

# Dimenzioniranje, proračun i validacija statvenog polimernog ležaja

---

**Bugarin, Tino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:822755>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**TINO BUGARIN**

**DIMENZIONIRANJE, PRORAČUN I  
VALIDACIJA STATVENOG  
POLIMERNOG LEŽAJA**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**DIMENZIONIRANJE, PRORAČUN I  
VALIDACIJA STATVENOG POLIMERNOG  
LEŽAJA**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**prof. dr. sc. Nenad Vulić**

**STUDENT:**

**Tino Bugarin (MB: 0171279430)**

**SPLIT, 2023.**

## SAŽETAK

Dimenzioniranje, proračun i validacija statvenog polimernog ležaja igra ključnu ulogu u osiguravanju učinkovitog i pouzdanog rada suvremenih brodskih pogonskih sustava. Cilj rada je obuhvatiti cijeli proces, fokusirajući se na korištenje naprednih inženjerskih tehnika za određivanje optimalnih dimenzija ležaja, predviđanje operativnih performansi i provjeru konstrukcije. Dimenzioniranje započinje odabirom odgovarajućih polimernih materijala na temelju različitih faktora. Proračun uključuje višestrani pristup koji integrira čimbenike poput hidrodinamičkog podmazivanja, elastične deformacije i toplinskih učinaka. Validacija konstrukcije polimernih ležajeva zahtijeva kombinaciju laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja na terenu. Uspješnost konstrukcije ležaja zahtijeva cjeloviti pristup koji koristi računalne alate, teorijsku analizu i validaciju. Integracija ovih metoda osigurava da konstrukcija ležajeva zadovoljava ili premašuje operativne zahtjeve, što dovodi do poboljšane učinkovitosti pogonskog sustava, smanjenih troškova održavanja i povećane ukupne pouzdanosti broda.

**Ključne riječi:** *polimeri, konstrukcija ležaja, brodski porivni sustav, validacija ležaja*

## ABSTRACT

Dimensioning, calculation and validation of the polymer bearing system plays a key role in ensuring the efficient and reliable operation of the modern ship's propulsion systems. The goal of the paper is to comprehensively cover the entire process, focusing on the use of advanced engineering techniques to determine optimal bearing dimensions, predict operational performance, and verify construction. Sizing begins with the selection of suitable polymer materials based on various factors. The calculation includes a multifaceted approach that integrates factors such as hydrodynamic lubrication, elastic deformation and thermal effects. Validation of polymer bearings construction requires a combination of laboratory and field testing. The success of the bearing design requires a holistic approach that uses computer tools, theoretical analysis and validation. The integration of these methods ensures that the bearing design meets or exceeds operational requirements, leading to improved propulsion system efficiency, reduced maintenance costs and increased overall reliability of the ship.

**Keywords:** *polymers, bearing construction, marine propulsion system, bearing validation*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. POLIMERNI LEŽAJ</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. VRSTE I MATERIJALI POLIMERNIH LEŽAJA</b> .....	<b>5</b>
2.1.1. COMPAC .....	7
2.1.2. SXL.....	7
2.1.3. XL .....	8
2.1.4. RiverTough.....	8
<b>2.2. FIZIKALNA SVOJSTVA LEŽAJA</b> .....	<b>9</b>
2.2.1. Granična temperatura.....	10
2.2.2. Faktor oblika .....	10
2.2.3. Koeficijent temperaturnog širenja (stezanja) .....	11
2.2.4. Bubrenje .....	11
2.2.5. Oprerećenje ležaja .....	13
2.2.6. Smicanje.....	13
2.2.7. Krutost .....	13
2.2.8. Udar na ležaj .....	14
2.2.9. Histereza (strukturno prigušenje).....	15
2.2.10. Otpornost na kemikalije.....	15
<b>2.3. KONSTRUKCIJA LEŽAJA</b> .....	<b>16</b>
2.3.1. Tlak ležaja .....	16
2.3.2. Brzina .....	17
2.3.3. Konstrukcijska karakteristika ležaja.....	17
2.3.4. PVT Dijagrami .....	18
2.3.5. Debljina stijenke .....	20
2.3.6. Utori za podmazivanje.....	21
2.3.7. Spojne površine .....	21
2.3.8. Smanjivanje početnih zračnosti.....	22
2.3.9. Proces odabira ležaja .....	23
<b>3. DIMENZIONIRANJE I PRORAČUN POLIMERNOG LEŽAJA</b> ..	<b>25</b>
3.1. VANJSKI PROMJER LEŽAJA .....	25
3.2. UNUTARNJI PROMJER LEŽAJA .....	26

3.3.	PROMJENE DIMENZIJA ZBOG APSORPCIJE .....	27
3.4.	TEMPERATURNO ŠIRENJE .....	27
3.5.	NAJMANJA UGRADBENA ZRAČNOST .....	28
3.6.	LEŽAJEVI VRATILA BRODSKOG VIJKA .....	29
3.7.	MONTAŽA LEŽAJEVA .....	30
3.8.	PROIZVODNJA I OBRADA LEŽAJA .....	32
3.8.1.	Rezanje materijala .....	33
3.8.2.	Tokarenje ležaja.....	34
3.8.3.	Glodanje utora .....	35
3.8.4.	Mjerenje i tehnička kontrola ležaja .....	35
3.9.	PRORAČUN POLIMERNOG LEŽAJA U SVRHU DIMENZIONIRANJA 37	
3.9.1.	Proračun vanjskoga promjera.....	38
3.9.2.	Proračun unutarnjeg promjera .....	39
3.9.3.	Proračun duljine ležaja .....	41
3.9.4.	Konačni rezultati proračuna.....	42
4.	VALIDACIJA UREĐAJA ZA ISPITIVANJE POLIMERNIH LEŽAJEVA.....	43
4.1.	OPIS UREĐAJA ZA ISPITIVANJE POLIMERNOG LEŽAJA .....	43
4.2.	POSTUPAK VALIDACIJE.....	45
4.3.	PROIZVEDENE NEISPRAVNE KOMPONENTE, OPĆENITO PORAVNANJE TE PROBLEMI S VIBRACIJAMA .....	48
4.4.	ANALIZA I RASPRAVA REZULTATA.....	50
5.	ZAKLJUČAK .....	54
	LITERATURA .....	56
	POPIS SLIKA.....	58
	POPIS TABLICA.....	60
	POPIS OZNAKA I KRATICA .....	61

# 1. UVOD

U području pomorskog prometa, učinkovit i pouzdan rad brodskih porivnih sustava najvažniji je za uspjeh operacija plovila. Među mnogim kritičnim komponentama koje pridonose ovom uspjehu, polimerni statveni ležajevi igraju ključnu ulogu u podupiranju pogonskog vratila i omogućavanju njegove kontinuirane vrtnje. Ovi ležajevi, izrađeni od naprednih polimernih materijala, nude obećavajuću alternativu tradicionalnim metalnim ležajevima zbog svoje povećane otpornosti na habanje, smanjenog trenja i potencijala za produženi vijek trajanja. Međutim, optimalna konstrukcija i izvedba takvih ležajeva zahtijeva sveobuhvatan pristup koji obuhvaća dimenzioniranje, proračun i validaciju.

Dimenzioniranje počinje odabirom odgovarajućih polimernih materijala na temelju faktora kao što su nosivost, otpornost na trošenje i kompatibilnost s morskim okruženjem. Koriste se matematički modeli i simulacije za određivanje dimenzija ležaja koji daju optimalnu zračnost i profile dodirnog tlaka, uzimajući u obzir čimbenike kao što su neusklađenost vratila, temperaturno širenje i hidrodinamički učinci. Ovi izračuni temelje se na empirijskim podacima i teoretskim analizama kako bi se osigurao točan i precizan prikaz stvarnih pogonskih uvjeta.

Proračun uključuje višestrani pristup koji integrira čimbenike poput hidrodinamičkog podmazivanja, elastične deformacije i toplinskih učinaka. Analiza metodom konačnih elemenata i računalna dinamika fluida koriste se za predviđanje ponašanja ležaja pod različitim opterećenjima, brzinama i radnim uvjetima.

Validacija konstrukcije polimernih statvenih ležajeva zahtijeva kombinaciju laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja na terenu. Fizikalni prototipovi su podvrgnuti rigoroznim mehaničkim ispitivanjima, uključujući ispitivanje opterećenja, trošenja i izdržljivosti, kako bi se potvrdila njihova izvedba u odnosu na predviđene rezultate. Osim toga, nadzor na licu mjesta tijekom rada plovila pruža vrijedne podatke za provjeru pretpostavki modela i potrebne prilagodbe konstrukcije.

Uspješno dimenzioniranje, proračun i validacija polimernih statvenih ležajeva zahtijevaju cjeloviti pristup koji koristi računalne alate, teorijsku analizu i empirijsku validaciju. Integracija ovih metoda osigurava da izabrana konstrukcija ležajeva zadovoljava ili premašuje operativne zahtjeve, što dovodi do poboljšane učinkovitosti pogonskog sustava, smanjenih troškova održavanja i povećane ukupne pouzdanosti plovila.

Cilj i zadatak rada je prikazati postupak konstruiranja polimernog statvenog ležaja koji zadovoljava pravila struke i zadane početne uvjete. Treba poznavati polimerne materijale koji se koriste za izradu ležaja kao što su različite vrste termoplasta, termoreaktivnih materijala, guma i kompozita. Važno je poznavati konstrukcijske karakteristike i pravilno konstruirati ležaj prema zadanim pretpostavkama. Na kraju treba validirati i ispitati ležaj u što vjernijim laboratorijskim uvjetima kako bi se odobrio konstruirani ležaj.

Rad se sastoji od pet poglavlja. Prvo poglavlje donosi kratak uvod, cilj i zadatak rada te opisuje svako pojedino poglavlje.

Drugo poglavlje opisuje polimerne ležaje. U poglavlju su opisani osnovni polimerni ležaji proizvođača *Thordon Bearings* kao i ostale vrste ležaja koji se mogu pronaći te su opisana fizikalna svojstva i konstrukcija ležaja. Osnovni tipovi polimernih ležajeva koji su opisani u ovom radu su COMPAC, SXL, XL i RiverTough.

Treće poglavlje opisuje dimenzioniranje i proračun polimernog ležaja. Poglavlje se bavi osnovnim dimenzijama i karakteristikama ležaja te ugradnjom i montažom ležaja. U poglavlju je još prikazano i dimenzioniranje ležaja SXL koji se ugrađuje na brod.

Četvrto poglavlje opisuje validaciju polimernog ležaja. Temelji se na prijašnjim istraživanjima koja su navedena u literaturi. Na početku poglavlja opisan je laboratorij za ispitivanje kliznih ležajeva na Pomorskom fakultetu te oprema koja se koristi. U ostatku poglavlja opisani su mogući problemi, procedura ispitivanja uređaja i neispravne komponente. Na kraju poglavlja je analiza i rasprava rezultata.

Peto poglavlje daje osvrt na cijeli rad te su izneseni glavni zaključci. Dalje je navedena literatura te popisi slika i tablica.



## 2. POLIMERNI LEŽAJ

Polimerni ležajevi su ležajevi koji su izrađeni od polimernih materijala. Postoje mnoge vrste polimernih materijala koji se koriste za izradu polimernih ležajeva, uključujući poliamid, poliakrilamid, politetrafluoretilen i drugi.

Polimerni ležajevi se koriste u mnogim industrijama, uključujući prehrambenu, medicinsku, automobilsku i brodsku industriju.

Polimerni ležajevi imaju mnoge prednosti u odnosu na tradicionalne ležajeve. Jedna od glavnih prednosti polimernih ležajeva je otpornost na koroziju. Budući da su izrađeni od polimernih materijala, ne korodiraju i ne oksidiraju, što znači da se neće istrošiti kao tradicionalni ležajevi izrađeni od čelika i bronce. Osim toga, polimerni ležajevi su laki i tihi, što ih čini idealnim za primjenu u strojevima koji se koriste u okruženjima gdje je potrebno smanjiti buku. Još jedna prednost polimernih ležajeva je njihova niska cijena. Budući da su izrađeni od jeftinijih materijala, polimerni ležajevi su često jeftiniji od tradicionalnih ležajeva. Ovo je posebno važno u industriji gdje se koriste velike količine ležajeva, jer se troškovi mogu značajno smanjiti [1].

Unatoč mnogim prednostima, polimerni ležajevi također imaju neke nedostatke. Jedan od glavnih nedostataka je njihova manja nosivost u odnosu na tradicionalne ležajeve. To znači da polimerni ležajevi nisu pogodni za primjenu u teškim uvjetima i kod visokih opterećenja. Polimerni ležajevi su manje otporni na visoke temperature i visoki tlak, što ih čini manje pogodnima za primjenu u uvjetima visoke temperature i visokog tlaka. Mogu biti i manje izdržljivi od tradicionalnih ležajeva, što znači da se mogu brže istrošiti i zahtijevati češću zamjenu. Također, polimerni ležajevi se razlikuju u načinu na koji se podmazuju. Dok tradicionalni ležajevi zahtijevaju uobičajeno podmazivanje, polimerni ležajevi su obično samopodmazujući [2].

Polimerni materijali za polimerne ležaje su umjetni materijali koji se koriste za njihovu izradu. Polimeri su kemijski spojevi koji se sastoje od dugih lanaca ponavljajućih molekularnih jedinica, koji se mogu izrađivati u različitim oblicima i svojstvima, ovisno o sastavu i strukturi [1].

Poliamidi (*PA*) su sintetički polimerni materijali koji se često koriste u proizvodnji polimernih ležajeva. Poliamidi su otporni na habanje, koroziju i udarce, a imaju i dobru otpornost na toplinu. Poliamidi se mogu ojačati različitim punilima, kao što su stakloplastika ili ugljična vlakna, kako bi se poboljšala njihova mehanička svojstva.

Poliuretani (*PU*) su termoplastični elastomeri koji se koriste za proizvodnju polimernih ležajeva. Poliuretani su elastični, ali istovremeno i vrlo otporni na habanje i koroziju. Imaju visoku otpornost na abraziju, što ih čini pogodnim za primjenu u teškim uvjetima.

Polietileni (*PE*) su termoplastični polimeri koji se često koriste u proizvodnji polimernih ležajeva. Polietileni su izuzetno izdržljivi, imaju nisku gustoću i visoku otpornost na habanje. Postoje različiti tipovi polietilena.

Polioksimetilen (*POM*) poznat i kao acetal, je termoplastični polimer koji se često koristi u proizvodnji polimernih ležajeva. Polioksimetilen ima izvrsnu otpornost na abraziju i habanje, što ga čini pogodnim za primjenu u teškim uvjetima. Također, polioksimetilen ima visoku krutost, čvrstoću i stabilnost u odnosu na temperaturu.

Poliimidi (*PI*) su termoplastični polimeri koji se koriste u proizvodnji polimernih ležajeva za primjenu u ekstremnim uvjetima. Poliimidi imaju vrlo visoku temperaturnu otpornost i izvrsna mehanička svojstva, što ih čini pogodnima za primjenu u visoko temperaturnim okruženjima i drugim zahtjevnim uvjetima. Također imaju izvrsnu kemijsku otpornost, nizak koeficijent temperaturnog širenja i dobru dimenzijsku stabilnost.

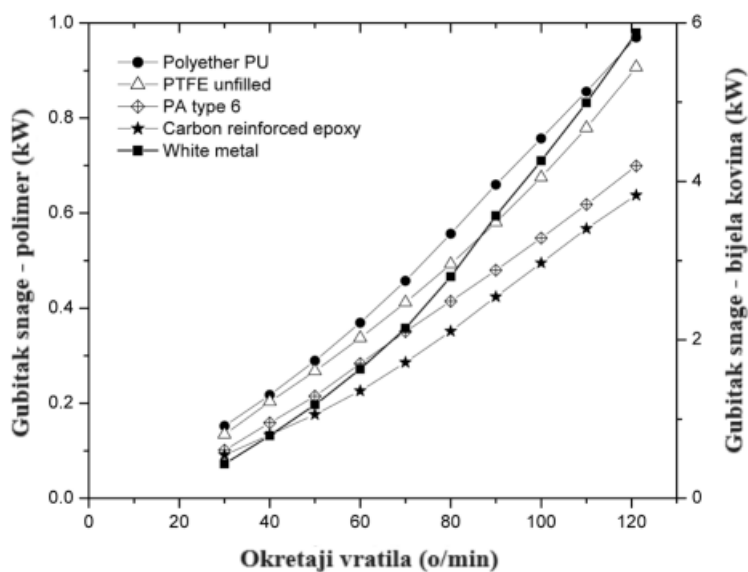
Politetrafluoretilen (*PTFE*) poznat i kao teflon, je termoplastični polimer koji se koristi za proizvodnju polimernih ležajeva. Ima izvrsnu otpornost na toplinu, kemijsku otpornost i nisku koeficijent trenja, što ga čini vrlo pogodnim za primjenu u zahtjevnim okruženjima, kao što su visoke temperature, kemikalije i visoki brzine.

Polietersulfon (*PES*) je termoplastični polimer koji se često koristi za proizvodnju polimernih ležajeva. Polietersulfon ima izvrsnu mehaničku čvrstoću, visoku temperaturnu otpornost i dobru otpornost na kemikalije. Također ima nisku toplinsku ekspanziju i stabilnost dimenzija.

Osim ovih polimernih materijala, postoje i drugi materijali koji se koriste u proizvodnji polimernih ležajeva, kao što su polikarbonati, akrilonitril-butadien-stiren (*ABS*) i politetrafluoretilen-etilen (*ETFE*). Ovi materijali se često koriste u kombinaciji s drugim materijalima, kako bi se poboljšala njihova mehanička i kemijska svojstva [3].

## 2.1. VRSTE I MATERIJALI POLIMERNIH LEŽAJA

Na slici 1. može se vidjeti razlika između različitih vrsta materijala polimernih ležaja te njihova primjena na brodu za prijevoz sipkog tereta. Pokazuje se usporedba između gubitka snage u statvenoj cijevi u slučaju primjene bijele kovine i polimera. Kao što se može vidjeti polimerni ležaj ima manje gubitke snage od bijele kovine pri najvećoj brzini od 121 o/min [4].



