

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem vany experimentálního zařízení pro testování lidských kloubů. Tribometr slouží k experimentálnímu měření tření a vizualizaci filmu reálné chrupavky v zaplavené synoviální kapalině. Výsledkem této práce je návržení odvodu vzduchu, vyhřívání a utěsnění vany v níž se synoviální kapalina nachází. Díky odstranění vzduchových bublin a ohřevu kapaliny na teplotu lidského těla, se dosáhne přesnějších hodnot koeficientu smykového tření a zlepšení vizualizace kontaktu. To by mělo vést k lepšímu pochopení třecích a mazacích procesů v synoviálním kloubu. Výstupem této práce je zvolená optimální konstrukční varianta a výrobní výkresová dokumentace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Pin-on-slab tribometr, biotribologie, odvodu vzduchu, vyhřívání

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of the bathtub of an experimental device for testing human joints. Tribometer is used for experimental measurement of friction and visualization of real cartilage film in flooded synovial fluid. The result of this work is the design of air releasing, heating and sealing the bathtub in which the synovial fluid is located. By removing air bubbles and heating the liquid to the temperature of the human body, more accurate shear coefficient values and improved contact visualization are achieved. This should lead to a better understanding of the friction and lubrication processes in the synovial joint. The result of this work is chosen optimal design variant and production drawing documentation.

## KEYWORDS

Pin-on-slab tribometer, biotribology, air releasing, heating



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, Tomáš. *Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro testování lidských kloubů*. Brno, 2018, 62 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Čípek, Ph.D.



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Pavlu Čípkovi za ochotu, mnoho cenných rad a připomínek během řešení této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Pavla Čípka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>10</b>
2.1	Tribologie	10
2.2	Biotribologie	10
2.3	Tribometr	11
2.3.1	Druhy tribometrů	12
2.3.2	Konvenční tribometry	14
2.3.3	Nekonvenční tribometry s recipročním pohybem	16
2.4	Odvzdušnění	19
2.4.1	Zdroje vzduchu	19
2.4.2	Dopad vzduchu na systém	20
2.4.3	Odvzdušňovací ventily	21
2.5	Těsnění	24
2.5.1	Druhy těsnění	25
2.5.2	Statické těsnění	25
2.5.3	Dynamické těsnění	29
2.6	Vyhřívání	30
2.6.1	Přímý ohřev kapalin	30
2.6.2	Nepřímý ohřev kapalin	32
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>35</b>
3.1	Analýza problému	35
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>37</b>
4.1	Odvzdušnění	37
4.1.1	Odvzdušnění vysokým bodem	37
4.1.2	Odvzdušnění podtlakem	38
4.2	Těsnění	39
4.2.1	Těsnění dělicí roviny vany	39
4.2.2	Těsnění mezi víkem vany a sklem	41
4.3	Vyhřívání	42
4.3.1	Topné patrony	42
4.3.2	Plášťové topné pásy	43
4.3.3	Šroubovací ponorný ohřívač	43

<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>45</b>
5.1	Odvzdušnění	45
5.2	Těsnění	48
5.2.1	Těsnění dělicí roviny vany	48
5.2.2	Těsnění mezi víkem vany a sklem	49
5.3	Vyhřívání	50
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>52</b>
6.1	Odvzdušnění	52
6.2	Těsnění	52
6.2.1	Těsnění dělicí roviny vany	52
6.2.2	Těsnění mezi víkem vany a sklem	53
6.3	Vyhřívání	53
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>62</b>



# 1 ÚVOD

Klouby v lidském těle mohou být zasaženy onemocněními jako chondropatie, osteoartritida či artróza. Tyto nemoci způsobují bolesti, omezují pohyblivost a tím pádem snižují životní komfort člověka. Existují dva základní způsoby, jak tyto onemocnění léčit. Volba léčby závisí na rozsahu a typu onemocnění. První způsob, kdy onemocnění není až tak závažné, se řeší nechirurgickým zákrokem. Mezi takovéto zákroky patří viskosuplementace, která umožňuje zpomalit nebo stabilizovat onemocnění kloubu. Pomocí injekce se do kloubu aplikuje kyselina hyaluronová, která má podpůrný efekt na mazací procesy v kloubu. Druhý způsob, který se snažíme co nejvíce oddálit, je chirurgický. Zde dochází k výměně kloubu za kloubní náhradu, resp. totální endoprotézu. Kloubní náhrada má však omezenou životnost zhruba 10 až 20 let, takže po určitém čase musí dojít k její výměně tedy k další operaci, která zatěžuje lidské tělo a snižuje tak komfort života. Pochopení problematiky mazání kloubů by tedy významně napomohlo k léčbě kloubů zasažených těmito nemocemi.

K základním údajům, které se snažíme zjistit, patří určení součinitele smykového tření. K určení tohoto součinitele slouží experimentální zařízení jménem tribometr. Existuje velké množství těchto zařízení, které se liší konfigurací, použitím a dalšími jinými parametry. Pro zjištění součinitele smykového tření u synoviálního kloubu se nejčastěji používají tribometry typu pin-on-plate a pin-on-disk. Doposud však ještě nebyly žádné experimenty, které by měřily součinitel smykového tření a současně umožňovaly náhled do třecího kontaktu. Proto byl na Ústavu konstruování (ÚK) na Fakultě strojního inženýrství (FSI) Vysokého učení technického (VUT) v Brně zkonstruován tribometr, který umožňuje měřit součinitel smykového tření a současně vizualizovat kontakt. Při konstrukci však nebyla dořešena konstrukce odvzdušnění vyhřívané vany zajišťující přítomnost maziva v kontaktu kloubu, proto se tato práce zabývá konstrukcí odvzdušnění vany. Práce se v rešeršní části zabývá současnými tribometry, odvzdušněním, těsněním a vyhříváním. Následně jsou v práci popsány možná koncepční řešení problému, ze kterých vyplyne konečné konstrukční řešení splňující kladené požadavky.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Tribologie

Tribologie je oblast vědy a techniky zabývající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu - což znamená, že se zabývá jevy souvisejícími s třením, opotřebením a mazáním [1]. Termín „tribologie“ je odvozen z řeckého slova „tribos“, který znamená tření. K objevu a zkoumání tření došlo v minulosti někdy 50 000 př. n. l., kdy ho lidé začali používat k rozdělání ohně. Starověké civilizace v Egyptě a Číně používaly principy mazání pro přepravu těžkých stavebních kamenů. První systematickou studii tribologie však provedl Leonardo da Vinci - první tribolog světa v letech 1490-1500, který rozlišil tření na smykové (kluzné) a valivé [2].

Tření je hlavní příčinou opotřebením a ztráty energie. Opotřebením způsobuje ztráty materiálu a ztráty mechanického výkonu a jakékoli snížení opotřebením může vést k značným úsporám. Ke snížení tření, opotřebením a úspoře energie se používá mazání [3].

V dnešní době je rostoucí potřeba omezit tření a opotřebením nebo ho umět řídit z několika důvodů, například prodloužit životnost strojů a biosystémů, vyrábět efektivnější motory a jiná zařízení, vyvíjet nové pokročilé výrobky, šetřit vzácné materiální zdroje, šetřit energii a zlepšit bezpečnost [1].

V důsledku rostoucího zájmu k pochopením tribologických jevů vyskytujících se v živých tkání vznikla biotribologie.

### 2.2 Biotribologie

Termín biotribologie se používá k označení tribologických jevů, které se vyskytují buď v lidském těle, nebo u zvířat, případně rostlin.

V biotribologii existují dvě odlišná témata:

- tribologické procesy, které se přirozeně vyskytují v tkáních a orgánech živých organismů nebo na nich
- tribologické procesy, které se mohou objevit po implantaci umělého zařízení v živém lidském těle [3]

Pojem biotribologie byl poprvé definován a použit Dowsonem v roce 1970 jako „ty aspekty tribologie, které se zabývají biologickými systémy“ [4].

Do této oblasti spadá:

- tribologie kloubů (kyčelní, kolenní kloub, chrupavka, kloubní tekutina, regenerační materiály kloubů...)
- tribologie kůže (péče o pokožku, kůže v kontaktu s předměty, různé lékařské i sportovní přístroje, lékařské a kosmetické ošetření...)
- tribologie ústní dutiny (zuby, jazyk, sliny; implantované zuby; zubní pasta...)
- tribologie ostatních částí těla (buňky, krevní řečiště, vlasy, oko a kontaktní čočky...)
- lékařské přístroje (skalpely, operační kleště, lékařské rukavice...)
- tribologie zvířat (pohyb zvířat, peří ptáků, bruslačky, křídla motýlů...)
- tribologie rostlin (list lotusu, řasy...)

Biotribologický výzkum se zaměřuje na pochopení toho, jak funguje přirozený biologický systém, jak se vyvíjejí nemoci, optimalizuje léčební postupy a zařízení, často z technického hlediska. Je důležité řešit jedinečné povahy různých biologických systémů, které mají skutečný dopad na zlepšení kvality života [4].

## 2.3 Tribometr

Zařízení pro měření tření a opotřebení, neboli tribometry se řadí mezi základní technologie používané při výzkumech v oblasti tribologie. Účelem tribometru je poskytnout simulaci tření a opotřebení za řízených podmínek. Tření a opotřebení jsou velmi citlivé na faktory, jako jsou změny teploty, zatížení nebo vlhkosti, a proto je nutné měřit na takových zařízeních, kde lze všechny tyto faktory pečlivě řídit a sledovat.

Ačkoli většina tribometrů je používána na laboratorní měření, v některých případech mohou být tribometry modifikovány tak, aby umožňovaly měření přímo v praxi. Takovéto tribometry se používají například pro měření opotřebení svazků lan a kladkostrojů nebo u zkoušek motorů. Jádrem každého tribometru tvoří třecí kontakt – zatěžovací tělíčko a vzorek, mezi kterými se uskutečňuje pohyb. Průměrný tribometr obsahuje také různá pomocná zařízení, která zajišťují pohyb, zatížení a dodávají mazivo nebo zvláštní atmosféru. Pokročilejší tribometry jsou vybaveny přístroji pro měření součinitele tření, rychlosti opotřebení a často i teploty. Kromě těchto základních vlastností se tribometry značně liší konstrukcí a funkcí. Primárním faktorem, který požadujeme u tribometrů, je rozmanitost kontaktů, které se vyskytují v reálných situacích, které je třeba simulovat. Opotřebení se vyskytuje za podmínek čistého posuvu, čisté rotace, kombinovaného posuvu a rotace, nárazu, otěru, eroze a kavitace. Každá forma opotřebení vyžaduje speciálně navržený tribometr.

Rozdíly v rozsahu základních provozních parametrů, jako je rychlost posuvu a amplituda, mají zásadní vliv na návrh tribometru. Většina tribometrů pracuje při kluzných rychlostech v rozmezí od 0,001 do 1 m/s a jsou navrženy tak, aby poskytovaly údaje o abrazivním opotřebením, adhezivním opotřebením, opotřebením z únavy nebo jiných souvisejících mechanismů opotřebením. Některé tribometry se však musí provozovat při kluzných rychlostech mimo tento rozsah. Například studie o opotřebením tavení kovů vyžadují velmi vysoké kluzné rychlosti asi 100 m/s nebo více a je požadován jiný návrh tribometru. U studie frettingu, ačkoli je fretting formou klouzavého posuvu, je amplituda velmi malá v rozmezí 5-100  $\mu\text{m}$ , takže konstrukce zařízení na opotřebením se výrazně liší od tribometru určeného ke studiu makroskopického posuvu.

Takže i když existuje určitý počet tribometrů, které jsou popsány tak, že mají komplexní rozsah testovacích schopností, téměř všechny známé zkušební stroje mají omezený rozsah použití. Tribometry jsou obvykle navrženy tak, aby pokryly specifický rozsah opotřebením nebo provozních podmínek a jsou obvykle nevhodné nebo neúčinné pro měření, které je mimo jejich zamýšlený provozní rozsah. Je široká řada tribometrů, které se podle druhu měření liší svou konstrukcí a technologií. Podle společnosti Tribologists and Lubrication Engineers, existuje přes 240 uznávaných návrhů konstrukce tribometru, ale přes počet dostupných návrhů je skutečný rozsah možností pro užitečné experimenty omezenější. Počet tribometrů, které se pravidelně používají, je mnohem menší [5].

### 2.3.1 Druhy tribometrů

Tribometry lze rozdělit podle různých hledisek do několika skupin (tab. 2-1).

Tab. 2-1 Druhy tribometrů

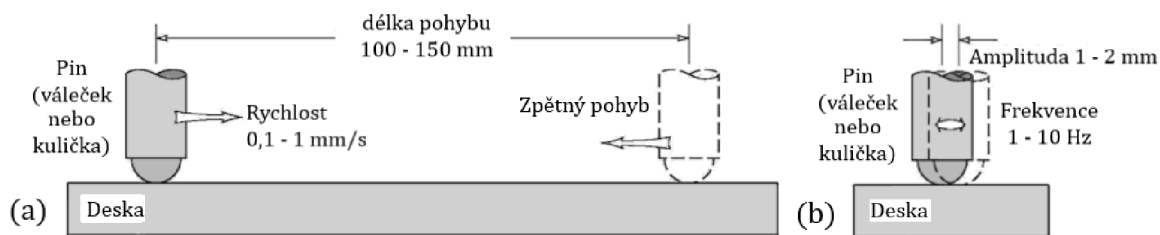
Hledisko	Typy
Styk třecích ploch	Konformní styk (plošný) Nekonformní styk (liniový, bodový)
Pro suchý, nebo částečně mazaný kluzný kontakt	Four-ball Falex Timken Pin-on-disk Pin-on-drum Ball-on-disk Pin-on-slab Ball-on-slab Pin-on-ring Ring-on-ring
Tribometry pro studii opotřebením	Erozivní Abrazivní Kavitační
Podle provozních podmínek	Vysokoteplotní Nízkoteplotní Pracující ve vakuu

	Pracující v korozivních kapalinách
Speciální tribometry	Pro studii otěru Pro extrémně vysoké kluzné rychlosti Pro opotřebení nárazem Pro kombinaci valení a klouzání Pro měření in-situ tření a opotřebení
tribometry pro studii mechanismu mazání	Hydrodynamické mazání Elastohydrodynamické mazání Mechanické vlastnosti absorbovaných filmů v mezním mazání
Tribometry, které nezahnují třecí kontakt	Studie adheze mezi čistými povrchy Studie drsnosti a povrchové deformace Studie chemických vlastností čistého povrchu
Tribometry pro měření integrity povlaků	

### Pin-on-slab / pin-on-plate

Vzhledem k tomu, že konstruovaný tribometr pracuje podle konfigurace pin-on-plate, bude zde tato konfigurace více popsána. Zařízení typu pin-on-slab, nebo též pin-on-plate, se používají pro měření tření a opotřebení mezi povrchy, které vůči sobě konají posuvný vratný pohyb, proto se zařízení tohoto typu používá pro testování v různých odvětví od automobilového průmyslu až po bio-materiály implantátů [6]. Třecí kontakt vznikne mezi pinem, který je ve většině případů staticky uložený, a pohybující se deskou (slab nebo plate). Pro kontakt konformních povrchů je jako pin používán váleček, pro kontakt nekonformních povrchů je používána kulička [7].

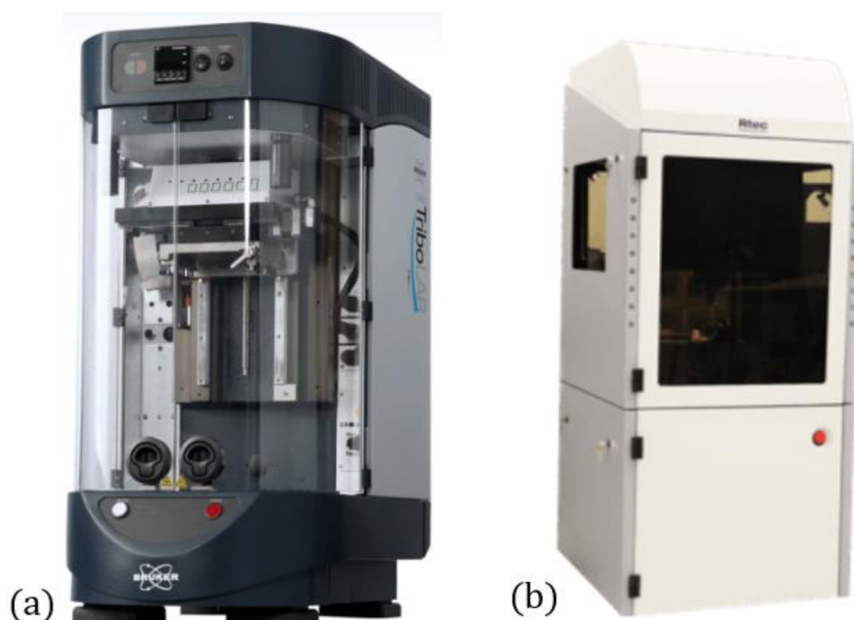
Pin-on-slab zařízení se dělí na Bowden-Leben a Cameron-Mills, které se od sebe liší velikostí frekvence a amplitudy. Pro Bowden-Leben je charakterizující velká amplituda mezi 100 až 150 mm a malá frekvence, kde se deska pohybuje mezi 0,1 až 1 mm/s. Zatímco u přístroje typu Cameron-Mills je malá amplituda 1 až 2 mm, ale výrazně vyšší frekvence desky 1 až 10 Hz. Metody jsou schematicky znázorněny na obr. 2-1. Zařízení Cameron-Mills má výhodu vysoké rychlosti opakování kluzných kontaktních cyklů, které způsobují, že procesy tření a opotřebení rychle dosáhnou ustáleného stavu. Na druhou stranu tribometr Bowden-Leben má tendenci vytvářet údaje o tření a opotřebení, které se vztahují pouze na počáteční stavy, protože pin má malou frekvenci a koná méně přesahů přes desku. Zvýšení povrchové teploty je přesně řízeno (a potlačeno) omezením rychlosti posuvu u obou zařízení. Výhodou těchto metod je fakt, že na rozdíl od metody Four-ball, kde jsou všechny kuličky vyrobeny z oceli, mohou být pin a deska vyrobeny z různých materiálů [5].



Obr. 2-1 Tribometr typu Pin-on-slab; (a) Metoda Bowden-Leben; (b) Metoda Cameron-Mills

### 2.3.2 Konvenční tribometry

V této kapitole budou popsány dva konvenční tribometry. Tyto tribometry se nacházejí a používají v laboratoři ÚK, jedná se o: Bruker's Universal Mechanical Tester TriboLab, dále jen UMT TriboLab a Rtec Universal Tribometer (obr 2-2).



Obr. 2-2 (a) Bruker's UMT TriboLab; (b) Rtec Universal Tribometer

#### a) UMT TriboLab

UMT TriboLab je jeden z nejvšestrannějších a nejvíce používaných tribometrů, který byl poprvé uveden v roce 2000. Platforma Bruker UMT se stala standardem pro tribologii a používá se po celém světě ve výzkumných laboratořích, na univerzitách a v národních laboratořích. Klíčovým prvkem tribometru je vysoce výkonný motor upevněný na středu sloupku tlumícího vibrace. Tento motor poskytuje celou řadu otáček a momentů.

