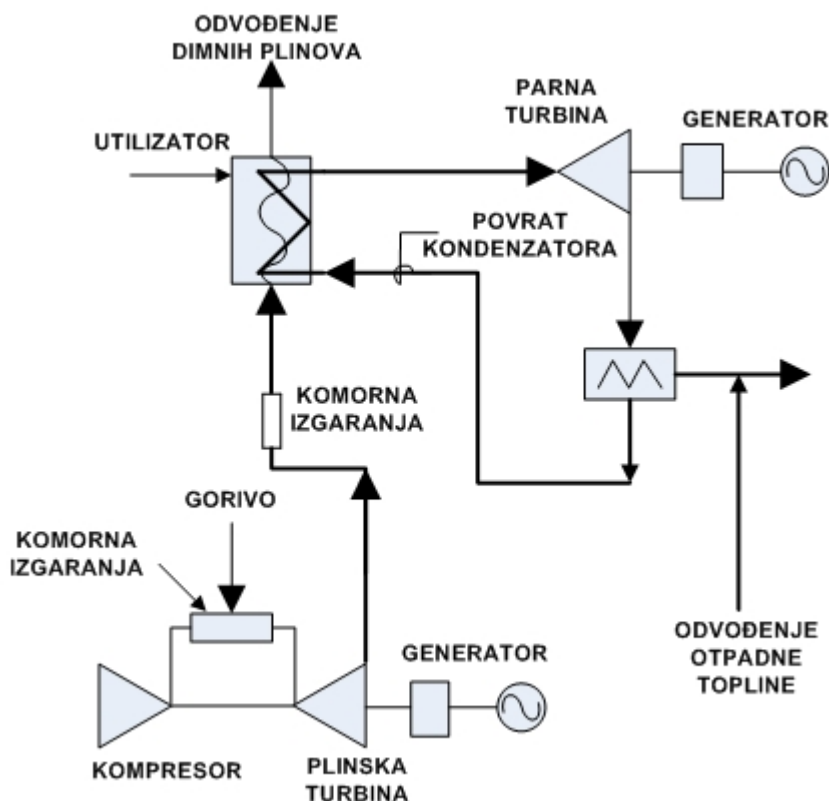


*Slika 2.35 Prikaz presjeka GT13E2 turbine smještene oko kućišta kompresora i turbine*

## 2.4. Kombinirani proces plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja

Kada govorimo o kombiniranom procesu mislimo na proces sastavljen od plinskoturbinskog i parno-turbinskog dijela. Glavne sastavnice su plinska i parna turbina. Osnovna namjena ovakvih postrojenja je da se iskoristi toplina nastala na izlazu iz plinske turbine. Pošto ispušni plinovi koji izlaze iz plinske turbine imaju izuzetno visoke temperature, oko 600 °C, mogu se iskoristiti kao sredstvo koje će grijati vodu i proizvoditi vodenu paru za parnu turbinu. Time povećavamo iskoristivost samog procesa pošto je toplina koju bi inače izgubili iskorištena za daljnju proizvodnju pare. Iskoristivost takvog postrojenja doseže i do 60%. [8]

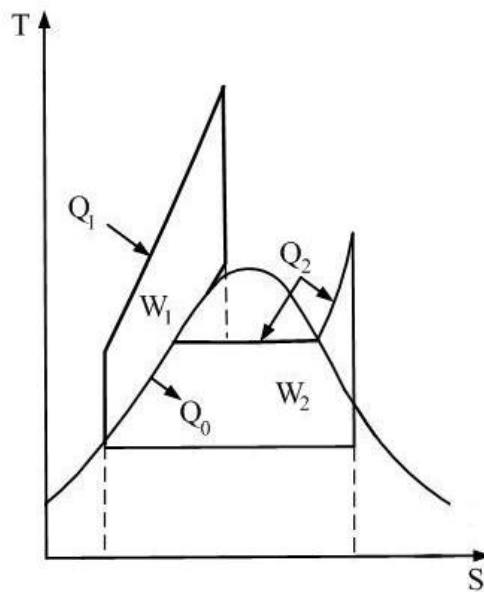
Na slici 2.16 prikazano je jedno takvo postrojenje s plinskom i parnom turbinom te kompresorom, dok je na slici 2.17 prikazan T-S dijagram kombiniranog procesa.



Slika 2.16 Kombinirani proces plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja[10]

U kombiniranom postrojenju kompresor komprimira zrak i šalje ga u komoru izgaranja gdje se istovremeno dovodi gorivo za izgaranje. Plinovi izgaranja vrlo visoke temperature vode se iz komore izgaranja u plinsku turbinu, gdje ekspandiraju dajući koristan rad na osovini spojenom na rotor plinske turbine. Osovina pokreće generator električne struje i proizvodi električnu energiju koja se šalje u mrežu. Nakon ekspanzije, ispušni se plinovi iz plinske turbine vode u utilizator (generator pare na otpadnu toplinu). Jedna od vrlo dobrih karakteristika plinske turbine

je ta što je kod nje prisutan vrlo visok omjer zrak/gorivo budući se dodaje nekoliko puta više zraka zbog hlađenja lopatica plinske turbine. [10]



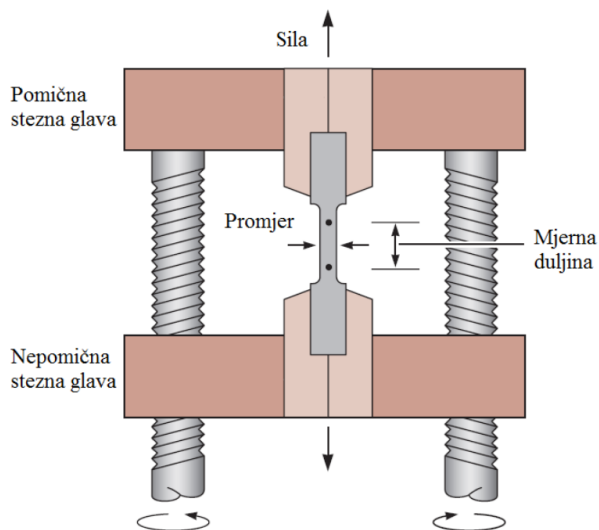
*Slika 2.174 T-S dijagram kombiniranog procesa[10]*

Zbog toga na izlazu iz plinske turbine ostaje još dosta neiskorištenog zraka, te se taj višak zraka koristi za izgaranje dodatnog goriva u utilizatoru. U utilizatoru se napojna voda zagrijava do isparavanja i pregrijava na zadane parametre. Pregrijana para odlazi iz generatora pare u parnu turbinu gdje ekspandira i predaje mehanički rad generatoru električne struje. Nakon toga para, sada već niskih parametara, odlazi u kondenzator gdje kondenzira. Nakon kondenzacije, voda se napojnom pumpom vraća u utilizator na ponovno zagrijavanje. [8]

## 2.5. Ispitivanje uzorka

### 2.5.1. Statičko rastezno ispitivanje

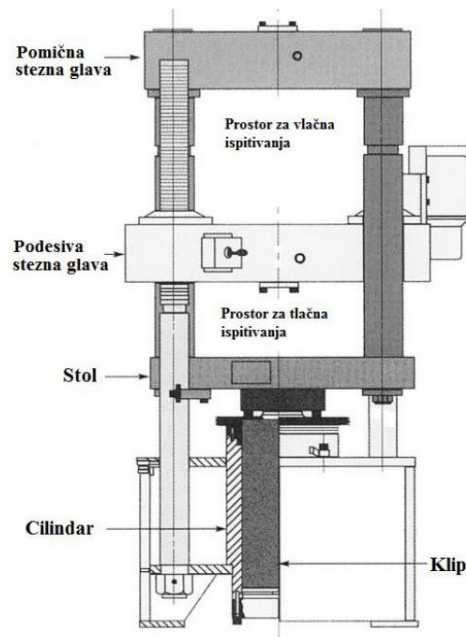
Statičko rastezno ispitivanje temeljno je ispitivanje svojstava materijala u kojem je ispitni uzorak podvrgnut jednoosnom rasteznom opterećenju, u pravilu do loma. Dobiveni rezultati ispitivanjem obično se primjenjuju kod izbora materijala za određeni proizvod, za kontrolu kvalitete materijala, za uvid u stanje materijala i predviđanje kako će se materijal ponašati kod opterećenja koje nije jednoosno. Slika 2.18 prikazuje shemu statičkog rasteznog ispitivanja. Statičko rastezno ispitivanje se provodi tako da se ispitni uzorak stegne u uređaj za rastezno ispitivanje (kidalica). Nakon toga uređaj rasteže ispitni uzorak primjenom rastezne sile. Sa uređajem za mjerenje produljenja, mjeri se koliko se ispitni uzorak produljuje između mjernih oznaka, koje su bile označene prije mjerenja na uzorku. Tijekom ispitivanja, u pravilnim intervalima, istodobno se zapisuju primijenjena sila i produljenje ispitnog uzorka, u pravilu do loma.[11]



Slika 2.18 Shema statičkog rasteznog ispitivanja[11]

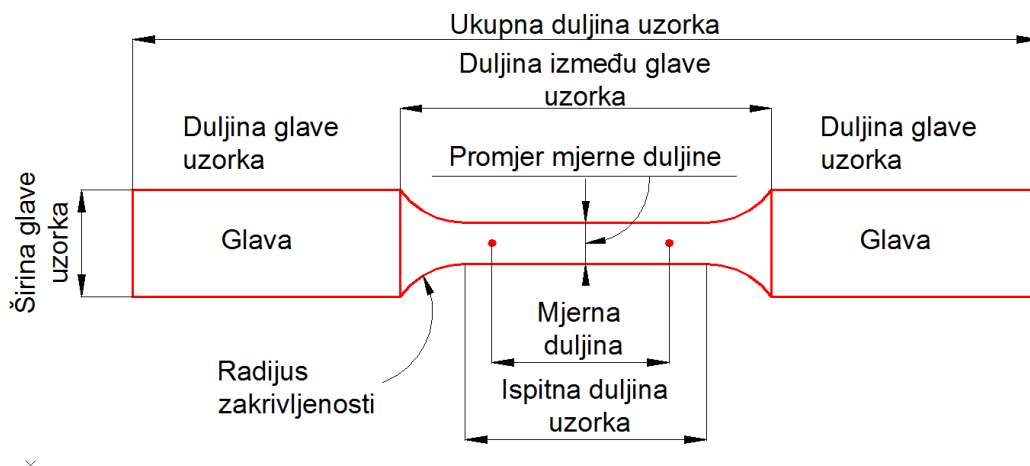
Ispitni uređaji za statička rastezna ispitivanja su najčešće univerzalni uređaji (kidalice) za ispitivanje rasteznih, tlačnih, i savojnih svojstava materijala. Uređaji su pogonjeni elektromehanički ili hidraulički. Glavna razlika između njih je u načinu generiranja sile, koja savija, tlači ili rasteže ispitni uzorak.

Hidraulični ispitni uređaji (slika 2.19) imaju jedan ili dva klipa koji pokreću stezne čeljusti. Ispitni uređaji mjere opterećenje primijenjeno na ispitnom uzorku. Stoga uređaj za mjerenje sile mora biti umjeren u skladu s važećim normama.



Slika 2.19 Shema hidrauličkog ispitnog uređaja (kidalice)[11]

Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka ovise o obliku i mjerama proizvoda od kojeg se ispitni uzorci izrađuju. Postoje obrađeni i neobrađeni ispitni uzorci. Neobrađeni ispitni uzorci imaju po cijeloj duljini jednak poprečni presjek, a izrađuju se od šipki, žica i sl., a obrađeni uzorci su na određenom dijelu stanjeni na određenu dimenziju. Oblik tipičnog obrađenog ispitnog uzorka je prikazan na slici 2.20.



Slika 2.20 Oblik tipičnog obrađenog ispitnog uzorka

Ispitni uzorci uzeti iz komada lima mogu imati samo pravokutan poprečni presjek, a uzorci izrađeni iz debele ploče mogu imati plosnat ili okrugao poprečni presjek, kao što je vidljivo na slici 2.21.



Slika 2.21 Oblici ispitnih uzorka za rastezno ispitivanje[12]

Površina poprečnog presjeka  $S_0$  na mjernoj duljini je smanjena u odnosu na ostatak ispitnog uzorka, tako da se osigura deformacija i lom upravo na tom dijelu ispitnog uzorka. Mjerna duljina je područje na kojem se vrše mjerenja i smješteno je na sredini ispitnog uzorka. Prema normi HRN EN ISO 6892-1, odnos između mjerne duljine i površine poprečnog presjeka dan je izrazom:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (2.1)$$

gdje je:

- $L_0$ , mm - početna mjerna duljina,
- $S_0$ , mm<sup>2</sup> - površina početnog poprečnog presjeka epruvete,
- $k$  - koeficijent proporcionalnosti.