Slika 1. Usporedba različitih materijala kod broda za prijevoz sipkog tereta [4]

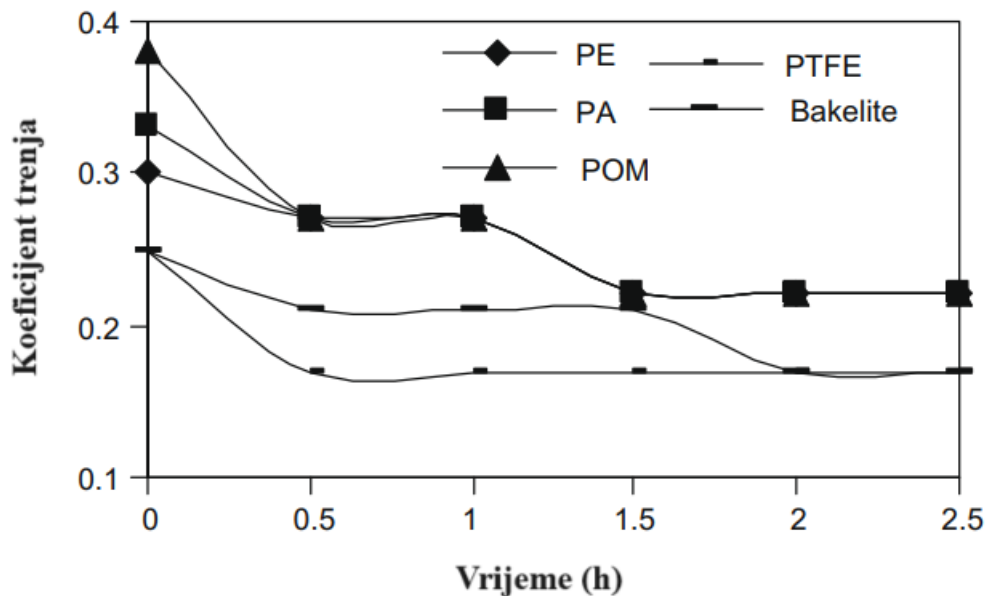
Prednosti polimernih ležajeva [1]:

- dugi vijek trajanja - servis je tijekom uporabe dokazao da ležajevi pružaju značajno dulji vijek trajanja u usporedbi s ležajevima koje zamjenjuju,
- dostupna su četiri stupnja višestruke konfiguracije - ležajevi vratila broskog vijka dostupni su u četiri različite kvalitete i više konfiguracija za optimalno rješenje ležaja za specifičnu primjenu i radni profil svakog vlasnika,
- bez onečišćenja okoliša - ležajevi vratila broskog vijka podmazani vodom potpuno eliminiraju upotrebu ulja što rezultira nultim rizikom od onečišćenja,
- visoka otpornost na habanje - zbog svojih čvrstih, elastomernih svojstava, ležajevi mogu se oduprijeti abrazivnom trošenju nastojeći preusmjeriti, a zatim odbaciti abrazivne čestice dopuštajući im da prođu kroz ležaj i da se ne uglave,
- prilagodba rubnog opterećenja - u uvjetima rubnog opterećenja uzrokovanog manjim odstupanjem osi vratila u odnosu na os ležaja, elastomerni ležajevi lagano se

deformiraju, učinkovito raspoređujući opterećenje i smanjujući potencijalno trošenje ležaja i vratila,

- nisko trenje - statički i dinamički koeficijent trenja niži su od ostalih materijala koji se obično koriste za vodeno podmazivane ležajeve. Niže trenje dovodi do smanjenog okretnog momenta, duljeg vijeka trajanja, kao i eliminacije proklizavanja i buke,
- visoka otpornost / otpornost na udarce – elastomerni ležajevi teže apsorbirati udarna opterećenja, povećavajući otpornost na oštećenja od udaraca tijekom rada ili u uvjetima teškoga mora.

Na slici 2. prikazan je odnos koeficijenta trenja i vremena za različite materijale kao što su PE, PA, POM, PTFE i bakelit.



Slika 2. Različiti materijali polimernih ležaja [5]

Najveća stopa trošenja zabilježena je kod ležaja od čistog bakelita, dok je najmanja stopa trošenja zabilježena kod ležaja od POM-a. Dakle, najveću otpornost na habanje imaju PA i POM. Otpornost na trošenje povećana je zbog boljih triboloških svojstava ovih materijala. Koeficijenti trenja bili su između 0,15 i 0,25, a temperature ležajeva su varirale od 30 do 35 C [5].

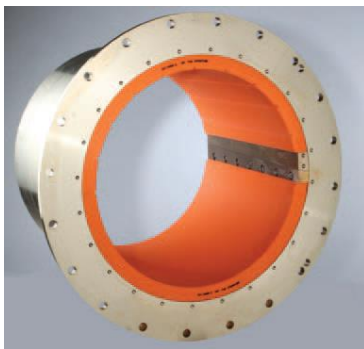
### 2.1.1. COMPAC

Thordon COMPAC je vodeno podmazan sustav ležaja visokih performansi prvenstveno za radne uvjete u mirnom moru.

Posebno formulirana s niskim koeficijentom trenja kako bi se smanjilo trenje pri pokretanju i eliminiralo proklizavanje, COMPAC-ova jedinstvena konfiguracija projektirana je za promicanje ranog stvaranja hidrodinamičkog sloja pri nižim brzinama vrtnje vratila.

Donji (opterećeni) dio ležaja je gladak, dok gornja polovica ležaja sadrži vodene utore za podmazivanje i hlađenje [6].

Na slici 3. prikazan je konstrukcijski oblik COMPAC ležaja.



Slika 3. Izgled COMPAC ležaja [7]

### 2.1.2. SXL

Thordon SXL nudi niži koeficijent trenja za smanjeni okretni moment i mirniji rad pri nižim brzinama vrtnje vratila, povećanu otpornost na abrazivno trošenje od stranih čestica i produljeni vijek trajanja u usporedbi s XL [6].

Na slici 4. prikazan je SXL ležaj.



Slika 4. Izgled SXL ležaja [8]

### 2.1.3. XL

Thordon XL je ležaj opće namjene koji nudi poboljšana svojstva u usporedbi s drugim ležajevima koji se obično koriste kao ležajevi vratila brodskog vijka.

XL pruža dobar kompromis između dugog vijeka trajanja, niskog koeficijenta trenja, otpornosti na abraziju i isplativosti [6].

Na slici 5. prikazan je XL ležaj.



Slika 5. Izgled XL ležaja [8]

### 2.1.4. RiverTough

Posebno formuliran za pružanje produljenog vijeka trajanja u vrlo abrazivnim vodenim uvjetima kao što su unutarnji riječni sustavi, koji obiluju česticama pijeska, Thordon RiverTough ležajevi koji rade u kombinaciji s površinski otvrdnutim Ni-Cr-B rukavcima vratila nadmašuju svojstva gumenih ležajeva vratila brodskog vijka dvostruko ili više.

Više od 25 godina iskustva na stotinama brodica koja rade na američkom muljevitom sustavu rijeke *Mississippi* potvrđuju moguće trošenje ležajeva između svega 0,25 mm do 0,38 mm godišnje [6].



Slika 6. Izgled RiverTough ležaja [8]

## 2.2. FIZIKALNA SVOJSTVA LEŽAJA

U tablici 1. prikazana su fizikalna svojstva Thordon XL, SXL i COMPAC ležaja.

**Tablica 1. Fizikalna svojstva Thordon XL, SXL i COMPAC ležaja [6]**

Svojstva	XL	SXL	COMPAC
Vlačna čvrstoća, MPa	35	37,5	37,5
Istezanje, %	70	150	150
Youngov modul elastičnosti, MPa	850	605	605
Poissonov koeficijent	0,45	0,45	0,45
Toplinska vodljivost, W/mK	0,25	0,25	0,25
Specifični toplinski kapacitet, KJ/kgK	1,5	1,5	1,5
Bubrenje, %			
Voda	1,3	1,3	1,3
Ulje	1,3	1,3	-
Koeficijent trenja			
Suho statičko	0,35 – 0,45	0,25 – 0,30	0,25 – 0,35
dinamičko	0,30 – 0,40	0,10 – 0,30	0,10 – 0,20
Mokro statičko	0,30 – 0,40	0,25 – 0,30	0,25 – 0,35
dinamičko	0,20 – 0,25	0,10 – 0,20	0,10 – 0,20
Raspon radnih temperatura			
Suho, °C	-60/107	-60/107	-60/107
Mokro, °C	-7/60	-7/60	-7/60
Ulje, °C	/75	/75	/75

Fizikalna svojstva polimernog ležaja su:

- granična temperatura,
- faktor oblika,
- koeficijent temperaturnog širenja (stezanja),
- bubrenje,

- naprezanje ležaja,
- smicanje,
- krutost,
- udar na ležaj,
- histereza,
- otpornost na kemikalije.

### **2.2.1. Granična temperatura**

Svi ležajevi su izloženi kombiniranom učinku temperature okoline i topline trenja koja se stvara tijekom rada, koja podiže temperaturu ležajnoga sklopa. Thordon, kao i svi drugi nemetalni materijali, ima nisku toplinsku vodljivost u usporedbi s metalima, pa se moraju uzeti u obzir ograničenja stvaranja topline uslijed trenja.

Gornja granica temperature za Thordon koji radi u nevodenom okruženju je 105°C. Iznad 105°C dolazi do omekšavanja površine. Kako površina omekšava, koeficijent trenja se povećava. To zauzvrat rezultira stvaranjem dodatne topline, koja se odvodi ograničeno. Temperatura se dalje povećava i proces se nastavlja sve dok ležaj ne otkáže. U nekim slučajevima to može biti zaustavljeno, pod uvjetom da postoji lagano prigušivanje.

Donja granica rada Thordona je -60°C. Međutim, moguće je tijekom stezanja koristiti tekući dušik na temperaturi od -195°C te Thordon ne postaje previše krt za postavljanje.

Gornja granica temperature za Thordon koji radi u vlažnom okruženju je 60°C zbog hidrolize. Hidroliza je kemijska reakcija u kojoj voda reagira s drugom tvari pri čemu nastaju dvije ili više novih tvari. To uključuje ionizaciju molekula vode kao i cijepanje spoja hidrolizom. Ovo se ograničenje također odnosi na druge tekućine sa značajnim sadržajem vode. Za ležajeve podmazane standardnim mineralnim uljem, gornja granica temperature je 75°C [6].

### **2.2.2. Faktor oblika**

Tlačnim ispitivanjem elastomera utvrdilo se da na krivulju naprezanja i deformacije (Hookeov dijagram) uvelike utječe oblik dijela. Taj je učinak poznat kao faktor oblika i određuje se dijeljenjem opterećene površine s površinom koja se može izbočiti. Za određeno opterećenje, kako se faktor oblika povećava, rezultirajući otklon elastomera se smanjuje. Nosivost elastomera ograničena je količinom otklona koji može prihvatiti, tako da povećanje faktora oblika omogućuje elastomeru da podnese veće opterećenje [6].



$$S = \frac{l}{2s}$$

gdje je:

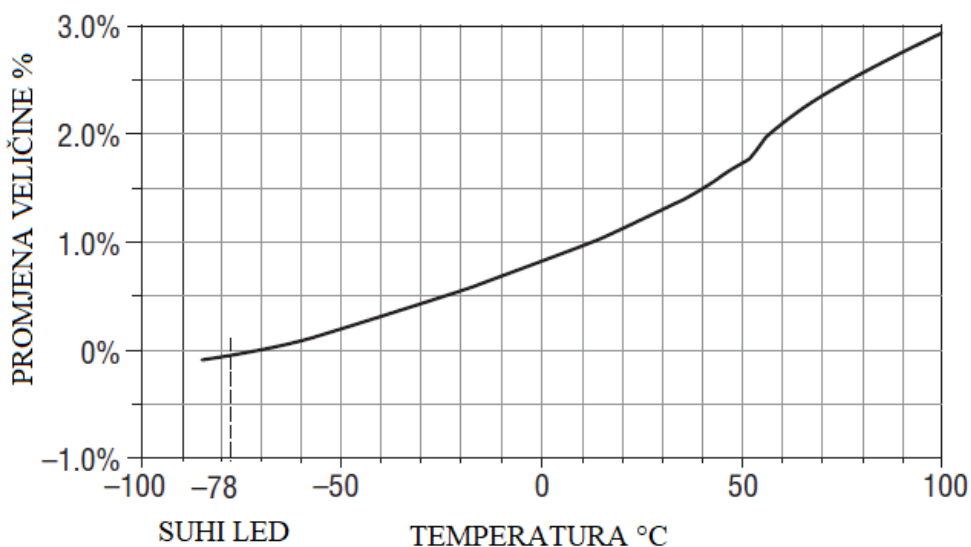
$S$  – faktor oblika,

$l$  – duljina ležaja, mm

$s$  – debljina stijenke, mm

### 2.2.3. Koeficijent temperaturnog širenja (stezanja)

Koeficijent temperaturnog širenja (stezanja) za Thordon je nelinearan, kao i drugi nemetali, i varira u cijelom temperaturnom rasponu. Slika 7. prikazuje dijagram promjene veličine (%) u odnosu na temperaturu (°C) za Thordon SXL i COMPAC [6].



**Slika 7. Dijagram promjene veličine (%) u odnosu na temperaturu (C) za Thordon SXL i COMPAC [6]**

### 2.2.4. Bubrenje

Thordon ekspandira u vodi približno 1,3% volumena u atmosferskim uvjetima na temperaturi od 21°C zbog izotropne prirode polimerne strukture. Na ovoj temperaturi ili nižoj, potpuno širenje može potrajati 6 do 18 mjeseci, ovisno o geometriji.

Ako se temperatura poveća, povećava se ne samo volumenski postotak bubrenja, već i brzina bubrenja. Kako bi se utvrdili učinci upijanja vode na Thordon provedena su razna ispitivanja. Ona su pokazala učinke upijanja vode na zatvaranje provrta i na promjenu aksijalne duljine. Prosječni učinak na zatvaranje provrta je 0,011 pomnožen s debljinom

stijenke. Prosječni učinak na aksijalno bubrenje je 0,005 pomnoženo s duljinom ležaja. U ispitivanjima s vodom na 60°C povećano je volumetrijsko bubrenje na 2,0% unutar 100 sati [6].

Kada se Thordon podvrgne neprekidnom uranjanju u vruću vodu, tj. iznad 60°C, materijal se kemijski kviri tijekom vremena zbog reakcije s vrućom vodom. Ovo propadanje se također može opisati kao hidroliza. Površina materijala u početku omekša, a zatim s vremenom puca i lomi se. Do hidrolize će doći i kod drugih tekućina s visokim sadržajem vode [6].

Na slici 8. je prikazan tipični primjer hidrolize.



**Slika 8. Primjer hidrolize [6]**

Bubrenje Thordon elastomera uronjenom u standardno mineralno ulje za podmazivanje je sporo i u maloj mjeri, osobito na niskim temperaturama kao što je 22°C. Promjene dimenzija su male i njihovo razmatranje je manje važno od onih u vodi na takvim temperaturama.

Međutim, pri visokim radnim temperaturama treba uzeti u obzir volumetrijsko bubrenje. Na primjer, na 75°C, volumetrijska ekspanzija može biti iznad 2,5%. U praksi se iste dimenzije dodaju i ležaju koji je uronjen u vodu i ležaju koji je uronjen u ulje. To je djelomično zbog zabrinutosti za nižu toplinsku vodljivost ulja u usporedbi s vodom.

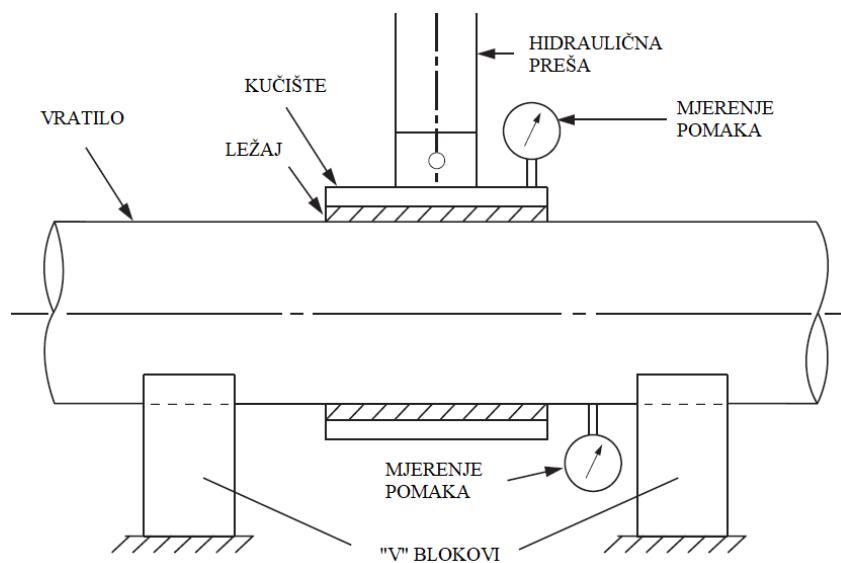
Kada se koristi druga vrsta ulja za podmazivanje, treba ga ispitati na kompatibilnost s Thordonom prije ugradnje ležaja. Thordon može drugačije reagirati na nestandardna ulja za podmazivanje. Značajna promjena u dimenzijama (iznad one koja se očekuje za vodu) ili omekšavanje nakon uranjanja u mazivo dulje od 24 sata znači da mazivo nije kompatibilno s Thordonom [6].

### 2.2.5. Opterećenje ležaja

Kada Thordon elastomerni ležajevi opterete, oni se pomiču u skladu s primijenjenom silom. Pri tlačnom opterećenju se obujam neće značajno promijeniti, ali može doći do značajne promjene oblika.

Krivulje naprezanja-linijske deformacije određuju se eksperimentalno pomoću stroja za vlačno ispitivanje i standardnog ispitnog uzorka. Međutim, kako bi se razvili podaci koji su prikladniji za opterećenje Thordon ležaja, treba ispitati materijal u tlačnom načinu opterećenja koristeći puni nosivi oblik [6].

Slika 9. prikazuje kako je ležaj opterećen i kako se mjeri progib.



Slika 9. Opterećenje ležaja [6]

### 2.2.6. Smicanje

Posmična sila na ležaju je funkcija koeficijenta trenja između ležaja, vratila i nazivnog opterećenja. Kada su ležajevi ugrađeni s čvrstim dosjedom, relativna sila je dovoljna da spriječi rotaciju. Ako bi se sila trenja ili normalno opterećenje značajno povećali, primjerice uslijed nakupljanja znatnije količine abraziva, sila smicanja može premašiti silu zadržavanja u sklopu [6].