Čtyři snadno vyměnitelné mechanické pohony přeměňují tuto sílu na lineární a rotační pohyb a poskytují tak celou řadu konfigurací: rotační, lineární, reciproční a konfiguraci Block-on-ring. Tribometr má jedenáct různých snímačů schopných měřit široký rozsah sil od  $\mu\text{N}$  až po  $\text{kN}$ . TriboLab UMT je navržen tak, aby dokázal napodobit co nejširší spektrum prostředí v reálném světě díky flexibilnímu příslušenství (tab. 2-2) [8].

Tab. 2-2 Zařízení tribometru UMT TriboLab

Typ zařízení	Použití	Vlastnosti
Modul pro rotační konfigurace	Ball-on-disk Pin-on-disk Stribeckovy křivky	Rychlost: 0,1–5 000 ot/min Točivý moment: až 5 Nm
Modul pro lineární konfiguraci	Nízko-rychlostní opotřebení Test odolnosti vůči poškrábání Zkoumání povlaků	Rychlost: 0,002–10 mm/s Zdvih: až 120 mm
Modul pro reciproční konfiguraci	Ball-on-plate Pin-on-plate Abrazivní opotřebení	Frekvence: až 60 Hz Amplituda: 0,1–25 mm
Modul pro konfiguraci Block-on-ring	Block-on-ring	Rychlost: 0,1–5 000 ot/min Točivý moment: až 5 Nm
Nádoba pro recirkulaci kapaliny	Testování materiálů v kapalině	
Komora s nastavitelnou teplotou a vlhkostí	Rotační pohon Reciproční pohon	Teplota: -30 °C–1000 °C Vlhkost: 5%–85% rel. vlhkosti
Komora pro konfiguraci Block-on-ring	Block-on-ring	Teplota: až 150 °C Vlhkost: až 99% rel. vlhkosti

#### b) Rtec Universal Tribometer

Univerzální Tribometr Rtec umožňuje na stejném stroji provozovat několik standardních i nestandardních testů opotřebení, tření a mechanických zkoušek. Zkoušky lze provádět v rozsahu od nano po makro. Jedinečná kombinace víceosých pohonů umožňuje vytvořit libovolný vlastní pohyb, který simuluje testování, které se co nejvíce přibližuje reálným podmínkám. Na rovinu  $xy$  umožňuje zařízení namontovat různé snadno vyměnitelné pohony, které software automaticky rozpozná a optimalizuje jejich nastavení. Stejně jako u UMT TriboLab to jsou moduly pro pohyb rotační, reciproční, lineární a pro konfiguraci block-on-ring (tab. 2-3). Na ose  $z$  se montují snímače zatížení, profilometry, Ramanův spektrometr a další zařízení. Univerzální tribometr měří a monitoruje síly a posunutí ve všech osách. Má širokou škálu patentovaných snadno vyměnitelných snímačů zatížení. Volba senzorů závisí na aplikaci, k dispozici jsou piezoelektrické, kapacitní a tenzometrické senzory. Rozsah zatížení se pohybuje od  $\text{nN}$  do  $12\,000\text{ N}$ . Pro studium tribologických vlastností lze většinu zkoušek provozovat v suchém nebo mazaném režimu [9].

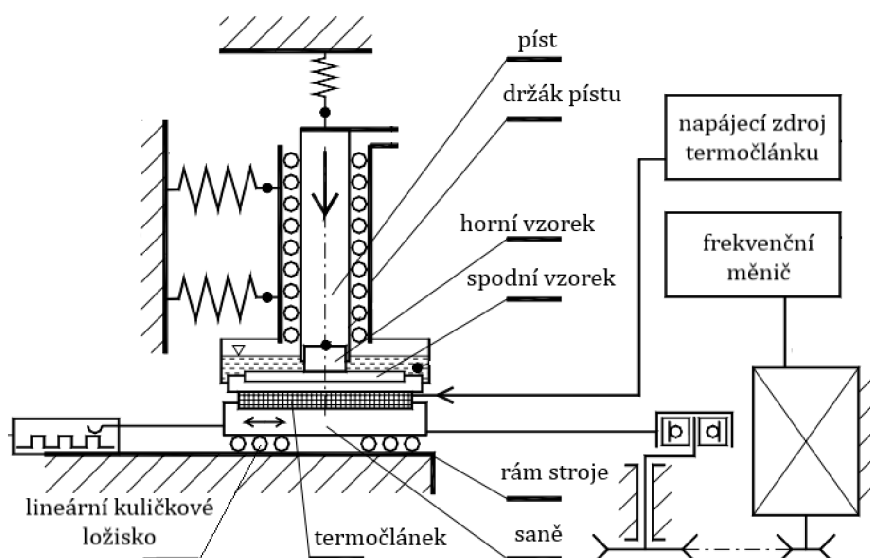
Tab. 2-3 Zařízení tribometru Rtec Universal Tribometer

Typ zařízení	Použití	Vlastnosti
Modul pro rotační konfigurace	Ball-on-disk Pin-on-disk Disk-on-disk	Otáčky: 0,001–10 000 ot/min Zatížení: $\mu\text{N}$ –10 kN Rozsah: 360°
Modul pro lineární konfiguraci	Pin-on-plate Ball-on-plate Nízko-rychlostní opotřebení	Frekvence: až 50 Hz Zdvih: až 35 mm
Modul pro reciproční konfiguraci	Pin-on-plate Ball-on-plate	Frekvence: až 70 Hz Amplituda: 0,1–30 mm
Modul pro konfiguraci Block-on-ring	Block-on-ring	Rychlost: až 7 000 ot/min Rozsah: 360°
Modul pro vrtání, řezání závitů	Vyhodnocení maziv a kapalin	
Komory pro zvláštní podmínky	Testovací prostředí: extrémní teploty, různá vlhkosti, vakuum, inertní plyn, kapaliny	Teplota: -120 °C–1200 °C Vlhkost: 5%–95% rel. vlhkosti

Univerzálnost Rtec Universal Tribometru umožňuje poskytnout několik tribologických a mechanických testovacích řešení pro různá průmyslová odvětví. Pro dosažení správného součinitele tření a opotřebení je důležité, aby byly zkoušky prováděny v podmínkách, které jsou blízké reálné aplikaci. Pomocí vlastních pohybů, širokého rozsahu zatížení, přizpůsobitelných držáků a pohonů umožňuje tribometr snadno generovat smysluplná data [9].

### 2.3.3 Nekonvenční tribometry s recipročním pohybem

K. Druet a kol. [10] navrhly zkušební stroj pro studium mazaného nebo suchého kluzného tření při lineárním recipročním pohybu za nastavitelného zatížení, kluzné rychlosti a teploty.



Obr. 2-3 Princip činnosti recipročního tribometru TPZ



Horní vzorek (Obr. 2-3) je připevněn k pístu uloženého v držáku, který je pružně uchycen k rámu stroje. Maximální zatížení až 1000 N působí na zkušební kontakt pístem buď přes pružinu nebo pákou se závažím. Změnou tuhosti pružiny se může měnit přirozená frekvence vibrací ve směru kolmém k povrchu vzorku. Spodní vzorek je připevněn k vratným saním nesených na rámu lineárními kuličkovými ložisky, které jsou poháněny motorem přes klínový řemen a klikový mechanismus. Motor je napájen z frekvenčního měniče, který umožňuje plynulou změnu posuvné rychlosti od 0,01 do 0,5 m/s i po jediné otáčce hnací kliky. Spodní vzorek je poháněn klikovým mechanismem, takže se vratně pohybuje při sinusové rychlosti, když elektromotor v systému pracuje při konstantních otáčkách. Cyklická modulace rychlosti otáčení hřídele motoru v rámci jedné otáčky umožňuje dosáhnout rovnoměrné rychlosti spodního vzorku v širokém rozsahu jeho zdvihu. Sáňky jsou opatřeny spodním držákem vzorku, zásobníkem maziva a termočlánkem pro topení nebo chlazení. Měřeno je opotřebení vzorků, aplikované zatížení, posunutí saní a teplota vzorků a maziv. Vyhodnocení výsledků tribologického experimentu je obvykle míra opotřebení, stavové přechodové podmínky a někdy dynamické účinky, jako jsou vibrace vyvolané třením [10].

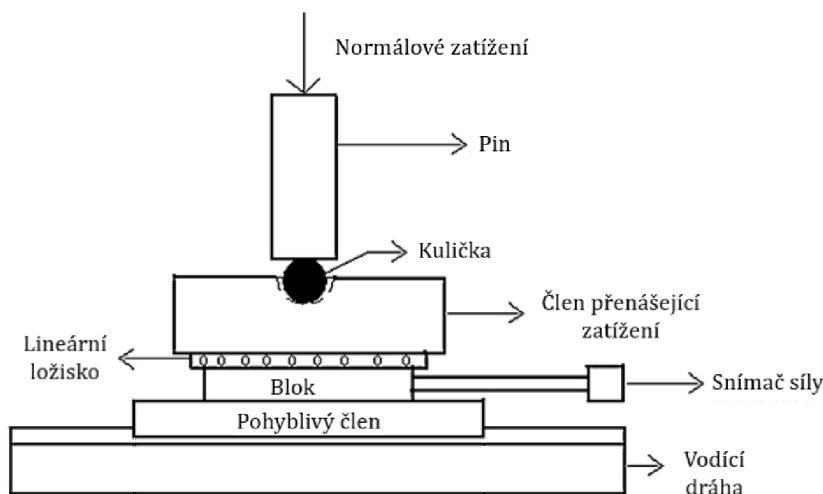
Reciproční tribometr v práci A. Abdelbarya kol. [11] byl navržen a zkonstruován pro provádění zkoušek opotřebení při konstantních a kolísavých podmínkách zatížení, kdy rychlost posuvu pro většinu jeho zdvihu, krom krajních poloh, je konstantní. Tribometr má možnost měnit amplitudu, střední zatížení a frekvenci zatěžovacího cyklu. Zkoušky opotřebení mohou být prováděny za sucha nebo za mokra. Na tomto zkušebním zařízení byl zkoumán vliv zátěžového režimu na chování opotřebení Nylonu 66 s nerezovou ocelí v suchých podmínkách. Polymer byl testován za konstantních a proměnlivých podmínek zatížení při dvou různých zátěžích a při třech frekvencích.



Obr. 2-4 Reciproční tribometr pro testování opotřebení

Zařízení se skládá z motoru pohánějícího řetězový mechanismus s převodovkou ke snížení rychlosti. Tento mechanismus se používá k pohonu vozíku, který se z 80 % svého zdvihu pohybuje konstantní rychlostí 0,25 m/s. Vozík je rozdělen do šesti oddělených kanálů, které umožňují testovat co největší počet nezávislých vzorků současně. Kolísavé zatížení je generováno speciálním systémem zátěže, který se skládá ze sady šesti excentrických replikovatelných vaček. Vačka přemění rotaci na vertikální stlačení pružiny, která přenáší generovanou sílu na držák pinu. Zátěžový cyklus v důsledku tohoto uspořádání má sinusový tvar. Vačkový hřídel je poháněn motorem s druhou převodovkou s třemi různými frekvencemi. Amplitudy a prostředky cyklického zatížení mohou být řízeny změnou vaček anebo pružin. Jiné formy zatěžovacího cyklu mohou být aplikovány s použitím různých tvarů vačky. Míra opotřebení zkušebních vzorků je určena měřením ztráty hmotnosti nebo objemu [11].

Studium tření a opotřebení mazaných povrchů hraje významnou roli ve vývoji kluzných ploch pro obráběcí stroje. C.B. Mohan a kol. [12] představili návrh a vývoj pokročilého lineárního recipročního tribometru pro studium vlastností maziv a povrchů kluzných ploch. Je proveden pokus o zkoumání účinnosti různých tvarů a geometrií olejových drážek s různými oleji. Na základě těchto studií mohou být získány nejlepší tvary a geometrie olejových drážek ke snížení tření a opotřebení mazaných kluzných ploch v posuvných dráhách obráběcích strojů.



**Obr. 2-5** Princip činnosti tribometru

Testovací zařízení je poháněno motorem přes převodovku a propojeno s počítačem. Motor pohání kluznou dráhu pomocí rozvodového řemene. Když posuvná dráha dosáhne krajních konců, spínač přiblížení obrátí směr otáčení motoru, čímž posouvá posuvnou dráhu v opačném směru. Posuvná dráha se tak mezi oběma čidly nepřetržitě otáčí. Mezi blokem a členem přenášejícího zatížení je lineární ložisko, aby se zabránilo přímému kontaktu, který by jinak ovlivňoval chování systému.

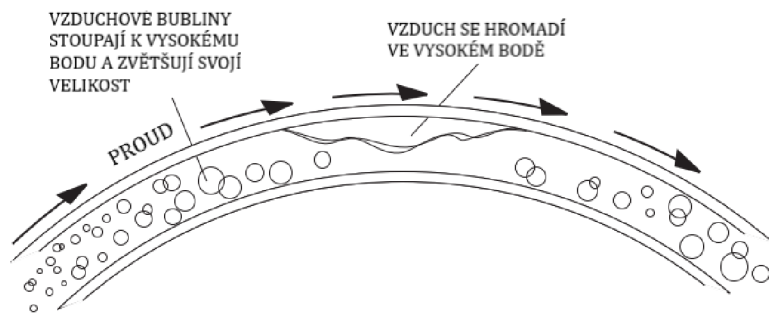
Tribometr je tedy navržen tak, aby simuloval kluzné chování v posuvných dráhách obráběcích strojů. Princip činnosti (obr. 2-5) zahrnuje vratný pohyb pohyblivého členu proti stacionárnímu bloku s posuvným pohybem ve vodicích dráhách stroje. Lineární rychlost posuvné dráhy se může měnit od 0,1 do 6000 mm/min. Požadovanou délku zdvihu lze nastavit změnou polohy snímačů přiblížení a rychlost počítačem. Běžná zátěž je aplikována pomocí mrtvých závaží připevněných ke konci ramena páky, která přenáší zatížení na blok. Normální zatížení se může měnit až do 6000 N. Pohyblivý člen a blok jsou vyrobeny z oceli s kaleným povrchem. Materiál použitý pro kluznou dráhu a bloky může být změněn tak, že může být studována třecí síla mezi libovolnými dvěma kluznými členy. Na povrchu bloků byly frézovány drážky tří konfigurací. Drážky byly vytvořeny v pravých úhlech ke směru pohybu a vzájemně propojeny pro distribuci maziva po celém povrchu. Pohyblivý člen se pohybuje při různých rychlostech posuvu a zaznamenává se třecí síla. Experiment se opakuje za stejných podmínek a stanoví se průměrná síla, ze které se vypočítá koeficient tření [12].

## 2.4 Odvzdušnění

U současného zařízení tribometru dochází ke vzniku vzduchových bublin, které se tvoří při doplňování maziva do vyhřívané vany mezi zkušební deskou a pinem. Z tohoto důvodu se bude muset navrhnout vhodné konstrukční řešení, které zajistí odstranění vzduchu. Vzduchové bubliny ve vaně způsobí, že kontakt není plně zaplaven, a tak dochází ke špatně naměřeným hodnotám součinitele smykového tření. Navíc bubliny zhoršují vizualizaci kontaktu, který je zkoumán fluorescenčním mikroskopem. V této kapitole budou obecně rozebrány zdroje a dopady vzduchu, které se nejčastěji objevují v systému potrubí s vodou.

### 2.4.1 Zdroje vzduchu

Vzduch v tlakovém provozním potrubí pochází ze tří primárních zdrojů. Zdroj první – potrubí před spuštěním není prázdné, ale je plné vzduchu. Pro úplné vyplnění potrubí kapalinou je nutné tento vzduch odstranit. Když se potrubí naplní, velká část z tohoto vzduchu bude tlačena po proudu, kde se uvolní pomocí hydrantů, vodovodních kohoutků apod. Ale velké množství se zachytí ve vysokých bodech systému (obr. 2-6). Tento jev nastane, protože vzduch je lehčí než voda, a proto se bude shromažďovat ve vysokých bodech. Tento vzduch nepřetržitě přidává druhý a třetí zdroj, protože systém pokračuje v provozu [13].

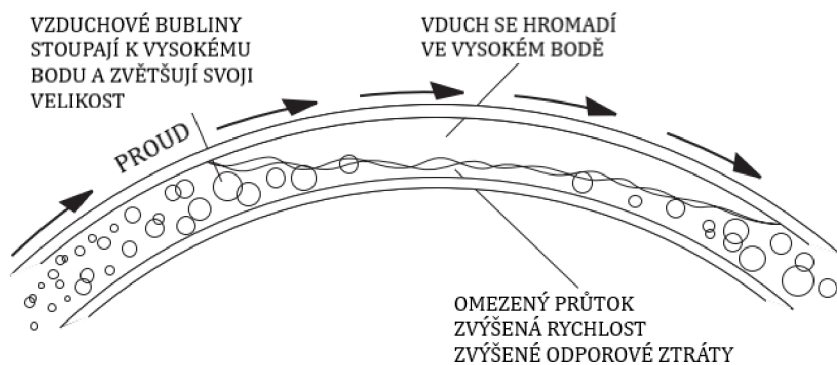


Obr. 2-6 Vzduch se v potrubí hromadí ve vysokých bodech

Zdroj číslo dvě je samotná voda. Voda obsahuje přibližně 2 % objemového vzduchu. Během provozu systému se unášený vzduch plynule odděluje od vody a opět se hromadí ve vysokých bodech systému. Třetím zdrojem vzduchu je ten, který vstupuje přes mechanická zařízení. To zahrnuje vzduch, který je přiváděn do systému čerpadly, stejně jako vzduch, který se vtahuje přes těsnění, ventily atd [13].

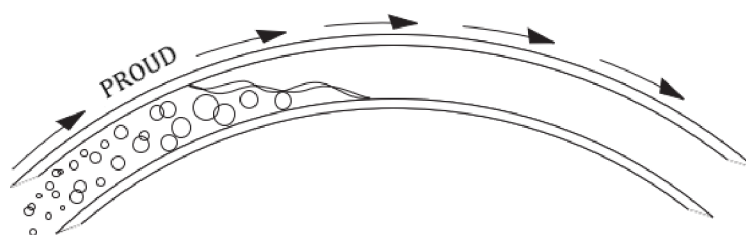
## 2.4.2 Dopad vzduchu na systém

Nyní, když jsme popsali zdroje vzduchu, zvážíme jejich dopad na systém. Dva problémy jsou zřejmé. Kapsy vzduchu, které se hromadí ve vysokých bodech, mohou způsobit omezení průtoku potrubí (obr. 2-7). Stejně jako jakékoli omezení, kapsy vzduchu zvyšují odporové ztráty, zvětšují čerpací cykly a zvyšují spotřebu energie. Přítomnost vzduchu také podporuje korozi potrubí a tvarovek. Vzhledem k tomu, že se vzduch nadále hromadí ve vysokých bodech systému, rychlost tekutiny se zvyšuje, protože kapalina je vytlačována menším a menším otvorem. Jak kapsa roste, nastane jeden ze dvou jevů.