Koeficijent proporcionalnosti iznosi 5,65. Ispitni uzorci ovih dimenzija su razmjerni ispitni uzorci. Međutim, mjerna duljina ne smije biti manja od 15 mm, a ako je površina poprečnog presjeka premala da zadovolji ovaj uvjet uz  $k = 5,65$ , uzima se koeficijent  $k$  s većom vrijednosti, koja iznosi  $k = 11,3$  ili se koristi nerazmjerni ispitni uzorak. Duljina između zadebljanih krajeva (glava) ispitnog uzorka i krajeva mjerne duljine mora biti dovoljno velika, kako zadebljanje ne bi utjecalo na deformaciju mjerne duljine. Također mora postojati postupan prijelaz između ispitne duljine i glave ispitnog uzorka. Sve ostale mjere ispitnih uzoraka su dane u normi HRN EN ISO 6892-1.

Za ispitne uzorke s pravokutnim poprečnim presjekom, isti se računa na slijedeći način:

$$S_0 = a_0 \cdot b_0 \quad (2.2)$$

gdje je:

- $a_0$ , mm - početna debljina plosnatog ispitnog uzorka,
- $b_0$ , mm - početna širina ispitne duljine plosnatog ispitnog uzorka.

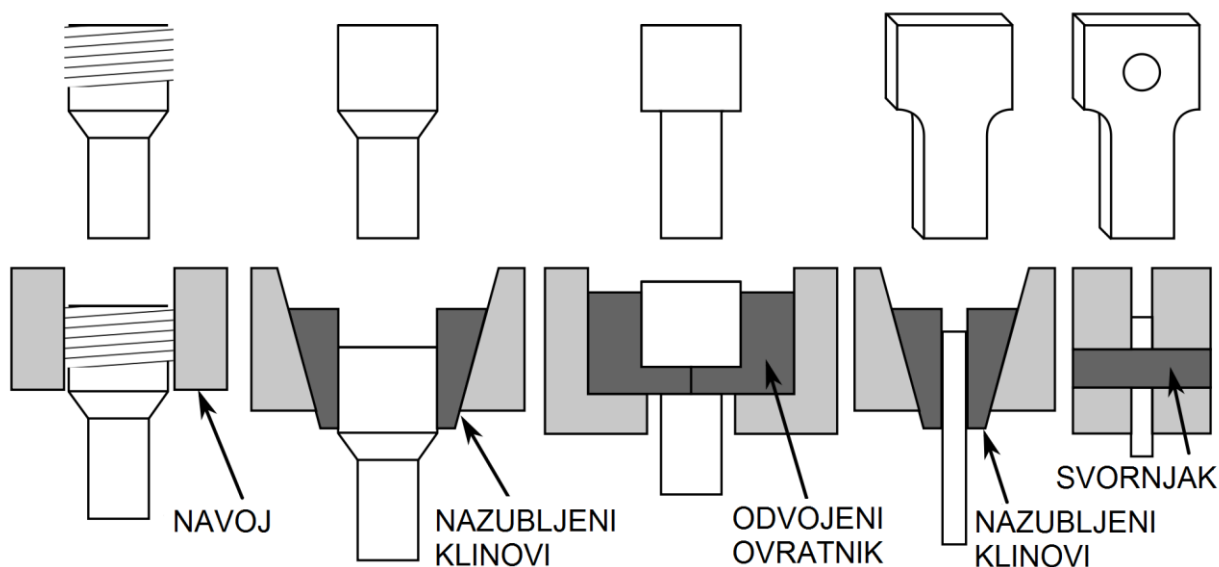
Za ispitne uzorke s okruglim poprečnim presjekom, isti se računa na slijedeći način:

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.3)$$

gdje je:

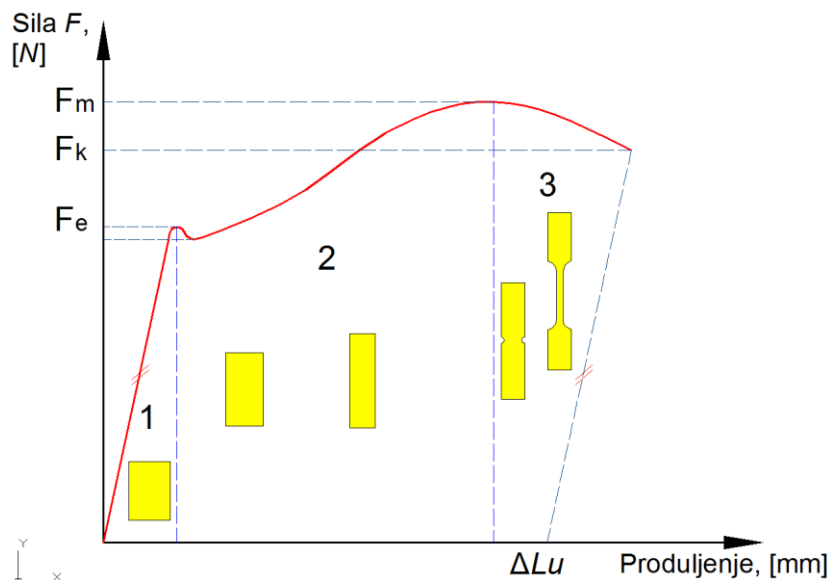
- $d_0$ , mm - početni promjer ispitne duljine ispitnog uzorka kružnog presjeka.

Izračunavanje ostalih oblika poprečnih presjeka opisano je u normi HRN EN ISO 6892-1. Krajevi početne mjerne duljine moraju se označiti finim mjernim oznakama ili nježnim grebanjem, ali nikako zarezima koji bi mogli izazvati zarezno djelovanje i privremeni lom. Početna mjerna duljina mora se označiti s nesigurnošću od najviše  $\pm 1\%$ .



Slika 2.22 Načini stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti [13]

Glave ispitnog uzorka služe za stezanje istog u čeljusti kidalice, stoga moraju biti tako oblikovane da najbolje odgovaraju steznim napravama ispitnog uređaja i obliku ispitnog uzorka. Također moraju biti dovoljno čvrste da se ne oštete tijekom ispitivanja, jer bi to utjecalo na rezultate. Postoje različiti načini stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti, prikazanih na slici 2.22, npr. pomoću navoja, nazubljenih klinova, svornjaka i sl.



Slika 2.23 Dijagram sila - produljenje

Prvi dio dijagrama (Slika 2.23) prikazuje linearnu ovisnost sile i produljenja, što vrijedi sve do vrijednosti sile  $F$  (sila na granici tečenja ili sila razvlačenja). U drugom dijelu dijagrama nakon sile razvlačenja, nestala je linearna ovisnost između povećanja sile i produljenja. Opterećenje raste sve do dostizanja maksimalne sile  $F_e$ , nakon kojeg se u trećem dijelu dijagrama epruveta nastavlja produljivati uz sve manju silu. Pri dostizanju konačne sile  $F_m$  dolazi do loma epruvete. Potrebno je uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka uzorka uz iznos sile pri statičkom rasteznom ispitivanju jer se u protivnom ne dobije uvid u ponašanje materijala. Stoga se uvodi pojam naprezanje prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.4)$$

gdje je :

- $F$ , N – sila

Konačno produljenje  $\Delta L$  ispitane epruvete nakon kidanja iznosi:

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad (2.5)$$

Ako se produljenje  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L$  dobiva se izraz za relativno produljenje ili istežanje  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.6)$$

Na taj se način iz dijagrama *sila – produljenje* dobije dijagram *naprezanje – istežanje* prikazan slikom 2.24. On je samo kvalitativno jednak dijagramu  $F - \Delta L$  pošto se svi iznosi sile dijele istom vrijednošću  $S_0$ , a sve vrijednosti produljenja vrijednošću  $L_0$ .

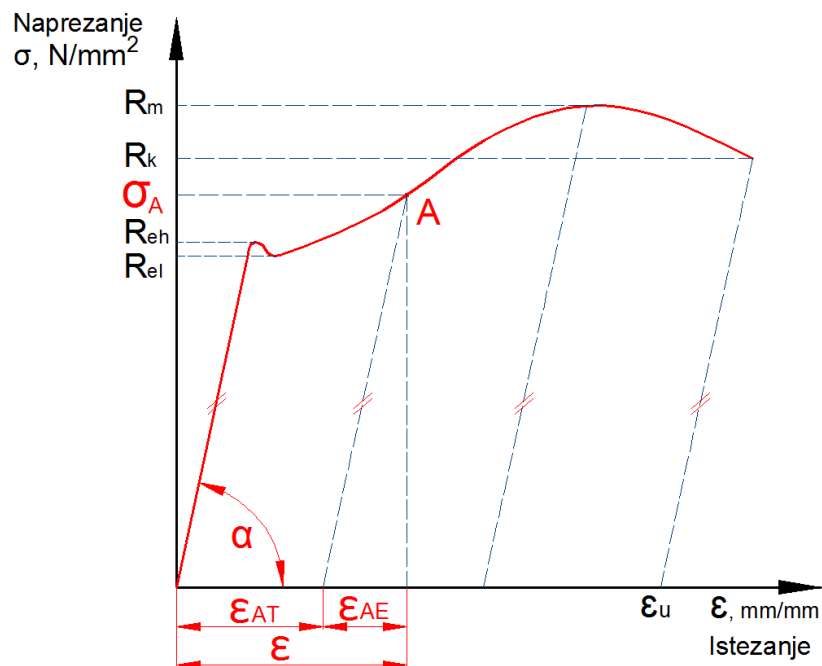


Dijagram *naprezanje – istezanje* počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem i za kojeg vrijedi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.7)$$

gdje je :

- $E$  - Youngov modul elastičnosti



Slika 2.24 Dijagram istezanje - naprezanje

Modul elastičnosti predstavlja nagib krivulje u elastičnom području; što je veći, za isto istezanje  $\varepsilon$  bit će potrebno veće naprezanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeova pravca bit će strmiji. U tom području materijal je deformiran isključivo elastično što znači da je trajna deformacija u slučaju rasterećenja ( $\sigma = 0$ ) jednaka nuli pa i razmak mjernih točaka na epruveti ostaje jednak  $L_0$ .

Modul elastičnosti za čelik iznosi oko  $210\,000\text{ N/mm}^2$  i tri puta je veći od modula elastičnosti aluminija koji iznosi oko  $70\,000\text{ N/mm}^2$ . Hookeov pravac završava granicom razvlačenja  $R_e$ , nakon koje se epruveta produljuje bez povećanja naprezanja. U tom kratkom periodu vrijedi:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (2.8)$$

gdje je :

- $R_e, \text{ N/mm}^2$  – granica razvlačenja,
- $F_e, \text{ N}$  – sila tečenja.

Granica razvlačenja je naprezanje kod kojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja. Prema njoj se, uz odabranu sigurnost, utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu nekog uređaja.

Karakteriziraju ju dvije vrijednosti prikazane slikom 2.24; gornja granica razvlačenja  $R_e^h$  i donja granica razvlačenja  $R_e^l$ . Nakon što materijal prijeđe granicu razvlačenja, ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija.

Naprezanje koje se ostvaruje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je :

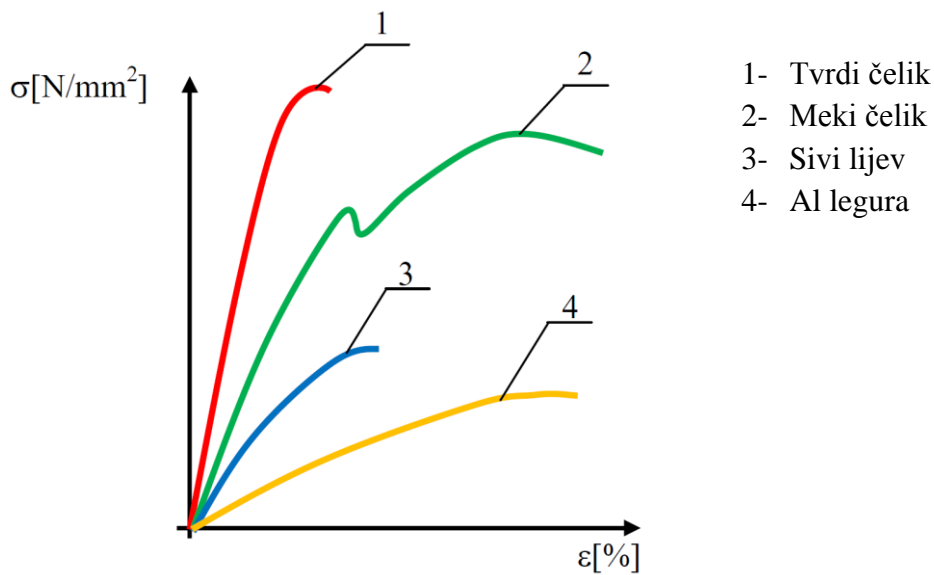
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2.9)$$

To naprezanje se nikako ne smije zvati maksimalno naprezanje jer se površina presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje smanjivati, ali naprezanje i dalje raste. Dostizanjem vrijednosti  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu i nastaje tzv. vrat.