### 2.2.7. Krutost

Krutost ležaja ovisi o veličini i fizikalnim svojstvima. Parametri veličine su duljina ležaja, promjer i debljina stijenke. Fizičko svojstvo koje treba uzeti u obzir je Youngov tlačni

modul ( $E_o$ ) materijala ležaja, koji je jednak tlačnom naprezanju podijeljenom s tlačnom deformacijom [6].

$$k = \frac{l D_L E_o}{s}$$

gdje je:

$k$  – krutost, MN/mm

$l$  – duljina ležaja, mm

$D_L$  – promjer ležaja, mm

$E_o$  – Youngov modul, MPa

$s$  – debljina stijenke, mm

U tablici 2. prikazani su Youngovi moduli elastičnosti za različite materijale.

**Tablica 2. Modul elastičnosti različitih materijala [9]**

<b>Materijal</b>	<b><math>E_o</math> (MPa)</b>
Guma	103
Thordon SXL	440
Thordon COMPAC	440
Thordon XL	490
Thordon HPSXL	650
Bijeli metal	33 500
Čelik	206 900

### 2.2.8. Udar na ležaj

Thordon, koji posjeduje visoku otpornost na udarce, ima sposobnost apsorpiranja udarnih opterećenja i otpornost da se vrati u prvobitni oblik. Otpornost se definira kao omjer energije predane u oporavku od deformacije i energije potrebne za proizvodnju deformacije. Ova kombinacija omogućuje Thordonu otpornost na udarce koji se često događaju i mogu kod kliznih ležajeva dovesti do otkazivanja bijele kovine ili polimerom. U primjenama gdje postoje značajna udarna opterećenja niske frekvencije, ležaj bi trebao biti projektiran s većom debljinom stijenke [6].

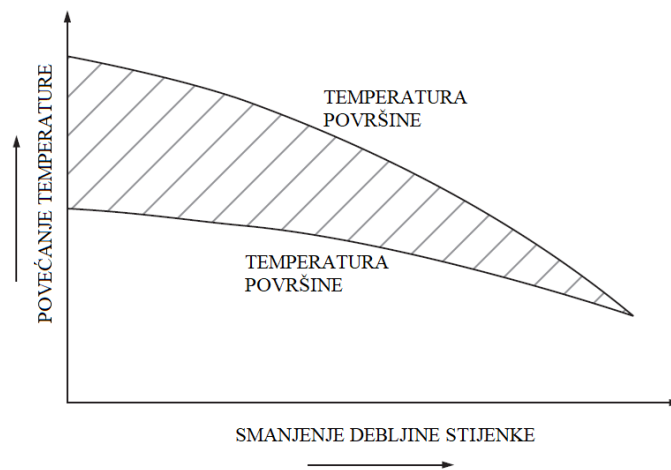
### 2.2.9. Histereza (strukturno prigušenje)

Histereza je vrst dinamičkog kvara zbog visokofrekventnog savijanja. Kvar se događa kada materijal apsorbira udarno opterećenje, budući da prije nego što se materijal potpuno oporavi od prvog udarca, on bude izložen drugom udarcu. Rezultat je energija koja se nakuplja ispod površine materijala u obliku topline. Ova će toplina, ako joj se dopusti da se akumulira, tj. ako se ne odvodi, na kraju oštetiti materijal.

Histereza je postotak gubitka energije po ciklusu deformacije i može se mjeriti kao razlika između postotka otpornosti i 100%.

Thordon ležaj može biti podložan oštećenju histerezom. Ako se ležaj izloži dinamičkom udarnom opterećenju koje bi moglo rezultirati histerezom, postoje različita konstrukcijska rješenja kako bi se smanjio problem. Slika 8. ilustrira da će povećanje faktora oblika (smanjenje debljine stijenke) smanjiti otklon i povećati stopu oporavka, čime se smanjuje stvaranje i nakupljanje topline. Manja debljina stijenke također omogućuje povećanu disipaciju topline kroz nosivu stijenku do kućišta kako bi se smanjila količina nakupljene topline [6].

Na slici 10. prikazan je učinak histereze.



Slika 10. Učinak histereze [6]

### 2.2.10. Otpornost na kemikalije

Thordon nije korozivan i otporan je na ulje, vodu i većinu kemikalija. Na njega ne utječu maziva koja se inače koriste s kliznim ležajevima.

Na Thordon ležaj ne utječu blage kiseline (pH raspon 2-7) ni lužnate kupke kao ni druga kemijska okruženja koja bi bila štetna za metalne ležajeve.

Za kritične primjene preporučuje se provođenje ispitivanja uranjanjem kako bi se utvrdilo hoće li Thordon ležaj biti siguran za upotrebu. Značajno omekšavanje ili promjene dimenzija nakon 24 sata uranjanja pri zadanim temperaturama pokazat će je li ležaj prikladan za tu primjenu [6].

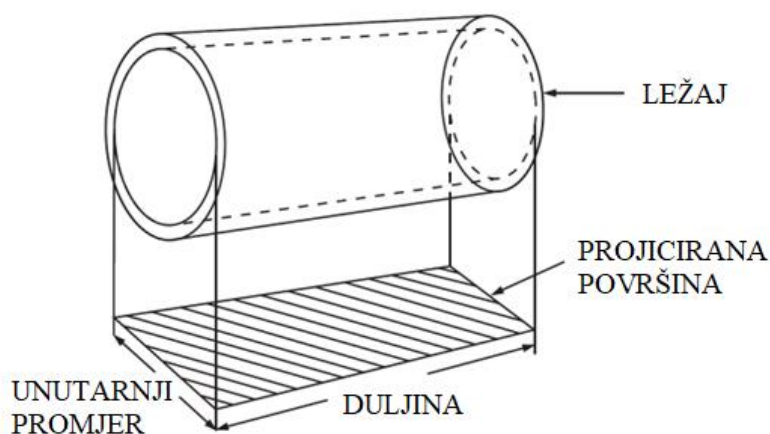
## 2.3. KONSTRUKCIJA LEŽAJA

### 2.3.1. Tlak ležaja

Tlak ležaja se izračunava dijeljenjem radijalnog opterećenja projiciranom površinom ili presjekom dijela ležaja. Projicirana površina se određuje množenjem unutarnjeg promjera ležaja sa duljinom ležaja kao što je prikazano na slici 9. Upotreba unutarnjeg promjera pomnoženog s duljinom ležaja norma je industrije ležajeva za izračun projicirane površine za tlak ležaja. Dijeljenje opterećenja projiciranom površinom daje približan nazivni tlak. Prepostavka je da je tlak ravnomjeran u cijelom području ležaja. U stvarnosti, tlak je najveći u položaju na šest sati i smanjuje se u paraboličnoj krivulji do nule gdje vratilo počinje imati zračnost s ležajem. Stoga je korisno, s obzirom na nosivost, svesti razmake na minimum.

Radijalno opterećenje treba definirati kao najveće proračunsko opterećenje, normalno radno opterećenje ili kombinaciju statičkog i udarnog opterećenja. Nadalje, treba razmotriti je li opterećenje konstantno ili cikličko. Sve ove čimbenike potrebno je analizirati u procesu odabira ležaja te izračuna tlaka ležaja [6].

Na slici 11. prikazan je tlak ležaja.



Slika 11. Tlak ležaja [6]

$$p = \frac{F_R}{A} = \frac{F}{l d_L}$$

gdje je:

$p$  – tlak ležaja, MPa

$F_R$  – radijalno opterećenje, N

$A$  – projicirana površina, mm<sup>2</sup>

$F$  – opterećenje, N

$l$  – duljina ležaja, mm

$d_L$  – unutarnji promjer ležaja, mm

### 2.3.2. Brzina

Brzina klizanja ili obodna brzina vratila važan je konstrukcijski čimbenik. Brzina je bitna za razmatranje pri procjeni stvaranja topline uslijed trenja. Izračunava se sljedećom jednadžbom [6]:

$$v = \frac{\pi d_V n}{60 \cdot 10^3}$$

Gdje je:

$v$  – brzina klizanja, m/s

$d_V$  – promjer vratila, mm

$n$  – brzina vrtnje vratila (rukavca u ležaju), min<sup>-1</sup>

### 2.3.3. Konstrukcijska karakteristika ležaja

Konstrukcijska karakteristika ležaja, tj. omjer duljine prema promjeru ( $L/D$ ) za tipični industrijski klizni ležaj varira od 1,0:1 do 1,5:1. Ovo je optimalan omjer koji omogućuje jednostavno poravnanje u smislu suosnosti osi ležaja i rukavca. Kod ležajeva koji se podmazuju vodom konstrukcijska karakteristika ležaja povijesno je bila 4:1 kako bi se tlak ležaja održao niskim, tj. oko 0,25 MPa. Međutim, kod tako značajnih duljina, zbog opterećenja brodskog vijka kao prepusta u modelu grede, raspodjela tlaka teži biti najbliže brodskom vijku i gotovo nula na prednjem kraju.

Tijekom rada, visoki  $L/D$  omjer ima tendenciju stvaranja većeg trenja ili otpora na vratilu. To je zato što prednji dio ležaja ne podupire vratilo i stvara nepotrebno smicanje vode. Može čak doći do kontakta između vratila i ležaja.

Ležaj vratila brodskog vijka Thordon omjera 2:1 ispitan je pod istim uvjetima kao i 4:1 i utvrđeno je da stvara manju silu trenja. Rezultati ovih ispitivanja u kombinaciji s

poticajima pomorskih klasifikacijskih društava rezultirali su razvojem Thordon COMPAC sustava ležajeva. Praktično su svi tipovi Thordon ležajevi postigli tipno obobrenje klasifikacijskih društava za konstrukcijsku karakteristiku najmanje 2:1. U većini primjena, gdje je opterećenje ležaja ravnomjerno, viši omjeri smanjit će pritisak i produžiti vijek trajanja ležaja. Usklađivanje je teže, ali ako je tlak visok, može biti potrebno povećanje omjera.

Za COMPAC ležajeve, omjer L/D ne smije biti veći od 3:1. Ovo je ograničenje uspostavljeno zbog zabrinutosti oko opskrbe vodom za hlađenje vrlo dugih ležajeva koji se okreću relativno velikim brzinama [6].

#### 2.3.4. PVT Dijagrami

Svaka analiza ležaja uvijek se temelji na tri faktora. Tlak, brzina i vrijeme (PVT) pojedinačni su čimbenici koje je nemoguće razdvojiti pri odabiru materijala za ležaj jer je proizvedena toplina srazmjerna sva tri čimbenika kao što je prikazano u sljedećem odnosu [6]:

$$\Delta T \sim p v \mu t$$

gdje je:

$\Delta T$  – promjena temperature, °C

$p$  – tlak, MPa

$v$  – brzina, m/s

$\mu$  - koeficijent trenja,

$t$  – vrijeme, s

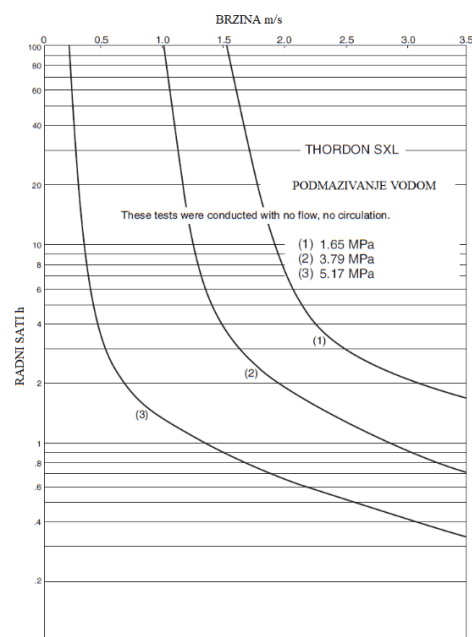
Kako bi se ocijenila mogućnost primjene, potrebno je poznavati radni ciklus opreme, tj. koliko dnevno radi, primjerice radi li osam sati, 24 sata ili stane pa ponovno započinje. Postoji li puna vrtnja (vod vratila) ili se vrti ili oscilira kroz ograničeni kut (struk kormila)? Pod kojim kutom i koliko često dolazi do gibanja i koliko sati dnevno radi (radni ciklus)? Svi ti čimbenici igraju ulogu u određivanju količine topline uslijed trenja koja će nastati pod definiranim tlakovima. Međutim, ako se proizvedena toplina trenja ukloni dovoljnim protokom rashladnog sredstva kao što je voda, ulje ili neka druga tekućina, Thordon ležajevi će se dobro ponašati pri brzinama daleko izvan granica prikazanih na PVT dijagramima. Uobičajene primjene u kojima se to događa uključuju brodsko vratilo i vertikalne ležajeve vratila pumpe ili turbine gdje je osiguran stalan protok hladne vode. Najmanja preporučena brzina protoka rashladne vode je 0,15 litara/min/mm promjera vratila. PVT graf - razvio je



*Thordon Bearings Inc.* kao vodič za projektante pri odabiru ispravne kvalitete Thordon ležaja za specifične radne tlakove, brzine klizanja i vremena. Krivulje su razvijene tehnikom koraka tlaka, gdje se materijal ispituje pri jednim tlakom pod različitim brzinama, a ograničavajući faktor je temperatura ležaja. Proizvoljno nametnuto ograničenje temperature za sve ležajeve kvalitete tijekom ispitivanja bilo je 82°C, mjereno na vanjskom promjeru ležaja, osim kada se ispitivalo u vodi. Ograničenje u vodi postavljeno je na 60°C kako bi se izbjegla hidroliza. Kada je tijekom ispitivanja postignuta granična temperatura, ispitivanje je zaustavljeno i vrijeme je zabilježeno. Temperatura ispitnog uzorka je zatim ostavljena da se vrati na temperaturu okoline prije nego što je ispitivanje ponovljeno za drugu brzinu. Ispitivanja su provedena pomoću ležajeva s faktorom oblika četiri.

Dijagrami PVT za ulje i vodu razvijeni su korištenjem kupke ulja ili vode bez protoka tekućine ili hlađenja. Ako se sustav može projektirati tako da uključuje prisilni protok hladnog maziva umjesto kupke, veći dio topline uslijed trenja raspršit će se protokom maziva. Nakon što ležaj radi u hidrodinamičkim uvjetima, ne razvija se dodatna toplina trenja kako se brzina povećava, osim blagog povećanja otpora trenja unutar samoga maziva. Ovo povećanje je tako malo da ne utječe na rad ležaja. U uvjetima protoka maziva s prisilnim hlađenjem, ograničenja na dijagramima nisu primjenjiva. Statvena cijev broda koja koristi podmazivanje vodom ili uljem tipična je za ovu situaciju [6].

Na slici 12. prikazan je PVT dijagram ležaja SXL koji se hladi morem.



Slika 12. PVT dijagram za SXL ležaj koji se hladi morem [6]

### 2.3.5. Debljina stijenke

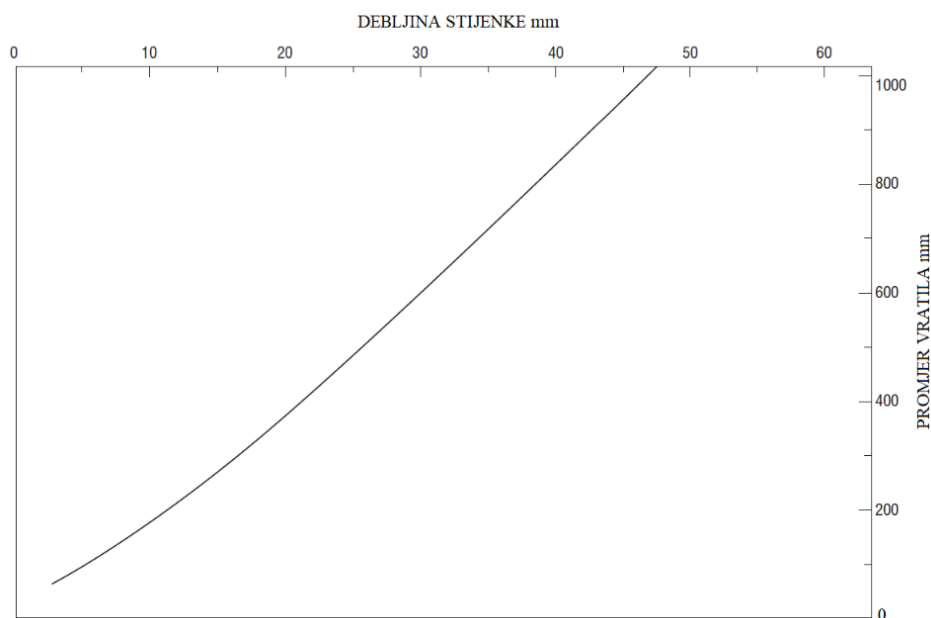
U primjeni gdje se Thordon ležaj navodi kao zamjenski ležaj, postojeća konfiguracija opreme obično upravlja debljinom stijenke ležaja. Ako bi debljina stijenke Thordon ležaja trebala biti prevelika, ležaj se može koristiti zajedno s metalnom čahurom u kućištu ili košuljicom (navlakom) na vratilu.

Bilo koja od ovih metoda omogućit će smanjenje debljine stijenke ležaja. Ako se koristi košuljica vratila, dolazi do dodatne prednosti - budući da efektivni promjer vratila povećava ležaj, pritisak se smanjuje. Stupanj dopuštenog trošenja prije nego što se ležaj istroši također je faktor u određivanju debljine stijenke. Najveći dopušteni razmak ležajeva i drugi vanjski čimbenici također ulaze u ovo razmatranje.

Za ožljebljene ležajeve najveće dopušteno trošenje mora biti manje od dubine žljeba. Zbog elastomerne prirode materijala, Thordon ležaj mora biti oslonjen cijelom duljinom. Ležaj bez potpore neće nositi praktički nikakav teret. Ako se debljina stijenke može odrediti u projektu, općenito je poželjno koristiti tanju stijenku. Ukupni razmaci i tolerancije mogu se smanjiti, odvođenje topline je poboljšano, a najveće dopušteno opterećenje veće.

Međutim, postoje neke primjene, poput onih s niskofrekventnim udarnim opterećenjima, gdje će učinak amortizacije deblje stijenke ležaja poboljšati učinkovitost [6].

Najmanja preporučena debljina stijenke Thordon ležaja navedena je na slici 13.



Slika 13. Dijagram omjera debljine stijenke i promjera vratila [6]

Prikazane vrijednosti temelje se na tlaku međusklopa između ležaja i kućišta. Povećanje ili debljine stjenke ili količine smetnji će povećati pritisak na međusklopu. U ožljebljenim i neožljebljenim ležajevima, debljina stijenke ležaja koja tvori kontinuirani sloj u kućištu jedini je materijal koji se uzima u obzir za potrebe postavljanja smetnji. Kod ležajeva s utorima najmanja debljina stijenke bit će veća od debljine stijenke bez utora za iznos dubine utora jer se samo debljina iza utora uzima u obzir pri izračunavanju tlaka međusklopa [6].