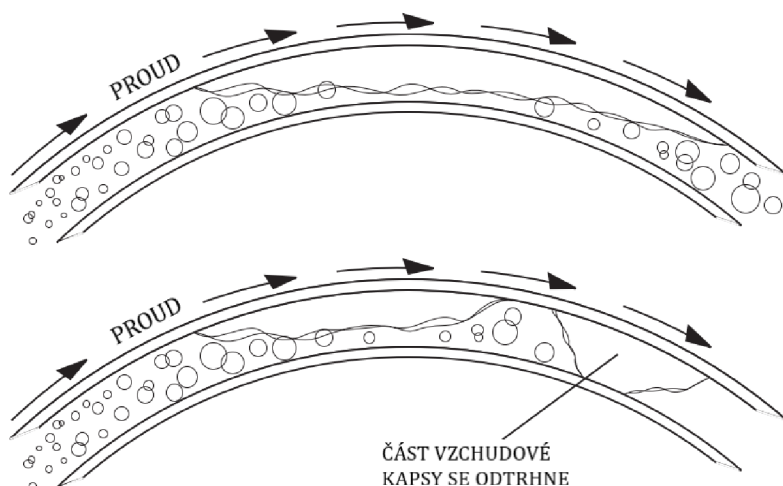
Obr. 2-7 Vzduch hromadící se v potrubí

První možností je úplné zastavení toku (obr. 2-8). K tomuto dojde, když vzduch nemůže být plynule odstraňován ani zvýšenou rychlostí kapaliny ani podtlakem. Vzhledem k tomu, že kapsa nadále akumuluje vzduch, může dojít k poklesu tlaku a k zastavení veškerého průtoku.



Obr. 2-8 Úplné zastavení toku

Druhá a pravděpodobnější možnost spočívá v tom, že zvýšená rychlost způsobí, že celá část kapsy nebo její část se náhle uvolní a bude tlačena po proudu (obr. 2-9). Náhlá a rychlá změna rychlosti kapaliny, kdy se kapsa uvolní a pak je zastavena jiným vysokým bodem, může a často vede k vysokotlaké nárazové rychlosti – vodnímu rázu. Může dojít k vážnému poškození ventilů, armatur, těsnění nebo dokonce poškození vedení. Jedná se o nejzávažnější z možných důsledků, kdy se vzduch akumuluje ve vysokých bodech systému [13].



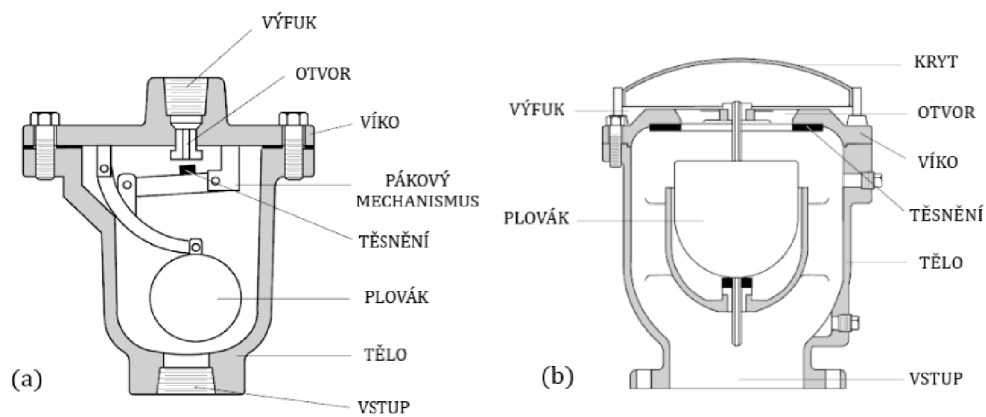
Obr. 2-9 Náhlé uvolnění vzduchu

### 2.4.3 Odvzdušňovací ventily

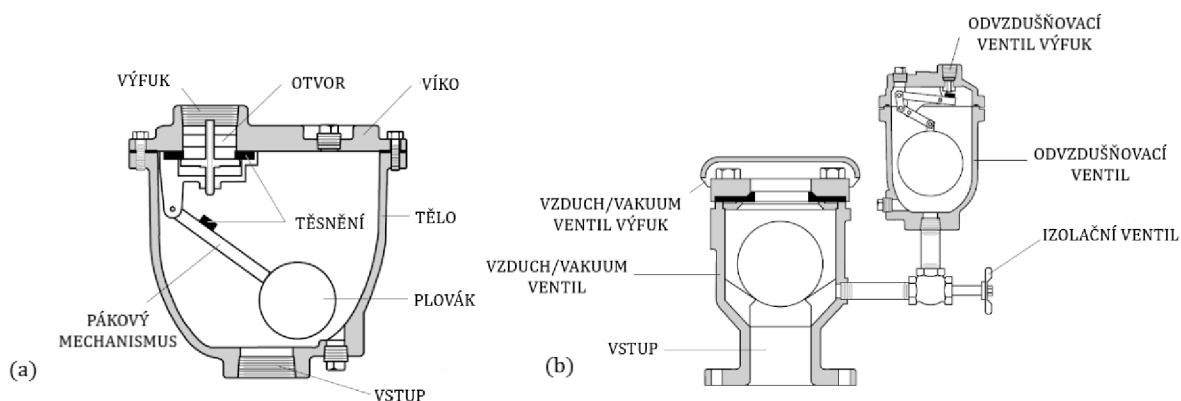
Jsou k dispozici v mnoha různých provedeních a konfiguracích pro širokou škálu aplikací. Jejich funkcí je automaticky přijímat a uvolňovat vzduch bez pomoci obsluhy. Vzduchové ventily jsou zhotoveny z litiny nebo korozivzdorné oceli, která se používá u ventilů pro úpravu vody a odpadních vod [14].

Vzduchové ventily jsou k dispozici ve třech základních konfiguracích (obr. 2-10, obr. 2-11):

- odvzdušňovací ventily,
- vzduch/vakuové ventily a
- kombinované vzduchové ventily.



**Obr. 2-10** (a) Odvzdušňovací ventil; (b) Vzduch/vakuový ventil

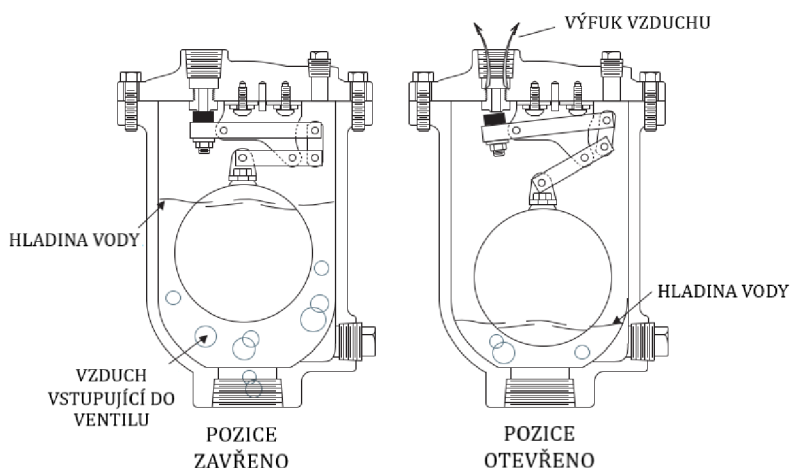


**Obr. 2-11** (a) Kombinovaný ventil s jedním tělem; (b) Kombinovaný ventil s dvojitým tělem

### a) Odvzdušňovací ventily

Odvzdušňovací ventily jsou pravděpodobně nejrozšířenějším typem vzduchového ventilu a vyznačují se malými otvory. Součástí ventilu je i váhový plovák a pákový mechanismus. Kombinace těchto tří prvků umožňuje vzduchovým ventilům vypustit vzduch nebo plyn při plném provozním tlaku. Vzhledem k tomu, že odvzdušňovací ventily mají otvory o průměru od 1,6 mm do 25 mm, mají omezenou kapacitu pro příjem a odsávání vzduchu. Odvzdušňovací ventily automaticky odvzdušňují malé kapsy nahromaděného vzduchu nebo plynů, které se nahromadí v potrubí.

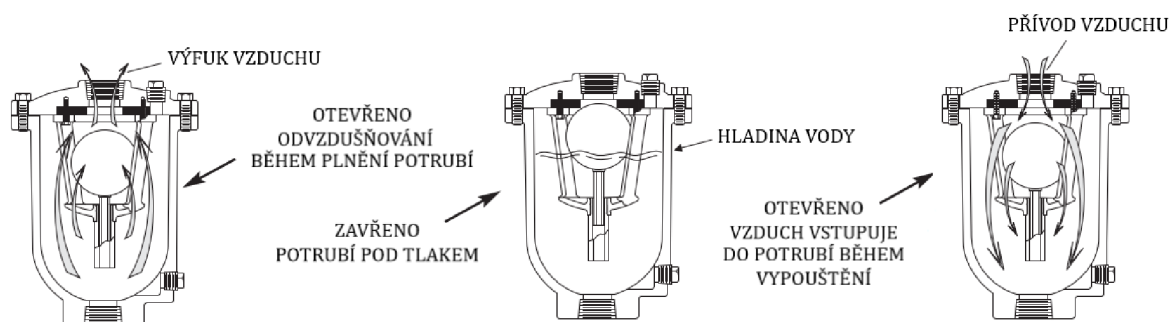
Při instalaci jsou ventily pro odvzdušnění „normálně otevřené“ a vypouštějí vzduch (obr. 2-12). Teprve když kapalina vstoupí do ventilu, začne se plovák zvedat díky vztlakové síle a ucpává otvory ventilu. Naopak, když se ve ventilovém těle akumuluje vzduch, který nahrazuje vodu ve ventilu, plovák poklesne a otevře ventil. Opětovné otevření odvzdušňovacího ventilu pod provozním tlakem vyžaduje správné navržení plovoucí hmotnosti a pákového mechanismu, tak aby umožnil ventilu otevřít libovolný tlak až do maximálního pracovního tlaku ventilu [14], [15].



Obr. 2-12 Princip odvzdušňovacího ventilu

### b) Vzduch/vakuové ventily

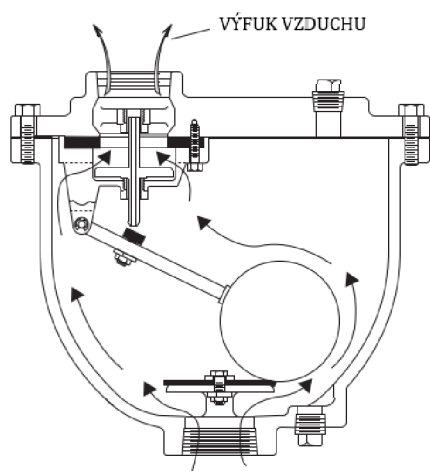
Vzduch/vakuové ventily jsou navrženy tak, aby automaticky vypouštěly velké množství vzduchu během plnění potrubí a automaticky přijímaly velké množství vzduchu při poklesu vnitřního tlaku pod atmosférický tlak. Typický vzduch/vakuový ventil je znázorněn na obr. 2-13. Tyto ventily jsou charakterizovány otvory mezi 13 mm až 500 mm. Vzhledem k tomu, že se potrubí naplní vodou, musí být vzduch v potrubí odpouštěn plynule a rovnoměrně, aby se minimalizovaly tlakové rázy. Stejně tak při výpadku proudu nebo při odtoku potrubí musí být do potrubí vzduch připuštěn k zabránění tvorbě vakua, aby nedošlo k poruše potrubí nebo přepětí v systému. Obsluha vzduch/vakuového ventilu je podobná ventilu pro uvolnění vzduchu, s výjimkou, že průměr otvoru je podstatně větší a nebude se otvírat pod tlakem. Vzduch/vakuový ventil je „normálně otevřený“ a je navržen tak, aby odvzdušňoval velké množství vzduchu přes otvor. Jakmile voda vstoupí do ventilu, plovák se zvedne a zavře odvzdušňovací otvor. Ventil zůstane uzavřen dokud tlak systému neklesne téměř na nula psi. Zatímco vzduch/vakuové ventily vyčerpají velké množství vzduchu při spuštění, je třeba si uvědomit, že nedokáží plynule uvolňovat vzduch během provozu systému. Pro tuto funkci je nutný odvzdušňovací ventil [15].



Obr. 2-13 Princip vzduch/vakuového ventilu

### c) kombinované vzduchové ventily

Třetím typem vzduchového ventilu je kombinovaný vzduchový ventil, který je nejčastěji používaným ventilem. Provádí funkce vzduch/vakuového ventilu (odvádějí velké množství vzduchu při rozběhu, přijímají vzduch při přerušení systému) a odvzdušňovacího ventilu (uvolňují vzduch nepřetržitě během provozu). Kombinované vzduchové ventily jsou k dispozici v konfiguraci s jedním tělem, kde jeden kus obsahuje jak komponenty pro uvolňování vzduchu, tak vzduch/vakuový ventil, nebo jako konstrukci s dvojitým tělem (obr. 2-11), kde je odvzdušňovací ventil veden stranou vzduch/vakuového ventilu. Konfigurace s jedním tělem je kompaktnější a hospodárnější. Konfigurace s dvojitým tělem poskytuje dva nezávislé ventily, takže pokud je prováděna údržba na odvzdušňovacím ventilu, vzduch/vakuový ventil stále chrání potrubí. Ventil s dvojitým tělem také nabízí mnohem širší rozsah možností dimenzování [13], [14].



Obr. 2-14 Princip kombinovaného vzduchového ventilu

## 2.5 Těsnění

Primární funkcí těsnění je omezit ztrátu maziva, kapaliny nebo plynu ze systémů a zabránit kontaminaci systémů provozním prostředím [16]. Účinnost těsnění se měří z hlediska úniku. Tudíž nulové těsnění je takové, které teoreticky neumožňuje proniknutí tekutiny přes jeho rozhraní nebo těsnicí kontaktní plochu [17].

Při volbě druhu těsnění je nutno brát v úvahu faktory, které ovlivňují funkčnost správného těsnění:

- druh kapaliny, která má být utěsněna
- úroveň tlaku na obou stranách těsnění,
- povaha relativního pohybu mezi těsnícím a spojovacím dílem,
- úroveň požadované těsnění,

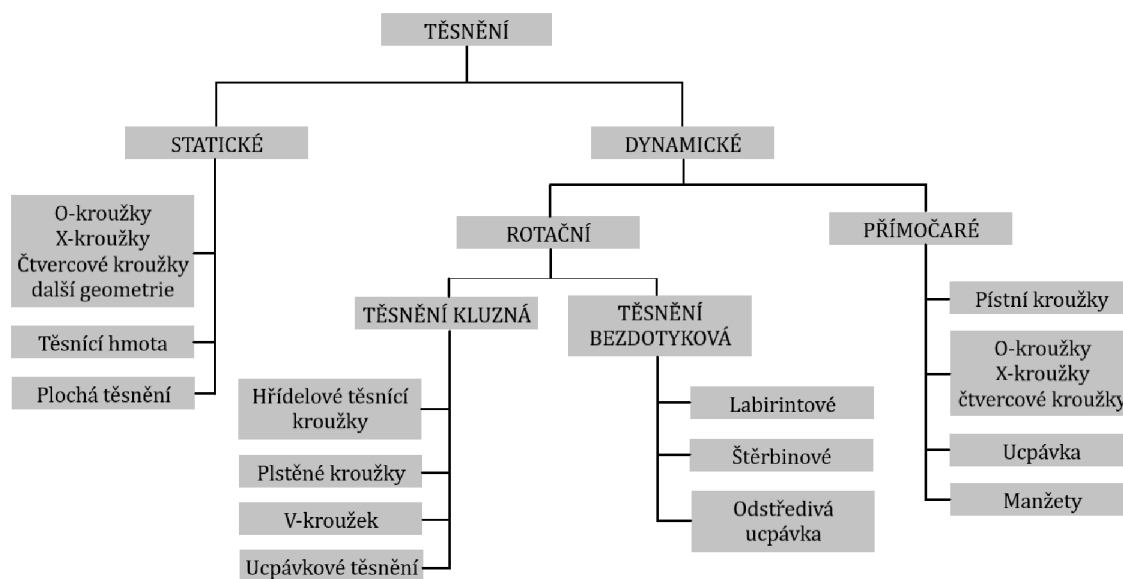


- provozní teploty,
- životnost, provozuschopnost,
- celkové náklady [18].

## 2.5.1 Druhy těsnění

V závislosti na provozních podmínkách a požadavcích se těsnění dělí na dvě základní skupiny.

- Statické, kde těsnění je umístěno mezi dva povrchy, které se mezi sebou nepohybují.
- Dynamické, kde těsnění je umístěno mezi dva povrchy, které vůči sobě konají pohyb rotační nebo posuvný [18].



Obr. 2-15 Druhy těsnění

## 2.5.2 Statické těsnění

Statické nebo nepohyblivé těsnění je takové, které zabraňuje průniku látek mezi vzájemně nepohyblivými díly. I když jsou povrchy teoreticky stacionární, ve skutečnosti nejsou stacionární kvůli vibracím, tlakovým pulzacím, uložení těsnění a tak dále. Statické těsnění převážně utěšňují v rovině umístěné v pravém úhlu ke středové ose těsnění. Požadavky na statické těsnění nejsou tak přísné jako u dynamických těsnění. Povrchová úprava drážky může být horší. Využívá se také vyššího stlačení, protože tření není ovlivňujícím faktorem.

Nejběžnějšími příčinami úniku statického těsnění jsou poškození při instalaci, vytlačování, přeplnění a použití nesprávného materiálu těsnění. Při montáži může dojít k poškození těsnění, a proto je nutno věnovat pozornost tomu, aby bylo těsnění správně instalováno a během instalace nebylo stříženo, zkrouceno nebo se jinak nepoškozovalo. Tato opatrnost šetří peníze a čas.

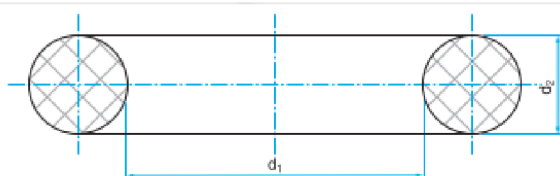
Vytlačování nebo tendence materiálu těsnění vytéct z těsnicího pouzdra je obvykle spojena s dynamickým těsněním, protože dochází k relativnímu pohybu mezi komponentami a tlakové pulzace mohou vynutit statické těsnění do vůle mezi těsnicími plochami. Aby se tomu zabránilo, je mezera mezi těsnicími plochami minimalizována. Jako statické těsnění by se měl používat tvrdší elastomer. Těsnicí povrchy by neměly překročit drsnost  $64 \mu\text{m Rq}$ , což je vyjádření efektivní průměrné hloubky povrchových nepravidlostí a nejlépe by mělo být  $32 \mu\text{m Rq}$  nebo lepší. Těsnění elastomeru musí odpovídat plochám, které těsní, a pokud je těsnicí plocha velmi hrubá, nedochází ke shodě a vznikne netěsnost.

Statické těsnění zahrnují plochá těsnění, O-kroužky, čtvercové kroužky, X-kroužky, T-těsnění a mnoho dalších geometrií [17].