Do loma epruvete dolazi kad naprezanje dosegne vrijednost konačnog naprezanja  $R_k$ :

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \quad (2.10)$$

Slika 2.25 prikazuje izgled Hooke-ovog dijagrama za različite materijale.

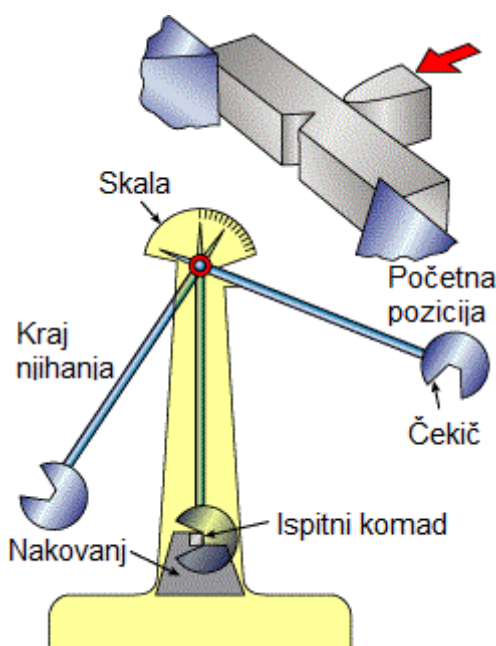


Slika 2.25 Izgled Hooke-ovog dijagrama za različite materijale

## 2.5.2. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje žilavosti provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja (na sobnoj temperaturi i sniženim temperaturama). Iznos udarnog rada loma je pokazatelj "žilavosti" ili "krhkosti" materijala udarno opterećenih epruveta s utorom. Najčešće se ispitivanje žilavosti provodi na Charpy-evom batu (slika 2.26). Bat težine  $G$  podiže se na visinu  $h_1$  te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju  $G \cdot h_1$ . Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku energiju. U tom trenutku brzina bata ( $v$ ) iznosi 6 m/s. Ukoliko na oslonac nije postavljen ispitni uzorak bat se penje na istu visinu s koje je i pušten (ako se zanemari trenje u ležaju i otpor zraka). Žilavost se računa prema jednadžbi:

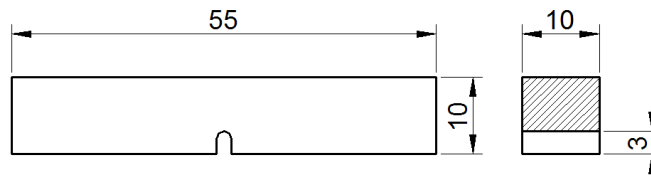
$$KU(V) = G \cdot h_1 - G \cdot h_2 = G \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.11)$$



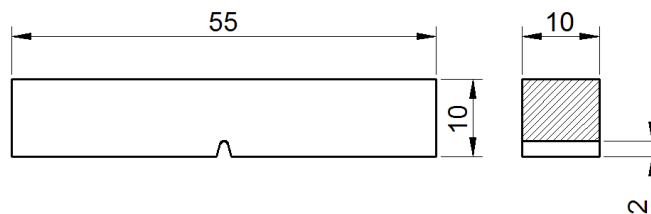
Slika 2.26 Ispitivanje udarnog rada loma na Charpy-evom batu[14]

Izgled i dimenzije ispitnih uzorka navedeni su na slici 2.27. Ovisno o obliku utora razlikuje se udarni rad loma ispitan s zaobljenim utorom (oznaka KU) od onog ispitanog s oštrim utorom (oznaka KV). Dubina "U" utora može biti 3 ili 5 mm, a dubina "V" utora je 2 mm. Epruvete s zaobljenim utorom primjenjuju se za krhke materijale, a one s oštrim za duktilne materijale. Vrijednost udarnog rada loma vrijedi kao takva samo za određeni utor i ne može se kao npr., vrijednost  $R_e$  koristiti kao računski veličina pri dimenzioniranju dijelova.

### Ispitni uzorak sa zaobljenim utorom

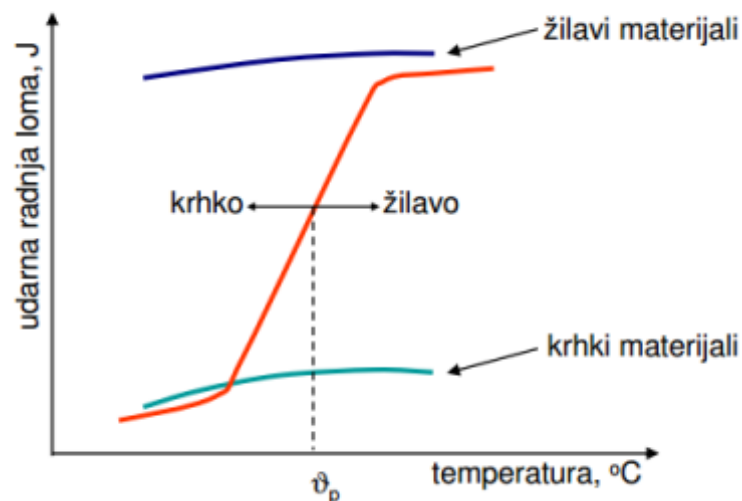


### Ispitni uzorak s oštrim utorom



Slika 2.275 Ispitni uzorci

Što je udarni rad loma veći to je i materijal žilaviji. U pravilu materijali veće istezljivosti A imaju i veću KU(V) i obrnuto. Nasuprot tome materijali visoke čvrstoće najčešće imaju mali udarni rad loma. Kod nekih se materijala udarni rad loma značajno smanjuje sa sniženjem temperature ispitivanja, ovisno o vrsti kristalne rešetke, odnosno vrsti materijala (Slika 2.28).



Slika 2.28 Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za različite tehničke materijale[15]

Žilavost materijala općenito opada sa snižavanjem temperature ispitivanja. Kod vrlo žilavih metala s FCC rešetkom (Al, Cu, Ni, austenitni čelici) opadanje žilavosti je neznatno te su oni zato deformabilni u širokom temp. intervalu. Krhki materijali (visoko čvrsti čelici, staklo i keramika) imaju nisku žilavost i deformabilnost bez obzira na temp. ispitivanja. Legure metala s BCC rešetkom (većina konstrukcijskih čelika) i polimeri imaju karakterističnu krivulju s

izraženom prijelaznom temperaturom ( $\vartheta_p$ ). Prijelazna temperatura ( $\vartheta_p$ ) je temperatura na kojoj materijal prelazi iz žilavog u krhko područje. [15,16]

### **2.5.3. Spektroskopska analiza / Kemijski sastav**

Određivanje kemijskog sastava za materijal na bazi Krom-Nikal legura vrši se prema normi ASTM: E353 – 93 (2006).

Spektroskopija je grana fizike koja proučava efekte vezane uz emisiju i apsorpciju elektromagnetskog zračenja; tako nastali emisijski (apsorpcijski) spektri karakteristični su za određenu tvar.

XRF (X-Ray fluorescentna spektroskopija) se koristi za određivanje elementarnog sustava uzorka. Kada snop x-zraka nastao u primarnom izvoru (rendgenska cijev) dođe do uzorka može u njemu biti apsorbiran ili raspršen. Proces u kojem se zračenje apsorbira i prenosi na unutrašnje elektrone naziva se fotoelektrični efekt. Ako je energija primarnog snopa dovoljno velika elektroni će biti izbačeni iz unutrašnjih orbitala te će nastati vakancije. Pri povratku atoma iz probuđenog u osnovno stanje elektroni iz viših orbitala vraćaju se na niže i pri tome se emitira x-zračenje valne duljine koja odgovara razlici energije probuđenog i osnovnog nivoa. Budući da svaki element ima jedinstveni set energetske nivoa, svaki element daje x-zrake jedinstvenog seta energija. Proces emitiranja karakterističnih x-zraka zove se XRF.

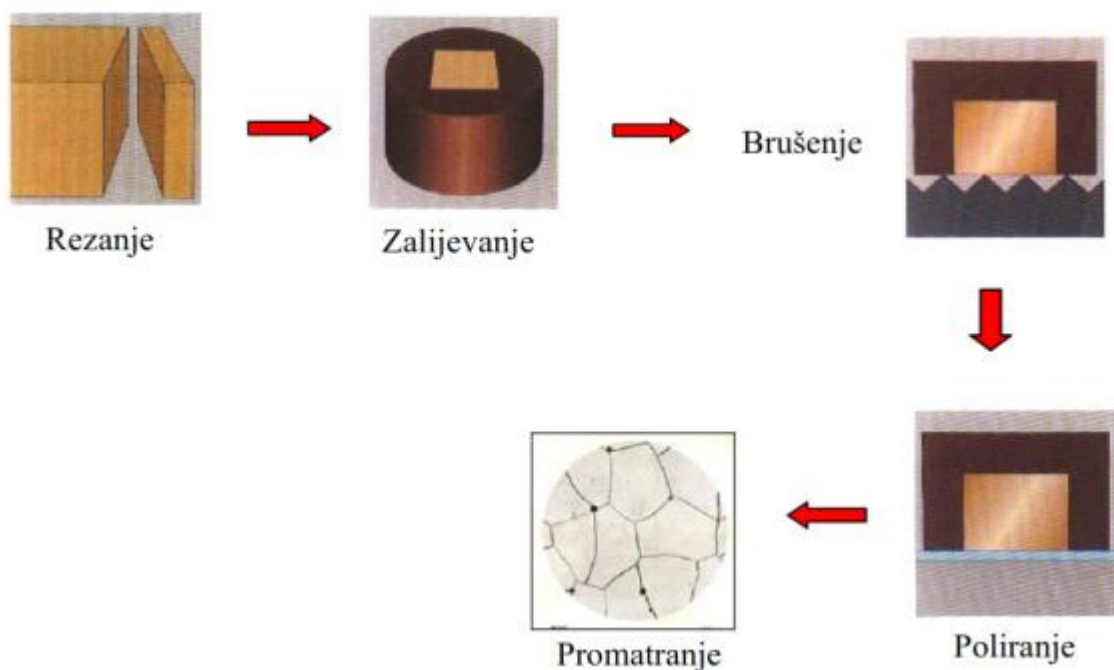
### **2.5.4. Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala svjetlosnim mikroskopom**

Metalografija (opisivanje metala) je dio znanosti o metalima koji se bavi vezom između dijagrama slijevanja, strukture i svojstava metala i legura. Metalografska ispitivanja obuhvaćaju pripremu uzorka te makroskopska i mikroskopska ispitivanja njegove strukture. Struktura uzorka koja se može opažati prostim okom naziva se grubom, struktura vidljiva svjetlosnim mikroskopom finom, a ona vidljiva samo elektronskim mikroskopom ultrafinom strukturom. Strukturne komponente veličine oko milimetra ( $10^{-3}$  m) ili veće čine makrostrukturu, komponente veličine između  $10^{-3}$  i  $10^{-7}$  m čine mikrostrukturu, a komponente veličine manje od  $10^{-7}$  m nanostrukturu; uobičajeno je, međutim, da se pod mikrostrukturom u širem smislu podrazumijeva i nanostruktura. Mikrostruktura metala i slitina ovisi o veličini, obliku, raspodjeli i volumnim udjelima različitih mikrostrukturnih komponenata, što je određeno vrstom, veličinom i raspodjelom njihovih atoma, ali ovisi i o vrsti, veličini, gustoći i raspodjeli nepravilnosti kristalne rešetke koje nisu u termodinamičkoj ravnoteži. [17]

Makroskopsko ispitivanje obavlja se na odgovarajuće pripremljenoj površini metalnog uzorka ili na njegovu prijelomu, a uzorak se promatra golim okom te povećalom pri povećanju do približno 20 puta. Pozornost se pritom obraća na posljedice koje potječu od dobivanja i preradbe metala kao što su uključci troske, usahline, pukotine, mjehurići, makrosegregacije, lomovi dr. Kao primjer makroskopskog ispitivanja može se navesti određivanje segregacije sumpora u čeliku. [17]

Za mikroskopsko ispitivanje potrebno je površinu metalnog uzorka pomnjivo izbrusiti i polirati te nagristi kemijskim reagensima, čime se dobiva izbrusak. [17]

Slika 2.29 prikazuje prikaz procesa pripreme metalografskog uzorka za mikroskopsko ispitivanje.