### **2.3.6. Utori za podmazivanje**

Za primjene koje uključuju protok tekućine preko površine ležaja, kao što su vertikalni ležajevi pumpi ili vratila broskog vijka, utori za podmazivanje su strojno izrađeni ili uliveni u ležaj kako bi pomogli u protoku maziva kroz ležaj. Utori također osiguravaju kanal za prolaz abraziva. Broj utora kao i njihova dubina i širina mijenjaju se s veličinom ležaja, njegovom konfiguracijom i dostupnom debljinom stijenke.

Utori za vodu obično su duboki 7 mm za promjere vratila od 400 mm ili veće, ali ne bi trebali biti veći od polovice debljine stijenke. Širina utora obično je jednaka dubini, ali se može povećati ako su utori vrlo plitki kako bi se osigurao dovoljan protok vode. Program za izračun veličine ležaja Thordon pruža pojedinosti o dubini i broju utora za bilo koju primjenu utornog ležaja, na temelju dimenzija vratila i kućišta [6].

### **2.3.7. Spojne površine**

Većina uobičajenih metalnih spojnih površina dobro će funkcionirati kada se koriste zajedno s Thordon ležajevima. Ako korozija nije problem, obično se koristi ugljični čelik, ali ako je korozija problem, kao što je vodom podmazan ležaj vratila broskog vijka, tada bi se trebala koristiti brončana košuljica vratila. Uobičajene bronce koje dobro funkcioniraju uključuju Gunmetal (88% Cu, 10% Sn i 2% Zn) ili 70-30% bakar nikal. Nikal aluminijska bronca (NiAlBz) se ne preporučuje jer je iskustvo pokazalo da može dovesti do visokih stopa trošenja. Aluminij i titan također se ne preporučuju.

Nehrđajući čelik također se naširoko koristi kao košuljica vratila koja radi s Thordonovim ležajem. Ako je prisutna abrazija, treba izbjegavati mekše nehrđajuće visokolegirane tipove čelika poput AISI 304. Slično tome, treba izbjegavati mekše tipove Aquamet vratila ako će vratila biti izložene značajnoj abraziji.

Preferiraju se tvrde vrste nehrđajućeg čelika ili Inconel 625. Umjesto košuljice, neki proizvođači koriste spiralno zavareni nehrđajući čelik ili Inconel 625 po cijeloj duljini vratila ili na putu rukavaca.

U primjeni jako abrazivnog klizajućeg ležaja, teoretski optimalna spojna površina je najtvrdja praktična površina na vratilu u kombinaciji s izdržljivim materijalom za ležaj. Za jake abrazive preporučuje se Thordon Composite ležaj i spojna površina s tvrdoćom od najmanje 40 Rockwell C (HRC). Općenito, mekši materijali za ležajeve kao što je Thordon imaju tendenciju manjeg habanja vratila i manje kombiniranog trošenja ležaja i vratila. Tvrđi materijali su prikladniji za abrazivne uvjete.

Najtvrdja vratila i najmekši materijali za ležajeve su ekstremi za postizanje najmanjeg kombiniranog trošenja u jako abrazivnom okruženju. Ako se materijal vratila zamijeni mekšim ili ako se materijal ležaja zamijeni tvrđim, povećalo bi se kombinirano trošenje. Kad bi okoliš sadržavao manje abraziva, smanjila bi se potreba za najtvrdim materijalom vratila ili najmekšim materijalom za ležaj. Drugi čimbenici kao što su zahtjevi za malim trenjem tada mogu postati značajni pri odabiru ležaja.

U čistom okruženju s mazivom (što se stvarnosti nikad ne događa) bilo koja kombinacija će biti dovoljna. Thordon ležaj ne smije nalijegati na Thordon košuljicu vratila.

Površinska obrada vratila trebala bi biti kvalitetno obrađena, tj. glatka koliko god je praktično kako bi se ograničilo početno trošenje. Thordonovo ispitivanje pokazalo je da se stvara manje topline uslijed trenja s površinom vratila veće glatkoće, povećavajući PVT granicu. Thordon će se ponašati zadovoljavajuće s normalnim strojno obrađenim završetkom na vratilu. Za optimalnu izvedbu, preporuča se konačna strojno obrađena površina spajanja s prosječnim odstupanjem profila  $R_a$  od 0,4 do 0,8  $\mu\text{m}$ . Zadovoljavajuća završna obrada vratila mora biti do 1,6  $\mu\text{m}$   $R_a$  [6].

### **2.3.8. Smanjivanje početnih zračnosti**

Početna ugradbena zračnost za Thordon ležajeve obično je veće od konačne pogonske zračnosti, uglavnom zato što početna zračnost uključuje dopunski razmak potreban za bubrenje i toplinsko širenje. Taj će razmak nestati tijekom rada opreme, ali za to će biti potrebno vrijeme.

U nekim primjenama postoji zahtjev da početna ugradbena zračnost bude što manja. Tipičan primjer bio bi vertikalni ležaj pumpe. Konačna zračnost nakon uhodavanja može biti prihvatljiva, ali kada se uzmu u obzir dopušteno upijanje, temperaturno širenje i

povećanje tolerancija, akumulirani zračnost može izići izvan projektnih zahtjeva. U takvim slučajevima potrebno je razmotriti načine smanjenja početne zračnosti [6].

Postoji nekoliko opcija: [6]

- tanji ležaj - bubrenje i toplinsko širenje variraju ovisno o debljini stijenke ležaja te smanjenjem debljine stijenke, dopunski razmaci za ove faktore postaju manji, pa se početna zračnost smanjuje. Smanjenje debljine stijenke obično se postiže smanjenjem promjera kućišta,
- minimiziranje varijacije zatvaranja provrta - stvarno zatvaranje provrta ovisit će o brojnim čimbenicima uključujući strojno obrađenu završnu obradu ležaja i kućišta,
- smanjenje omjera duljine/promjera ležaja smanjit će varijacije u zatvaranju provrta po duljini,
- završna obrada provrta ležaja nakon njegove ugradnje - strojna obrada nakon postavljanja u kućište eliminira učinak zatvaranja provrta jer se to već dogodilo, te za neužljebljene ležajeve. Ova faza strojne obrade ne smije ukloniti više od 5% debljine stijenke,
- za ožljebljene ležajeve to nije toliko važno jer je materijal provrta puno manje opterećen te strojna obrada treba biti ograničena na 10% debljine stjenke ili 25% dubine utora, što god je manje. Utori za podmazivanje moraju se uvijek obraditi prije postavljanja ležaja u kućište,
- postavljanje ležaja u privremeno kućište prije obrade - ova metoda je varijacija koja se može koristiti kada nije praktično ugraditi ležaj u njegovo konačno kućište. Privremeno kućište treba imati točne dimenzije i završnu obradu kao konačno kućište. Ova metoda je manje precizna jer ne eliminira varijacije tolerancije obrade na kućištu.

### **2.3.9. Proces odabira ležaja**

U svakoj primjeni ležaja primarno je osigurati da se toplina trenja koja se razvija klizanjem ili se apsorbira i rasprši okolnim mehanizmom odvede protokom maziva ili rashladnog sredstva. U sustavu mora postojati temperaturna ravnoteža, a ona mora biti ispod granice temperature materijala. U suprotnom će doći do kvara ležaja. Sekundarno razmatranje je vrsta okruženja u kojem ležaj radi.

Ako je obodna brzina dovoljno visoka za stvaranje topline trenja, tada će najveći tlak biti znatno manji. Na primjer, na vratilima s Thordon COMPAC, SXL i XL ležajevima, najveći tlak je ograničen na 0,6 MPa. Za primjene visokog tlaka gdje stvorena toplina

trenjem nije faktor ni zbog oscilirajućeg gibanja ni zbog vrlo malih brzina, ležaj mora biti projektiran s vrlo visokim faktorom oblika, npr. iznad 100, kao u Thordon HPSXL TRAXL ležaju.

Thordon XL (crni) koristi se u raznim industrijskim i pomorskim primjenama. Ima nizak koeficijent trenja (obično 0,20-0,25), visoku otpornost na habanje u suhim primjenama i visoku otpornost na udarna opterećenja i vibracije

Thordon SXL (bijeli) ima značajnu sposobnost rada na suho, niži koeficijent trenja (obično 0,10-0,20) i sličnu otpornost na abraziju u usporedbi s XL. Ima mogućnost suhog pokretanja kao vertikalni ležaj pumpe

Thordon COMPAC (narančasti) je visokoučinkoviti ležaj koji se koristi u sustavima vratila broskog vijka koji se podmazuju vodom ili morem. Posebno razvijena s niskim koeficijentom trenja pri pokretanju i smanjenim proklizavanjem, COMPAC-ova jedinstvena konfiguracija omogućava rano stvaranje hidrodinamičkog sloja pri nižim brzinama vrtnje vratila [8].

### 3. DIMENZIONIRANJE I PRORAČUN POLIMERNOG LEŽAJA

Postupci dimenzioniranja Thordon ležajeva razlikuju se od tradicionalnih materijala za ležaje. Thordon ležajevi ne mogu se izraditi u istim dimenzijama kao bronca, guma, drvo ili drugi materijali za ležajeve koje moguće zamjenjuju.

Za dimenzioniranje Thordon ležaja potrebne su sljedeće informacije:

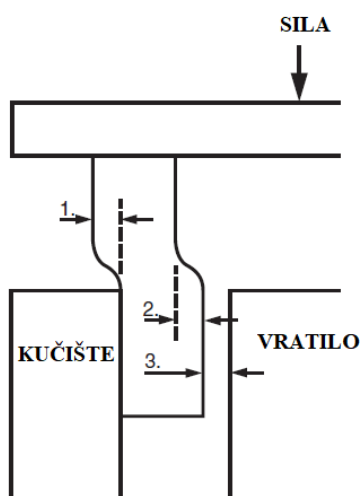
- kućište: najveći promjer, najmanji promjer, duljina,
- vratilo: najveći promjer,
- temperatura: najmanja očekivana radna temperatura, najveća očekivana radna temperatura, temperatura okoline u strojarnici,
- podmazivanje: voda, mazivo, ulje, mast ili suho,
- primjena: vratilo brodskog vijka, kormilo ili drugo
- vrsta ležaja,
- montaža: čvrsti spoj ili drugo.

Važno je provjeriti je li kućište okruglo tj. da nije ovalnog oblika i važno je provjeriti istrošenost kućišta ležaja. Elastomerni ležajevi prilagodit će se obliku kućišta. Preferirano rješenje je strojna obrada ili popravak kućišta. Prije izračuna dimenzija ležaja, također treba provjeriti centriranje kućišta. Ispravljanje neusklađenosti ponovnim brušenjem kućišta je bolje nego linijsko brušenje ležaja nakon ugradnje. Nakon što je kućište ponovno izbrušeno, vanjski promjer ležaja mora se dimenzionirati prema novim dimenzijama kućišta [10].

#### 3.1. VANJSKI PROMJER LEŽAJA

Thordon ležajevi obično se ugrađuju s čvrstim dosjedom na vanjskoj površini (slika 14). Dosjed ovisi o veličini ležaja i najmanjoj temperaturi na kojoj će raditi. Dodatna odstupanja dosjeda ne štete, ali nedovoljan preklop (uključivo i ta odstupanja) pri radu na niskim temperaturama mogu izazvati labavljenje ležaja u kućištu i posljedično proklizavanje. Dodatna odstupanja dodaju se najvećem promjeru kućišta kako bi se dobio najmanji vanjski promjer ležaja. Normalna najmanja temperatura koju koriste Thordon ležajevi za primjenu na vratilu brodskog vijka je  $-2^{\circ}\text{C}$ . Za ležajeve kormila koji rade izvan vode, često se koristi najmanja temperatura od  $-25^{\circ}\text{C}$  kako bi se omogućio mogući rad u hladnim okruženjima.

Thordon ležajevi mogu se ugraditi s čvrstim dosjedom mehanički (pritiskom) ili toplinski (pothlađivanjem). Ulazno skošenje na ležaju i/ili zaobljeni kut na kućištu olakšat će montažu pritiskom. Ležaj neće moći podnijeti opterećenje na putu skošenja. Prilikom montiranja Thordon ležaja pothlađivanjem, odabir prikladnog rashladnog sredstva ovisi o temperaturnoj razlici za koju je projektiran čvrsti spoj ležaja. Razlika temperature je razlika između temperature okoline u strojarnici i najniže temperature kojoj će ugrađeni ležaj biti izložen tijekom rada. Ako je razlika 40°C ili manje, tada se obično može koristiti suhi led. Ako je razlika veća od 40°C, preporučuje se upotreba tekućeg dušika [10].



**Slika 14. Parametri prilagodbe čvrstoga dosjeda [8]**

### **3.2. UNUTARNJI PROMJER LEŽAJA**

Zatvaranje provrta je dijametralno smanjenje unutarnjeg promjera ležaja. To se događa kada se ugradi u kućište pomoću čvrstoga dosjeda koji ga drži na mjestu. Zatvaranje provrta se ne događa kod spojenih ležajeva i stoga nije faktor u izračunu unutarnjeg promjera ležaja za spojene ležajeve. Preveliki dosjed prenosi se na unutarnji promjer ležaja. Faktor zatvaranja provrta mora uzeti u obzir i dodatna odstupanje kako bi se izračunao učinak na unutarnji promjer ležaja. Stvarno zatvaranje provrta može varirati +/- 15% od izračunate količine. Budući da obujam Thordonovog ležaja pri bilo kojoj danoj temperaturi ostaje konstantan, ograničavajući vanjski promjer rezultira smanjenjem unutarnjeg promjera i može rezultirati povećanjem duljine ležaja.

Preporučena pogonska zračnost za Thordon ležajeve izračunava se na temelju vrste primjene. Za vratilo brodskog vijka i ležajeve kormila koriste se različiti razmaci. Zračnost



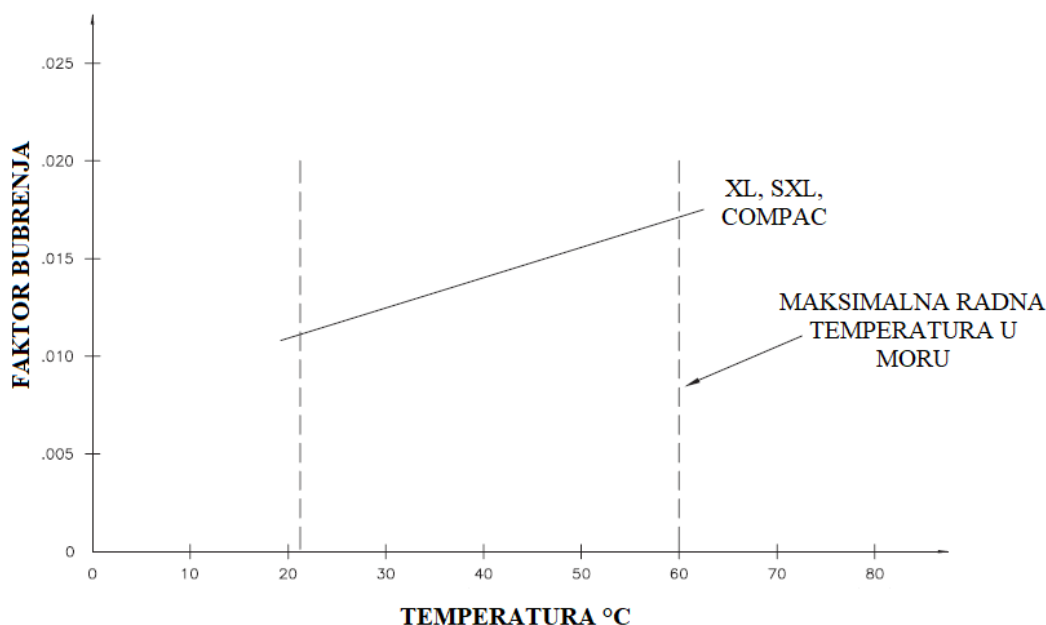
ležaja kormila može biti manja jer je gibanje oscilirajuće, a ne potpuna vrtnja. Oscilirajuće gibanje niske frekvencije stvara manje topline uslijed trenja [11].

### 3.3. PROMJENE DIMENZIJA ZBOG APSORPCIJE

Kada je uronjen u vodu ili mazivo, ležaj povećava volumen samo 1,3% u normalnim uvjetima. Neki od ovih proširenja jednostavno povećavaju dodatna odstupanja, ali postoji i učinak na unutarnji promjer i duljinu ležaja.

Program za izračun izračunava učinak apsorpcije na unutarnji promjer ležaja i duljine. Uzdužna apsorpcija je važna pri izračunavanju razmaka koji treba ostaviti između posljednjeg segmenta ležaja i držača prstena te između segmenata (tj. letvi) višedijelnih ležajeva. Za ležajeve trupa kormila koji su obično iznad vodne linije, ipak treba koristiti dopuštenu apsorpciju jer će ležajevi biti izloženi vodi. Ako se Thordon XL ležaj ugrađuje s uljnim podmazivanjem, treba koristiti jednaku dopuštenu apsorpciju [6].

Na slici 15. prikazana je promjena dimenzija zbog bubrenja ležaja.



Slika 15. Promjena dimenzija zbog bubrenja ležaja [6]

### 3.4. TEMPERATURNI ŠIRENJE

U slučajevima kada najveća radna temperatura ležaja premašuje temperaturu okoline u strojnici u kojoj se obrađuje, dodatno temperaturno širenje uključeno je u proračun unutarnjeg promjera i proračune duljine.

Thordon ležajevi koriste standardnu najveću radnu temperaturu od 45°C za konstrukciju ležajeva brodskog vratila. Ova temperatura omogućuje odvođenje topline sa standardnim protokom vode i temperaturom morske vode od 32°C. Ta se temperatura može povećati ako su ležajevi izloženi toplijoj vodi [10].

Dopušteno temperaturno širenje ( $C_t$ ) se mora uzeti u obzir kada ležaj radi na temperaturama iznad temperature okoline (strojarnice). Dijametralni  $C_t$  izračunava se na temelju koeficijenta temperaturno g širenja pomoću sljedećeg izraza:

$$\Delta l_t = 2 s \alpha (T_a - T_o)$$

gdje je:

$\Delta l_t$  – dodatno temperaturno širenje, mm

$s$  – debljina stijenke ležaja, mm

$\alpha$  – koeficijent toplinskog širenja, mm/mm/°C

$T_a$  – radna temperatura, °C

$T_o$  – temperatura okoline, °C

Koeficijent temperaturnog širenja ( $\alpha$ ) za temperature od 0°C do 30°C iznosi:

- XL i Composite  $\alpha = 0.000148$  mm/mm/°C,
- SXL i COMPAC  $\alpha = 0.000151$  mm/mm/°C.