#### a) O-kroužky

O-kroužek je těsnění z pryže určené k zabránění nežádoucí propustnosti nebo ztráty kapaliny či plynu. Tvarově je O-kroužek anuloid, tj. prstenec s kruhovým průřezem. Zástavbový prostor, většinou drážka s těsněnou protiplochou, slouží k uložení O-kroužku. Spojení těchto prvků – O-kroužek a těsněný prostor vytváří utěsnění O-kroužkem.

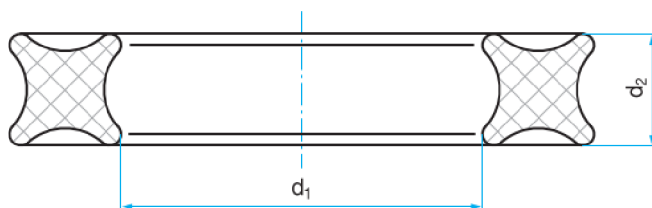
O-kroužek je vyráběn ze syntetických kaučuků v přesných rozměrových tolerancích a vysoké povrchové kvalitě. Jeho těsnicí schopnost je dána axiálním nebo radiálním stlačením průřezu O-kroužku. Pryžový materiál se chová jako nestlačitelná vysoce viskózní kapalina s vysokým povrchovým napětím. Vlivem působícího tlaku a uložení dochází k tvarovým změnám průřezu O-kroužku. Na stykových těsněných plochách mezi O-kroužkem a zástavbovým prostorem je předpětí zvyšováno působícím provozním tlakem. Těsnicí výsledek je ovlivněn zástavbovým prostorem a výběrem vhodné pryže. Pokud je to možné, doporučuje se používat O-kroužek s největším průřezem, který konstrukce ještě umožňuje. Volba tvrdosti materiálu O-kroužku je závislá na působícím tlaku, tolerančních úchylnkách vzájemně těsněných ploch (určují velikost těsněné mezery) a drsnosti jejich povrchu. Při konstrukci se musí brát na zřetel také provozní deformace strojních dílů v těsněném uzlu, včetně těsněné mezery a drsnosti povrchu kontaktních ploch při montáži nebo funkci [19].



Obr. 2-16 O-kroužek

## b) X-kroužky

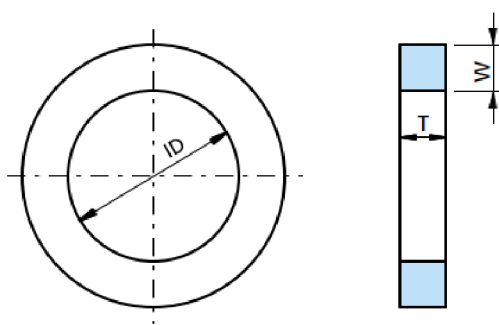
Těsnění prostřednictvím X-kroužků bylo vyvinuto hlavně z toho důvodu, aby se zamezilo přetáčení kroužků v drážce. Základem X-kroužku je přibližně čtvercový průřez s prstencovými drážkami. Šířka a tloušťka u X-kroužků odpovídá rozměrům pro klasické O-kroužky, jsou tedy zaměnitelné. Vhodné jsou pochopitelně pouze do pravoúhlých zástavbových prostorů. Výhodou v porovnání s klasickými O-kroužky je především jejich větší možnost použití pro rotační těsnění, větší stabilita v zástavbovém prostoru, menší radiální předpětí v drážce a tudíž menší tření a opotřebení. Mezi těsnícími bříty se může tvořit mazací film [19].



Obr. 2-17 X-kroužek

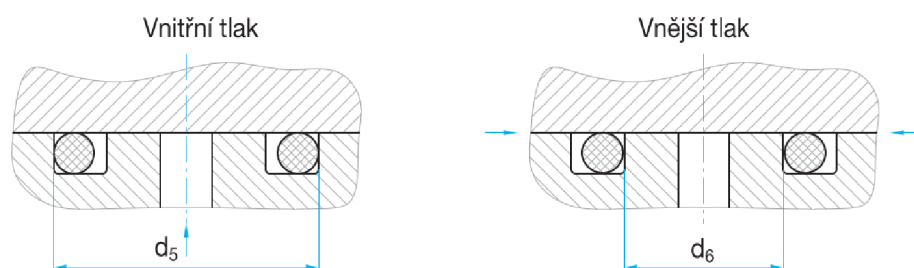
## c) Čtvercové kroužky

Čtvercový kroužek je dobrá alternativa k O-kroužku jako axiální statické utěsnění v případech, kdy jsou zapotřebí zvláštní požadavky. Aplikace a manipulace je srovnatelná s aplikací O-kroužků. Čtvercový tvar těsnění zůstává prakticky konstantní i při vysokých tlacích [20]. Ačkoli O-kroužek byl nejoblíbenějším tvarem pro statické těsnění, někteří inženýři naznačují, že čtvercové kroužky jsou účinnější statické těsnění, protože umožňují širší kontaktní plochu těsnění a skoro nulový únik kapaliny. Čtvercový kroužek byl zpočátku navržen jako dynamické těsnění, které překonalo tendenci O-kroužku kroutit se. Kvůli své geometrii vytváří čtvercový prstenec širší stopu a v dynamických situacích se stejným stlačením mají vyšší tření než O-kroužek. Proto se používá pouze ve statických aplikacích, kdy tření není důležitým faktorem [17].



Obr. 2-18 Čtvercový kroužek

U čtvercových kroužků nebo O-kroužků v aplikacích čelního těsnění by měla být drážka navržena tak, aby zajistila těsnící kontakt s nízkotlakou stranou sestavy drážky. U aplikací s vnitřním tlakem je utěsněna těsnící drážka a vnější průměr těsnění. Pokud je tlak vnější, musí být těsnění na vnitřním průměru (obr. 2-19) [17].



Obr. 2-19 Axiální instalace statických kroužků

#### d) Plochá těsnění

Ploché těsnění je stlačitelný materiál nebo kombinace materiálů, které při sevření mezi dvěma stacionárními členy zabraňuje průchodu média přes tyto členy. Zvolený těsnící materiál musí být schopen utěsnit proti sobě přiléhající povrchy v provozních podmínkách, které se mohou lišit v závislosti na změnách teploty a tlaku. Na těsnění musí působit dostatečně vysoké tlakové zatížení, aby došlo ke stlačení těsnění na tolik, aby se vyplnily případné nedokonalosti na povrchu součástí. Těsnění lze rozdělit do tří kategorií: nekovové (měkké), polokovové a kovové.

Nekovová plochá těsnění jsou nejběžnější statická těsnění, která jsou hojně využívána v nejrůznějších průmyslových odvětvích a prostředích, zejména v těch, kde je postačující nízká či střední těsnivost. Tato těsnění jsou vhodná pro nízké i vysoké teploty v závislosti na materiálu. Jejich použití je zpravidla omezeno pro nízké až střední tlaky kapalin. Současná nekovová těsnění zahrnují široké spektrum materiálů se širokou škálou fyzikálních vlastností, které mohou být vyrobeny z velkého množství elastomerů, bezazbestových těsnících materiálů, PTFE, grafitu a dalších materiálů, proto jsou díky materiálu a nákladům na výrobu z těchto tří kategorií nejlevnější. Plochá těsnění jsou vyráběna ve standartních nebo nestandardních provedeních libovolného tvaru.

Polokovové těsnění se vyrábí kombinací měkkých materiálů s kovovou součástí. Kov je určen k tomu, aby zvyšoval pevnost a pružnost, zatímco nekovová část zajišťuje lepší těsnící vlastnosti a schopnost přizpůsobit se. Polokovová těsnění mohou být vhodná pro nízkotlaké i vysokoteplotní a tlakové aplikace v závislosti na použitých materiálech a konfiguraci. Vyrábějí se spirálově vinuté těsnění, hřebenová těsnění, těsnění obalovaná kovem a další.

Kovová těsnění mohou být vyrobena z jediného kovu nebo z kombinace kovových materiálů v různých tvarech a velikostech. Kovová těsnění jsou vhodná pro vysokoteplotní a tlakové aplikace. Pro uložení těsnění je třeba vyššího zatížení. Aby kroužky dobře těsnily, je třeba věnovat pozornost úpravě povrchu v místě kontaktu těsnění a příruby. Malá těsnicí plocha a vysoký kontaktní tlak zaručují vynikající těsnivost. Kovové těsnicí kroužky jsou vyráběny v nejrůznějších profilech a rozměrech např. plochý, oválný, kulatý, oktagonální průřez, čočková těsnění, spoje prstencového typu a svařovaná těsnění [21], [22], [23].

### 2.5.3 Dynamické těsnění

Dynamické těsnění slouží k utěsnění kapalin a udržení tlaku mezi povrchy součástí, které se vzájemně vůči sobě pohybují. Dynamická těsnění se nacházejí u součástí, která konají pohyb rotační nebo reciproční. Požadavky na těsnění jsou často protichůdné a vyžadují kompromis. Efektivní těsnění občas mohou vyžadovat vysoký kontaktní tlak mezi stacionárním komponentou a pohybující se komponentou, ale také je žádoucí minimální opotřebení pro dlouhou životnost těsnění [17].

Nejběžnějším těsněním je O-kroužek. Je to proto, že je snadno dostupný v široké škále velikostí a materiálů. Jedná se o levné těsnění, které se snadno instaluje, a hlavně je velmi účinné. Při střídavém pohybu vzájemně těsněných částí těsnicí schopnost a životnost O-kroužku určuje více faktorů, než je tomu u nepohyblivého utěsnění. Obecně lze použít O-kroužky k účinnému utěsnění až do 10 MPa. Stlačení průřezu O-kroužku je kvůli třecím odporům menší než u nepohyblivého utěsnění. Na kroužek se přivodí zatížení, které vyvolá 15-30% stlačení kroužku. O-kroužky vyžadují malé zástavbové prostory. S výhodou jsou používány zvláště pro malé zdvihy a relativně malé průměry. Nevýhodou O-kroužků je, že se při vysokých hodnotách tlaku vlivem velkého tření mají tendenci kroutit. Těsnicí kroužky jsou hlavně z elastomerů a mohou být různých geometrií, která byla navržena především tak, aby vyhovovala nedostatkům O-kroužků, mohou to být T-těsnění, X-kroužky, D-kroužky a mnoho jiných. Výběr tvrdosti materiálu se řídí podle provozního tlaku a podle druhu mechanického použití [17, 19].

## 2.6 Vyhřívání

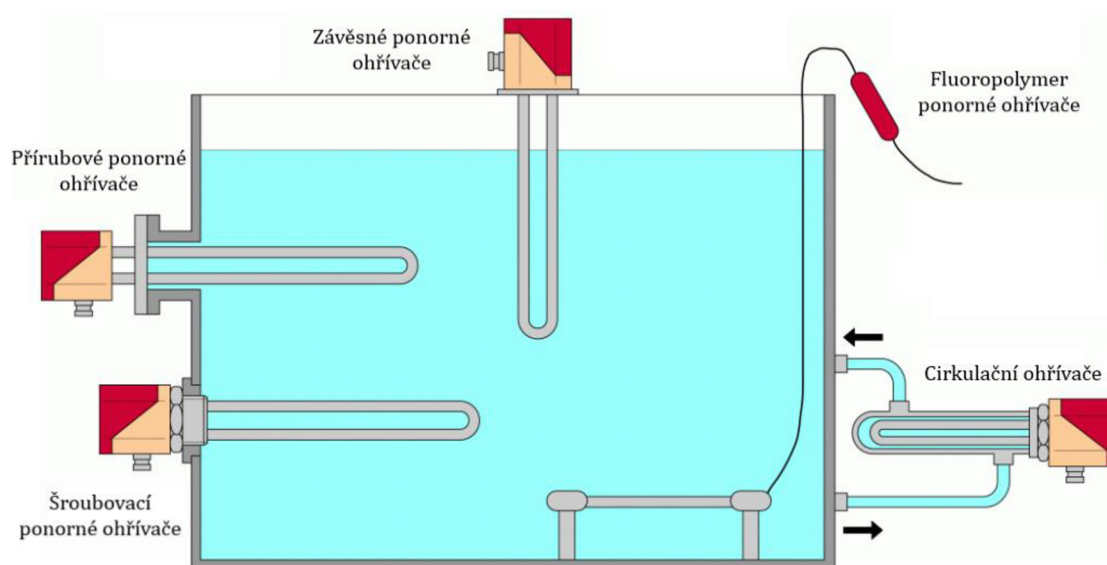
Jelikož u tribometru bude zkoumáno tření synoviálního kloubu, a bude potřeba se co nejvíce přiblížit reálným podmínkám v lidském těle, bude muset být mazivo ohříváno na teplotu lidského těla, tedy něco okolo 37 °C. Proto se bude muset navrhnout vhodný ohřev lázně, který zajistí požadované podmínky.

Jakékoli zařízení pro výrobu tepla v elektrických ohřivačích se nazývá topné těleso. Všechny topné prvky mají stejný cíl: přeměnit elektrickou energii na energii tepelnou, a to až do 700 °C a potom tuto tepelnou energii převést do pevných látek, kapalin nebo plynů (včetně vzduchu) prostřednictvím konvekce, vedení nebo záření. Topná tělesa se vyrábějí v řadě různých tvarů a velikostí a s různými konfiguracemi a materiály. Topná tělesa se řídí teorií Jouleova tepla. Elektrická energie prochází vysoce odporovým prvkem, kde se elektrická energie pomocí odporu tělesa přemění na tepelnou energii. Množství vyrobené tepelné energie závisí na velikosti elektrického proudu, odporu vodiče a čase, po kterém vodičem protéká proud. Velikost elektrického odporu je přímo úměrné délce vodiče a měrného elektrického odporu materiálu a nepřímo úměrné obsahu průřezu vodiče. Zatížení prvku v kilowattch představuje tolik elektrické energie, kterou topný článek snese [24].

Ohřev kapaliny může probíhat ve dvou formách, buď přímým ohřevem nebo nepřímým ohřevem.

### 2.6.1 Přímý ohřev kapalin

Ohřev kapaliny přirozenou konvekcí (statickou tekutinou) nebo nucenou konvekcí (cirkulační kapalinou) se provádí pomocí elektrických odporů v přímém kontaktu s kapalinou (obr. 2-20) [25].



Obr. 2-20 Druhy topných těles pro přímý ohřev kapaliny

## Ponorné ohřivače

Ponorné ohřivače nabízejí rychlé a účinné vytápění a jsou cenově výhodným řešením. Mezi materiály, které jsou často zahřívány ponornými topnými tělesy, jsou mírné kyseliny, oleje, voda, vzduch, soli, pokovovací lázně a různé chemické roztoky. Protože ponorná topná tělesa se používají k ohřívání mnoha korozivních látek, jsou často pokryta ochranným vnějším pláštěm. Široká škála použitých materiálů pláště zahrnuje titan, nerezovou ocel, slitinu Incoloy, měď, mosaz a litinu. Pro různé látky však fungují nejlépe různé materiály pláště. Typická konstrukce ponorného ohřivače zahrnuje trubkový topný prvek a elektrickou svorku, která zůstává mimo látku. Ponorné topná tělesa se dodávají ve třech hlavních typech: závěsné, přírubové a závitové.

Závěsné provedení ponorných topných těles je určeno pro kontejnery, ve kterých nelze snadno instalovat ponorné topné články. Ponorný ohřivač je tedy zavěšen přes horní část nádoby, což umožňuje, aby topný prvek ležel podél strany nebo na dně nádoby.

Ohřivače s přírubou vedou skrz stěnu nádoby. Jsou obvykle kulaté nebo čtvercové a jsou svařovány nebo pájeny na příruby, které se poté přišroubují na odpovídající přírubu, která byla přivařena ke stěně nádoby. Tento způsob ponorného ohřivače je nejběžnější metodou používanou pro ohřev kapalin.

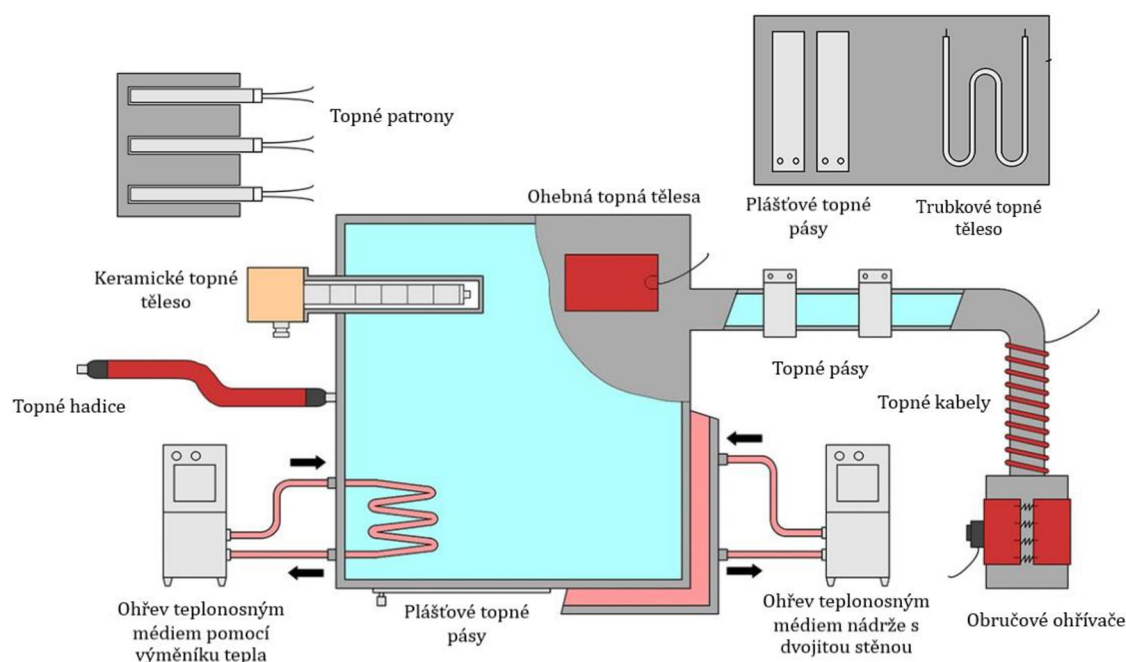
Ponorné ohřivače se závitěm nebo se šroubovým uzávěrem se velmi podobají ponorným ohřivačům s přírubou. Namísto příruby je trubkovité ohřivací těleso našroubováno do nádoby skrz závitový otvor ve stěně nádoby. Ponorná topná tělesa se šroubovým uzávěrem pracují nejlépe v aplikacích ohřevu užitkové vody a ochrany před mrazem [26].

Cirkulační ohřivače jsou určeny pro ohřev cirkulujících kapalin. Jsou tvořeny kotlem obsahujícím 1 až 4 nádoby DN20 až DN80 z oceli nebo nerezové oceli. Vstup a výstup je pomocí šroubového nebo přírubového spoje [27].

Odvětví, která využívají ponorné ohřivací prvky, zahrnují hlavně automobilový průmysl, komerční výrobu, elektroniku a v letectví [26].