Slika 2.29 Shematski prikaz procesa pripreme metalografskog uzorka[17]

Pomoću svjetlosnoga mikroskopa može se postići povećanje od približno 2000 puta i razlučivanje od 250 nm, što omogućuje analizu faza koje nastaju pri skrućivanju ili kao posljedica promjena u čvrstom stanju, te opažanje mnogih detalja, odnosno elemenata mikrostrukture, npr. granice zrna malog i velikoga kuta, granice faza, granice sraslaca, plinsku mikromjehuravost, mikrousahline, fizikalne nečistoće (uključci) itd. Za još detaljniju mikroanalizu rabi se elektronski mikroskop, koji zbog male valne duljine elektrona omogućuje vrlo veliko razlučivanje od samo nekoliko desetinki nanometra, što odgovara veličini parametara metalnih rešetki. Udjel je raspršenih elektrona u metalima vrlo malen pa je moguće prosvjetljivanje metalne folije debljine nekoliko desetaka nanometara, što dopušta promatranje dislokacija, različitih izlučina, nepravilnosti slaganja, područja pretvorbi kristalnih sustava,

oblika kristala sraslaca itd. Elektronski mikroanalizator služi za kvantitativnu in situ analizu pojedinačnih faza u metalima i nemetalima, npr. za određivanje sastava čvrstih faza, nemetalnih uključaka, karbida i sl. Kvalitativna je analiza moguća s uzorcima kojima čestice nisu manje od približno 1  $\mu\text{m}$ , koliki je približno promjer elektronskog snopa mikroanalizatora.

Na osnovi dvodimenzijske mikrostrukturne slike može se ocijeniti podobnost nekog metala za predviđenu namjenu. Međutim, za jednoznačno određivanje mikrostrukture nije dovoljan samo vizualni pregled i usporedba s nekom referentnom mikrostrukturom, nego treba odrediti vrstu, oblik i raspodjelu pojedinih komponenata mikrostrukture u njezinu ukupnom volumenu, služeći se pri mjerenju samo pripremljenom dvodimenzijskom površinom izbruska. U posljednje se doba ta grana metalografije naziva stereometrijskom metalografijom.

Iskazivanje različitih mjerljivih veličina mikrostrukture svrstava se u kvantitativnu obradbu ili kvantitativnu procjenu mikrostrukture. Najčešće se mjere mikrostrukturni elementi (veličina zrna, udjel izlučene faze, razmak dendritnih grana i dr.), pri čem se rabi površinska, linijska ili točkasta analiza. Kvantitativno izražavanje veličine, oblika i raspodjele mikrostrukturnih komponenata na temelju dvodimenzijske mikrostrukturne slike naziva se analizom slike. Uređaji, analizatori mikrostrukture, osnivaju se na manualnim, poluautomatskim ili automatskim sustavima. Pod pojmom automatske analize slike razumije se mikroskopsko snimanje mikrostrukture izbruska digitalnom ili analognom kamerom, prijenos toga zapisa u računalo, njegova digitalizacija, te obradba digitalnog zapisa nekim od komercijalno dostupnih programa. Sustavi za analizu slike primjenjuju se sve više u kontroli i razvoju materijala, posebno lijevanih i deformabilnih aluminijskih i magnezijevih slitina, grafitnih odn. karbidnih željeznih ljevova, valjanih i kovanih austenitnih i brzoreznih čelika itd.[17,18]

### 3. Uvod i opći podaci ispitivanja

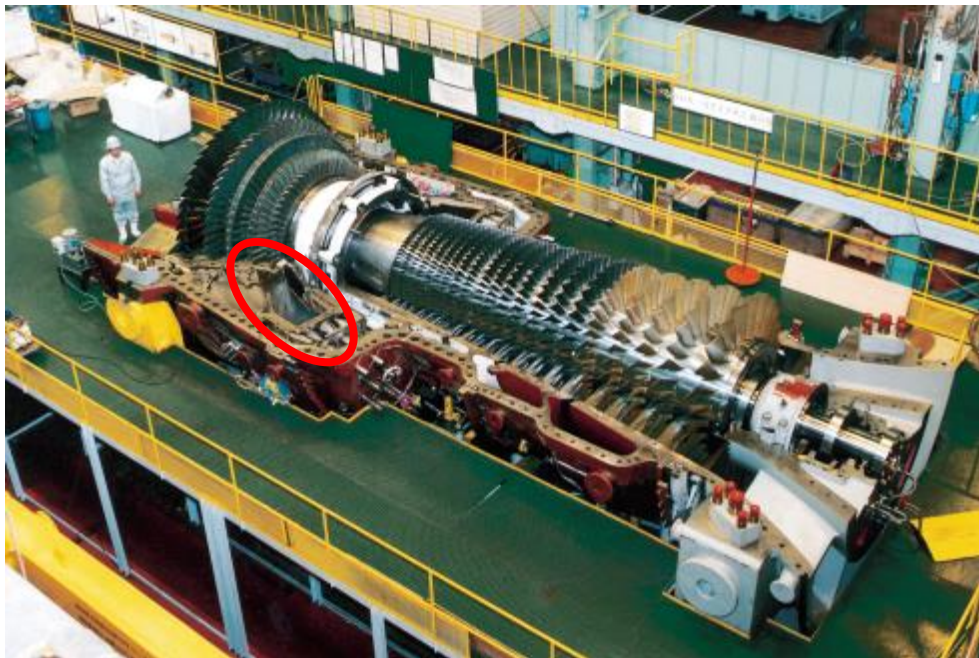
Ras Abu Fontas (Slika 3.1) elektrana bila je posjećena od strane Nikole Mlinarića, predstavnika Inpirio tima Donji Kraljevec, kako bi bio predstavljen asortiman komponenti GT13E2 iste tvrtke te se utrdilo stanje komponente Zone 2.



*Slika 3.1 Ras Abu Fontas, Katar*

Koristeći 14 različitih izvora prirodnog plina elektrana Ras Abu Fontas smatra se drugim najvećim pogonom u Sjevernoj Africi te Bliskom Istoku. Glavni je opskrbljivač električne energije te desalinizirane vode u Katru. Sveukupna snaga elektrane iznosi 5,432 MW te kapacitet desalinizacije od 325,8 m<sup>3</sup>/s. Blok B te B1 sastoji se od 8 plinskih postrojenja GT13E2 sa sveukupnom snagom od 1320 MW.

Nakon 32,000 operacijskih sati slijedi A inspekcija u kojoj se plinska turbina otvara, vrši se vizualni pregled te mjerenja sa ciljem da se utvrdi stanje plinske turbine.



*Slika 3.2 Prikaz otvorene plinske turbine GT13E2 (označena pozicija Zone 2 na slici)*



Vizualni pregled stanja Zone 2 (Slika 3.3) bio je učinjen kod kupca. Nakon vizualnog pregleda komponente, uzorci materijala uzeti su sa Zone 2 (unutarnje te vanjske oplata kućišta izgaranja vrućih plinova) u svrhe laboratorijskog pregleda s ciljem da se provjeri degradacija materijala nakon 32 000 operacijskih sati.



*Slika 3.3 Prikaz markiranja područja za uzimanje uzorka s unutarnje oplata*

Na području ispitivanja materijala/metalurška analiza odrađena je suradnja laboratorija „Zentrallabor Siegerland“ iz Siegena, Njemačka i Inpiria iz Donjeg Kraljevca, Hrvatska. Suradnja je pokazala sljedeće rezultate:

- Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala
  - na prijelaznoj zoni (sredini ploče) stvarnog stanja odnosno u nađenom stanju
  - na prijelaznoj zoni (sredini ploče) nakon toplinske obrade
  - na graničnom pojasu stvarnog stanja odnosno u nađenom stanju
  - na graničnom pojasu nakon toplinske obrade
- Rastezno ispitivanje
- Ispitivanje žilavosti
- Spektroskopska analiza/Kemijski sastav

Laboratorijsko izvješće je sažetak ispitivanja svojstva materijala sa „Zentrallabor Siegerland“ s daljnjim objašnjenjima.

Materijal za ispitivanje je superlegura 617 (2.4663 / NiCr23Co12Mo).

Nakon izvršene analize temeljene na prethodnim iskustvima i ispitivanjima Inpirio tima, vizualnog pregleda unutarnjih i vanjskih oplata kućišta izgaranja, dobiven je zaključak na temelju laboratorijskih ispitivanja pomoću kojeg se moglo doći do opisa evaluacije stanja materijala, shodno s kojima se izvlači preporuka o rekondicioniranju kućišta izgaranja Zone2.

## 4. Specifikacija materijala

### 4.1. Svrha dokumenta

Ovaj dokument služi za definiranje kemijskih, mehaničkih svojstva te standarde kvalitete za isporuku lima od Alloy-a 617.

### 4.2. Oznaka materijala

- prema DIN/EN/ISO normi
  - NiCr23Co12Mo
  - WNr 2.4663
  - NiCr22Co12Mo9
- prema ASTM/ASME/SEA AMS normi
  - UNS N06617
- prema trgovačkome nazivu
  - Alloy 617
  - Inconel® Alloy 617 (Special Metals)
  - Nicrofer®5520 Co (ThyssenKrupp VDM)

### 4.3. Kemijski sastav

Tablica 2.1 prikazuje kemijski sastav materijala koji je važeći samo za:

- toplo valjane ploče
- toplo i hladno valjane šipke
- hladno valjane limove i trake
- cijevi

### 4.4. Mehanička svojstva materijala pri sobnoj temperaturi

Tablica mehaničkih svojstva materijala (tablica 4.1.) je važeća samo za:

- toplo valjane ploče
- toplo i hladno valjane šipke
- hladno valjane limove i trake

Tabela 4.1 Mehanička svojstva pri sobnoj temperaturi

Tip uzorka	Uobičajeno stanje isporuke	Debljina (mm)	Smjer ispitivanja	Granica tečenja $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> ) min.	Granica tečenja $R_{p1.0}$ (N/mm <sup>2</sup> ) min.	Vlačna čvrstoća $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Istezanje A %
Hladno valjani limovi i trake	Odžareno u kupci	< 6	Poprečno	350	380	750	35
Toplo valjane ploče	Odžareno u kupci	< 80	Poprečno	300	330	700	35
Toplo i hladno valjane šipke	Odžareno u kupci	≤ 300	Poprečno	300	330	680	30
			Uzdužno				35

#### 4.5. Mehanička svojstva materijala pri sobnoj temperaturi

- Gustoća 8.36 g/cm<sup>3</sup>
- Temperatura topljenja 1332-1380 °C
- Specifična toplina 420 J/kgK
- Električni otpor 1,22 μΩm
- Modul elastičnosti 212kN/mm<sup>2</sup>
- Koeficijent toplinske ekspanzije (pri 100°C) 11,6 10<sup>-6</sup>/K

Udarni rad loma (ISO–V, vrijednost za vruće valjane limove):

- Poprečno ≥ 100 J/cm<sup>2</sup>
- Uzdužno ≥ 100 J/cm<sup>2</sup>

#### 4.6. Dodatni zahtjevi

Svi dodatni zahtjevi moraju biti točno opisani u PO.

#### 4.7. Stanje isporuke

Odžareno u kupci

#### **4.8. Posebne napomene**

- temperaturu međuprolaza kod zavarivanja treba držati ispod 120°C
- materijal nije magnetiziran
- materijal je otporan na koroziju

#### **4.9. Dokumentacija za kvalitetu**

- certifikat za inspekciju 3.1. prema EN 10204

## **5. Uzimanje uzorka materijala za razorno ispitivanje**

### **5.1. Upute**

Instrukcije su vežeće za uzimanje uzorka materijala kako bi se provelo razorno ispitivanje materijala.

Uzimanje uzorka materijala obavlja se samo uz suglasnost klijenta nakon što je stranka upoznata sa procesom i kada potpiše protokol o uzimanju uzorka materijala.

Dokument određuje veličinu i broj uzorka koje treba uzeti kao i alate koji se mogu koristiti.