Dopušteno aksijalno temperaturno širenje dobije se iz sljedeće formule:

$$\Delta l_t = l_k \alpha (T_a - T_o)$$

gdje je:

$\Delta l_t$  – dodatno temperaturno širenje, mm

$l_k$  – duljina kućišta ležaja, mm

$\alpha$  – koeficijent toplinskog širenja, mm/mm/°C

$T_a$  – radna temperatura, °C

$T_o$  – temperatura okoline, °C

### 3.5. NAJMANJA UGRADBENA ZRAČNOST

Nakon ugradnje, Thordon ležaj ima najmanji ugradbenu dijametralnu zračnost koja predstavlja razliku između promjera vratila i promjera ležaja. Značajna su tri čimbenika:

- projektirani razmak,
- dopušteno temperaturno širenje materijala,

- dopuštena apsorpcija vode (ili drugog maziva) od strane materijala.

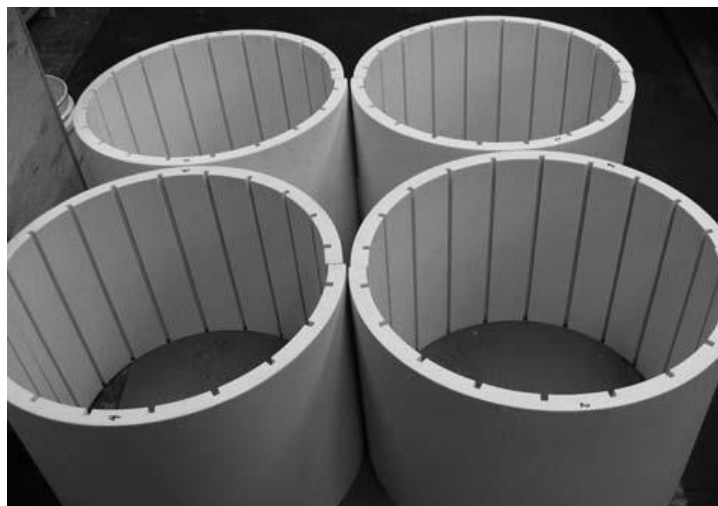
Kako se radna temperatura ležaja povećava, materijal se širi i provrt ležaja se smanjuje - to se prilagođava dodatkom za temperaturno širenje. Materijal se također širi zbog vode (ili drugog maziva) što uzrokuje smanjenje provrta ležaja - to se prilagođava dopuštenom apsorpcijom maziva.

Na primjer, nakon što je došlo do apsorpcije vode ili maziva (to može potrajati nekoliko mjeseci), a ležaj radi na najvećoj projektiranoj temperaturi, zračnost ležaja može biti jednaka je projektiranoj vrijednosti ugradbene zračnosti.

Najmanji ugradbena dijametralna zračnost koristi se kao važna završna provjera prije puštanja Thordon ležaja u pogon. Rano ispitivanje zračnosti može pokazati negativno trošenje - to je zbog porasta upijanja vode ili maziva koje nadmašuje trošenje ležaja [8].

### 3.6. LEŽAJEVI VRATILA BRODSKOG VIJKA

Ležajevi vratila broskog vijka moraju uvijek imati utore za podmazivanje kako bi se omogućio odgovarajući protok rashladne vode ili maziva. Većina malih ležajeva broskog vratila isporučuje se s utorima za podmazivanje koji su već oblikovani ili strojno izrađeni na mjestu. Na slici 16. prikazani su utori ležaja za podmazivanje.



**Slika 16. Primjer utora za podmazivanje [10]**

Za Thordon SXL, XL i kompozitne ležajeve vratila broskog vijka, utori su ravnomjerno raspoređeni po cijelom opsegu ležaja. COMPAC ležajevi omjera  $L/D = 2:1$  imaju utori za podmazivanje samo u gornjoj polovici. Ova konstrukcija poboljšava hidrodinamička svojstva. Ako se ležaj vratila broskog vijka sastoji od više od jednog

segmenta, treba strojno izraditi prstenasti utor na jednom kraju svakog segmenta gdje se spaja sa sljedećim segmentom. Utor bi trebao biti jednake širine i dubine kao aksijalni utori. Ovaj prstenasti utor olakšava prolaz vode za hlađenje iz jednog segmenta u drugi ako postoji bilo kakva međusobna neusklađenost utora [10].

### 3.7. MONTAŽA LEŽAJEVA

Ležajevi Thordon XL, SXL i COMPAC obično se ugrađuju s pomoću čvrstog dosjeda. Montaža je brza i jednostavna, posebno kada se koristi hlađenje na vrlo niske temperature.

Thordon ležajevi se također mogu zalijepiti na mjesto ugradnje. Lijepljenje pomoću ljepila koje je odobrio Thordon prikladno je u sljedećim okolnostima:

- ako se koristi ležaj s tankom stijenkom i sila zadržavanja nije dovoljna za čvrsti dosjed,
- kada kućište nije strojno obrađeno ili kada ne pruža odgovarajuću potporu duž cijele duljine ležaja,
- kada su ležajevi izloženi visokim temperaturama koje mogu izazvati smanjenje dodirnih naprezanja i gubitak sile zadržavanja spojnog dosjeda,
- kada se koristi Thordon HPSXL,
- kada kućište nije okruglo ili je oštećeno korozijom.

Konačne dimenzije Thordon ležaja ovisit će o tome kako će se montirati. Odabir najbolje metode ugradnje iznimno je važan i ovisi o zahtjevima primjene.

Za sprječavanje rotacije ležaja u normalnim radnim uvjetima dovoljan je čvrsti spoj, ali su potrebni prednji graničnik i pričvršćeni krajnji držač prstena kako bi se osiguralo da ne dođe do uzdužnog pomicanja ležaja. Prstenovi za čuvanje moraju biti odgovarajuće veličine i imati unutarnji promjer približno 3 mm veći od promjera utora. Graničnici i zaštitni prstenovi nisu obavezni kada je ležaj spojen na mjestu, ali se preporučuju u kritičnim primjenama kao sigurnosna mjera. U slučajevima kada je orijentacija ležaja kritična, kao što su ležajevi s necentralnim bušenjem ili COMPAC, preporučuje se ugradnja uređaja protiv rotacije.

Većina zahtjeva može se zadovoljiti korištenjem čvrstog prijanjanja (preklopa) uz pretpostavku da su svi relevantni čimbenici konstrukcije uzeti u obzir. Međutim, potrebno je da omjer  $L/D$  ležaja bude najmanje 0,5:1. Praktično iskustvo pokazalo je da se mali

ležajevi mogu lako utisnuti u kućište, dok se veći ležajevi lakše ugrade kad se pothlade suhim ledom ili tekućim dušikom. Kućište se nikada ne smije zagrijavati da bi se olakšalo montiranje, niti se smije koristiti mast ili ulje kao pomoć prilikom montiranja pritiskom.

U slučajevima kad se ležaj postavlja s čvrstim dosjedom kao na slici 14., također se mora uzeti u obzir učinak čvrstog dosjeda na unutarnji promjer ležaja. Ovaj učinak, poznat je kao zatvaranje provrta.

Svi ležajevi s čvrstim dosjedom koji su u potpunosti obrađeni prije ugradnje podliježu lancu tolerancije koji može stvoriti dodatnu ugradbenu zračnost. Na primjer, kada je ležaj projektiran s najmanjom zračnosti, njegova stvarna zračnost ovisit će o akumuliranim tolerancijama obrade debljine stijenke ležaja, plus tolerancijama na vratilu i kućištu. Ovaj lanac tolerancije može se smanjiti strojnom obradom samo vanjskog promjera ležaja prije postavljanja, a potom strojne obrade do najviše 5% debljine stijenke nakon ugradnje. Ovo će eliminirati lanac tolerancije koji je povezan sa zatvaranjem provrta, nosivom stijenkom i unutarnjim promjerom kućišta. Zatvaranje provrta najvarijabilniji je čimbenik koji utječe na ugrađene dimenzije Thordon ležaja. Mogu postojati situacije u kojima se u praksi zatvaranje provrta razlikuje od onog predviđenog ispitivanjima, što može rezultirati dodatnim zračnostima. Ako ga nije moguće strojno obraditi nakon ugradnje, ispitni ležaj se može ugraditi u strojno obrađeno privremeno kućište kako bi se precizno odredilo zatvaranje provrta za tu primjenu. Po potrebi se mogu izvršiti odgovarajuće prilagodbe. Alternativno, ležajevi se mogu strojno obraditi u privremeno kućištu, ukloniti i postaviti u stvarno kućište. Ovaj se pristup ponekad koristi za okomite ležajeve pumpi ili turbina gdje postoji zahtjev da početni instalirani zazor bude što je moguće manji.

Montaža hlađenjem na niske temperature je najlakši način za ugradnju Thordon ležajeva koji su projektirani s čvrstim spojem (preklopom). Thordon se značajno skuplja kada se hladi, zbog svog visokog koeficijenta temperaturnog širenja (stezanja), čime se olakšava jednostavna montaža bez skupe dizalice ili druge opreme. Tekući dušik je optimalno rashladno sredstvo, ali se za većinu ugradnji može koristiti i suhi led. Kod zamrzavanja kompozitnih ležajeva treba koristiti suhi led, a ne tekući dušik.

Ležaj bi trebao biti potpuno uronjen ili ravnomjerno obložen tekućim dušikom. Kada para prestane ključati iz tekućeg dušika, ležaj je dosegao temperaturu od  $-196^{\circ}\text{C}$  i može se lako postaviti (otprilike 5 do 30 minuta, ovisno o površini ležaja). Ako se suhi led koristi kao rashladno sredstvo, treba ga isporučiti u kuglicama ili razbiti u male komadiće.

Suhi led mora biti čvrsto nabijen oko ležaja, ostvarujući dodir s unutarnjom i vanjskom površinom. Nakon tri sata provedena u suhom ledu mogu se provjeriti dimenzije

ležaja da se vidi je li se ležaj dovoljno skupio kako bi se ugradio. Ako nije, ležaj treba ostati u ledu još jedan sat.

Približan iznos skupljanja koji se može očekivati, procijenjuje se na sljedeći način: svaki pad temperature od 10°C rezultirat će približnim smanjenjem promjera od 0,0014 mm/mm promjera.

Kako bi se lanac tolerancije sveo na minimum, ležaj bi trebao biti strojno obrađen na vanjskom promjeru. a zatim se zalijepiti u kućište.

Lijepljenje treba biti učinjeno na konstantnoj temperaturi tijekom cijelog procesa stvrdnjavanja ljepila. Varijacije temperature tijekom stvrdnjavanja mogu imati negativan učinak na cjelovitost veze. Kombinacija pothlađivanja i lijepljenja ne funkcionira dobro jer vlaga i mraz na pothlađenom ležaju imaju značajan negativan utjecaj na čvrstoću veze.

Kućište u koje se ugrađuje Thordon ležaj mora biti okruglo, poravnato, a ne suženo ili zvonasto. Najveća dopuštena ovalnost kućišta je 1/3 početnog (normalnog) projektiranog hoda. Kućište također mora pružiti potporu Thordonov ležaju cijelom njegovom duljinom. Praznine u kućištu ili druge nepravilnosti moraju se ispraviti strojnom obradom, ugradnjom čahure ili lijepljenjem ležaja (za praznine do 3 mm).

Ako je kućište pogrešno poravnato, ili ako postoji potreba za kosim bušenjem, tada bi se pogrešno poravnanje ili nagib trebali ispraviti u kućištu. Pomaknuto provrtanje Thordon ležajeva nakon ugradnje se ne preporučuje zbog mogućeg štetnog učinka i stvaranja dodatnih naprezanja. Alternative su poravnati strojno obrađeni ležaj i zatim ga zalijepiti ili podmetnuti na mjesto, ili poravnati privremeni ležaj, izliti smjesu za prigušnicu oko prividnog ležaja i zatim ukloniti privremeni ležaj ostavljajući okruglo poravnato kućište od materijala za pričvršćivanje u koji se Thordon ležaj može ugraditi pomoću prese ili pothlađivanja [10].

### **3.8. PROIZVODNJA I OBRADA LEŽAJA**

Thordon je tvrd i žilav elastomerni polimerni proizvod koji se može lako strojno obrađivati. Međutim, potrebno je zapamtiti da je Thordon nemetal i da se mora obrađivati drugačije od metala. Zbog elastomerne prirode Thordon ima tendenciju da se odmakne od svega što na njega vrši pritisak, uključujući alatne strojeve svih vrsta. Thordon se ne može lomiti te se mora rezati oštrim alatom.

Kad se strojno obrađuju tankostjeni ležajevi, važno je prepoznati da djelovanje prekomjernog tlaka može deformirati ležaj.

Brzine rezanja također su važne. Niske brzine napredovanja (uzdužnog posmaka) u kombinaciji s pre niskom brzinom vrtnje obratka imaju teže proizvesti grubi rez zbog žilavosti i elastomerne prirode Thordona. Visoke brzine vrtnje u kombinaciji s malom brzinom napredovanja mogu proizvesti prekomjernu toplinu uslijed trenja, što rezultira gumastim završetkom. Najprikladnije kombinacije brzine vrtnje i uzdužnog posmaka slične su onima koje se koriste kod strojne obrade aluminijskih aluminija.

Zračnosti se mogu činiti pretjeranim u usporedbi s metalima. Treba uzeti u obzir i širenje ležaja zbog vode, maziva i promjene temperature.

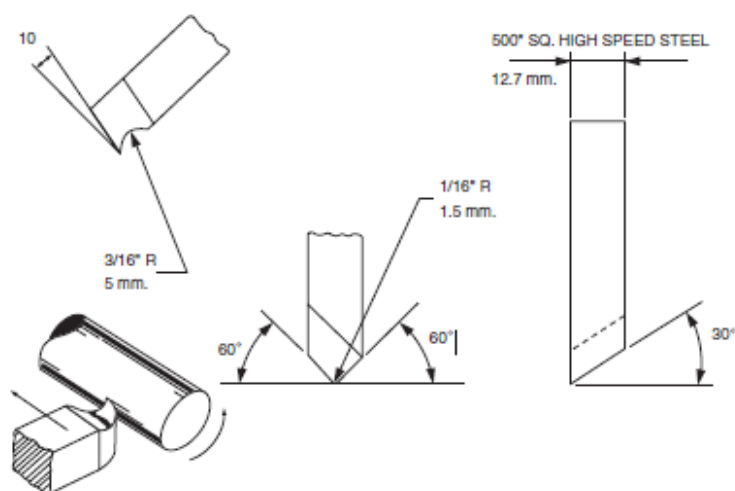
Za najmanju ugradbenu zračnost treba uzeti u obzir sve ove čimbenike. Također treba uzeti u obzir zračnost za sloj tekućeg podmazivanja ako se ležaj podmazuje vodom ili uljem, kao i sigurnosnu zračnost zbog stvaranja topline uslijed trenja [10].

### 3.8.1. Rezanje materijala

Za obradu Thordona ključno je koristiti ispravan alat za rezanje. Alat mora biti projektiran za rezanje materijala, kao i za izbacivanje obrađene površine.

Prilikom obrade Thordona, iz alata za rezanje izlazi neprekidna traka. Alat za rezanje mora biti oštar. Nakon brušenja, alat za rezanje treba izbrusiti uljnim kamenom.

Zbog vrlo elastične prirode materijala, treba biti oprezan pri uklanjanju reznica s radnog područja. Na slici 17. ilustrirana je ispravna konfiguracija alata za rezanje kada se koriste konvencionalni alatni nastavci. Brzorezni čelik može se koristiti za SXL i COMPAC, dok se nastavci od volfram karbida koriste se za XL [10].



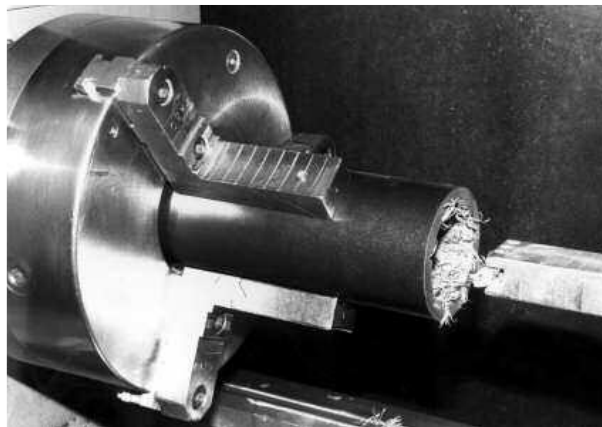
Slika 17. Prikaz rezanja materijala za ležaj [10]

### 3.8.2. Tokarenje ležaja

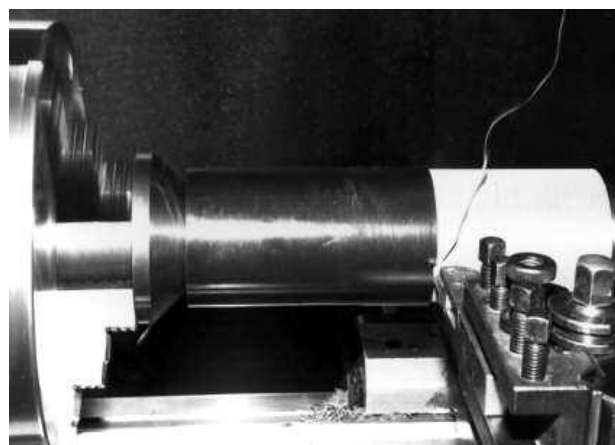
Ležaj koji se izrađuje može se stegnuti na jednom kraju u normalnoj steznoj glavi s tri čeljusti. Kod stezanja treba paziti da se materijal ne iskrivi. Prvo se grubo obradi vanjski promjer ležaja te nakon njega unutarnji promjer, ali on se odmah obradi na završnu mjeru. Zatim se ponovno obradi vanjski promjer i ležaj se skрати na potrebnu duljinu.

Ako je ležaj montiran u tokarilici, treba ga potpuno obraditi bez zaustavljanja dulje vrijeme. Time se sprječava slijeganje ležaja ili izokretanje pod vlastitom težinom. Thordona se može razdvojiti na duljinu standardnim alatom za odvajanje, međutim, dodatni nagib i bočni razmak korisni su kako bi se spriječilo stvaranje topline koje proizlazi iz dodira Thordona sa stranom alata za odvajanje. Reznice s Thordona treba stalno uklanjati tijekom obrade, kako bi se postigla ujednačena površina reza [10].