## 2.6.2 Nepřímý ohřev kapalin

Kapalina se zahřívá přes stěny nádrže, potrubí nebo pláště. Zdroj tepla není v přímém kontaktu s kapalinou (obr. 2-21) [25].



Obr. 2-21 Druhy topných těles pro nepřímý ohřev kapaliny

### a) Trubková topná tělesa

Jedná se o velmi běžný typ topného tělesa. Trubková topná tělesa mohou být ohýbána ve standardních nebo vlastních tvarech, aby vyhovovaly konkrétní aplikaci, tato flexibilita odpovídá za velkou popularitu trubkových ohřivačů. Jsou velmi univerzální, mohou být použity k vedení tepla přímo nebo vzduchem a mohou být dokonce použity jako ponorné ohřivače. Trubková topná tělesa jsou obvykle konstruována z vnitřního vodivého materiálu a ochranného pláště. Některé z těchto materiálů zahrnují nikl, ocel, hliník, měď, mosaz a další elektricky a tepelně vodivé kovy. Vzhledem k jejich všestrannosti lze trubkové ohřivače nalézt v mnoha odvětví průmyslu a u spotřebních výrobků jako například v průmyslových pecích a sušárnách, v myčkách nádobí, v prostorových ohřivačích a v celé řadě dalších zařízení a přístrojů [28].

### b) Topné patrony

Topné patrony se nejčastěji používají pro kontaktní ohřev kovových částí, kdy jsou vkládány do přesně opracovaných otvorů. Možnosti jejich uplatnění jsou však mnohem širší. Topné patrony jsou schopné dodávat mimořádně velký výkon při zachování malých rozměrů. Jejich robustní konstrukce je trvanlivá a velmi odolná. Kovový plášť a vnitřní těsnění chrání vnitřní topný drát před oxidací a proti mechanickému poškození. Topný prvek je drát z austenitické slitiny NiCr 80-20. Má maximální provozní teplotu přibližně 1200 °C a tavnou



teplotu 1400 °C. Topný drát je navinutý na keramickém jádře. Plášť topné patrony bývá nejčastěji zhotovený z vysokoteplotní nerezové oceli s teplotní odolností 800 až 1000 °C. Patrony určené pro nejvyšší zatížení jej mají precizně broušený. Spodní disk je vodotěsně přivařený. Vnitřní prostor patrony je utěsněn jemnozrnným oxidem hořečnatým.

Tento materiál má velmi dobrou teplotní vodivost a zároveň je dobrý elektrický izolant. Lankové přívodní vodiče jsou nakontaktovány buďto uvnitř nebo vně patrony. Topné patrony se vyrábějí v několika konstrukčních provedeních, které se odlišují maximální výkonovou hustotou. Jedná se o tzv. vysoko, středně a nízko výkonné provedení. Rozměry a výkony topných patron jsou standardizovány. Kromě standardních typů se běžně dodávají i zakázková a speciální provedení [29].

#### c) Ohebná topná tělesa

Ohebná topná tělesa jsou určena pro ohřev plochých nebo trojrozměrných tvarových dílů. Navrhují se tak, aby se snadno přizpůsobila tvarům a rozměrům vyhřívaného objektu. K jejich hlavním přednostem patří vynikající rovnoměrnost teploty a rychlý náběh. Volitelně mohou být vybavena snímači teploty nebo termostatem. Pro snadnou instalaci slouží např. samolepicí povrch, šněrovací očka, háčky, připevňovací pásy nebo suchý zip. Existuje několik standardních provedení, ale ohebná topná tělesa se ve většině případů vyrábí na míru přesně podle požadavků. Topný element je drát z Ni-Cr nebo je vytvořen leptáním fólie z odporové slitiny. Jejich silikonová izolace velmi dobře odolává vlhkosti a chemickým látkám. Maximální pracovní teplota je 200 °C [30].

#### d) Keramická topná tělesa

Topné prvky keramických topných těles přicházejí do přímého nebo téměř přímého kontaktu s oblastí nebo látkou, kterou ohřívají. V některých případech mohou být keramická topná tělesa použita v ponorných ohříváčích. Keramická topná tělesa jsou schopna vytvářet vysoké, rovnoměrně rozložené teplo. Bývají považována za lepší topná tělesa než topná tělesa s drátem, protože mají vyšší tepelnou kapacitu a rovnoměrnost, s jakou jsou schopny rozdělovat teplo. Také umožňují ohřívát déle než topná tělesa s drátem a jsou méně náchylné k požárům. Keramická topná tělesa jsou účinné díky vysokému elektrickému odporu. Jsou odolnější a trvanlivější než jiné druhy tepelných prvků. Keramická topná tělesa mohou být v obdélníkových, čtvercových, plochých, válcových nebo částečných válcových tvarech. Tvar a velikost daného keramického topného tělesa závisí na požadavcích jeho použití. Všechny topné prvky by měly být vybírány na základě požadavků jejich použití, aby byl zajištěn bezpečný a efektivní provoz. Keramické topné prvky mohou být použity ve výrobcích, pro tavení, vaření, sušení nebo ohřívání látek. Mnoho komerčních a spotřebních výrobků také obsahuje keramické topné prvky, jako jsou vysoušeče vlasů, ohříváče prostoru, toustovače a žehličky [31].

#### e) Plášťové topné pásy

Jedná se o jednoduchý způsob, jak efektivně ohřívat plochy povrchu součástí. Topné pásy lze snadno ovládat pomocí regulátoru teploty, které mohou být instalovány na povrchu, který se ohřívá. Pásové ohřivače se skládají z topného tělesa, ochranného pouzdra a montážního materiálu. Používají vysoce kvalitní oxid hořečnatý, který se používá v trubkových prvcích, které umožňují efektivní přenos tepla, kdy teploty dosahují až 250 °C. K povrchu součásti mohou být upnuty nebo přišroubovány. Využívají se hlavně pro kontaktní povrchové vytápění velkých ploch. Výhodou je poměrně levný způsob vytápění povrchů [32].

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Jak bylo popsáno výše v rešerši, biotribologie zkoumá tribologické procesy v živých organismech jak v přirozeně vyskytujících se tkáních, tak i procesy s materiály umělými. Hlavními cíli studií je zkoumání tření, mazání a opotřebení v náhradách velkých kloubů člověka a analýza tření a mazání kloubní chrupavky. Pochopení problematiky tření a mazání kloubní chrupavky pomůže k léčbě kloubů zasažených různými onemocněními jako je chondropatie, osteoartritida či artróza, které vyvolávají bolesti a omezují pohyblivost kloubů. Tyto onemocnění se dají léčit několika způsoby, které záleží na typu a rozsahu onemocnění. V případě menšího rozsahu onemocnění kloubů se provádí léčba pomocí viskosuplementace, která nijak chirurgicky nezasahuje do kloubů. Tímto způsobem lze zpomalit či stabilizovat vývoj onemocnění a tím i oddálit nutnost operace totální endoprotézy. V krajních případech, které se snažíme co nejvíce oddálit, je nutná operace totální endoprotézy.

Jedna z hlavních částí problematiky tření kloubní chrupavky je určení součinitele smykového tření a opotřebení, které se měří experimentálně pomocí tribometru. V kap. 2.3.1 byly vypsány různé druhy tribometrů. Pro měření tření v kloubní chrupavce se používají většinou speciálně navržené tribometry, které pracují nejčastěji na principu pin-on-disk, pin-on-plate nebo kyvadla. Chrupavka může být v konfiguraci pinem i deskou/diskem, druhý materiál bývá nejčastěji ze skla, kovů-hlavně oceli (nerezové), hydrogelu nebo opět z chrupavky. Třecí kontakt se může měřit bez maziva nebo s mazivem. Tribometr na ÚK navíc propojuje měření koeficientu smykového tření s optickou vizualizací kontaktu, díky kterému se bude moct popsat tvorba mazacího filmu v synoviálním kloubu. Aby byla umožněna vizualizace mazacího filmu v kontaktu, musí být poskytnut náhled do místa kontaktu, což umožní monitorovat procesy a měřit tloušťku mazacího filmu. Kontakt musí být plně zaplavený a mazivo v mazací lázni temperováno na teplotu lidského těla, aby výsledky experimentu byly co nejvíce podobné realitě.

V našem případě je na pracovišti ÚK k dispozici tribometr typu pin-on-plate (princip popsán v kap. 2.3.1), kdy pin bude z chrupavky a deska ze skla nebo plexiskla, aby byla možnost současně vizualizovat kontakt a měřit třecí síly. Pro experiment byla jako vizualizační metoda zvolena fluorescenční mikroskopie. Pin bude umístěn ve vaně, ve které bude přítomno mazivo, které bude ohříváno na požadovanou teplotu.

Při návrhu ovšem nebyla dořešena konstrukce od vzdušnění vany zajišťující přítomnost maziva v kontaktu kloubu, kdy se při doplňování maziva do vany v místě kontaktu tvoří vzduchové bubliny, které jsou nepřijatelné ze dvou důvodů. Prvním důvodem je, že ovlivňují přesnost měření, protože nedochází k plně zaplavenému kontaktu. Druhým důvodem je, že bubliny negativně ovlivňují vizualizaci mazacího filmu v kontaktu synoviálního kloubu. Je nutné navrhnout novou vyhřívanou vanu na mazivo s možností od vzdušnění a implementovat tento návrh do stávající konstrukce zařízení, případně upravit některé stávající díly zařízení. Z důvodu montáže a demontáže ramene s pinem bude vana složena ze dvou hlavních částí, z vany a víka vany, které budou v dělicí rovině utěsněny. Další těsnění se bude nacházet mezi víkem vany a pohybují se deskou. Hlavním cílem práce tedy je konstrukční návrh vyhřívané vany na mazivo umožňující od vzdušnění náplně a úprava souvisejících částí zařízení.

Aby byl splněn hlavní cíl práce, je nutné splnit několik dílčích cílů:

- Rešerše existující literatury technických řešení,
- Návrh od vzdušňovacího systému vany,
- Návrh utěsnění dělicích rovin vany,
- Návrh utěsnění vany a pohyblivého segmentu skla,
- Návrh vyhřívání vany,
- Návrh úprav nutných pro implementaci nové vany do stávající konstrukce,
- Vytvoření 3D modelu,
- Vytvoření výkresové dokumentace.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

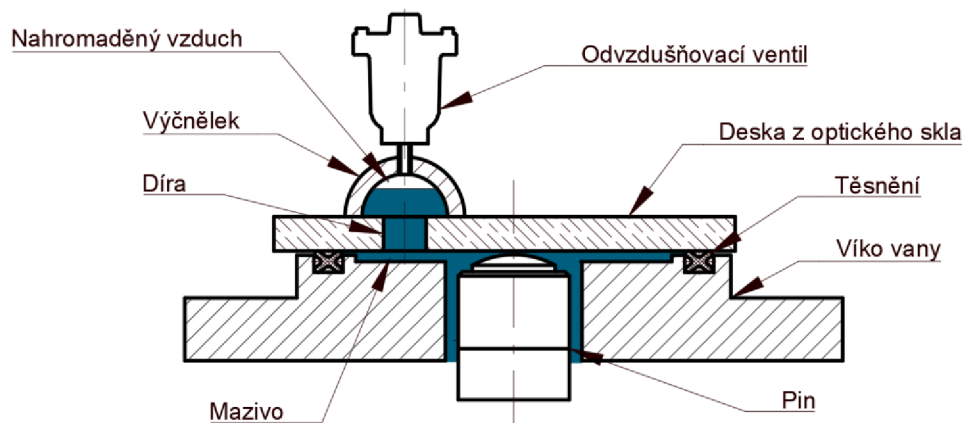
Vzhledem k tomu, že u vany bude potřeba vyřešit problémy s odvzdušněním, těsněním a vyhříváním, bude každé koncepční řešení rozděleno do těchto tří oblastí, kde v každé části bude popsáno, jak lze daný problém řešit.

### 4.1 Odvzdušnění

Jak bylo psáno výše v rešerši (kap. 2.4.1), potrubí, v našem případě vana, není před plněním prázdná, ale je plná vzduchu. Při plnění vany mazivem nemá možnost vzduch kudy ze systému uniknout pryč, a proto vznikají vzduchové bubliny. Ty se nacházejí v nejvyšším bodě systému, protože vzduch má menší hustotu než testovací mazivo. U vany je problém v tom, že nejvyšší místo tvoří celá vodorovná plocha desky z optického skla, takže se bubliny nacházejí libovolně po celé ploše desky, a to i v místě kontaktu vzorku s deskou. Tomuto stavu se musíme vyhnout, neboť vzduchové bubliny ovlivňují přesnost měření, protože nedochází k plně zaplavenému kontaktu. Dále vzduchové bubliny negativně ovlivňují vizualizaci mazacího filmu v kontaktu synoviálního kloubu.

#### 4.1.1 Odvzdušnění vysokým bodem

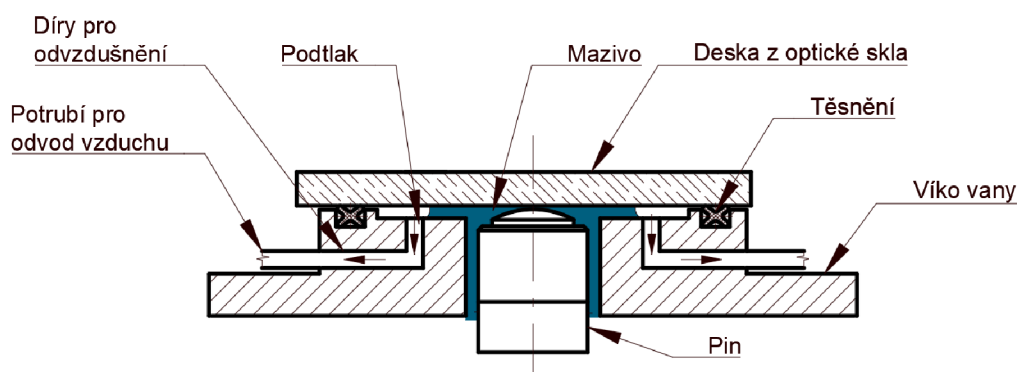
Toto koncepční řešení využívá vlastnosti, že vzduch má menší hustotu než mazivo a tvoří se v nejvyšších místech soustavy (obr. 4-1). Do desky z optického skla, která je uchycena v rámečku vozíku, se vyrobí díra, na kterou se přilepí nebo jinak upevní součást ve tvaru polokoule nebo jiného vhodného tvaru. Tento „výčnělek“ bude sloužit jako nejvyšší místo soustavy, do kterého se během plnění vany mazivem budou soustředit vzduchové bubliny. Ty se následně automaticky odstraní pomocí odvzdušňovacího ventilu umístěného v nejvyšším bodě výčnělku. Použije se odvzdušňovací ventil, protože jak bylo psáno v kapitole 2.4.3, ventily automaticky odvzdušňují malé kapsy nahromaděného vzduchu nebo plynů, které se nahromadí v potrubí. Při instalaci jsou ventily pro odvzdušnění „normálně otevřené“ a vypouštějí vzduch. Teprve když kapalina vstoupí do ventilu, začne se plovák zvedat díky vztlakové síle a ucpává otvory ventilu.



Obr. 4-1 Schéma odvzdušnění vysokým bodem

#### 4.1.2 Odvzdušnění podtlakem

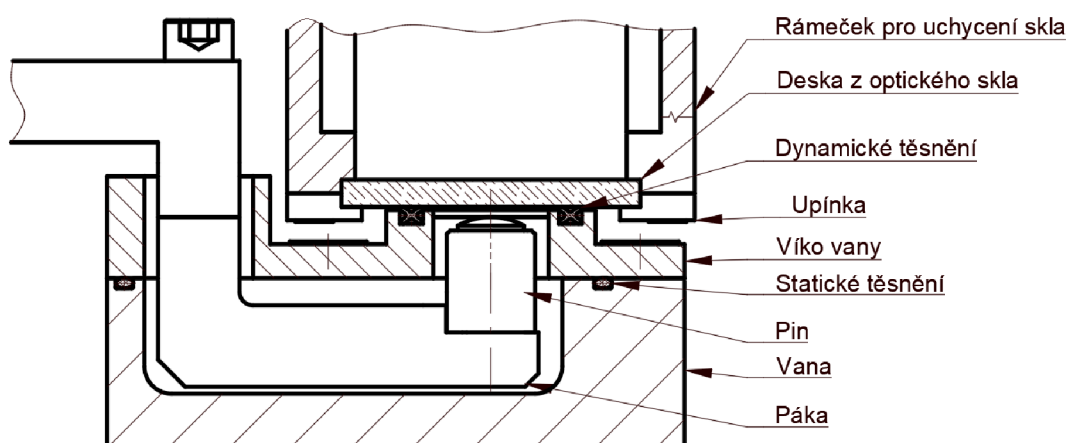
Principem tohoto koncepčního řešení je odstranění zbytkového vzduchu pomocí podtlaku vyvolaného vnějším zařízením (obr. 4-2). Do víka vany se zhotoví díry pro odvod vzduchu. Ty se poté pomocí potrubního systému připojeného k díram pro odvzdušnění vyvedou k zařízení pro podtlak. Zařízení, kterým se vytvoří podtlak, mohou být třeba injekční stříkačka nebo jiné zařízení pro tvorbu podtlaku. K odstranění vzduchu může dojít dvojnásobným způsobem. Buď se vysaje čistě vzduch v době, kdy bude mazivo dosahovat maximálně k hraně testovací plochy a poté se do vakua doplní zbytek maziva, nebo se vzduchové bubliny nasají společně s mazivem. Potrubní systém by se doplnil vhodnými armaturami tak, aby mazivo nebo vzduch neunikal samovolně z potrubí a dalo se připojit vnější zařízení k tvorbě podtlaku.



Obr. 4-2 Schéma odvzdušnění podtlakem

## 4.2 Těsnění

Vana, ve které se bude nacházet mazivo, se skládá z několika komponent (obr. 4-3). Hlavními částmi vany jsou samotná vana a víko vany. Sestava je opatřena kolíky k vystředění přesné polohy vany a víka. Dále jsou obě komponenty k sobě přišroubovány z důvodu montáže a demontáže ramene, na kterém se nachází pin. Z tohoto důvodu se dělicí rovina vany a víka vany musí správně utěsnit, aby nedocházelo k úniku testovací kapaliny. Vzhledem k tomu, že se díly mezi sebou nepohybují, bude se jednat o statické těsnění. Druhé těsnění nacházející se mezi víkem vany a deskou je dynamické, protože deska koná přímočarý vratný pohyb.