### **5.2. Ispitivanja provedena na uzorcima**

#### **5.2.1. Uzorak u nađenom stanju**

- Rastezno ispitivanje prema DIN EN ISO 6892-1
- Ispitivanje žiavosti prema DIN EN ISO 148-1 (450 / KV2) / PSW 450J Serijski broj 1991
- Spektroskopska analiza/Kemijski sastav [wt.-%] prema ASTM E353-93 (2006)
- Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala sa optičkim mikroskopom

#### **5.2.2. Uzorak nakon toplinske obrade**

- Rastezno ispitivanje prema DIN EN ISO 6892-1
- Ispitivanje žilavosti prema DIN EN ISO 148-1 (450/ KV2) / PSW 450J Serijski broj 1991
- Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala sa optičkim mikroskopom

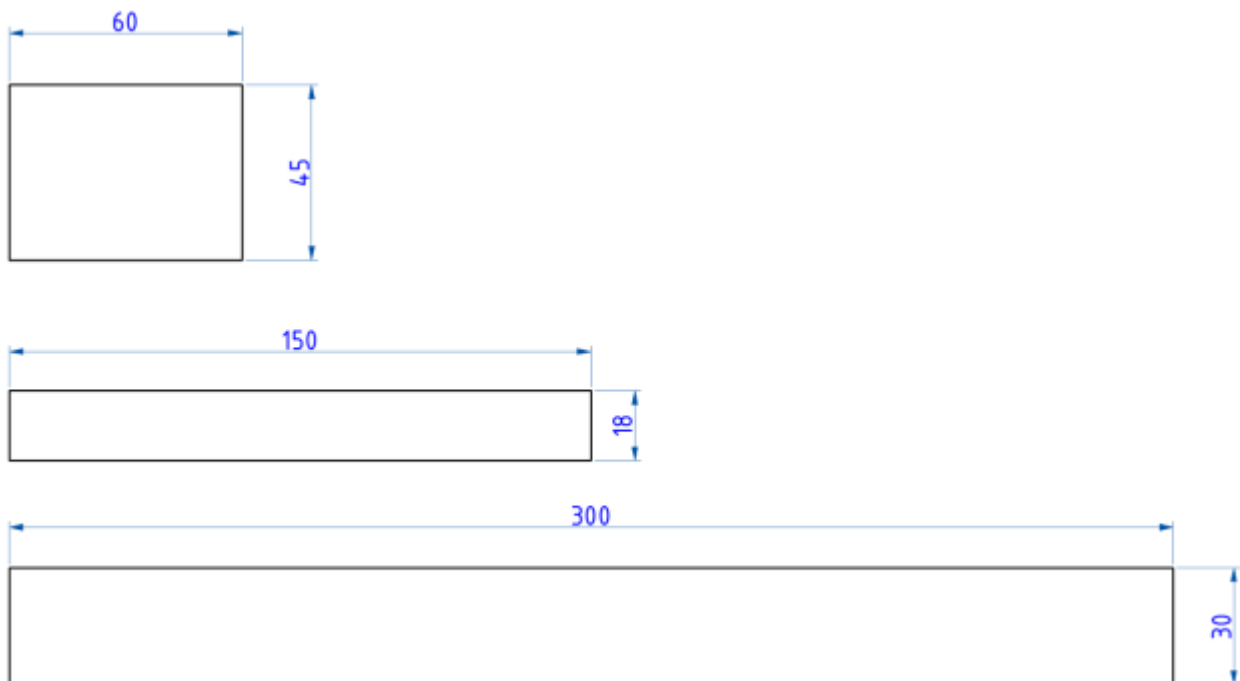
### 5.3. Opći zahtjevi za ispitivanje

Razorno ispitivanje može obavljati laboratorij koji je akreditiran u skladu s ISO/IEC 17025:2005 za ispitivanje:

- Ispitivanje savijanjem
- Rastezno ispitivanje
- Ispitivanje tvrdoće
- Ispitivanje žilavosti
- Makro pregled
- Mikro pregled

### 5.4. Veličina uzorka

Slika 3.1 prikazuje minimalne dimenzije uzorka. Debljine kod kojih se uzimaju uzorci na limovima su 8mm pa na više.



*Slika 5.1 Prikaz minimalnih dimenzija uzorka*

## 5.5. Stanje površina komponente s koje se uzima uzorak

Uzorak se uzima na području s najstarijim materijalom, stoga se RECO povijest komponente mora uzeti na razmatranje. Eventualne zakrpe i popravci moraju biti identificirani tako da se uzorci ne uzimaju s tih područja. Također prilikom uzimanja uzorka treba izabrati područje gdje se trebaju uzimati uzorci. To područje treba biti birano tako da se popravi u roku od standardnog RECO opsega ( pokraj “split” linije ili linije prijeloma).

Uzorci i ispitivanja na njima potvrđuju uspjeh obnavljanje procesa tako da njihovo stanje bi trebalo predstavljati opće stanje komponenti materijala. Uzimanje uzorka na mjestima gdje se komponenta iznimno pogoršala nije dopušteno jer će se ti dijelovi mijenjati u slučaju remonta.

## 5.6. Dokumentiranje uzorka i njegove pozicije

Poziciju uzorka treba dokumentirati u Field Service izvješću sa skicom, položajem mjerenja i fotografijom. Skice moraju imati sve relevantne informacije za prepoznavanje orijentacije komponente. Uzorci moraju biti jasno označeni sa vodootpornim flomasterom i spakirani u malim vrećicama.

Obilježavanje se obavlja na sljedeći način:

Primjer: Šest uzorka se uzima iz GT13E2 Zone2 vanjske ovojnice (tri uzorka za tri testa na gornjem dijelu i tri iz donjeg dijela):

- S121112-1
- S121112-2
- S121112-3
- S121112-4
- S121112-5
- S121112-6

Gdje je:

- S - oznaka za uzorak (sample)
- 121112 - je datum (dd / mm / gg) kada je uzorak uzet
- -1, -2, -3, -4, -5, -6 - broj uzetih uzorka nabrajanih po redu



## **5.7. Povijest komponente**

Da bi se dobila potpuna slika komponente potrebna nam je povijest stanja materijala. Odgovorna osoba na terenu treba dobiti od kupca što je moguće više podataka i dostaviti ga zajedno s FSR-om.

## **5.8. Dokumentacija**

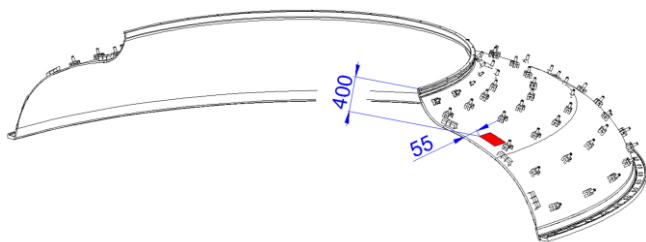
- FSR (Field Service Report) - Detaljni izvještaj koji sadrži sve relevantne informacije prikupljene tijekom uzimanja uzoraka
- Fotografski / video zapis
- Dokumentacija komponente od strane kupca

## 6. Uzimanje uzorka materijala te vizualno ispitivanje

U nastavku je kratki izvadak iz dokumenta ID: INPIRIO-QEWC0-PI-01082012, "Material sampling and visual inspection" koji pokazuje mjesto uzimanja uzorka materijala na komponenti.

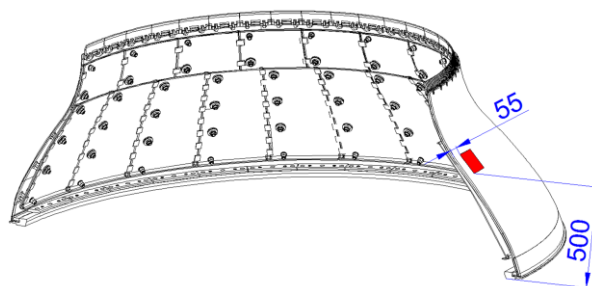
Položaj materijala uzorka je označen na nacrtu unutarnjeg i vanjskog oplata kućišta izgaranja Zone 2.

U skici ispod nalazi se fotografija sa položajem uzimanja uzorka na unutarnjoj i vanjskoj oplati kućišta izgaranja Zone 2.



Slika 6.1 Izvadak iz dokumenta: INPIRIO-QEWC0-PI-01082012

Slika sa položajem uzimanja uzorka s vanjske oplata



Slika 6.2 Izvadak iz dokumenta: INPIRIO-QEWC0-PI-01082012

Slika sa položajem uzimanja uzorka s unutarnje oplata

### Izvadak iz rezultata ispitivanja vizualnog pregleda unutarnje oplata kućišta izgaranja Zone 2:

- vrat komponente mijenja se tijekom zadnjeg rekondicioniranja (na visini 90mm)
- krajevi linije presjeka nisu bili zamijenjeni tijekom zadnjeg rekondicioniranja
- komponenta ne pokazuje značajna deformiranja niti ispuščenja osim devijacije od +250mm na diametru linije presjeka

### Izvadak iz nalaza vizualnog pregleda vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2:

- gornja prirubnica je bila zamijenjena tijekom zadnjeg rekondicioniranja (na visini 35mm)
- krajevi linije presjeka nisu bili zamijenjeni tijekom zadnjeg rekondicioniranja
- komponenta nema značajnih deformacija niti ispuščenja osim devijacije od +400mm na diametru linije presjeka

## **Izvadak iz nalaza vizualnog pregleda unutarnje i vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2:**

- vruća strana komponente zaštićena je prevlakom keramike (thermal barrier coating)
- prevlaka keramike ne pokazuje znakove oštećenja ni na jednom dijelu komponente
- debljinu premaza keramike nije bilo moguće provjeriti zbog nedostatka vremena
- za određivanje točnog oblika i dobivanje točnog odstupanja od nominalnog oblika komponente potrebno je potpuno 3D skeniranje (prije skeniranja potrebno je rastaviti rashladne ploče s komponente)
- kompletno ispitivanje pukotina nije moguće (prije ispitivanja pukotina treba otkloniti prevlaku keramike te je potrebno rastaviti rashladne ploče s komponente)
- stanje rashladnih ploča nije bilo moguće provjeriti jer su bile sastavljene na komponenti

## 7. Uzorci materijala LPIS i LPOS u stvarnom stanju

Sljedeće slike 7.1 i 7.2 prikazuju uzorke materijala:

LPIS - Lower Part of CC Zone 2 Inner Shell (donji dio unutarnje oplata kućišta izgaranja Zone 2)

LPOS - Lower Part of CC Zone 2 Outer Shell (donji dio vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2)

Strane koje su izložene direktnom plamenu imaju prevlaku keramike, dok sa druge strane nema prevlake keramike.



Slika 7.1 Uzorak materijala LPIS (6 x 50 x 95 mm) i LPOS (10 x 50 x 95 mm) u stvarnom stanju (Vruće strane okrenute jedna prema drugoj)



Slika 7.2 Uzorak materijala LPIS (6 x 50 x 95 mm) i LPOS (10 x 50 x 95 mm) u stvarnom stanju

Nazivna debljina materijala LPOS (donji dio vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2) je 8 mm. U ovom slučaju imamo materijal debljine 10 mm. Veća debljina materijala je zbog činjenice da je vanjske oplata kućišta izgaranja proizvedena procesom spinninga. Spinning je proces s visokim gubitkom debljine materijala, tako da je dodatni materijal stavljen radi sigurnosnih razloga. Zbog toga razloga smatramo da je debljina materijala vanjske oplata zadovoljavajuća.

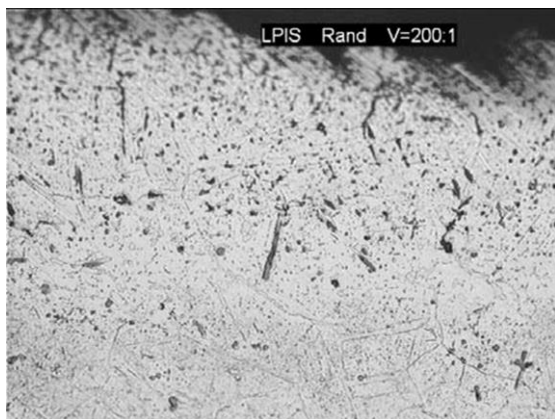
## 7.1. Rezultati ispitivanja materijala / metalurška analiza kućišta izgaranja

### Zone 2 uzorka u stvarnom stanju

Uzorci kućišta izgaranja Zone 2 su ispitani u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

#### 7.1.1. Mikrostruktura materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju

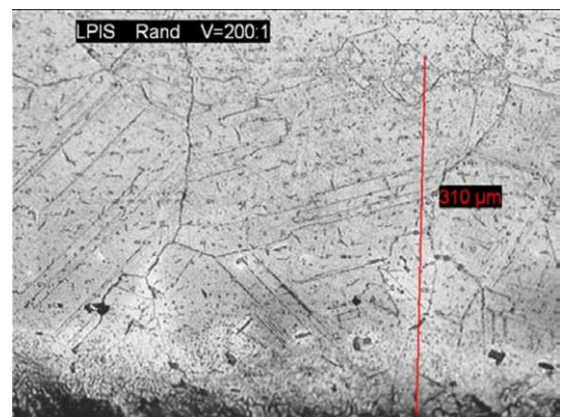
Presjek mikrostrukture materijala je uzet iz uzorka, pogodno pripremljen te vrednovan pod svjetlosnim mikroskopom. Sljedeće slike (Slika 7.3 te Slika 7.4) prikazuju presjek mikrostrukture materijala u graničnom pojasu (hladna strana/neprevučene strane i vruće strane/prevučena ) u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.