Na slikama 18. i 19. prikazana je obrada ležaja.



Slika 18. Obrada unutarnjeg promjera ležaja [10]



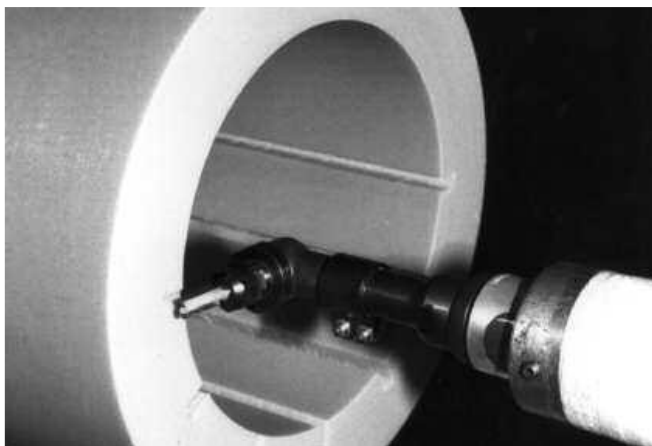
Slika 19. Obrada vanjskog promjera ležaja [10]



### 3.8.3. Glodanje utora

Utori za podmazivanje mogu se obrađivati ručno ili glodalom (slika 20.). Ručna obrada utora za podmazivanje uključuje oblikovano svrdlo alata koje se pritegne na vreteno tokarilice i ručno gura kroz ležaj. Za postizanje konačne dubine utora može biti potrebno nekoliko prolaza.

Utori se mogu mnogo lakše obraditi montiranjem glodala na šipku za bušenje, a zatim obradom na odgovarajuću dubinu u jednom prolazu kroz ležaj. Vanjski promjer stezne glave može se podijeliti i označiti kao vodič za lociranje utora u ležaju [10].



Slika 20. Glodanje utora [10]

### 3.8.4. Mjerenje i tehnička kontrola ležaja

U većini slučajeva Thordon se može mjeriti istim instrumentima i postupcima kao i bilo koji drugi materijal (slika 21.).



Slika 21. Mjerenje promjera ležaja [10]

Treba imati na umu da je Thordon elastomer i da se prilikom mjerenja mora koristiti lagani dodir jer je moguće deformirati ležaj izvan okruglog oblika. Osim toga, Thordon ima visok koeficijent temperaturnog rastezanja u usporedbi s metalima, pa se mjerenja moraju izvoditi na temperaturi strojarnice. Ako to nije moguće, tada se dimenzije moraju korigirati za toplinsko rastezanje do kojega je došlo zbog razlike između mjerne temperature u strojarnici i temperature okoline.

U slučaju ležajeva većeg promjera, relativno tankih stijenki koje su strojno obrađene i odstranjene iz tokarilice, prilično je uobičajeno otkriti da su ovalne.

Ova deformacija može biti rezultat popuštanja ležaja pod vlastitom težinom. Može se činiti da je ležaj izvan tolerancije zbog činjenice da je izašao izvan kruga. To nije problem jer, kad se ležaj utisne u okruglo kućište, prilagodit će se obliku kućišta i bit će okrugao. Za precizno mjerenje ležaja izvan kućišta, treba upotrijebiti pi traku za mjerenje vanjskog promjera. a zatim izmjerite debljinu stijenke pomoću mikrometra s kuglicama kako bi se dobile točne dimenzije. Pi traka je precizna čelična traka kalibrirana za mjerenje promjera mjerenjem opsega (slika 22.) [10].



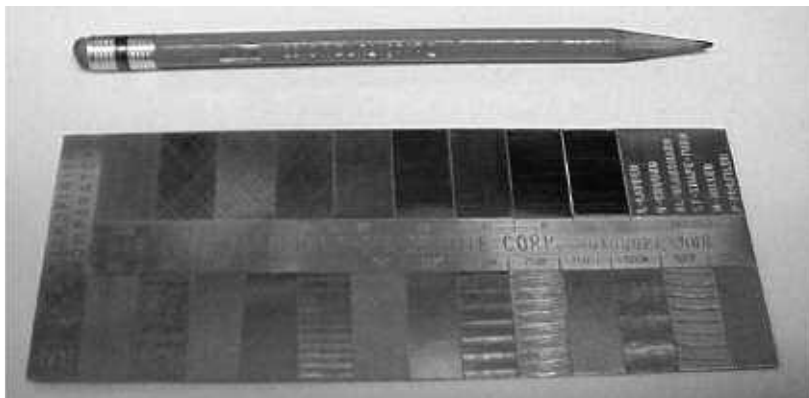
**Slika 22. Mjerenje promjera ležaja pomoću Pi trake [10]**

Thordon se zbog svoje nemetalne elastomerne prirode ne može strojno obraditi do glatke površine kao metali.

To nije problem jer ležaj u pogonu uobičajeno prolazi kroz normalan period tijekom kojeg se početna hrapavost površine izgladuje. Međutim, važno je težiti površini što je moguće veće glatkoće kako bi se smanjilo trenje i početno trošenje.

Kvalitetu završne obrade površine Thordon treba odrediti korištenjem vizualnog komparatora, umjesto korištenja igle [10].

Na slici 23. prikazana je kontrola kvalitete površinske obrade.



**Slika 23. Kontrola kvalitete površinske obrade [10]**

### 3.9. PRORAČUN POLIMERNOG LEŽAJA U SVRHU DIMENZIONIRANJA

Prikazat će se primjer proračuna Thordon SXL ležaja brodskog vratila kojega je potrebno ugraditi pomoću čvrstoga dosjeda. Također je potrebno odrediti vanjski promjer, unutarnji promjer i duljinu ležaja.

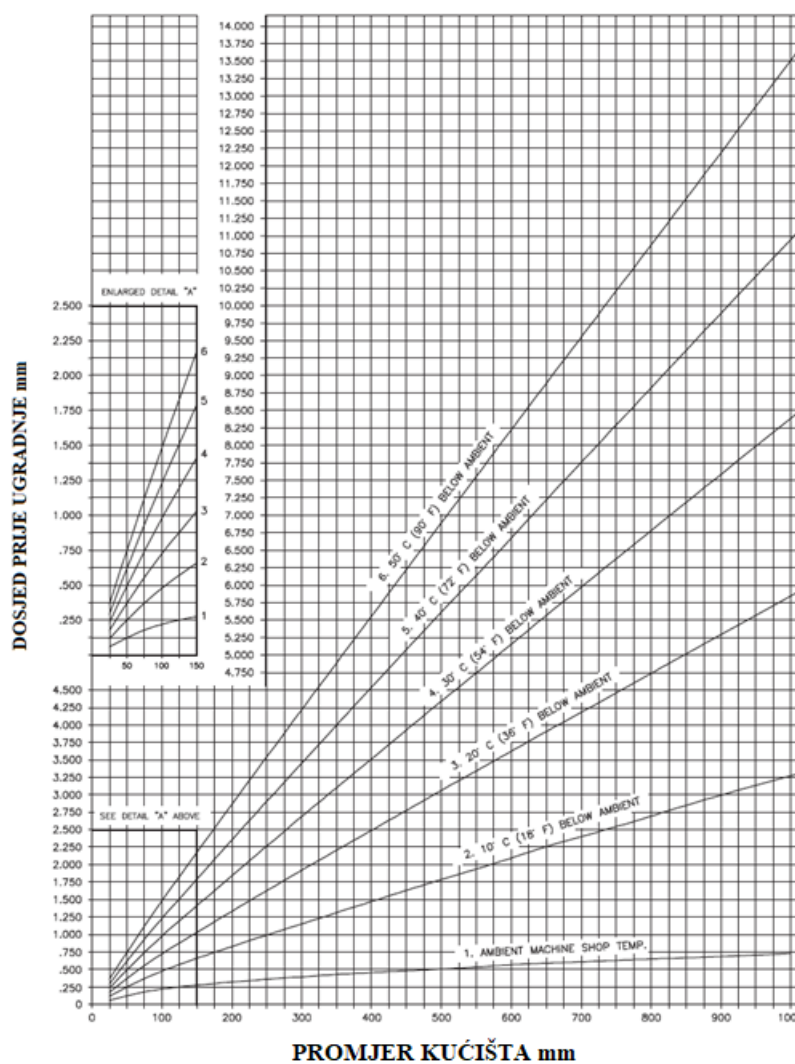
Početni parametri su prikazani u tablici 3.

**Tablica 3. Početni parametri**

Materijal	SXL
Ugradnja	Brodski vratilni vod
Promjer vratila, $d_v$	250 mm + 0,00/-0,10 mm
Kućište ležaja, $D_k$	300 mm +0,10/-0,00 mm
Duljina kućišta, $l_k$	1000 mm
Radna temperatura, $T_a$	Min. -2°C, Max. 30°C
Temperatura okoline, $T_o$	21°C
Okolina	More

### 3.9.1. Proračun vanjskoga promjera

Na slici 24. prikazan je dijagram promjera kućišta ležaja i dosjeda prije ugradnje. Promjer kućišta je 300 mm, a temperatura okoline je ispod 23°C te se iz dijagrama može izvući da dosjed iznosi 1,85 mm.



Slika 24. Dijagram promjera kućišta i dosjeda prije ugradnje [6]

Nakon toga se može izračunati vanjski promjer prema sljedećem izrazu:

$$D_L = D_{K,max} + Z_v$$

uvrštenjem

$$D_L = 300,10 + 1,85 = 301,95 \text{ mm}$$

gdje je:

$D_L$  – vanjski promjer ležaja, mm

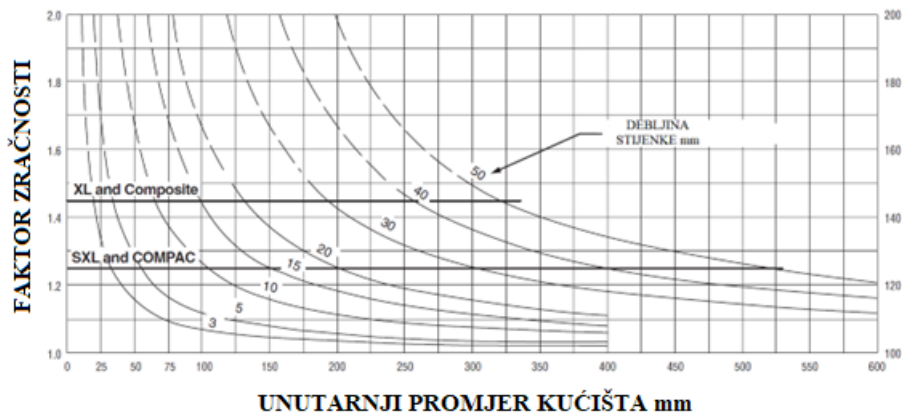
$D_{K,max}$  – najveći promjer kućišta, mm

$Z_v$  – dosjed prije ugradnje, mm.

Kad se uzmu u obzir tolerancije, promjer će iznositi:  $D_L = 301,95 + 0,13/-0,00$  mm.

### 3.9.2. Proračun unutarnjeg promjera

Faktor zračnosti prema slici 25. iznosi  $\psi_u = 1,147$ .



Slika 25. Dijagram unutarnjeg promjera kućišta i faktor zračnosti [6]

Srednja zračnost je:

$$\psi_{sr} = Z_v + \left( \frac{0,10 + 0,13}{2} \right)$$

uvrštenjem

$$\psi_{sr} = 1,85 + \left( \frac{0,10 + 0,13}{2} \right) = 1,97 \text{ mm}$$

Gdje je:

$\psi_{sr}$  – srednja zračnost (mm),

$Z_v$  – dosjed prije ugradnje (mm),

Dosjed kućišta ležaja = 0,10, dosjed vanjskog promjera = 0,13.

Stvarna zračnost provrta je:

$$\psi_{stv} = \psi_{sr} \cdot \psi_u$$

uvrštenjem

$$\psi_{stv} = 1,97 \cdot 1,147 = 2,26 \text{ mm}$$

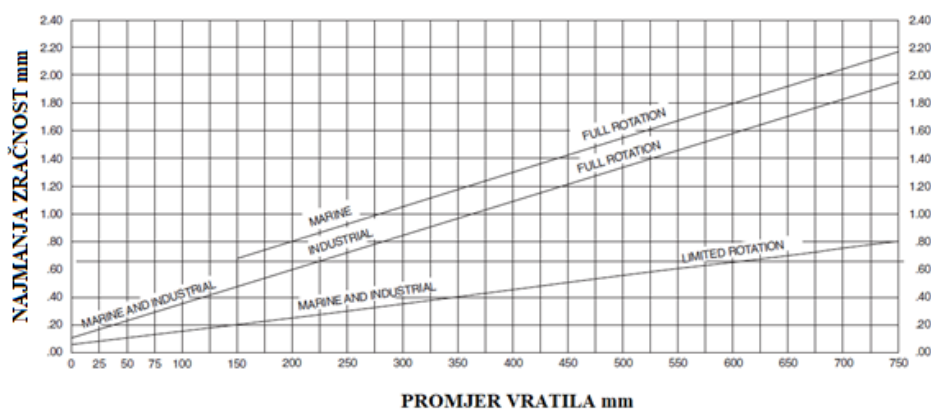
gdje je:

$\psi_{stv}$  – stvarna zračnost, mm

$\psi_{sr}$  – srednja zračnost, mm

$\psi_u$  – faktor zračnosti za unutarnji promjer.

Zračnost prema slici 26. za vratilo od 250 mm iznosi 0,96 mm.



Slika 26. Zračnost za vratila [6]

Temperaturno širenje se izračunava prema sljedećoj formuli:

$$\Delta l_t = 2 s \alpha (T_a - T_o)$$

uvrštenjem

$$\Delta l_t = 2 \cdot 25 \cdot 0,000151 \cdot 9 = 0,07 \text{ mm}$$

gdje je:

$\Delta l_t$  – dodatno temperaturno širenje, mm

$s$  – debljina stijenke ležaja, mm

$\alpha$  – koeficijent toplinskog širenja, mm/mm/°C

$T_a$  – radna temperatura, °C

$T_o$  – temperatura okoline, °C

Bubrenje se izračunava na sljedeći način:

$$\Delta l_s = S_V \cdot s$$

uvrštenjem

$$\Delta l_s = 0,0124 \cdot 25 = 0,31 \text{ mm}$$

gdje je:

$\Delta l_s$  – bubrenje, mm

$S_V$  – faktor apsorpcije vode (slika 14.),

$s$  – debljina stijenke, mm

$$\psi_{ukupno} = 2,26 + 0,96 + 0,07 + 0,31 = 3,60 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer ležaja:

$$d_L = d_{V,max} + \psi_{ukupno}$$

uvrštenjem

$$d_L = 250 + 3,60 = 253,60 \text{ mm}$$

gdje je:

$d_L$  – unutarnji promjer ležaja, mm

$d_{v,max}$  – najveći promjer vratila, mm

$\psi_{ukupno}$  – ukupni dodatak zračnosti na promjer ležaja, mm

Uzimajući u obzir toleranciju unutarnji promjer ležaja  $d_L = 253,60 +0,13/-0,00$  mm.

### 3.9.3. Proračun duljine ležaja

Aksijalno temperaturno širenje izračunava se na sljedeći način:

$$\Delta l_t = l_k \alpha (T_a - T_o)$$

uvrštenjem

$$\Delta l_t = 1000 \cdot 0,000151 \cdot 9 = 1,36 \text{ mm}$$

gdje je:

$\Delta l_t$  – dodatno temperaturno širenje, mm

$l_k$  – duljina kućišta ležaja, mm

$\alpha$  – koeficijent temperaturnog širenja, mm/mm/°C

$T_a$  – radna temperatura, °C

$T_o$  – temperatura okoline, °C

Dopušteno aksijalno bubrenje izračunava se na sljedeći način:

$$\Delta l_s = S_V \cdot l_k$$

uvrštenjem

$$\Delta l_s = 0,005 \cdot 1000 = 5,00 \text{ mm}$$

gdje je:

$\Delta l_s$  – dopušteno bubrenje u uzdužnom smjeru, mm

$S_V$  – faktor apsorpcije vode (slika 14.),

$s$  – duljina kućišta ležaja, mm

Duljina ležaja izračunava se na sljedeći način:

$$l = l_K - \Delta l_t - \Delta l_s$$

uvrštenjem

$$l = 1000 - 1,36 - 5,00 = 993,64 \text{ mm}$$

gdje je:

$l$  – duljina ležaja, mm

$l_K$  – duljina kućišta ležaja, mm

$\Delta l_t$  – aksijalno temperaturno širenje, mm

$\Delta l_s$  – dopušteno aksijalno bubrenje, mm

Kada se uzmu u obzir tolerancije duljina ležaja iznosi:  $l = 993,64 +0,00/-1,00$  mm.

#### **3.9.4. Konačni rezultati proračuna**

Konačni rezultati proračuna glase:

- vanjski promjer ležaja:  $D_L = 301,95 + 0,13/-0,00$  mm,
- unutarnji promjer ležaja:  $d_L = 253,60 +0,13/-0,00$  mm,
- duljina ležaja:  $l = 993,64 +0,00/-1,00$  mm.

Ovim je ležaj u potpunosti dimenzioniran.



## **4. VALIDACIJA UREĐAJA ZA ISPITIVANJE POLIMERNIH LEŽAJEVA**

Validacija (eng. *validation*) je postupak ocjenjivanja značajki nekoga postupka i provjera na stvarnom objektu zadovoljavaju li te značajke neka prethodno postavljena mjerila. Validacija se općenito odnosi na proces ocjenjivanja ili potvrđivanja točnosti, ispravnosti ili prikladnosti nečega. Ne može se provesti dok ne postoji realan objekt, a najčešće služi potvrdi projekta, dokazujući da je realan objekt dobro projektiran. Često se primjenjuje u različitim kontekstima, poput razvoja softvera, analize podataka i istraživanja.

Ispitivanje i validacija polimernog ležaja izvršeni su u Laboratoriju za ispitivanje inženjerskih materijala i proizvoda na Pomorskom fakultetu u Splitu. S obzirom na činjenicu da je validacija polimernog ležaja provedena u sklopu validacije cijeloga uređaja za ispitivanje kliznih ležajeva, u nastavku će se opisati cjeloviti postupak validacije samoga uređaja, koji obuhvaća i validaciju odabranog tipa polimernog ležaja u odabranoj ležajnoj konfiguraciji.