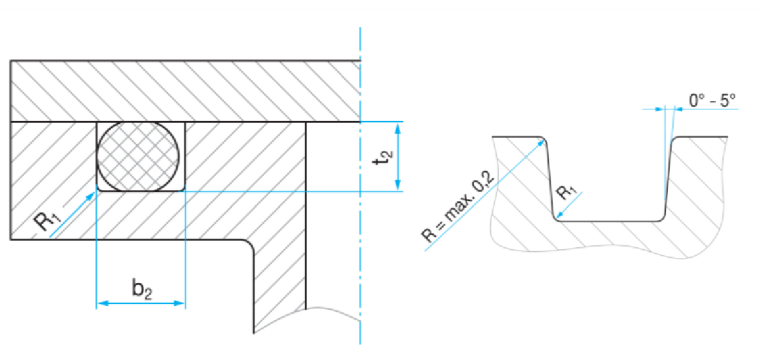
Obr. 4-3 Řez vanou

### 4.2.1 Těsnění dělicí roviny vany

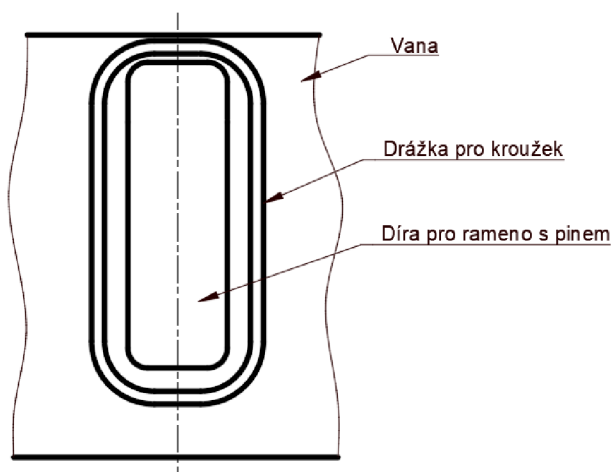
#### a) O-kroužek, X-kroužek, čtvercový kroužek

Jedná se o podobná těsnění, která mají stejné rozměry, ale liší se průřezem a jsou tedy zaměnitelné. Aplikace a manipulace X a čtvercových kroužků je srovnatelná s aplikací O-kroužků. O-kroužek je nejběžnější typ těsnění díky možnosti těsnění v širokém rozsahu tlaků, teplot a tolerancí. Mají malý nárok na prostor a nízkou hmotnost. Jedná se o ekonomicky nejvýhodnější konstrukční řešení. X-kroužek zamezuje přetáčení kroužků v drážce. Výhodou v porovnání s klasickými O-kroužky je především větší stabilita v zástavbovém prostoru, menší radiální předpětí v drážce, a tudíž menší tření a opotřebení. Mezi těsnícími břitzy se může tvořit mazací film. Čtvercové kroužky se používají jako axiální statické utěsnění, kdy průřez těsnění zůstává prakticky konstantní i při vysokých tlacích [19].

Nevýhodou toho řešení jsou drážky, v nichž jsou kroužky umístěné, jak z hlediska výroby, tak z hlediska pevnosti. Drážky se vyfrézují kolem díry pro rameno s pinem dle obr. 4-5. Výhodou kroužku je lehká montáž a snadná údržba. Na rozdíl od plochého těsnění dochází při axiálním utěsnění ke konstantnímu stlačení O-kroužku, to umožňuje sestavit vanu vždy do stejné požadované pozice.



Obr. 4-4 Konstrukce drážky pro kroužek

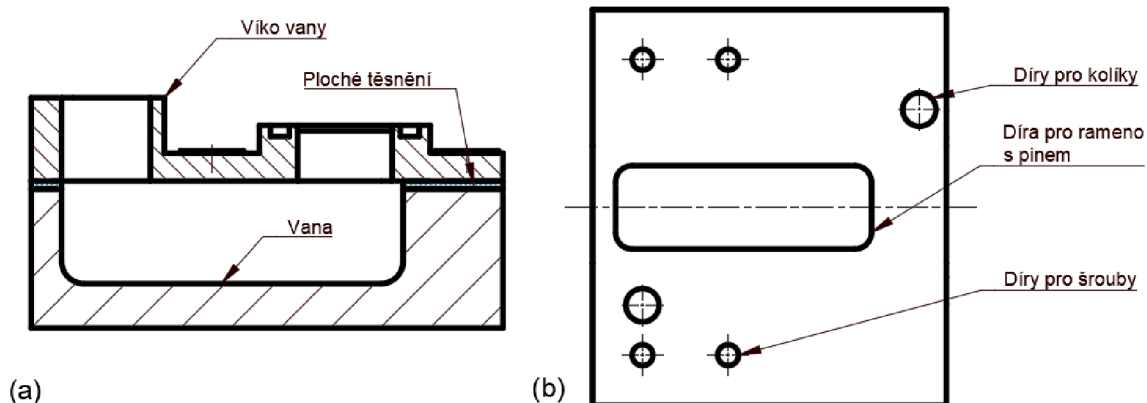


Obr. 4-5 Umístění drážky ve vaně

#### b) Ploché těsnění

Další možné řešení, jak utěsnit dělicí rovinu vany a víka vany, je ploché těsnění. Pomocí něho dojde k utěsnění celé plochy v dělicí rovině. Tvar těsnění (obr. 4-6) odpovídá tvaru vany s dírou pro rameno s pinem a dalšími dírami pro kolíky a šrouby. Nevýhodou tohoto těsnění je, že nedochází ke konstantnímu stlačení při axiálním těsnění, takže by nedocházelo k sestavení vany do stejné pozice tak, aby dynamické těsnění, které se nachází mezi vanou a sklem bylo vždy ve stejné pozici a docházelo tak vždy k úplnému utěsnění vany, což pak souvisí i se sestavením rámečku tak, aby byl vždy rovnoběžně a nedocházelo ke kolísání zatěžující síly při pohybu.

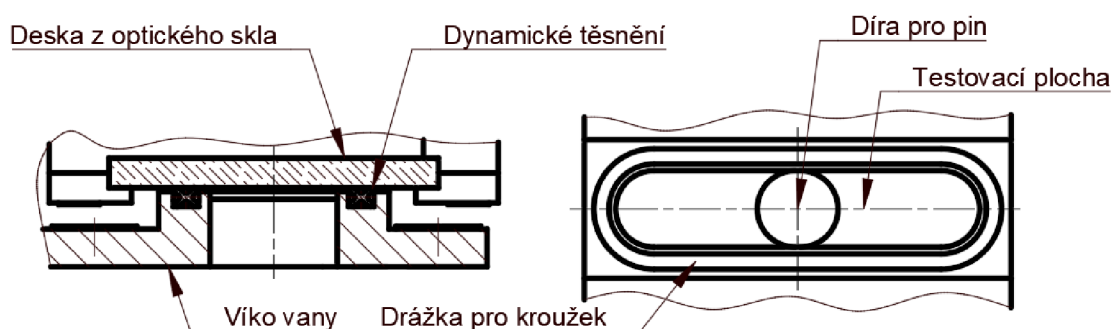




Obr. 4-6 (a) Umístění těsnění v dělicí rovině; (b) Tvar plochého těsnění

#### 4.2.2 Těsnění mezi víkem vany a sklem

Zde připadají v úvahu opět O-kroužky, X-kroužky nebo jiné kroužky, které se kromě statického těsnění mohou použít také pro dynamické těsnění, kdy v našem případě součásti konají reciproční pohyb. Do víka vany kolem testovací plochy (obr. 4-7) se vyfrézuje drážka do které se vloží kroužek. U toho těsnění už musí docházet k velmi dobrému utěsnění a k přesné rovnoběžné poloze těsnění a skla v rámečku, aby tak nedocházelo k zadrhávání součástí.



Obr. 4-7 Těsnění mezi víkem vany a sklem

## 4.3 Vyhřívání

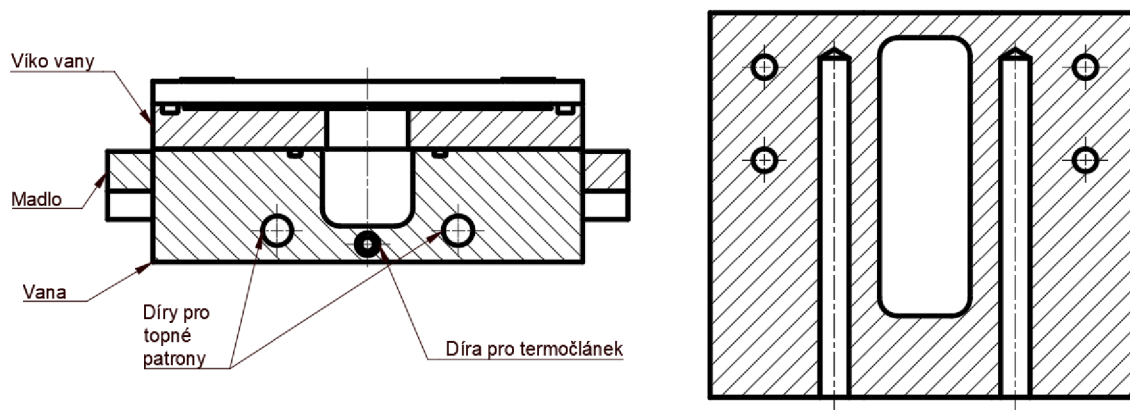
Experimenty budou prováděny s modelovými mazivy, která jsou složením velmi podobné skutečným synoviálním kapalinám v živých kloubech. Aby byly podmínky experimentů co nejbližší skutečným, je nutné mazací lázeň ohřívat na teplotu lidského těla.

### 4.3.1 Topné patrony

Jak bylo psáno v rešerši v kapitole 2.6.2, topné patrony mají mnoho výhod. Hlavní předností je schopnost dodávat mimořádně velký výkon při zachování malých rozměrů. Další výhodou patron je lehká montáž i demontáž, kdy se vkládají do přesně opracovaných otvorů.

#### a) Umístění ve vaně

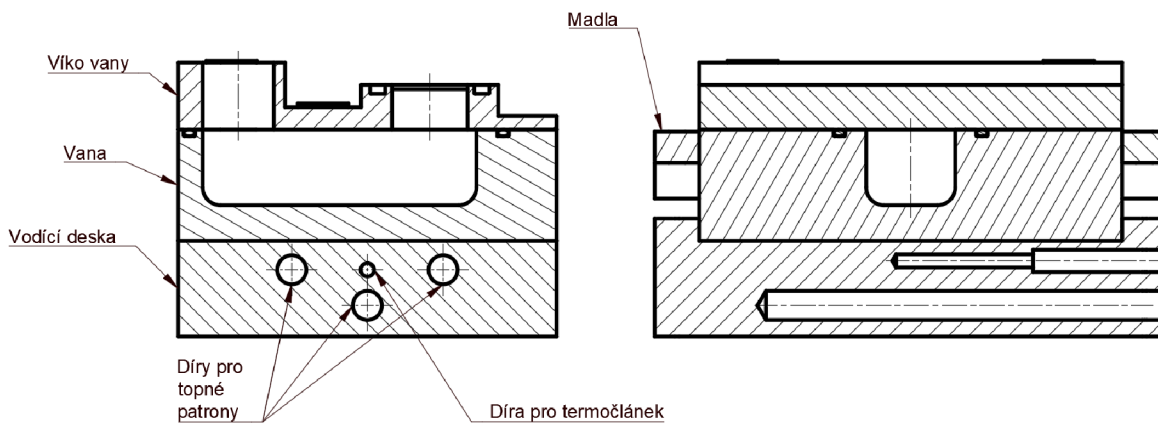
Topné patrony se umístí do děr vyvrtaných v čele těla vany souběžně po délce vany. Výhodou tohoto řešení bude účinnější ohřev, protože patrony se budou nacházet v těsné blízkosti vany. Na druhou stranu nevýhodou bude častá montáž a demontáž patron, kvůli montáži a demontáži vany při každé výměně vzorku či maziva.



Obr. 4-8 Umístění topných patron ve vaně

#### b) Umístění ve vodící desce

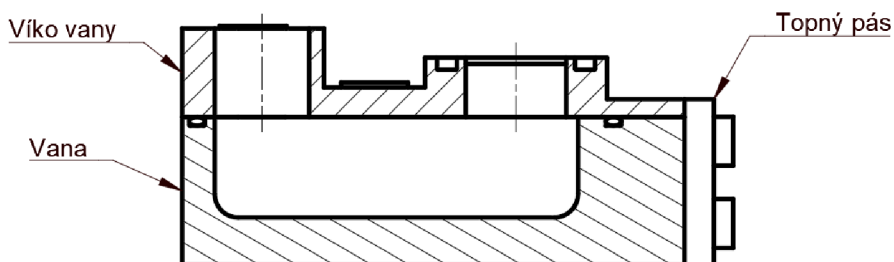
U toho koncepčního řešení nebudou patrony umístěné ve vaně, ale v součásti pod vanou – vodící desce, která zajišťuje přesné ustavení vany při každé montáži. Díry pro patrony se vyvrtají z boku vodící desky, takže patrony budou v příčném směru oproti délce vany. Protože vodící deska je šrouby pevně připojena v rámu tribometru, nebudou se tím pádem muset montovat a demontovat patrony při každé montáži a demontáži vany, to je výhoda oproti umístění patron ve vaně. Nevýhodou bude méně účinný ohřev oproti předchozímu řešení.



Obr. 4-9 Umístění topných patron ve vodící desce

### 4.3.2 Plášťové topné pásy

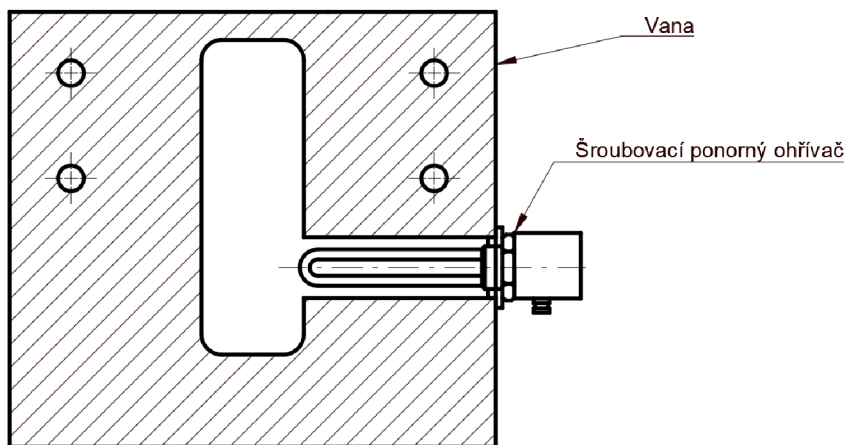
Topný pás se upevní na čelo pomocí šroubů do vany. Ohřev maziva tak probíhá z čela vany, což může způsobovat nerovnoměrný ohřev celého objemu kapaliny. Při každé montáži a demontáži vany je třeba topný pás odmontovat a znova připojit, aby bylo možné celou vanu rozdělat a vyměnit mazivo a vzorek.



Obr. 4-10 Vyhřívání pomocí topných pásů

### 4.3.3 Šroubovací ponorný ohříváč

V tomto případě dochází k přímému ohřevu kapaliny pomocí šroubovacího ponorného ohříváče, který je našroubován z boku vany. Ohřev mazací lázně je v tomto případě bodový, což může opět způsobovat nerovnoměrný ohřev kapaliny. Vývrt určený k připevnění topného tělesa do mazací lázně zvětšuje potřebný objem kapaliny k experimentům což je nevýhodou tohoto řešení. Dále je nutné šroubový spoj mezi topným tělesem a vanou utěsnit, a to po každé montáži tělesa do vany.



**Obr. 4-11** Vyhřívání pomocí šroubovacího ponorného ohřivače

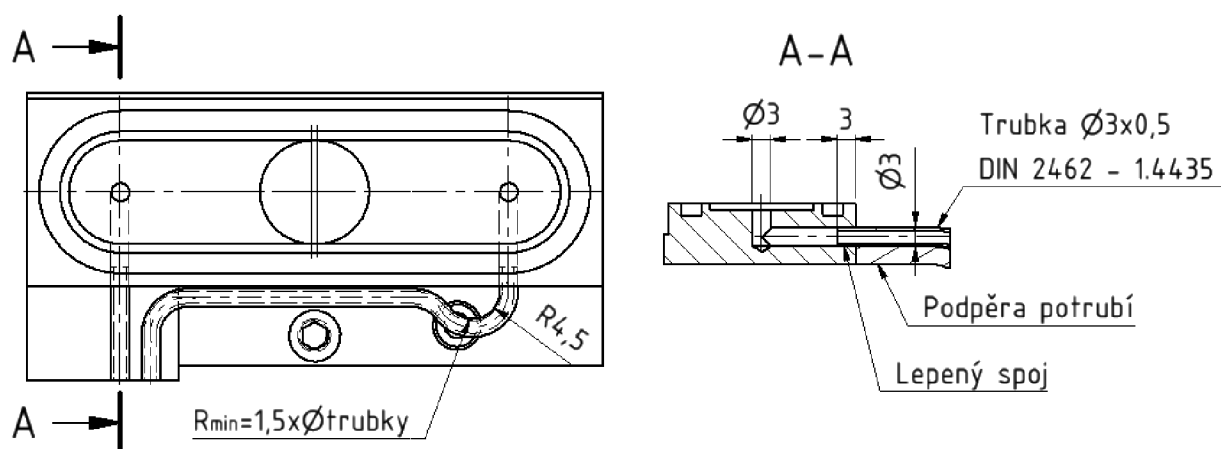
## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Z koncepčních návrhů odvodušnění, těsnění a vyhřívání vzešlo výsledné konstrukční řešení, které z každého požadavku vybírá výsledné, co možná nejlepší, řešení daného problému.

### 5.1 Odvodušnění

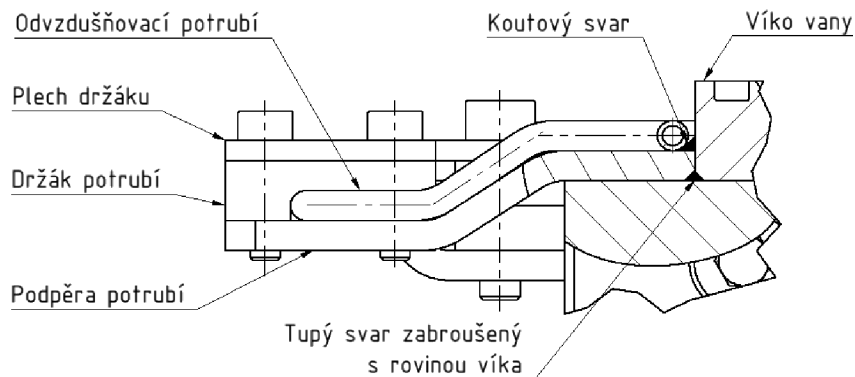
Odstranění vzduchových bublin z vany se dosáhne pomocí podtlaku. Odvodušnění pomocí vysokého bodu nepřipadá v úvahu, neboť by výčnělek s odvodušňovacím ventilem během pohybu s deskou zasahovaly do pozorovacího mikroskopu, a tak znemožnily hlavní smysl experimentu, a to sledování mazacího filmu během pohybu. Muselo by se také počítat se setrvačnými silami působící na soustavu, protože by byla zatížena díky spojení s pohybující deskou. Navíc by byla obtížná výroba celého konceptu, protože deska je ze speciálního optického skla, do kterého by se musela vyrobít díra a vyřešit, jak spojit výčnělek s optickým sklem. Naproti tomu odvodušnění podtlakem umožní odstranění bublin, aniž by zařízení nějak zasahovalo do mikroskopu a výroba nebyla tak náročná.