Slika 7.3 Presjek mikrostrukture materijal LPIS  
na graničnom pojasu hladne strane

V = 200:1

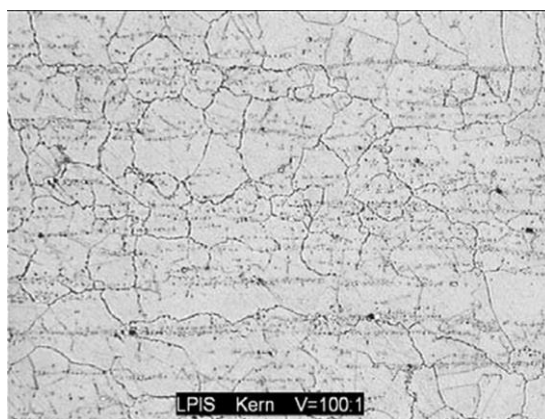
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>



Slika 7.4 Presjek mikrostrukture materijala LPIS  
na graničnom pojasu vruće strane

V = 200:1

60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>



*Slika 7.5 Presjek mikrostrukture materijala LPIS  
na srednjoj zoni u stvarnom stanju  
 $V = 100:1$   
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

Slika 7.5 prikazuje presjek mikrostrukture materijala uzorka LPIS na srednjoj zoni (sredini ploče) u stvarnom stanju.

**Analiza:**

U stvarnom stanju odnosno stanju komponente granica zone uzorka LPIS pokazuje ekstremne strukturne promjene mikrostrukture uzrokovane visokim temperaturama.

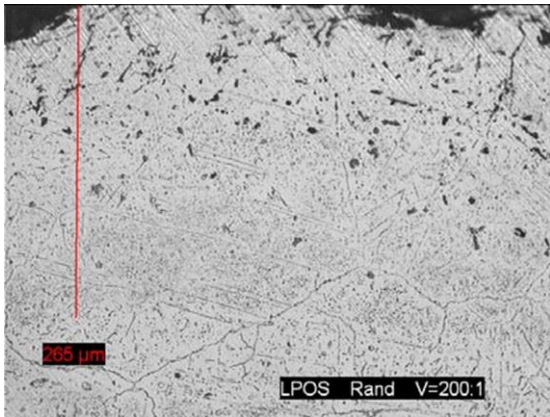
Na graničnoj zoni vruće / prevučene strane javljaju se ekstremne strukturne promjene mikrostrukture do 0.310 mm (310  $\mu\text{m}$ ) dubine uzorka.

Na graničnoj zoni hladne / neprevučene strani ekstremne strukturne promjene mikrostrukture su uporedive. Strukturne promjene mikrostrukture uzorka vidljive su na srednjoj zoni (sredine ploče) materijala uzorka LPIS.

Igličasto struktura je vjerojatno iz nitrida. Matrica pokazuje taloženje zrna s malo krom karbida.

## 7.1.2. Mikrostruktura materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju

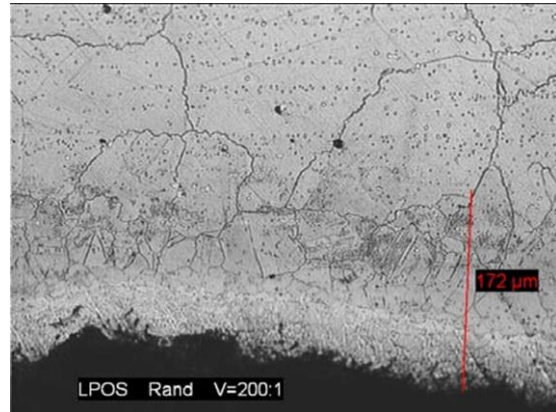
Presjek mikrostrukture materijala je uzet iz uzorka, pogodno pripremljen te vrednovan pod svjetlosnim mikroskopom. Sljedeće slike (Slika 7.6 te Slika 7.7) prikazuju presjek mikrostrukture materijala u graničnom pojasu (hladna strana/neprevučene strane i vruće strane/prevučena strana) u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.



*Slika 7.6 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu vruće strane u stvarnom stanju*

*V = 200:1*

*60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

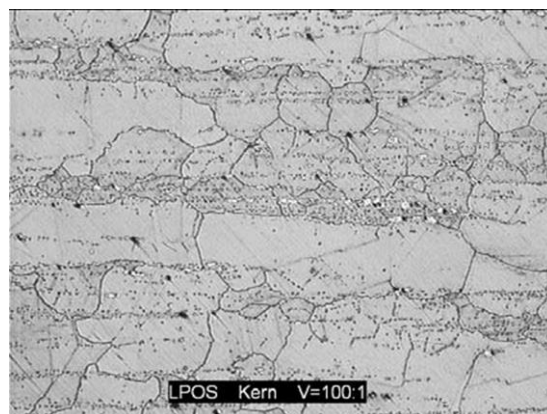


*Slika 7.7 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu hladne strane u stvarnom stanju*

*V = 200:1*

*60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

Slika 7.8 prikazuje presjek mikrostrukture materijala uzorka LPOS na srednjoj zoni (sredini ploče) u stvarnom stanju.



*Slika 7.8 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na srednjoj zoni u stvarnom stanju*

*V = 100:1*

*60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

### **Analiza:**

U stvarnom stanju odnosno stanju komponente granica zone uzorka LPIS pokazuje ekstremne strukturne promjene mikrostrukture uzrokovane visokim temperaturama.

Na graničnoj zoni vruće strane/prevučena strani javljaju se ekstremne strukturne promjene mikrostrukture do 0.265 mm (265  $\mu\text{m}$ ) dubine uzorka.

Na graničnoj zoni hladna strana/neprevučene strani javljaju se ekstremne strukturne promjene mikrostrukture do 0.172 mm (172  $\mu\text{m}$ ) dubine uzorka. Strukturne promjene mikrostrukture uzorka vidljive su na srednjoj zoni (sredine ploče) materijala uzorka LPIS.

Igličasto struktura je vjerojatno iz nitrida. Matrica pokazuje granice taloženje zrna s malo krom karbida.

## **7.2. Rezultati ispitivanja materijala / metalurška analiza uzorka kućišta izgaranja Zone 2 nakon toplinske obrade**

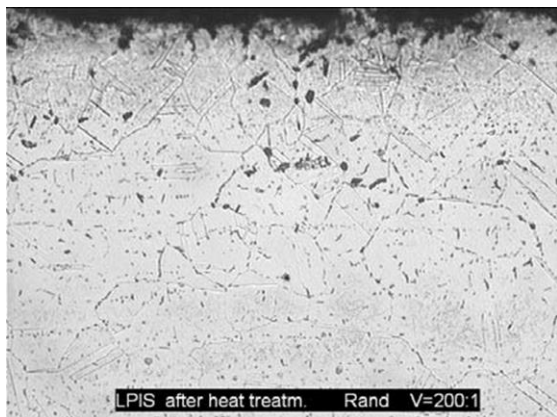
Ispitivanje uzorka kućišta izgaranja Zone 2 nakon toplinske obrade u laboratorijskoj peći izvršeni su prema sljedećim parametrima:

temperatura:	1170°C
vrijeme držanja:	10 minuta
hlađenje:	gašenje u vodi (brzo hlađenje)

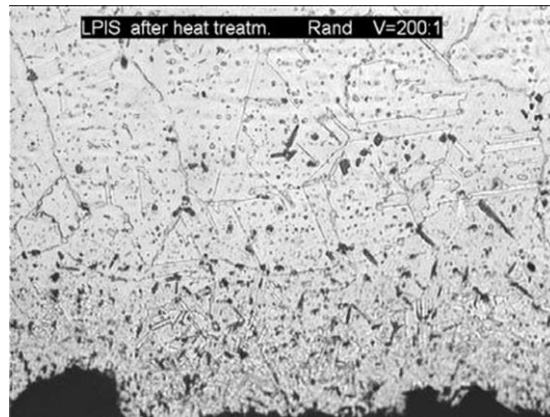
### **7.2.1. Mikrostruktura materijala uzorka LPIS nakon toplinske obrade**

Presjek mikrostrukture materijala je uzet iz uzorka, pogodno pripremljen te vrednovan pod svjetlosnim mikroskopom. Sljedeće slike (Slika 7.9 te Slika 7.10) prikazuju presjek mikrostrukture materijala u graničnom pojasu (hladna strana/neprevučene strane i vruće strane/prevučena strana) nakon toplinske obrade u laboratorijskoj peći.



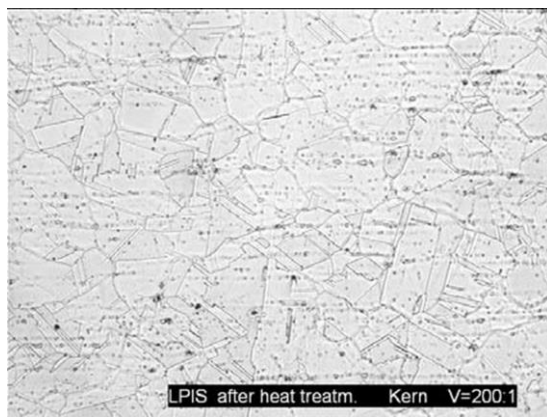


*Slika 7.9 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na graničnom pojasu hladne strane nakon toplinske obrade  
1170°C / 10 min / voda  
V = 200:1  
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*



*Slika 7.10 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na graničnom pojasu vruće strane nakon toplinske obrade  
1170°C / 10 min / voda  
V = 200:1  
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

Slika 7.11 prikazuje presjek mikrostrukture materijala uzorka LPIS na srednjoj zoni (sredini ploče) nakon toplinske obrade u laboratorijskoj peći.



*Slika 7.11 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na srednjoj zoni nakon toplinske obrade  
1170°C / 10 min / voda  
V = 100:1  
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

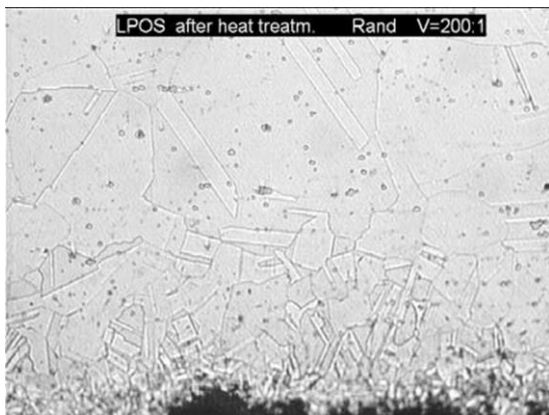
### **Analiza:**

Nakon toplinske obrade (1170°C/10min/hlađenje vodom) matrica srednje zone (sredina ploče) materijala uzorka LPIS pokazuje homogenu mikrostrukturu. Mikrostruktura srednje zone (sredina ploče) promijenila se u izvorno stanje materijala nakon toplinske obrade.

Na graničnoj strani zone (vruće strane/prevučena strana) ekstremne strukturne promjene mikro strukture su do 0.450 mm (450  $\mu$ m) dubine. Na graničnoj strani zone (hladna strana /neprevučene strane) ekstremne strukturne promjene mikrostrukture su usporedivi. Nema poboljšanja mikrostrukture vidljive na graničnim zonama nakon toplinske obrade. Strukturne promjene graničnog područja su trajne te se nisu promijenile nakon toplinske obrade.

## 7.2.2. Mikrostruktura materijala uzorka LPOS nakon toplinske obrade

Presjek mikrostrukture materijala je uzet iz uzorka, pogodno pripremljen te vrednovan pod svjetlosnim mikroskopom. Sljedeće slike (Slika 7.12 te Slika 7.13) prikazuju presjek mikrostrukture materijala u graničnom pojasu (hladna strana/neprevučene strane i vruće strane/prevučena strana) nakon toplinske obrade u laboratorijskoj peći.