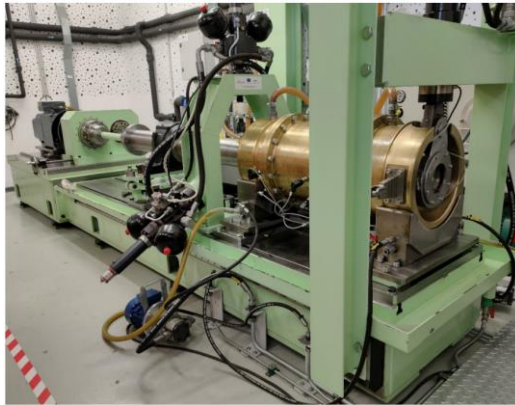
### **4.1. OPIS UREĐAJA ZA ISPITIVANJE POLIMERNOG LEŽAJA**

Ispitni uređaj omogućuje provjeru stvarnog ponašanja kliznih ležajeva u njihovim različitim konfiguracijama rada, dimenzijama, materijalima, mazivima, kao i njihovim radnim opterećenjem. To je modularni uređaj koji se može koristiti za ispitivanje ležajeva različitih nazivnih promjera i različitih relativnih duljina  $\lambda$ . Ispitivanje je provedeno na polimernom ležaju koji se podmazuje vodom. Promjer statvenog ležaja je 300 mm i relativne duljine  $\lambda=2$ . Pogonski modul tj. stroj je elektromotor s frekvencijskim regulatorom koji omogućuje odabir proizvoljne brzine vrtnje. Na ispitnom uređaju nisu ugrađeni ni kočnica ni brodski vijak, tako da je ukupno opterećenje sustava okretnim momentima na posljedica isključivo trenja u ležajevima i hidrauličkim cilindrima koji opterećuju vratilo.

Na ispitni modul utječe reaktivni moment trenja ležaja koji se izravno mjeri, što znači da se moment može precizno odrediti u odnosu na moment trenja ostalih ležajeva. Svi mjerni podaci ispitnog uređaja bilježe se u ispitnom modulu. U modulu za podmazivanje slatka voda cirkulira do i od ispitnog modula preko cirkulacijske pumpe za slatku vodu. Slatka voda služi istovremeno kao mazivo i rashladno sredstvo za polimerne ležajeve u modulu [12]. Na slici 27. prikazan je uređaj za ispitivanje.

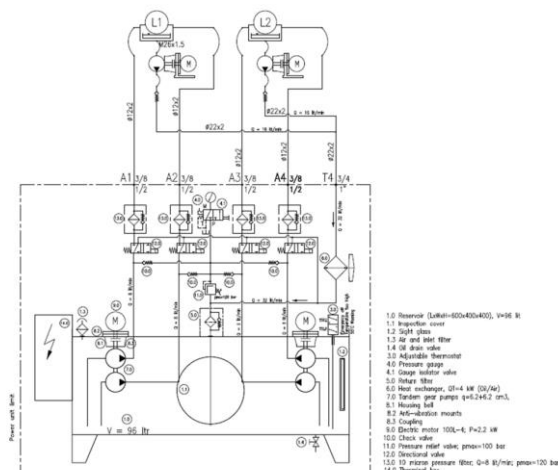
Uređaj se sastoji od sljedećih komponenti: [13]

- pogonskog modula,
- vratila,
- radijalnog modula,
- ispitnog modula,
- modula opterećenja,
- modual podmazivanja,
- rashladnog modula,
- modula upravljanja.



Slika 27. Uređaj za ispitivanje [13]

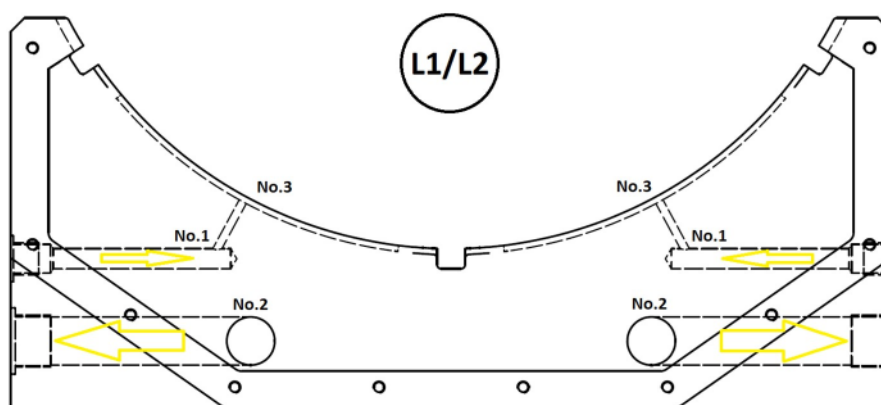
Na slici 28. prikazana je hidraulična pumpna jedinica za hidrostatičko podmazivanje.



Slika 28. Hidraulična pumpna jedinica za hidrostatičko podmazivanje [13]

Ispitni modul se oslanja na dva nosača (L1 i L2) koji su dio hidrostatičkog sustava podmazivanja. Dva nosača povezana su s hidrauličkom jedinicom preko visokotlačnih cijevi. Svrha hidrostatičkog sustava podmazivanja je korištenje hidrauličkog ulja za podizanje ispitnog modula s nosača i omogućavanje mu da pluta na tankom sloju ulja, eliminirajući trenje između testnog modula i njegovih nosača. Hidraulična jedinica ima dva fiksna elektromotora od kojih je svaki spojen s dvije dovodne pumpe i dva prijenosna elektromotora od kojih je svaki spojen s jednom pumpom za ekstrakciju.

Svaki hidrostatički nosač za podmazivanje ima dva ulaza, dva izlaza i dva preljevna otvora. Ulje pod visokim tlakom ulazi u hidrostatički nosač za podmazivanje kroz oba ulazna otvora (br. 1), podiže ispitni modul koji leži na nosačima kroz preljevne otvore (br. 3), a zatim se ispumpava kroz jedan od izlaznih otvora (br. 2) [13].



Slika 29. Hidrostatički nosači [13]

#### 4.2. POSTUPAK VALIDACIJE

Kriteriji koji se primjenjuju za definiranje općeg postupka ispitivanja opreme ovise o navedenim veličinama i varijablama. Međutim, ispitna oprema je mehanički uređaj (stroj) koji mora raditi sigurno i pouzdano tijekom cijeloga radnog vijeka u laboratoriju, tako da se ovdje također primjenjuju kriteriji ispitivanja tipa za opće komponente strojeva. Opći postupak ispitivanja opreme je: [12]

- provjeriti postoji li tehnička dokumentacija,
- nadzorna ispitivanja koja se provode u prostorijama proizvođača (vizualni pregled, dimenzionalne provjere i tlačna ispitivanja),
- provjera certifikata isporučениh komponenata (ispitne sonde, senzori tlaka, temperature i pomaka, itd.),

- pregled i nadzor sklapanja komponenti u podsklopove i module,
- nadzor nad centracijom sklopljenih modula ispitnog uređaja,
- sigurnosna ispitivanja, prije početnog pokretanja ispitne opreme, kako bi osoblje, laboratorijsko okruženje i okoliš bili sigurni i zaštićeni,
- ispitivanje laboratorijskih cjevovodnih sustava: sustavi hlađenja, podmazivanja i hidraulike,
- odabir i postavljanje rasporeda modula za ispitnu opremu (radijalni ležajevi međuvratila, radijalni ležaji statvene cijevi ili aksijalni ležajevi), promjer ležaja (između 60 i 300 mm), omjer duljine prema promjeru, materijal ležaja i vrsta maziva.

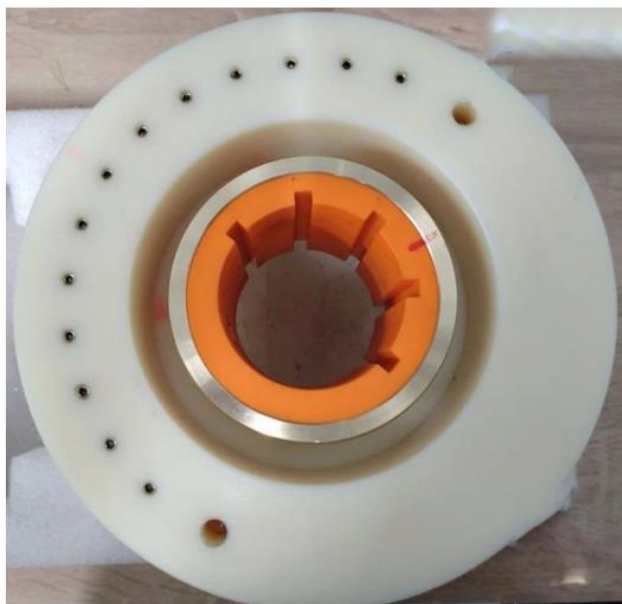
Postupak ispitivanja predložio je projektant ispitne opreme. Bez sumnje će zadovoljiti zahtjeve ispitivanja, kao što je opisano u pravilima klasifikacije brodova, ako bi se ispitna oprema smatrala dijelom brodskih strojeva.

Materijal ležaja može biti metal (legure kositra, aluminijska ili bakra), kao i ležajevi na osnovi polimera i kompozita kao što su polietilen PU ili kompoziti ojačani ugljikom. Promjeri ležaja su između 60 i 300 mm, tako da su ovo granične vrijednosti za promjere rukavca vratila [12].

Postupak validacije samog uređaja sastoji se od sljedećih koraka: [12]

- ispitivanje hidrauličkih agregata namijenjenih za cilindre modula opterećenja i servo cilindre,
- ispitivanje hidrauličkih agregata namijenjenih za hidrostatsku pumpu,
- ispitivanje pogonskog modula ispitne opreme (neopterećen),
- ispitivanja modula opterećenja raspoređenih kao nosivi ležajevi vratila (između oslonaca jednostavne grede) za dvije granične vrijednosti promjera vratila, različitih materijala za ležajeve i maziva,
- ispitivanja modula opterećenja raspoređenih kao ležajevi statvene cijevi (jednostavne grede s prepustom) za dvije granične vrijednosti promjera vratila, različitih materijala za ležajeve i maziva,
- ispitivanja modula dinamičkog opterećenja.

Na slici 30. prikazan je PU polieterski ležaj ugrađen u kućište od 60 mm.



**Slika 30. Montiran PU polieterski ležaj (narančasta boja) u kućištu ležaja (čelik i poliamid - najlon 6) [12]**

Mjerenje započinje snimanjem okolne i unutarnje temperature. Sljedeća stavka je provjeriti odgovarajuću dokumentaciju (hidrauličke sheme, elektro sheme i uputa za uporabu), kao i odgovarajuće rezervne dijelove. Nakon toga, predloženi postupak uvijek zahtijeva provjeru je li komponenta ispitne opreme u ispitivanju u skladu s tom posebnom tehničkom dokumentacijom [12].

Najvažniji detalji su ispitivanja modula opterećenja za granične veličine ležajeva i rukavaca vratila, različite rasporede, materijale ležaja i maziva, pa se mogu ukratko prikazati na sljedeći način: [12]

- provjeriti tehničku dokumentaciju,
- nakon montaže, provjeriti pokretljivost vratila,
- provjeriti curenje na način da se napuni modul mazivom (vodom ili uljem) i ostaviti 30 minuta bez uključivanja pogona,
- uključiti pogon vratila i postupno povećavati brzinu vrtnje,
- izmjeriti vibracije na prednjem kraju, u sredini i na stražnjem kraju radnog stola za svaku brzinu vrtnje i usporediti ih s izmjerenim vibracijama bez modula opterećenja (provesti pomoću opreme *Hofmann-Machine Control MC 1100*),

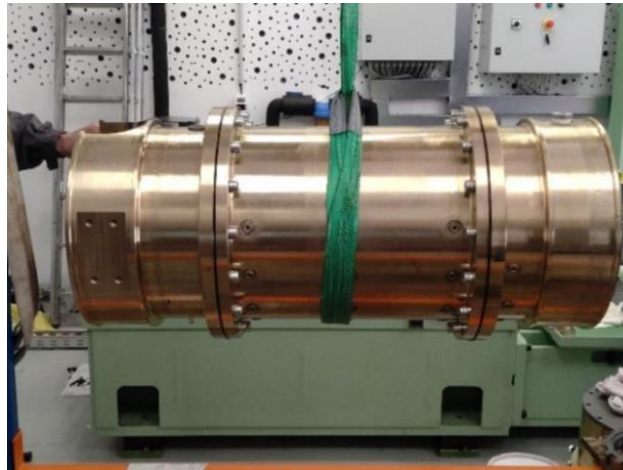
- ispitati vlačnu/tlačnu mjernu ćeliju od 25 kN,
- ispitati vlačnu/tlačnu mjernu ćeliju od 100 kN,
- ugraditi unaprijed odabranu i prethodno ispitanu mjernu ćeliju s hidrauličkim cilindrom u oslonac stvarnog modula (nosivi ležaj vratila ili ležajevi statvene cijevi) za daljnje ispitivanje,
- nakon 10 minuta rada bez opterećenja, postupno povećavati silu na hidrauličkom cilindru kako bi se ispitni modul opteretio na unaprijed odabrane vrijednosti kao dijelove maksimalnog opterećenja,
- istovremeno mjeriti vibracije na prednjem, srednjem i stražnjem kraju radnog stola koristeći *Hofmann-Machine Control MC 1100* za svaku postavljenu silu,
- pratiti cirkulaciju i protok tekućine za podmazivanje,
- izvršiti provjere zagrijavanja na dodir za modul opterećenja i ležajeve, kako bi se spriječili nepovoljni uvjeti koji se mogu iznenada pojaviti, prema, kako bi se izbjeglo pregrijavanje polimernog ležaja. Savjetuje se ugradnja senzora protoka [14]. Razne neočekivane situacije poput prekomjernog trenja ili kvara rashladnog sustava mogu izazvati pregrijavanje,
- provesti temperaturna mjerenja sloja maziva u ispitnom ležaju,
- provesti mjerenja tlaka sloja maziva u ispitnom ležaju,
- izvršiti mjerenja debljine sloja maziva u ispitnom ležaju na temelju relativnog položaja ispitnog ležaja i rukavca vratila,
- provesti mjerenje viskoznosti ulje/voda na ulazu u modul,
- provesti mjerenje viskoznosti ulje/voda na izlazu iz modula,
- provesti mjerenja broja čestica,
- ispitati žurno isključivanje sustava u slučaju nužnosti,
- provjeriti zapisnaloga za hitno isključivanje.

#### **4.3. PROIZVEDENE NEISPRAVNE KOMPONENTE, OPĆENITO PORAVNANJE TE PROBLEMI S VIBRACIJAMA**

Brončane komponente izrađene od CuAl10Ni5Fe4 - kućišta ispitnih ležajeva i statvena cijev pokazale su nepropusnost. Kako bi se ispitala oprema i njezine komponente, proveden je popravak korištenjem jednokomponentnog impregnacijskog brtvila koje omogućuje rad kućišta ležaja pod tlakom. Glavna komponenta brtvila je keton. Nakon

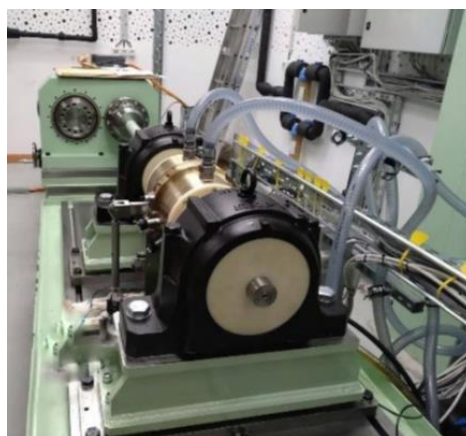
nanošenja brtvila na kućišta ležaja, provedena su ispitivanja na 1,2 bara temeljem kojih su, nakon pažljivog praćenja, kućišta odobrena za ugradnju [12].

Na slici 31. prikazana je statvena cijev koja je premazana brtvilom i spremna za ugradnju.



**Slika 31. Statvena cijev spremna za ugradnju [12]**

Uočene su prekomjerne vibracije prijenosnog vratila i djelomično riješene pravilnim poravnanjem (centracijom) vratila ispitne opreme (slika 32.). Podrazumijeva se da su izvori vibracija prvenstveno posljedica nelinearnih učinaka, poput hrapavosti i abrazivnosti površine te hidrodinamičkih interakcija. Ove pobude, zajedno s kompliciranim vibracijskim putanjama, teško je opisati linearnim modelima, ali u prikazanom slučaju zadržavanje unutar praktičnog kriterija centriranosti vratila od 0,05 mm bilo je dovoljno za praktično rješavanje problema vibracija (slika 33.) [12].



**Slika 32. Ispitivanje vibracija [12]**



**Slika 33. Centriranje vratila i kućišta ležaja [12]**

Problemi s vibracijama pogonskog vratila mogu se smanjiti strožim tolerancijama poravnanja, ali je još bitnije održati komponente ispitne opreme u njihovom postignutom poravnatom položaju nakon dovršetka njihove montaže. Zbog osjetljivosti cijelog procesa usklađivanja, npr. zatezanje temeljnih vijaka kućišta ležaja nije dovoljno za održavanje sklopa ležaja u pravilnom poravnatom položaju [12].

#### **4.4. ANALIZA I RASPRAVA REZULTATA**

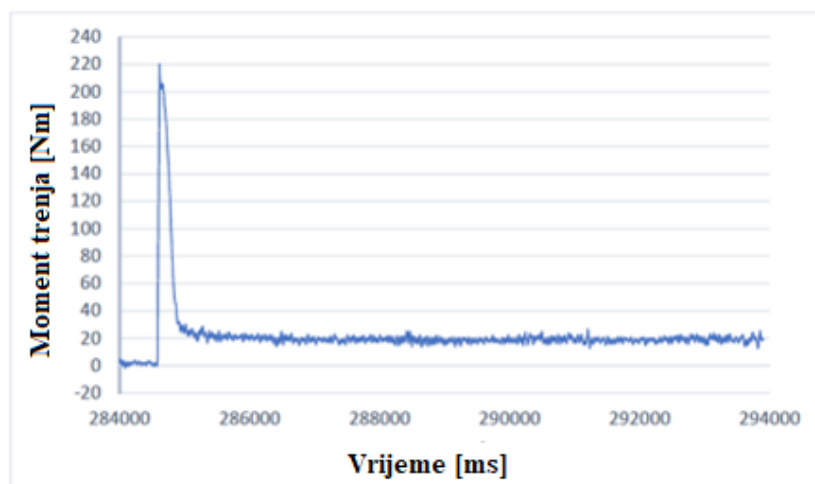
Metoda mjerenja se sastoji od određenih uvjeta koji su morali biti ispunjeni. Prvi uvjet bio je uspostaviti podmazivanje i hlađenje ležajeva uključivanjem pumpe za cirkulaciju vode kako bi se osigurao kontinuirani protok vode kroz ispitni modul. Drugi uvjet bio je uspostaviti početni uvjet mjerenja uključivanjem hidrostatskog sustava podmazivanja kako bi se ispitni modul podigao tako da pluta na tankom sloju hidrauličkog ulja dok je ispitna oprema nepomična (ne rotira). Treći uvjet bio je potvrditi da su sve vrijednosti senzora poništene, odnosno postavljene na nulu, što je početna točka mjerenja. Ako su ispunjeni svi uvjeti, ispitni uređaj se može pokrenuti na unaprijed postavljenoj točki brzine vrtnje.