Kolmo na testovací plochu víka vany se soustředně v obou zaobleních testovací plochy vyvrtají díry pro odvodušnění (obr. 5-1). Kolmo na ně se z čela víka vany vyvrtají další díry stejného průměru pro spojení odvodušňovacích děr s odvodušňovacím potrubím v takové výšce, aby potrubí leželo na podpěře potrubí. Potrubí je zvoleno z nerezové bezešvé trubky  $\text{Ø}3 \times 0,5$  DIN 2462 - 1.4435 od výrobce 3Q Metal s.r.o. [33]. Trubky se pomocí lepidla pro kovy vlepí do díry pro odvodušnění, protože svařování trubek s takto malým průměrem a umístěním vůči víku by bylo obtížné. Zvoleno bylo dvousložkové epoxidové lepidlo Loctite 3450 [34] (příloha 2), které je vhodné i pro nerezové oceli. Lepený spoj zajistí dostatečnou pevnost, těsnost a odolnost vůči chemikáliím málo namáhaného spoje.



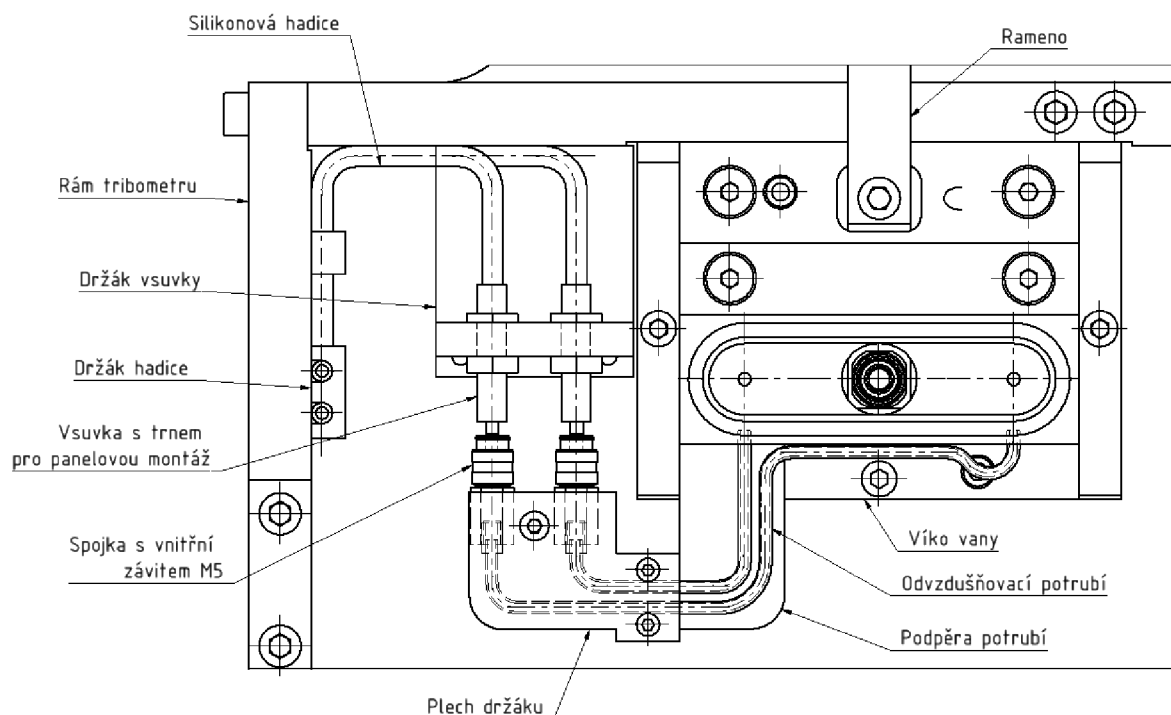
Obr. 5-1 Umístění odvodušňovacích děr ve víku vany a spoj potrubí

Potrubí se vhodně natvaruje tak aby bylo možné na víko vany přidělat šroub pro montáž víka s vanou (obr. 5-1) a aby zbývající komponenty odvodu nezasahovaly do pohybujícího vozíku. Minimální poloměr ohýbané trubky byl zvolen dle literatury [35], kdy pro ocelové trubky je minimální poloměr roven 1,5krát průměr trubky, z čehož v našem případě vyplývá vnitřní poloměr ohybu 4,5 mm.

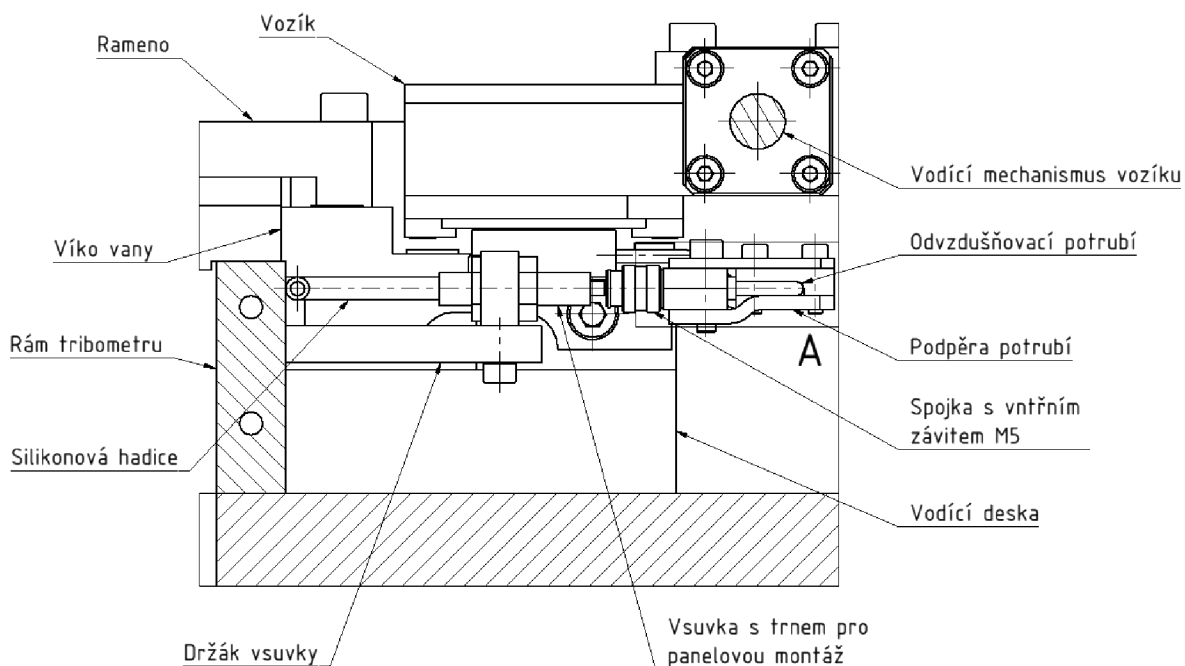


Obr. 5-2 Detail spoje podpěry s víkem

Aby nedošlo k deformaci, pohybu nebo jinému poškození, bude potrubí ležet na podpěře potrubí. Podpěra potrubí je ohýbaný plech tloušťky 3 mm, která se svaří z boku koutovým a zespod vany tupým svarem, který se následně zabrousí s rovinou víka vany. Podpěra bude kopírovat tvar potrubí, tak aby na něm potrubí po celé jeho délce leželo. K zajištění potrubí proti posuvu bude sloužit držák potrubí, který bude přichycen k podpěře potrubí pomocí šroubů.

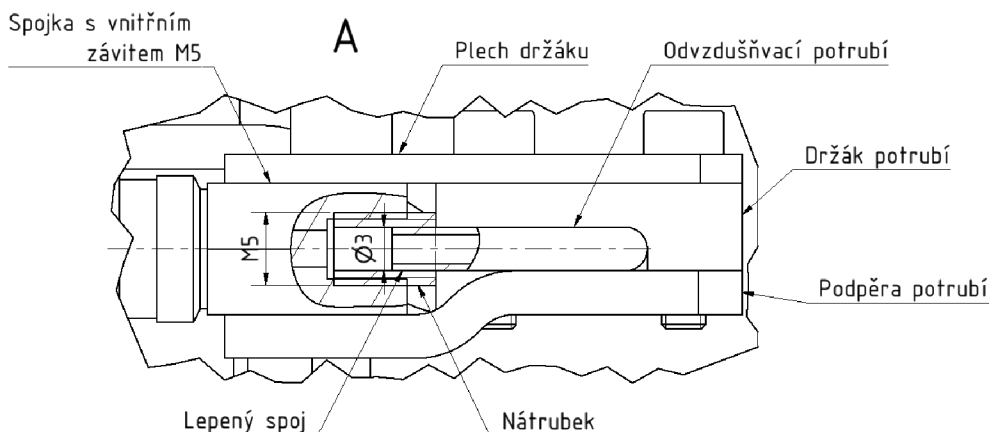


Obr. 5-3 Odvzdušnění-pohled shora



Obr. 5-4 Odvzdušnění-pohled z boku

Potrubí je vyvedeno ke spojkám, které jsou souběžné s osou vany pro snadnou montáž a demontáž. Celá konstrukce vany se spojkami se pouze zasune do vodící desky a při zasunutí vany ke stěně dojde k automatickému spojení spojky a vsuvky v držáku připojeného k rámu tribometru. Byly vybrány spojky s vnitřním závitem M5 DN 2,7 série 20KB s ventilem z nerezové oceli výrobce Rectus [36] (příloha 1). Jako protikus spojky byly zvoleny vsuvky s trnem na hadici pro vnitřní průměr hadice 3 mm pro panelovou montáž s ventilem stejného materiálu a výrobce jako spojky [36] (příloha 1). Obě součásti jsou s ventilem z toho důvodu, aby při demontáži nedošlo k vytečení kapaliny z potrubí a hadice.



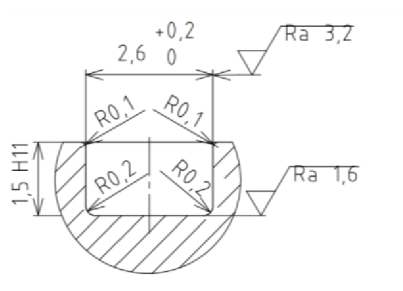
Obr. 5-5 Detail spojení potrubí se spojkou

Jelikož potrubí má průměr 3 mm, zasune a přilepí se na jeho konci stejným lepidlem pro kovy (příloha 2) nátrubek s vnějším závitem M5 a vnitřním průměrem 3 mm (obr. 5-5). Vsuvky se vloží do děr v držáku pro vsuvky a připevní maticí na vsuvce. Držák vsuvek se skládá ze dvou přišroubovaných desek, kdy deska s dírami pro vsuvky se bude moct, díky drážkám v druhé desce, pohybovat v ose vsuvky z důvodu montážních nepřesností. Držák se opět z důvodu možných montážních nepřesností přišroubuje do svislých drážek v rámu tribometru, které umožní případné upravení přesné polohy držáku pro vsuvky. Na trny vsuvek se nasunou hadice zvolené z katalogu firmy Tubes International s.r.o.. Hadice jsou typu VERSITEC s vnitřním průměrem 3 mm a silou stěny 1 mm z poloprůhledného silikonu [37] (příloha 3) a vyvedou se po rámu tribometru k místu, kde se posléze připojí k zařízení pro tvorbu podtlaku třeba injekční stříkačce. Hadice budou zajištěny pomocí držáku hadice.

## 5.2 Těsnění

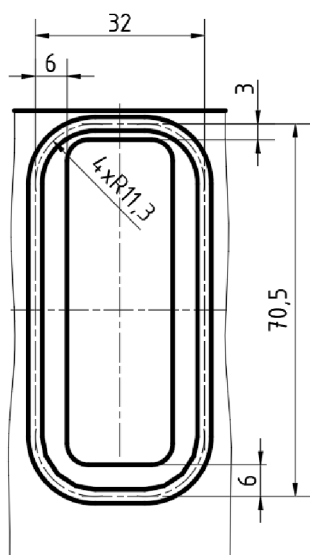
### 5.2.1 Těsnění dělicí roviny vany

Těsnění dělicí roviny vany a víka vany bude řešeno pomocí O-kroužku, protože na rozdíl od plochého těsnění dochází při axiálním utěsnění ke konstantnímu stlačení O-kroužku, které umožňuje sestavit vanu vždy do stejné požadované pozice, která je pro testování nezbytná. Byl zvolen O-kroužek 57x2 NBR70 dle katalogu výrobce Hennlich [38] (příloha 4), vnitřní průměr kroužku se odvodil od délky vnitřního obvodu drážky. Podle pokynů od výrobce se zhotoví drážka s rozměry pro axiálně statické aplikace (obr. 5-3). Kdy hloubka drážky bude menší než průměr O-kroužku a pomocí přítlačné síly vyvolané šrouby dojde k deformaci neboli stlačení kroužku a k požadovanému utěsnění prostoru. Drážka bude symetrická podél díry pro rameno s pinem a rohy drážky budou zaobleny (obr. 5-4), aby nedošlo ke „skřípnutí“ kroužku.



Obr. 5-6 Konstrukce drážky pro O-kroužek

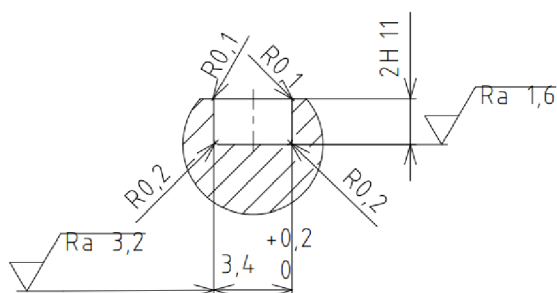




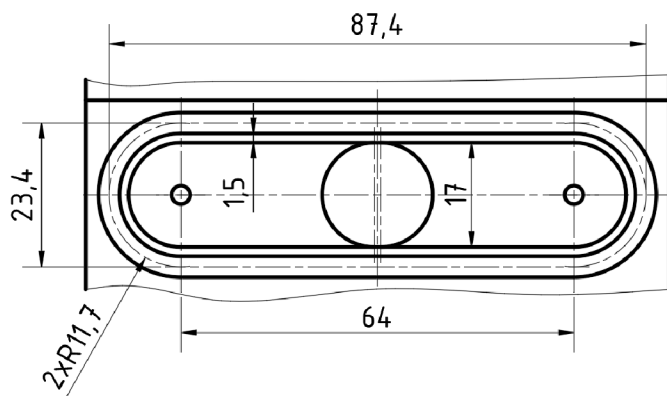
Obr. 5-7 Umístění drážky ve vaně

## 5.2.2 Těsnění mezi víkem vany a sklem

Díky tvaru vyžadují X-kroužky oproti O-kroužkům menší počáteční stlačení, což vede ke snížení tření a tím i opotřebením v dynamických aplikacích. Navíc profil X-kroužku zabraňuje rotaci těsnění v drážce při přímočarém pohybu. Víko vany a pohybující se sklo se tedy utěsní pomocí X-kroužku. Podle katalogu výrobce Hennlich [39] (příloha 5) byl vybrán X-kroužek 60 x 2,62 NBR 70. Z katalogu výrobce jsou dány rozměry drážky a doporučené drsnosti povrchu (obr. 5-5). Drážka pro kroužek kopíruje tvar testovací plochy ve tvaru „drážky pro pero“ (obr. 5-6). Testovací plocha musí být co možná nejmenší, aby i objem kapaliny ve vaně byl co nejmenší. Proto je šířka zaplavené plochy určena podle průměru pinu a délka plochy podle požadovaného zdvihu pohybu zařízení tak, aby nedocházelo ke stírání adsorbovaného filmu těsněním na kontaktním skle.



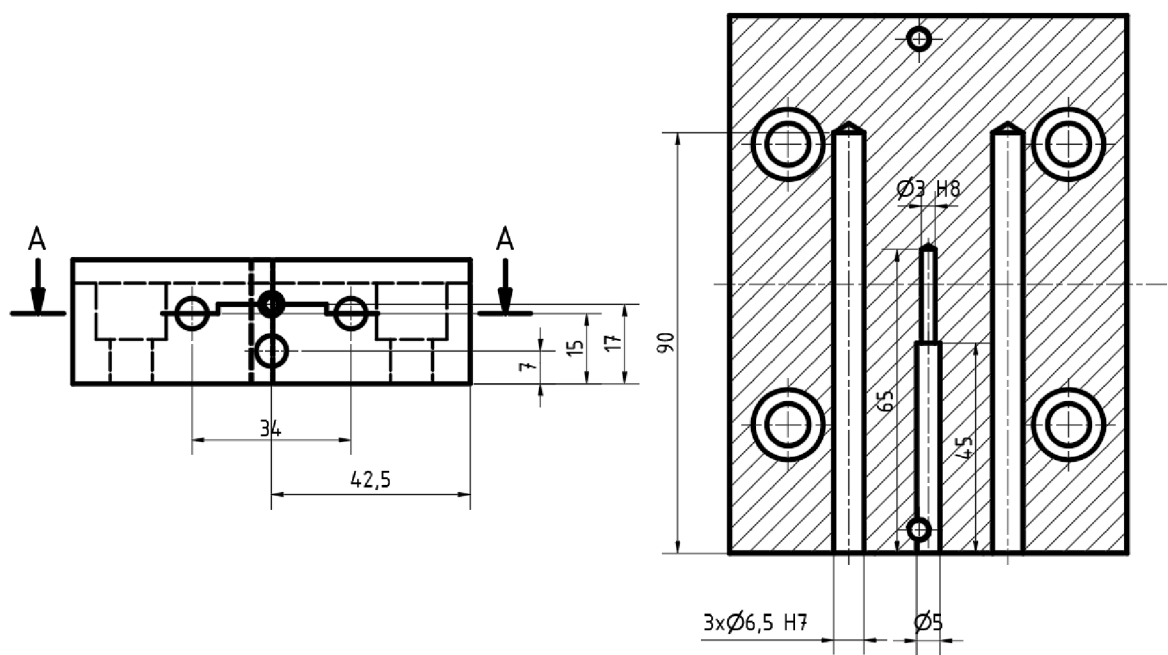
Obr. 5-8 Konstrukce drážky pro X-kroužek



Obr. 5-9 Umístění drážky ve víku vany

### 5.3 Vyhřívání

Po vyhodnocení koncepčních řešení vyhřívání vyplývá, že nejlepší možnou volbou je vyhřívání pomocí topných patron umístěných ve vodící desce. Díky umístění patron do vodící desky se usnadní výměna vzorku, kdy se patrony nebudou muset po každé montáži a demontáži vany společně s ní montovat a demontovat, což by v případě umístění patron ve vaně bylo nutné. Byly zvoleny topné patrony HHP D 6,5 x 60 mm, 230 V, 125 W od firmy Hotset ČR s.r.o. [40] (příloha 6), které výrobce po odborné konzultaci doporučil jako nejvhodnější volbu. Patrony se rozmístí rovnoměrně napříč délky vany, aby docházelo k co nejrovnoměrnějšímu ohřevu celé vany (obr. 5-7). Patrony se vloží do lícovaných děr daných podle výrobce, tak aby půlka délky patrony zasahovala přes osu vany. Teplota vany se bude kontrolovat a řídit pomocí termočlánku, zvolen byl termočlánek MT, Fe CUNi, typ J D 3 x 20 mm, plášť termočlánku bude z nerezové oceli opět od firmy Hotset ČR s.r.o. [41] (příloha 7). Díra pro termočlánek se zhotoví zhruba uprostřed mezi topnými patronami, aby nedocházelo ke špatně naměřeným hodnotám vlivem blízkého umístění termočlánku u patrony.