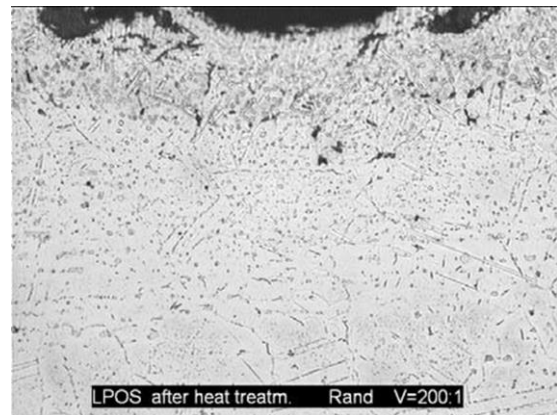


*Slika 7.12 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu hladne strane nakon toplinske obrade*

*1170°C / 10 min / voda*

*V = 200:1*

*60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*



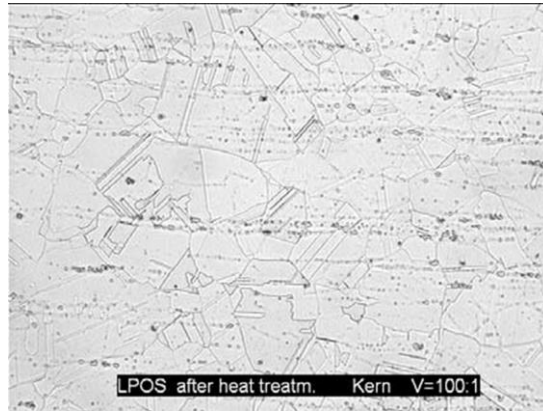
*Slika 7.13 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu vruće strane nakon toplinske obrade*

*1170°C / 10 min / voda*

*V = 200:1*

*60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

Slika 7.14 pokazuje presjek mikrostrukture materijala uzorka LPOS na srednjoj zoni (sredini ploče) nakon toplinske obrade.



*Slika 7.14 Presjek mikrostrukture materijala  
LPOS na srednjoj zoni nakon toplinske obrade  
1170°C / 10 min / voda  
V = 100:1  
60ml HCL / 10 ml HNO<sub>3</sub>*

**Analiza:**

Nakon toplinske obrade (1170°C/10 min/hlađenje vodom) matrica srednje zone (sredina ploče) materijala uzorka LPOS prikazuje homogenu mikrostrukturu. Mikrostruktura srednje zone (sredina ploče) promijenila se u izvorno stanje materijala nakon toplinske obrade.

Na graničnoj strani zone (vruće strane/prevučena strana) ekstremne strukturne promjene mikro strukture su do 0.210 mm (210 μm) dubine. Na graničnom zona (hladna strana /neprevučene strane) ekstremne strukturne promjene mikrostrukture su usporedive. Nema poboljšanja mikrostrukture vidljive na graničnim zonama nakon toplinske obrade. Strukturne promjene graničnog područja su trajne te se nisu promijenile nakon toplinske obrade.

### **7.3. Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka komore izgaranja Zone 2 u stvarnom stanju**

Uzorci komore izgaranja Zone 2 ispitani su u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

#### **7.3.1. Rastezno ispitivanje uzorka LPIS u stvarnom stanju**

Zbog male veličine uzorka materijala LPIS (6 x 50 x 95 mm), tj. 6 mm debljine materijala, rastezno ispitivanje materijala uzorka LPIS prema normi DIN EN ISO 6892-1 nije moguće.

### 7.3.2. Rastezno ispitivanje uzorka LPOS u stvarnom stanju

Tablica 7.1 prikazuje rezultate rasteznog ispitivanja materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

Tabela 7.1 Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka LPOS u stvarnom stanju komponente

Test broj	Dimenzija [mm]	L <sub>0</sub> Duljina [mm]	Re / Rp <sub>0,2</sub> Granica razvlačenja [MPa]	R <sub>m</sub> Rastezna čvrstoća [MPa]	A Izduženje [%]	Oblik uzorka	Temp. °C]
12-C0659	ø6.03	30	-	-	-	PM	RT / 20°C
Dobivene vrijednosti			414	701	23.5	-	-
Minimalne vrijednosti			300	700	35.0	-	-
Odstupanje			+114	+1	-11.5		
Procjena			prihvatljivo	prihvatljivo ali mora biti uzeto u obzir da je na granici	Nije prihvatljivo	-	-
Prema normi DIN EN ISO 6892-1							

#### Analiza:

Rastezno ispitivanje uzoraka materijala LPOS izvršeno je prema normi DIN EN ISO 6892-1. Minimalna vrijednost granica razvlačenja R<sub>p 0,2</sub> iznosi 300 MPa. Dobivena vrijednost ispitivanje granice razvlačenja R<sub>p 0,2</sub> je 414 MPa. Granica razvlačenja R<sub>p 0,2</sub> uzorka materijala je unutar raspona zahtjeva i prema tome rezultat je prihvatljiv.

Minimalna vrijednost rastezne čvrstoće R<sub>m</sub> iznosi 700 MPa. Dobivena vrijednost ispitivanjem rastezne čvrstoće R<sub>m</sub> je 701 MPa. Rastezna čvrstoća R<sub>m</sub> je u granici zahtjeva te je stoga rezultat prihvatljiv, ali treba uzeti u obzir kako dobiven rezultat je na granici minimalne vrijednosti prihvatljivosti rezultata.

Minimalna vrijednost izduženja A iznosi 35,0%. Dobivena vrijednost ispitivanja izduženja A je 23,5%. Izduženje je izvan zahtjeva prihvatljivost te stoga rezultat nije prihvatljiv.

## 7.4. Rezultati ispitivanja žilavosti uzorka komore izgaranja Zone 2 u stvarnom stanju

Uzorci komore izgaranja Zone 2 ispitani su u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

### 7.4.1. Ispitivanje žilavosti uzorka LPIS u stvarnom stanju

Tablica 7.2 prikazuje rezultate ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

Tablica 7.2 Rezultati ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponente

Test broj	Presjek [cm <sup>2</sup> ]	Pozicija ureza	Temp. [°C]	Žilavost [J]			Žilavost [J] prosjek
				pojedinačne vrijednosti			
12-06836	0.40	PM	RT / 20°C	-	-	-	-
Dobivene vrijednosti			-	22	22	21	21
Minimalne vrijednosti			-	-	-	-	40
Odstupanje			-	-	-	-	-19
Procjena			-	-	-	-	Nije prihvatljivo
Prema normi DIN EN ISO 148-1 (450 / KV2) / PSW 450J Serijski broj 1991							

#### Analiza:

Minimaln žilavost za ploču debljine 6mm iznosi 40J. Dobivena vrijednost ispitivanja žilavosti iznosi 21J. Žilavost materijala je izvan zahtjeva prihvatljivosti te stoga rezultat nije prihvatljiv.

## 7.4.2. Ispitivanje žilavosti uzorka LPOS u stvarnom stanju

Tablica 7.3 prikazuje rezultate ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

Zbog male veličine uzorka materijala LPOS (10 x 50 x 95 mm) kompletno ispitivanje žilavosti prema DIN EN ISO 148-1 (450 / KV2) / PSW 450J nije bilo moguće. Minimalno je potrebno tri uzorka za udarno ispitivanje. Laboratorij je bio u mogućnosti uzeti dva uzorka za udarno ispitivanje materijala uzorka LPOS što nije zadovoljavajuće za analizu rezultata ispitivanja.

*Tabela 7.3 Rezultati ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponente*

Test broj	Presjek [cm <sup>2</sup> ]	Pozicija ureza	Temp. [°C]	Žilavost [J]			Žilavost [J] prosjek
				pojedinačne vrijednosti			
12-06836	0.60	PM	RT / 20°C	-	-	-	-
Dobivene vrijednosti			-	28	27	-	27
Minimalne vrijednosti			-	-	-	-	40
Odstupanje			-	-	-	-	-13
Procjena			-	-	-	-	Nije prihvatljivo
Prema normi DIN EN ISO 148-1 (450 / KV2) / PSW 450J Serijski broj 1991							

### **Analiza:**

Zbog nedostatka materijala ispitivanje žilavosti nije bilo moguće provesti u potpunosti. Minimalna žilavost za ploču debljine 10mm iznosi 40J. Dobivena vrijednost ispitivanja žilavosti iznosi 27J. Žilavost materijala je izvan zahtjeva prihvatljivosti te stoga rezultat nije prihvatljiv.

## 7.5. Rezultati spektroskopske analize / kemijskog sastava uzorka komore izgaranja Zone2 u stvarnom stanju

Uzorci komore izgaranja Zone 2 ispitani su u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

### 7.5.1. Spektrografska analiza / kemijski sastav uzorka LPIS u stvarnom stanju

Sljedeća tablica 7.4 prikazuje rezultate spektroskopske analize / kemijskog sastava materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

Tabela 7.4 Rezultate spektroskopske analize materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponente

Test broj.	12-06836				
Materijal	Alloy 617 (2.4663 / NiCr23Co12Mo)				
Element	Minimum	Maksimum	Dobivena vrijednost	Odstupanje	Procjena
Ni	44.5		53.81	9.31	prihvatljivo
Cr	20.0	24.0	22.10	u granici	prihvatljivo
Fe	-	3.0	0.36	u granici	prihvatljivo
C	0.05	0.15	0.092	u granici	prihvatljivo
Mn	-	1.0	0.03	u granici	prihvatljivo
Si	-	1.0	0.03	u granici	prihvatljivo
Co	10.0	15.0	12.70	u granici	prihvatljivo
Cu	-	0.5	-	u granici	prihvatljivo
Mo	8.0	10.0	9.35	u granici	prihvatljivo
Ti	-	0.6	0.36	u granici	prihvatljivo
Al	0.8	1.5	1.00	u granici	prihvatljivo
P*	-	0.012	0.003	u granici	prihvatljivo
S	-	0.015	0.002	u granici	prihvatljivo
B	-	0.006	0.0025	u granici	prihvatljivo
W	-	-	-	u granici	prihvatljivo

#### Analiza:

Sadržaj nikla (Ni) je malo veći od tražene vrijednosti, što je prihvatljivo. Svi ostali elementi su unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Osim toga nema sadržaja bakra (Cu) i volframa



(W), što je prihvatljivo. Dobivena vrijednost spektroskopske analize materijala prikazuje da je kemijski sastav u cjelini unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti.

### 7.5.2. Spektrografska analiza / kemijski sastav uzorka LPOS u stvarnom stanju

Sljedeća tablica prikazuje rezultate spektroskopske analize / kemijskog sastava materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente.

*Tabela 7.5 Rezultate spektroskopske analize materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju komponente*

Test broj	12-06836				
Materijal	Alloy 617 (2.4663 / NiCr23Co12Mo)				
Element	Minimum	Maksimum	Dobivena vrijednost	Ostupanje	Procjena
Ni	44.5		53.25	8.75	prihvatljivo
Cr	20.0	24.0	22.21	u granici	prihvatljivo
Fe	-	3.0	0.84	u granici	prihvatljivo
C	0.05	0.15	0.095	u granici	prihvatljivo
Mn	-	1.0	0.04	u granici	prihvatljivo
Si	-	1.0	0.07	u granici	prihvatljivo
Co	10.0	15.0	12.61	u granici	prihvatljivo
Cu	-	0.5	-	u granici	prihvatljivo
Mo	8.0	10.0	9.36	u granici	prihvatljivo
Ti	-	0.6	0.36	u granici	prihvatljivo
Al	0.8	1.5	0.93	u granici	prihvatljivo
P*	-	0.012	0.004	u granici	prihvatljivo
S	-	0.015	0.003	u granici	prihvatljivo
B	-	0.006	0.0025	u granici	prihvatljivo
W	-	-	-	u granici	prihvatljivo

#### **Analiza:**

Sadržaj nikla (Ni) je malo veći od tražene vrijednosti, što je prihvatljivo. Svi ostali elementi su unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Osim toga nema sadržaja bakra (Cu) i volframa

(W), što je prihvatljivo. Dobivena vrijednost spektroskografske analize materijala prikazuje da je kemijski sastav u cjelini unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti.

## **7.6. Sažetak / Procjena ispitivanja materijala / metalurška analiza**

Uzorci materijala su LPIS i LPOS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente. Strane koje su izložene direktnom plamenu imaju prevlaku keramike, dok sa druge strane materijal nema prevlaku keramike.

Laboratorij je obavio sljedeća ispitivanja:

- Vizualno ispitivanje mikrostrukture materijala sa optičkim mikroskopom
  - mikrostruktura materijala uzorka na srednjoj zoni (sredini ploče) u stvarnom stanju odnosno stanju komponente
  - mikrostruktura materijala uzorka na srednjoj zoni (sredini ploče) nakon toplinske obrade
  - mikrostruktura materijala u graničnom pojasu (hladna strana / neprevučene strane i vruće strane / prevučena strana) u stvarnom stanju odnosno stanju komponente
  - mikrostrukture materijala u graničnom pojasu (hladna strana / neprevučene strane i vruće strane / prevučena strana) nakon toplinske obrade
- Rastezno ispitivanje prema DIN EN ISO 6892-1
- Ispitivanje žilavosti DIN EN ISO 148-1 (450 / KV2) / PSW 450J Serijski broj 1991
- Spektroskopska analiza / Kemijski sastav [wt.-%] prema ASTM-u

Ovo izvješće je sažetak materijalnih ispitivanja sa evaluacijom, daljnjim objašnjenjima te preporukom.