Za ovaj rad odabrane su dvije različite brzine vratila. Prvi odabir bio je 70 o/min, za simulaciju brodskih sporokretnih dizelskih motora s dugim hodom, koji izravno pokreću vratilo brodskog vijka. Drugi odabir je bio 200 o/min, kako bi se simulirali srednjekretni brodski dizelski motori koji pokreću vratilo brodskog vijka s upotrebom reduktora [13].



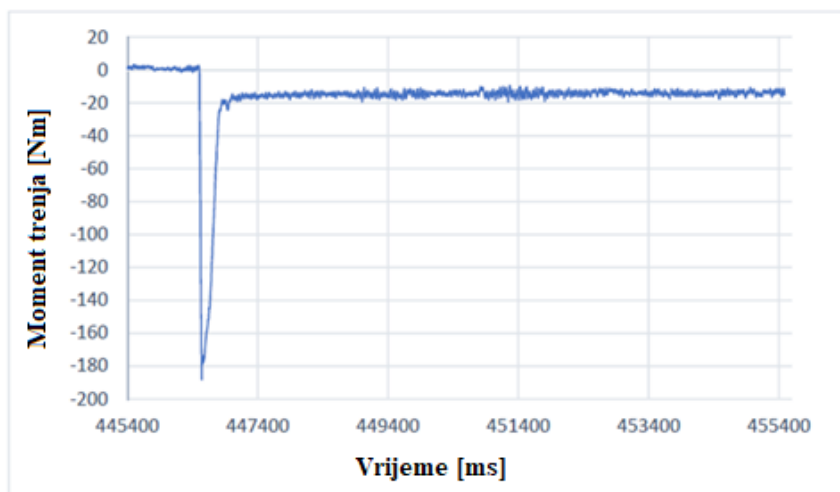
U prvom stanju, ispitna oprema je pokrenuta pri unaprijed postavljenoj brzini od 70 o/min u smjeru kazaljke na satu i ostavljena da radi pri toj brzini otprilike 10 minuta. Najviši zabilježeni moment trenja iznosio je 220,4 Nm, koji se zatim polako ustalio na stabilnu prosječnu vrijednost od 17,1 Nm (slika 34.), dok je disipacija trenja varirala između 110 W i 150 W. Kada se ispitna oprema započela okretati, podmazivanje između dodirnih površina je bilo nedostavno, tj. cjelokupno opterećenje se prenosilo dodirom čvrsto na čvrsto. Ova vrsta podmazivanja naziva se granično podmazivanje. Kako se brzina vrtnje povećavala, sloj maziva je počeo razdvajati površine.

U tom slučaju, ukupno trenje je kombinacija dorirnog trenja između čvrstih dijelova i trenja slojeva maziva, što se naziva mješovito podmazivanje. Nakon što se sloj maziva u potpunosti formira i razdvoji čvrste dijelova, jedino trenje koje se razvija je viskozno smicanje slojeva maziva, što se naziva punim podmazivanjem [13].



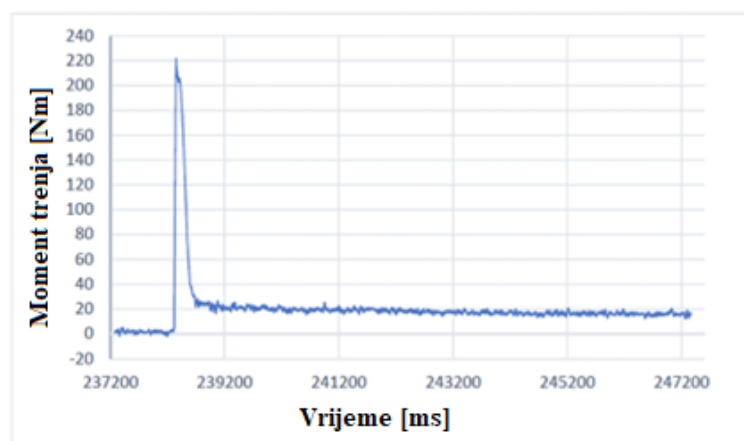
**Slika 34. Zapis mjerenja pri brzini vrtnje 70 o/min u smjeru kazaljke na satu [13]**

Za drugi uvjet, smjer vrtnje je promijenjen iz smjera kazaljke na satu u suprotan s istom brzinom od 70 o/min. Pri ispitivanju u smjeru suprotnom od kazaljke na satu pri 70 o/min izmjeren je vršni moment trenja od -188,3 Nm, koji se zatim uspostavio na stabilnoj prosječnoj vrijednosti od -14,1 Nm (slika 35.), dok je disipacija trenja varirala između -90 W i -110 W. Vlačno-tlačna mjerna sonda mjeri silu pri vrtnji u smjeru kazaljke na satu kao tlak (negativnu vrijednost) a za smjer vrtnje suprotno od kazaljke na satu kao vlak (pozitivnu vrijednost) [13].



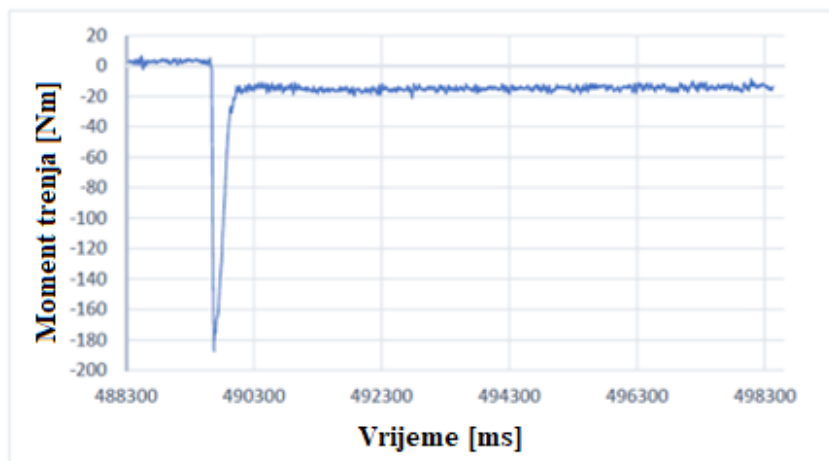
**Slika 35. Zapis mjerenja pri brzini 70 o/min u suprotnom smjeru od kazaljke na satu [13]**

Za treći uvjet, smjer vrtnje i brzina vratila promijenjeni su u smjer kazaljke na satu pri 200 o/min. Vršni moment trenja iznosio je 222,1 Nm dok se nije ustalio na stabilnu prosječnu vrijednost od 15,2 Nm (slika 36.), dok je disipacija trenja varirala između 300 W i 350 W [13].



**Slika 36. Zapis mjerenja pri brzini 200 o/min u smjeru kazaljke na satu [13]**

Za četvrti uvjet, smjer vrtnje je promijenjen u smjeru suprotnom od kazaljke na satu pri 200 o/min. Vršni moment trenja iznosio je -185,4 Nm dok se nije ustalio na stabilnu prosječnu vrijednost od -12,7 Nm (slika 37.), dok je disipacija trenja varirala između -270 W i -320 W [13].



Slika 37. Zapis mjerenja pri brzini 200 o/min u suprotnom smjeru od kazaljke na satu [13]

## 5. ZAKLJUČAK

U području pomorskih porivnih sustava, dimenzioniranje, izračun i validacija polimernih statvenih ležajeva pojavljuju se kao ključna poveznica inženjerskih inovacija, preciznosti i praktičnosti. Razvoj od koncepta do realizacije ovih naprednih ležajeva naglašava multidisciplinarnu prirodu modernog strojarstva, gdje se znanost o materijalima, računalna analiza i validacija u stvarnom svijetu preklapaju kako bi oblikovali budućnost pomorske industrije.

Rigorozna laboratorijska ispitivanja na licu mjesta potvrđuju projektom predviđena ponašanja ležajeva, čime se osigurava da konstrukcija polimernih ležajeva može izdržati stroge uvjete stvarnih pomorskih operacija. Ovaj postupak provjere valjanosti neophodan je u pročišćavanju pretpostavki, identificiranju potencijalnih zamki i osiguravanju pouzdanosti ovih ključnih komponenti.

Za prototip je nemoguće projektirati ili definirati postupak unaprijed i ne očekivati promjene. Sigurno će biti prilagodbi koje će biti potrebne ispraviti. Te prilagodbe nastaju kao rezultat procesa učenja koji proizlazi iz pogrešaka.

Na temelju prikazanih eksperimentalnih podataka može se zaključiti da primjena hidrostatičkih ležajeva u instrumentiranoj ispitnoj opremi za ispitivanje hidrodinamičkih kliznih ležajeva pruža valjanu osnovu za određivanje stvarnog momenta opterećenja rukavca vratila u ležaju ispitne opreme i njegovih gubitaka snage uslijed trenja, što izravno utječe na energetska učinkovitost ispitivanog ležaja.

Eksperiment se odvijao na četiri različita načina. U prvom stanju postavljena brzina je bila 70 o/min u smjeru kazaljke na satu i ostavljena da radi pri toj brzini otprilike 10 minuta. Najviši zabilježeni moment trenja iznosio je 220,4 Nm, dok je disipacija trenja varirala između 110 W i 150 W. Za drugo stanje ispitivanje je provedeno u smjeru suprotnom od kazaljke na satu pri 70 o/min izmjeren je vršni moment trenja od -188,3 Nm, dok je disipacija trenja varirala između -90 W i -110 W. Za treći uvjet, smjer vrtnje i brzina vratila promijenjeni su u smjer kazaljke na satu pri 200 o/min. Vršni moment trenja iznosio je 222,1 Nm dok se nije ustalio na stabilnu prosječnu vrijednost od 15,2 Nm, dok je disipacija trenja varirala između 300 W i 350 W. Za četvrti uvjet, smjer vrtnje je promijenjen u smjeru suprotnom od kazaljke na satu pri 200 o/min. Vršni moment trenja iznosio je -185,4 Nm dok se nije ustalio na stabilnu prosječnu vrijednost od -12,7 Nm, dok je disipacija trenja varirala između -270 W i -320 W. Na ovaj način, istraživač može predvidjeti opterećenje okretnim

momentom i gubitke snage koji se mogu očekivati u ležaju stvarnog brodskog pogonskog sustava.

Uz pouzdanu metodu, buduća istraživanja mogu se provoditi s različitim konfiguracijama ispitnih uređaja koje uključuju: različite brzine vratila, različite vrste maziva, različite materijale i veličine ležajeva, različite temperature i različita poprečna opterećenja. Takvo istraživanje može pružiti vrijedne informacije koje mogu dovesti do uštede troškova i uporabe ekološki prihvatljivih materijala i maziva.

Kako se pomorska industrija nastavlja razvijati, dimenzioniranje, izračun i validacija polimernih ležajeva ostat će okosnica napretka.

## LITERATURA

- [1] IGUS motion plastics: <https://www.igus.com/info/polymer-bearings> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [2] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: *Metal/Polymer Composite Plain Bearings*, [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi\\_211\\_de\\_en.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_211_de_en.pdf) (pristupljeno 22.6.2023.)
- [3] Plastic Material: <https://www.iqsdirectory.com/articles/plastic-material.html> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [4] Roldo, L., Komar, I., Vulić, N.: *Design and Materials Selection for Environmentally Friendly Ship Propulsion System*, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 59(01):25-31, 2013.
- [5] Ünlü, B., Atik, E., Köksal, S.: *Tribological properties of polymer-based journal bearings*, *Materials & Design* Volume 30, Issue 7, str. 2618-2622, 2009.
- [6] Thordon Bearings Inc.: *Engineering Manual Version E2006.1*, Thordon Canada, 2006. <https://thordonbearings.com/> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [7] Thordon Bearings Inc.: *Seawater Lubricated COMPAC Propeller Shaft Bearing System Product Manual*, Thordon Canada, <https://thordonbearings.com/> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [8] Thordon Bearings Inc.: <https://thordonbearings.com/> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [9] The Engineering ToolBox: *Young's Modulus, Tensile Strength and Yield Strength Values for some Materials*, [http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_417.html](http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html) (pristupljeno 22.6.2023.)
- [10] Thordon Bearings Inc.: *Marine Bearing Installation Manual Version 2008.1*, Thordon Canada, 2008. <https://thordonbearings.com/> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [11] ThorPlas Bearings: *Engineering Manual Version: TP2006.1*, Thordon Canada, 2006. <https://thordonbearings.com/> (pristupljeno 22.6.2023.)
- [12] Roldo, L., Vulić, N., Komar, I.: *Instrumented test rig: Analysis of the procedure to test radial bearings and related components*, 20<sup>th</sup> International Conference on Transport Science (ICTS 2022), May 23<sup>rd</sup>-24<sup>th</sup> 2022, Conference Proceedings, Portorož, 2022. pp. 322-327.

- [13] Pavlović, I., Vulić, N., Bratić, K., Roldo, L.: *Principles of torque measurement in the PFST instrumented sliding bearings test rig*, International Maritime Science Conference (IMSC 2023), May 8<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> 2023, Book of Proceedings, Solin, 2023. pp. 69-79.
- [14] Litwin, W., Dymarski, C. Experimental research on water-lubricated marine stern tube bearings in conditions of improper lubrication and cooling causing rapid bush wear, *Tribology International*, 95 (2016) -, pp. 449-455.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba različitih materijala kod broda za prijevoz sipkog tereta [4] .....	5
Slika 2. Različiti materijali polimernih ležaja [5].....	6
Slika 3. Izgled COMPAC ležaja [7] .....	7
Slika 4. Izgled SXL ležaja [8] .....	7
Slika 5. Izgled XL ležaja [8].....	8
Slika 6. Izgled RiverTough ležaja [8].....	8
Slika 7. Dijagram promjene veličine (%) u odnosu na temperaturu (C) za Thordon SXL i COMPAC [6].....	11
Slika 8. Primjer hidrolize [6] .....	12
Slika 9. Opterećenje ležaja [6].....	13
Slika 10. Učinak histereze [6].....	15
Slika 11. Tlak ležaja [6].....	16
Slika 12. PVT dijagram za SXL ležaj koji se hladi morem [6].....	19
Slika 13. Dijagram omjera debljine stijenke i promjera vratila [6] .....	20
Slika 14. Parametri prilagodbe čvrstoga dosjeda [8] .....	26
Slika 15. Promjena dimenzija zbog bubrenja ležaja [6] .....	27
Slika 16. Primjer utora za podmazivanje [10] .....	29
Slika 17. Prikaz rezanja materijala za ležaj [10] .....	33
Slika 18. Obrada unutarnjeg promjera ležaja [10].....	34
Slika 19. Obrada vanjskog promjera ležaja [10] .....	34
Slika 20. Glodanje utora [10] .....	35
Slika 21. Mjerenje promjera ležaja [10] .....	35
Slika 22. Mjerenje promjera ležaja pomoću Pi trake [10].....	36
Slika 23. Kontrola kvalitete površinske obrade [10] .....	37
Slika 24. Dijagram promjera kućišta i dosjeda prije ugradnje [6].....	38
Slika 25. Dijagram unutarnjeg promjera kućišta i faktor zračnosti [6] .....	39
Slika 26. Zračnost za vratila [6].....	40
Slika 27. Uređaj za ispitivanje [13] .....	44
Slika 28. Hidraulična pumpna jedinica za hidrostatičko podmazivanje [13] .....	44
Slika 29. Hidrostatički nosači [13] .....	45



Slika 30. Montiran PU polieterski ležaj (narančasta boja) u kućištu ležaja (čelik i poliamid – najlon 6) [12] .....	47
Slika 31. Statvena cijev spremna za ugradnju [12] .....	49
Slika 32. Ispitivanje vibracija [12] .....	49
Slika 33. Centriranje vratila i kućišta ležaja [12] .....	50
Slika 34. Zapis mjerenja pri brzini vrtnje 70 o/min u smjeru kazaljke na satu [13] .....	51
Slika 35. Zapis mjerenja pri brzini 70 o/min u suprotnom smjeru od kazaljke na satu [13]	52
Slika 36. Zapis mjerenja pri brzini 200 o/min u smjeru kazaljke na satu [13] .....	52
Slika 37. Zapis mjerenja pri brzini 200 o/min u suprotnom smjeru od kazaljke na satu [13] .....	53

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva Thordon XL, SXL i COMPAC ležaja [6] .....	9
Tablica 2. Modul elastičnosti različitih materijala [9].....	14
Tablica 3. Početni parametri.....	37

## POPIS OZNAKA I KRATICA

$A$	Projicirana površina
$D_{k,max}$	Najveći promjer kućišta
$D_L$	Promjer ležaja
$d_L$	Unutarnji promjer ležaja
$d_v$	Vanjski promjer ležaja
$d_{v,max}$	Najveći promjer ležaja
$E_o$	Youngov modul elastičnosti
$F$	Opterećenje (sila)
$F_R$	Radijalno opterećenje
$k$	Krutost
$l$	Duljina ležaja
$l_k$	Duljina kućišta ležaja
$n$	Brzina vrtnje vratila
$p$	Tlak u ležaju
$S$	Faktor oblika
$s$	Debljina ležaja
$S_V$	Faktor bubrenja ležaja
$t$	Vrijeme
$T_a$	Radna temperatura
$T_o$	Temperatura okoline
$v$	Brzina klizanja
$Z_v$	Dosjed prije ugradnje
$\Delta l_s$	Bubrenje
$\Delta l_t$	Dodatno temperaturno rastezanje
$\Delta T$	Promjena temperature
$\alpha$	Koeficijent temperaturnog rastezanja
$\mu$	Koeficijent trenja
$\lambda$	Relativna duljina (konstrukcijska karakteristika ležaja)
$\Psi_{sr}$	Srednja zračnost
$\Psi_{stv}$	Stvarna zračnost

$\Psi_u$

Faktor zračnosti za unutarnji promjer

$\Psi_{ukupno}$

Ukupni dodatak zračnosti na promjer ležaja