Obr. 5-10 Umístění topných patron ve vodící desce

## 6 DISKUZE

Výsledné konstrukční řešení zajistí odstranění vzduchových bublin, utěsnění požadovaných prostorů a ohřev mazací lázně na požadovanou teplotu.

### 6.1 Odvzdušnění

Pomocí odvzdušnění pod tlakem se zajistí odstranění vzduchových bublin z testovacího prostoru vany. Výsledné konstrukční řešení sice obsahuje více komponent než odvzdušnění pomocí vysokého bodu, ale zato je většina součástí nakupovaných nebo jejich výroba není příliš nákladná. Většinou se jedná o jednoduché součásti, kdy podpěra potrubí je ohnutý plech z výpalku, potrubí je z ohýbané trubky, držák potrubí je frézovaná kostka s otvory. Výhodou tohoto řešení bude snadná montáž i demontáž, kde se celá konstrukce vany zasune do vodící desky a pomocí rychlospojky dojde k snadnému a rychlému spojení se vsuvkou. Navíc díky ventilům v obou komponentách nedojde při demontáži k úniku maziva z potrubí. Narozdíl od odvzdušnění pomocí vysokého bodu se nebudou muset uvažovat setrvačné síly, které by působili na konstrukci od vzdušnění od recipročního pohybu desky. Na celou konstrukci tedy nebude působit skoro žádné zatížení.

### 6.2 Těsnění

#### 6.2.1 Těsnění dělicí roviny vany

Zvolení O-kroužku v dělicí rovině vany zajistí požadované konstantní stlačení těsnění a tím pádem ustanovení vany do stejné pozice, což by plochým těsněním nebylo možné. Na těsnění nejsou kladeny velké nároky, takže volba O-kroužku, který je nejvýhodnější ekonomickou variantou s širokou řadou rozměrů a materiálů, bude dostačující. Nevýhodou těsnění s kroužky bude konstrukce drážky, kdy se v našem případě bude jednat spíše o nevýhodu z hlediska výroby nežli pevnosti.

## 6.2.2 Těsnění mezi víkem vany a sklem

Díky utěsnění vany a skla X-kroužkem nedojde k úniku kapaliny z testovacího prostoru. Výhodou oproti O-kroužkům je menší počáteční stlačení a tím pádem snížení tření a opotřebení. Hlavně ale nebude docházet k přetočení těsnění, což by bylo nepřípustné. Těsnění mezi víkem vanou a deskou by mohlo být tvrdší, aby nedocházelo k zadrhávání neboli k stick-slip efektu. Bohužel takové těsnění tvaru X-kroužku se tvrdší než zvolené řešení běžně nevyrábí. Někteří výrobci nabízejí tvrdší materiály pouze na poptávku, ale většinou se jedná o sériovou výrobu, které by byla neekonomická.

## 6.3 Vyhřívání

Díky umístění patron do vodící desky se usnadní výměna vzorku, kdy se patrony nebudou muset po každé montáži a demontáži vany společně s ní montovat a demontovat, což by v případě umístění patron ve vaně bylo nutné. Topné patrony zajistí rovnoměrný ohřev celé lázně, který by šroubovým ponorným tělesem nebo topným pásem nebyl možný. Výroba děr ve vodící desce není příliš nákladná.

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala konstrukčním návrhem vany experimentálního zařízení pro testování lidských kloubů. Výsledné konstrukční řešení bylo dosaženo z tří požadovaných funkcí, které musí vana recipročního tribometru pro testování lidských kloubů s fluorescenčním mikroskopem splňovat, aby došlo k co možná nejpřesnějším výsledkům a současně snadné montáži. Hlavním cílem bylo vyřešit odvzdušnění vany, tak aby se v testovacím prostoru nenacházely vzduchové bubliny, které by znehodnocovaly výsledky měření a zhoršovaly kvalitu vizualizace mazacího filmu. Dále byla potřeba utěsnit rovinu mezi vanou a víkem vany, které byly z důvodu montáže a demontáže ramene s pinem ze dvou částí. Utěsnit se také musel prostor mezi víkem vany a pohyblivou deskou. V poslední části se musel vyřešit ohřev maziva ve vaně, aby teplota maziva byla stejná jako teplota lidského těla a docházelo tak k reálným podmínkám jako v lidském těle. Všechny požadavky, odvzdušnění, těsnění a vyhřívání, byly ve výše psaných kapitolách této bakalářské práce rozepsány v kritické rešerši, podle které vznikly možné koncepční řešení. Z koncepčních řešení nakonec vyšlo výsledné konstrukční řešení, které splňuje všechny tyto dané požadavky. Díky tomuto konstrukčnímu řešení dojde k plně zaplavenému kontaktu pinu se skleněnou deskou bez vzduchových bublin, což pomůže zpřesnit výsledky měření. Bubliny v kontaktu by jinak ovlivnily a zkreslily naměřené hodnoty součinitele smykového tření a obraz zachycený vizualizací. Přesné měření součinitele smykového tření a současná vizualizace kontaktu napomůže k pochopení problematiky mazacích procesů v lidském kloubu. Nové poznatky v oblasti mazání synoviálního kloubu by mohly napomoci k léčbě onemocněných kloubů, a tak zlepšit životní komfort člověka.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOLMBERG, KENNETH, Allan Matthews. *COATINGS TRIBOLOGY Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering* [online]. 2009. ISBN 9788578110796. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- [2] *Tribology, What is Tribology?* [online]. [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.tribonet.org/wiki/tribology/>
- [3] WILLIAMS, J. A. a Francis E. KENNEDY. Engineering Tribology. *Journal of Tribology* [online]. 2008, **120**(3), 644. ISSN 07424787. Dostupné z: doi:10.1115/1.2834601
- [4] ZHOU, Z.R. a Z.M. JIN. Biotribology: Recent progresses and future perspectives. *Biosurface and Biotribology* [online]. 2015, **1**(1), 3–24 [vid. 2019-05-06]. ISSN 24054518. Dostupné z: doi:10.1016/j.bsbt.2015.03.001
- [5] GWIDON W. STACHOWIAK, ANDREW W. BATCHELOR, Grazyna Stachowiak. *Experimental Methods in Tribology, 1st Edition, Elsevier*. B.m.: Elsevier, 2004. ISBN 9780444515896.
- [6] DUCOM NNSTRUMENTS. *Linear Reciprocating Tribometer (LRT)* [online]. [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://ducom.com/test-instruments/tribometers/linear-reciprocating-tribometer-lrt/#tab-3-1>
- [7] BRUKER COOPERATION. *An Introduction to the UMT-TriboLab™ Your Single Tribology Lab* [online]. 2015 [vid. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/TriboLabWebinar\\_-\\_2015-05-07.pdf](https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/TriboLabWebinar_-_2015-05-07.pdf)
- [8] BRUKER COOPERATION. *UMT TriboLab Mechanical Tester and Tribometer* [online]. 2015 [vid. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab/overview.html>
- [9] RTEC-INSTRUMENT. *Universal Tribometer* [online]. 2017 [vid. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://rtec-instruments.com/pdf/Tribometer\\_Brochure-MFTRtec2018.pdf](https://rtec-instruments.com/pdf/Tribometer_Brochure-MFTRtec2018.pdf)
- [10] DRUET, K., T. ŁUBIŃSKI a J. I. ŁUBIŃSKI. RECIPROCATING MOTION TRIBOMETER [online]. nedatováno, 2–4 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.oetg.at/fileadmin/Dokumente/oetg/Proceedings/WTC\\_2001\\_files/html/M-68-04-313-DRUET.pdf](https://www.oetg.at/fileadmin/Dokumente/oetg/Proceedings/WTC_2001_files/html/M-68-04-313-DRUET.pdf)
- [11] ABDELBARY, A, M N ABOUELWafa, I M El FAHHAM a A I GOMAA. A new reciprocating tribometer for wear testing under different fluctuating loading conditions. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2004 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267705465\\_A\\_new\\_reciprocating\\_tribometer\\_for\\_wear\\_testing\\_under\\_different\\_fluctuating\\_loading\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/267705465_A_new_reciprocating_tribometer_for_wear_testing_under_different_fluctuating_loading_conditions)
- [12] MOHAN, C B, C DIVAKAR, K VENKATESH, K GOPALAKRISHNA, K S Mahesh LOHITH a T N NAVEEN. Design and development of an advanced linear reciprocating tribometer. *Wear* [online]. 2009, **267**, 1111–1116 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2009.01.047

- [13] VALMATIC. *Air Valves - Providing System Efficiency and Protection* [online]. 2008 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [http://www.centexp.com/wp-content/uploads/2015/06/Air\\_1500.pdf](http://www.centexp.com/wp-content/uploads/2015/06/Air_1500.pdf)
- [14] JOHN V. BALLUN, P.E. *Air Valves in Piping Systems* [online]. [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.valvemagazine.com/magazine/sections/back-to-basics/9170-air-valves-in-piping-systems.html>
- [15] AWWA, Awwa STAFF a AWWA. *Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves (M51)*. 1 edition. 2005, 51.
- [16] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. 2013. ISBN 1118403223.
- [17] TOTTEN, George E. *Handbook of Hydraulic Fluid Technology, Second Edition* [online]. B.m.: Marcel Dekker, 2012. ISBN 9780824760229. Dostupné z: doi:10.1201/b11225
- [18] CHILDS, Peter R.N. *Seals* [online]. B.m.: Elsevier, 2014. ISBN 9780080977591. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-097759-1.00014-9
- [19] RUBENA. *Těsnicí prvky* [online]. 2014 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [www.rubena.eu/underwood/download/files/tesnici-prvky\\_2015.pdf](http://www.rubena.eu/underwood/download/files/tesnici-prvky_2015.pdf)
- [20] TRELLEBORG. *Static Seals. Seals and Sealing Handbook* [online]. 2007 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: doi:10.1016/b978-185617461-9/50002-6
- [21] FLEXITALLIC. *Gasket Design Criteria* [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.flexitallic.com/uploads/files/broDesignCriteria.pdf>
- [22] DIMER. *Industrial gaskets* [online]. 2012 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.dimer-group.com/wp-content/uploads/2014/01/DIMER-E\\_Catalogue-Industrial-gaskets\\_EN.pdf](https://www.dimer-group.com/wp-content/uploads/2014/01/DIMER-E_Catalogue-Industrial-gaskets_EN.pdf)
- [23] FLUID SEALING ASSOCIATION, EUROPEAN SEALING ASSOCIATION. *Gasket Handbook* [online]. 2017 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [http://www.fluidsealing.com/publication-downloads/FSA\\_Gasket\\_Handbook - June 2017.pdf](http://www.fluidsealing.com/publication-downloads/FSA_Gasket_Handbook_-_June_2017.pdf)
- [24] *Heating Element Manufacturers | Heating Element Suppliers* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.heating-elements.com/>
- [25] *Heating liquids - Vulcanic* [online]. [vid. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.vulcanic.com/en/heating-liquids/>
- [26] *Immersion Heater Element Manufacturers Suppliers* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.heating-elements.com/immersion-heater-elements/>
- [27] *Fluid circulation heaters - Vulcanic* [online]. [vid. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.vulcanic.com/en/fluid-circulation-heaters-screw-plug/>
- [28] *Tubular Heating Element Manufacturers Suppliers* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.heating-elements.com/tubular-heating-elements/>
- [29] EASYTHERM. *Topné patrony* [online]. [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: [http://easytherm.cz/index.php?topne\\_patrony](http://easytherm.cz/index.php?topne_patrony)
- [30] EASYTHERM. *Ohebná topná tělesa* [online]. [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://easytherm.cz/index.php?id=98,0,0,1,0,0>



- [31] *Ceramic Heating Element Manufacturers Suppliers* [online]. [vid. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.heating-elements.com/ceramic-heating-elements/>
- [32] WATTCO. *Strip and finned strip heaters* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: [https://www.wattco.com/product\\_category/strip-heaters/](https://www.wattco.com/product_category/strip-heaters/)
- [33] 3Q METAL S.R.O. *Nerezové trubky bezešvé* [online]. [vid. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/nerezove-trubky-a-jekly/nerezove-trubky-bezesve/>
- [34] *Loctite 3450 tekutý kov - 25 ml* [online]. [vid. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.elotechnik.cz/loctite-3450-tekuty-kov-25-ml.html>
- [35] DILLINGER J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. B.m.: Praha: Europa - Sobotáles, 2007. ISBN 9788086706191.
- [36] RECTUS. *Rychlospojky Series 20KA* [online]. nedatováno [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.teeing.com/files/downloads/quick-connect-couplings/low-pressure-series/stainless-steel/rectus-pneumatic-stainlesssteel-ka.pdf>
- [37] TUBES INTERNATIONAL. *Průmyslové hadice - silikonové* [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.tubes-international.cz/produkty/prumyslove-hadice/silikonove-hadice/>
- [38] HENNLICH. *O-kroužky, Seznam forem a rozměrů* [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.hennlich.cz/fileadmin/user\\_upload/HCZ/Home/Tesneni/Produktové\\_listy/Statická\\_seznam\\_forem\\_a\\_rozměrů.pdf](https://www.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/HCZ/Home/Tesneni/Produktové_listy/Statická_seznam_forem_a_rozměrů.pdf)
- [39] HENNLICH. *X-kroužky, Rozměry* [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.hennlich.cz/fileadmin/user\\_upload/HCZ/Home/Tesneni/Produktové\\_listy/Statická\\_x-kroužky\\_rozměry.pdf](https://www.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/HCZ/Home/Tesneni/Produktové_listy/Statická_x-kroužky_rozměry.pdf)
- [40] HOTSET. *Topné patrony* [online]. [vid. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.hotset.cz/uws\\_files/topnepatrony/Hotrod\\_190129.pdf](https://www.hotset.cz/uws_files/topnepatrony/Hotrod_190129.pdf)
- [41] HOTSET. *Snímače teploty* [online]. [vid. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.hotset.cz/uws\\_files/termoclanky/Termoclanky\\_190220.pdf](https://www.hotset.cz/uws_files/termoclanky/Termoclanky_190220.pdf)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
ÚK	- Ústav konstruování
FSI	- Fakulta strojního inženýrství
VUT	- Vysoké učení technické
UMT	- Universal Mechanical Tester

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 2-1</b> Tribometr typu Pin-on-slab; (a) Metoda Bowden-Leben; (b) Metoda Cameron-Mills.....	14
<b>Obr. 2-2</b> (a) Bruker's UMT TriboLab; (b) Rtec Universal Tribometer.....	14
<b>Obr. 2-3</b> Princip činnosti recipročního tribometru TPZ.....	16
<b>Obr. 2-4</b> Reciproční tribometr pro testování opotřebení .....	17
<b>Obr. 2-5</b> Princip činnosti tribometru .....	18
<b>Obr. 2-6</b> Vzduch se v potrubí hromadí ve vysokých bodech.....	20
<b>Obr. 2-7</b> Vzduch hromadící se v potrubí .....	20
<b>Obr. 2-8</b> Úplné zastavení toku .....	21
<b>Obr. 2-9</b> Náhlé uvolnění vzduchu .....	21
<b>Obr. 2-10</b> (a) Odvzdušňovací ventil; (b) Vzduch/vakuový ventil .....	22
<b>Obr. 2-11</b> (a) Kombinovaný ventil s jedním tělem; (b) Kombinovaný ventil s dvojitým tělem .....	22
<b>Obr. 2-12</b> Princip odvzdušňovacího ventilu.....	23
<b>Obr. 2-13</b> Princip vzduch/vakuového ventilu.....	23
<b>Obr. 2-14</b> Princip kombinovaného vzduchového ventilu.....	24
<b>Obr. 2-15</b> Druhy těsnění .....	25
<b>Obr. 2-16</b> O-kroužek .....	26
<b>Obr. 2-17</b> X-kroužek .....	27
<b>Obr. 2-18</b> Čtvercový kroužek .....	27
<b>Obr. 2-19</b> Axiální instalace statických kroužků.....	28
<b>Obr. 2-20</b> Druhy topných těles pro přímý ohřev kapaliny .....	30
<b>Obr. 2-21</b> Druhy topných těles pro nepřímý ohřev kapaliny .....	32
<b>Obr. 4-1</b> Schéma odvzdušnění vysokým bodem.....	38
<b>Obr. 4-2</b> Schéma odvzdušnění podtlakem .....	38
<b>Obr. 4-3</b> Řez vanou .....	39
<b>Obr. 4-4</b> Konstrukce drážky pro kroužek .....	40
<b>Obr. 4-5</b> Umístění drážky ve vaně.....	40
<b>Obr. 4-6</b> (a) Umístění těsnění v dělicí rovině; (b) Tvar plochého těsnění .....	41

<b>Obr. 4-7</b> Těsnění mezi víkem vany a sklem .....	41
<b>Obr. 4-8</b> Umístění topných patron ve vaně .....	42
<b>Obr. 4-9</b> Umístění topných patron ve vodící desce .....	43
<b>Obr. 4-10</b> Vyhřívání pomocí topných pásů .....	43
<b>Obr. 4-11</b> Vyhřívání pomocí šroubovacího ponorného ohříváče .....	44
<b>Obr. 5-1</b> Umístění odvzdušňovacích děr ve víku vany a spoj potrubí.....	45
<b>Obr. 5-2</b> Detail spoje podpěry s víkem.....	46
<b>Obr. 5-3</b> Odvzdušnění-pohled shora .....	46
<b>Obr. 5-4</b> Odvzdušnění pohled z boku.....	47
<b>Obr. 5-5</b> Detail spojení potrubí se spojkou .....	47
<b>Obr. 5-6</b> Konstrukce drážky pro O-kroužek.....	48
<b>Obr. 5-7</b> Umístění drážky ve vaně .....	49
<b>Obr. 5-8</b> Konstrukce drážky pro X-kroužek.....	49
<b>Obr. 5-9</b> Umístění drážky ve víku vany.....	50
<b>Obr. 5-10</b> Umístění topných patron ve vodící desce .....	51

## 11 SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 2-1</b> Druhy tribometrů.....	12
<b>Tab. 2-2</b> Zařízení tribometru UMT TriboLab.....	15
<b>Tab. 2-3</b> Zařízení tribometru Rtec Universal Tribometer.....	16

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b>	Katalog Rectus – Rychlospojky serie 20
<b>Příloha 2</b>	Katalog Henkel – Lepidlo Hysol
<b>Příloha 3</b>	Katalog Tubes international s.r.o. – Hadice silikonové
<b>Příloha 4</b>	Katalog Hennlich – O-kroužek
<b>Příloha 5</b>	Katalog Hennlich – X-kroužek
<b>Příloha 6</b>	Katalog Hotset – Topné patrony
<b>Příloha 7</b>	Katalog Hotset – Termočlánek
<b>Příloha 8</b>	Výkresová dokumentace