Iz uzorka materijala LPIS i LPOS u stvarnom stanju odnosno stanju komponente vidljive su ekstremne promjene mikrostrukture materijala. Do tih promjena došlo je zbog utjecaja visokih temperatura na materijal. Strukturne promjene mikrostrukture materijala uzorka vidljive su do srednje zone (sredine ploče).

Nakon toplinske obrade matrica srednje zone (sredine ploče) uzorka materijala LPIS te LPOS prikazuje homogenu mikrostrukturu. Mikrostruktura srednje zone promijenila se u izvorno stanje materijala nakon toplinske obrade.

Mikrostruktura materijala uzorka u graničnom pojasu vruće strane (prevučena strana) nakon toplinske obrade nije pokazala nikakva poboljšanja. Stoga zaključujemo da su strukturne promjene na graničnom pojasu vruće strane su trajne.

Mehanička svojstva materijala u stvarnom stanju su izvan traženih rezultata ili na samoj granici te stoga dobiveni rezultati nisu prihvatljivi.

Dobivena vrijednost spektroskografske analize materijala prikazuje da je kemijski sastav u cjelini unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti.

Nema poboljšanja mikrostrukture vidljive na graničnim zonama nakon toplinske obrade, ali trajne strukturne promjene graničnih zona su  $\leq 0.500$  mm (500  $\mu$ m). To je prihvatljivo za trenutnu procjenu, ali treba provjeriti detaljnije tijekom remonta komponente.

Zbog male veličine uzoraka materijala LPIS i LPOS rastezno i udarno ispitivanja nakon toplinske obrade materijala nije bilo moguće. Nakon toplinske obrade mikrostruktura sredine ploče se promijenila u homogeno stanje te je vidljivo iz presjeka da se mikrostruktura uzorka promijenila u prvobitno odžareno stanje materijala. Zbog promjene u izvorno stanje materijala na temelju prijašnjih iskustva očekuju se bolje i prihvatljive vrijednosti mehaničkih svojstava (rastezno i udarno ispitivanje) nakon toplinske obrade.

## 8. Zaključak

U ovom završnom radu cilj je ustanoviti stanje komore izgaranja u kojem su tvrtka Inpirio zajedno sa laboratorijem Zentrallabor Sigerland došli su do sjedećeg zaključka.

Kao važan kriterij nakon vizualne inspekcije površine materijala komponente vidljivo je da površina materijala bez znakova "slonove kože" te bez znakova predgrijanih dijelova materijala.

Na temelju vizualne inspekcije unutarnje te vanjske oplata kućišta izgaranja Zone 2, rezultata laboratorijskog ispitivanja, operativnog iskustva te činjenicu da je komponenta isključivo radi na plin remont komponente je prihvatljiv. Nakon remonta komponenta može ostvariti još jedan dodatni standardni operativni ciklus od 32,000 radnih sati.

Dodatni pozitivni argument za inspekciju komponente je postojeći premaz keramike koji smanjuje razgradnju materijala:

- korozivna zaštita
- smanjenja operativne temperature materijala komponente

Prema metalografskim i mehaničkim svojstvima, inspekcija komore izgaranja Zone 2 (unutarnje te vanjske oplata), remont komponente može se obaviti prema standardnom postupku rekondicioniranja.

Prije početka remonta komponenta mora biti:

- Rastavljena
- Pjeskarena
- 100% provjerena penetrantom
- 3D skenirana laserom
- Odžarena

Nakon remonta komponenta mora biti:

- Pjeskarena
- 100% provjerena penetrantom
- 3D skenirana laserom
- Odžarena
- Sastavljena

IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Nikola Mlinarić (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Nikola Mlinarić  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Nikola Mlinarić (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Rekondicioniranje komore izgaranja plinske turbine (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Nikola Mlinarić  
(vlastoručni potpis)

## 9. Literatura

- [1] [www.specialmetals.com/documents/Inconel alloy 617.pdf](http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20617.pdf), dostupno 10.05.2015.
- [2] Maherwan P. Boyce, Gas turbine engineering handbook, Second edition, Butterworth-Heinemann 2002.
- [3] Miler, J.: Parne i plinske turbine, Tehnička knjiga, Zagreb 1955, str. 305
- [4] Izvor: <http://www.alstom.com/press-centre/2011/9/alstom-boosts-gas-turbine-portfolio-address-growth-gas-fired-power-generation/>, dostupno 10.08.2015.
- [5] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/katedra3/Nastava/toplinske\\_turbine\\_novo/12%20SteamGas.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra3/Nastava/toplinske_turbine_novo/12%20SteamGas.pdf), dostupno 12.10.2015.
- [6] [http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/aviation/1995/a95o0232/figure\\_2.gif](http://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/aviation/1995/a95o0232/figure_2.gif), dostupno 15.07.2015.
- [7] <http://www.winbrogroup.com/applications/turbineblades/>, dostupno 16.07.2015.
- [8] Tireli, E.; Martinović, D. Brodske toplinske turbine. Rijeka : Pomorski fakultet u Rijeci, 2001.
- [9] [https://www.vuka.hr/fileadmin/user\\_upload/knjiznica/on\\_line\\_izdanja/Energetski\\_strojevi\\_i\\_sustavi.pdf](https://www.vuka.hr/fileadmin/user_upload/knjiznica/on_line_izdanja/Energetski_strojevi_i_sustavi.pdf), dostupno 15.02.2016.
- [10] [http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE), dostupno 08.10.2015.
- [11] Izvor: Donald R. Askeland; Pradeep P. Fulay; Wendellin J. Wright: Science and engineering of materials, Sixth edition, Cengage Learning 2010.
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile\\_testing#/media/File:Tensile\\_specimen-round\\_and\\_flat.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile_testing#/media/File:Tensile_specimen-round_and_flat.jpg), dodano 01.11.2015.
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile\\_testing#/media/File:Tensile\\_specimen\\_shoulders.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile_testing#/media/File:Tensile_specimen_shoulders.svg), dodano 15.03.2016.
- [14] [http://www.twi-global.com/\\_resources/assets/inline/full/0/9122.gif](http://www.twi-global.com/_resources/assets/inline/full/0/9122.gif), dodano 10.03.2016.
- [15] Ivica K., Materijali 1, Mehanička svojstva materijala, Ispitivanje udarnog rada loma, dodano 10.05.2015.
- [16] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20udarne%20radnje%20loma.pdf>, dostupno 12.10.2015.
- [17] Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Studij konstrukcijskog strojarstva, Materijali 1, praktikum za laboratorijske vježbe, razradio: Igor Gabrić, pred., Split, 2013. str 25
- [18] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=40365>, dostupno 20.01.2016.

## Popis tablica

<i>Tabela 2.1</i> <i>Kemijski sastav superlegure 617[1]</i> .....	8
<i>Tabela 2.2</i> <i>Fizičke konstante superlegure 617[1]</i> .....	9
<i>Tabela 2.3</i> <i>Električna i toplinska svojstva superlegure 617[1]</i> .....	9
<i>Tabela 2.4</i> <i>Modul elastičnosti[1]</i> .....	10
<i>Tabela 2.5</i> <i>Tipična mehanička svojstva legure 617 na sobnoj temperaturi u odžarenom stanju[1]</i> .....	10
<i>Tabela 4.1</i> <i>Mehanička svojstva pri sobnoj temperaturi</i> .....	39
<i>Tabela 7.1</i> <i>Rezultati rasteznog ispitivanja uzorka LPOS u stvarnom stanju komponenete</i> .....	56
<i>Tabela 7.2</i> <i>Rezultati ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponenete</i> .....	57
<i>Tabela 7.3</i> <i>Rezultati ispitivanja žilavosti materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponenete</i> .....	58
<i>Tabela 7.4</i> <i>Rezultate spektroskopske analize materijala uzorka LPIS u stvarnom stanju komponenete</i> .....	59
<i>Tabela 7.5</i> <i>Rezultate spektroskopske analize materijala uzorka LPOS u stvarnom stanju komponenete</i> .....	60

## Popis slika

Slika 1.1.1 kubična plošno centrirana (FCC) kristalna struktura .....	6
Slika 2.3 Svojstvo puzanja legure 617 u odžarenom stanju[1].....	13
Slika 2.4 Svojstvo loma legure 617 u odžarenom stanju[1].....	13
Slika 2.5 Prikaz plinskoturbinskog postrojenja .....	14
Slika 2.6 Presjek plinske turbine GT24[4].....	15
Slika 2.7 Prikaz sapnica turbine[6] .....	17
Slika 2.8 Prikaz prvog reda lopatice plinske turbine s rupama za hlađenje[7].....	17
Slika 2.9 Prikaz sheme komore izgaranja i procesa promjene temperature (t) i brzine strujanja plinova (c) [9] .....	18
Slika 2.10 Izvedba horizontalne komore za izgaranje smještene prstenasto oko turbostroja[9].....	19
Slika 2.11 Prikaz komora za izgaranje smještenih prstenasto oko turbine[9].....	19
Slika 2.12 Prikaz presjeka GT13DM turbine s jednom plamenom cijevi u kućištu .....	20
Slika 2.13 Prikaz presjeka GT13E2 turbine smještene oko kućišta kompresora i turbine.....	20
Slika 2.14 Kombinirani proces plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja[10] .....	21
Slika 2.15 T-S dijagram kombiniranog procesa[10] .....	22
Slika 2.16 Shema statičko vlačnog ispitivanja[11] .....	23
Slika 2.17 Shema hidrauličkog ispitnog uređaja (kidalice)[11] .....	24
Slika 2.18 Oblik tipičnog obrađenog ispitnog uzorka.....	24
Slika 2.19 Oblici ispitnih uzorka za vlačno ispitivanje[12] .....	25
Slika 2.20 Načini stezanja ispitnih uzoraka u stezne čeljusti[13].....	26
Slika 2.21 Dijagram sila - produljenje.....	27
Slika 2.22 Dijagram istežanje - naprezanje .....	28
Slika 2.23 Izgled Hooke-ovog dijagrama za različite materijale.....	29
Slika 2.24 Ispitivanje udarnog rada loma na Charpy-evom batu[14].....	30
Slika 2.25 Ispitni uzorci .....	31
Slika 2.26 Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za različite tehničke materijale[15].....	31
Slika 2.27 Shematski prikaz procesa pripreme metalografskog uzorka[17].....	33
Slika 3.1 Ras Abu Fontas, Katar.....	35
Slika 3.2 Prikaz otvorene plinske turbine GT13E2 (označena pozicija Zone 2 na slici) .....	35
Slika 3.3 Prikaz markiranja područja za uzimanje uzorka s unutarne oplata .....	36
Slika 5.1 Prikaz minimalnih dimenzija uzorka.....	42
Slika 6.1 Izvadak iz dokumenta: INPIRIO-QEWC0-PI-01082012 .....	45
Slika 6.2 Izvadak iz dokumenta: INPIRIO-QEWC0-PI-01082012 .....	45
Slika 7.1 Uzorak materijala LPIS (6 x 50 x 95 mm) i LPOS (10 x 50 x 95 mm) u stvarnom stanju .....	47
Slika 7.2 Uzorak materijala LPIS (6 x 50 x 95 mm) i LPOS (10 x 50 x 95 mm) u stvarnom stanju .....	47
Slika 7.3 Presjek mikrostrukture materijal LPIS na graničnom pojasu hladne strane.....	48
Slika 7.4 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na graničnom pojasu vruće strane.....	48
Slika 7.5 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na srednjoj zoni u stvarnom stanju .....	49
Slika 7.6 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu vruće strane u stvarnom stanju .....	50
Slika 7.7 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu hladne strane u stvarnom stanju.....	50
Slika 7.8 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na srednjoj zoni u stvarnom stanju.....	50



<i>Slika 7.10 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na graničnom pojasu vruće strane nakon toplinske obrade.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 7.9 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na graničnom pojasu hladne strane nakon toplinske obrade.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 7.11 Presjek mikrostrukture materijala LPIS na srednjoj zoni nakon toplinske obrade.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 7.12 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu hladne strane nakon toplinske obrade ..</i>	<i>53</i>
<i>Slika 7.13 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na graničnom pojasu vruće strane nakon toplinske obrade ....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 7.14 Presjek mikrostrukture materijala LPOS na srednjoj zoni nakon toplinske obrade .....</i>	<i>54</i>