



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TĚSNĚNÍ HŘÍDELE A HŘÍDELOVÉ UCPÁVKY ČERPADEL

SHAFT SEALS AND STUFFING BOXES OF PUMPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Pluskal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Štefan, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Tomáš Pluskal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Štefan, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Těsnění hřídele a hřídelové ucpávky čerpadel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Těsnění hřídele oběžného kola je důležitým konstrukčním prvkem většiny běžných čerpadel. V případech, kdy jsou objemové ztráty čerpané kapaliny nežádoucí, nebo musí být minimální (například z důvodu kontaminace prostředí) nabývá tato problematika na větší důležitosti. Ruku v ruce s těsnícím efektem (tření, víření, nárůst teploty, eroze materiálu, atd.) jdou mechanické ztráty snižující celkovou účinnost čerpadla.

Cíle bakalářské práce:

Student provede rešerši různých typů hřídelových těsnění pro běžně používaná čerpadla. Budou vysvětleny principy fungování jednotlivých typů těsnění a shrnuty jejich výhody a nevýhody pro dané typy čerpadel.

Seznam doporučené literatury:

BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. Příručka čerpací techniky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01626-9.

GÜLICH, Johann Friedrich. Centrifugal Pumps [online]. 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014 [cit. 2020-09-09]. DOI: 10.1007/978-3-642-40114-5. ISBN 978-3-642-40113-8. Dostupné z: <https://www.springer.com/gp/book/9783662518281>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Čerpadla jsou nedílnou součástí průmyslu, zemědělství, ale také běžného života. Jedním z hlavních prvků, které mají vliv na správnou funkci a spolehlivost těchto strojů jsou hřídelové ucpávky a těsnění. Tato práce se v první části zabývá jednotlivými druhy hřídelových ucpávek a těsnění, jejich konstrukčním provedením, aplikací, funkcí a používanými materiály. V druhé části je dimenzována vhodná ucpávka pro vybrané čerpadlo.

Klíčová slova

Čerpadlo, těsnění, hřídelová ucpávka, pracovní médium, mazivo

ABSTRACT

Pumps are an integral part of industry, agriculture, but also everyday life. One of the main elements that affect the proper function and reliability of these machines are shaft seals and gaskets. The first part of this work deals with individual types of shaft seals and gaskets, their design, application, function and used materials. In the second part, a suitable seal for the selected pump is calculated and dimensioned.

Key words

Pump, gasket, shaft seal, working substance, lubricant.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLUSKAL, Tomáš. *Těsnění hřídele a hřídelové ucpávky čerpadel*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132448>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce David Štefan.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Těsnění hřídele a hřídelové ucpávky čerpadel** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Tomáš Pluskal

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Davidu Štefanovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytnul při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Problematika ucpávek.....	12
1.1 Spotřeba energie	13
1.2 Provozní hlučnost	13
1.3 Průsak.....	14
2 Materiály pro výrobu těsnění a ucpávek.....	15
2.1 Kaučuky (pryže)	15
2.1.1 Nitrilkaučuk.....	15
2.1.2 Duratemp (SKF).....	15
2.1.3 Duralip (SKF).....	15
2.1.4 Duralife (SKF).....	15
2.1.6 Polyakrylátový elastomer	16
2.1.7 Silikonová pryž	16
2.2 Plastické látky tvrditelné a netvrditelné.....	16
2.2.1 Polytetrafluoroetylén	16
2.2.2 Polyamidy.....	16
2.2.3 Polyuretany.....	16
2.2.4 Termosety.....	16
2.3 Látky organického původu	17
2.3.1 Plst'	17
2.3.2 Bavlna, konopí, juta, len.....	17
2.4 Látky minerálního původu.....	17
2.4.1 Uhlík (grafit)	17
2.4.2 Keramické hmoty	17
2.4.3 Kovy	18
2.5 Kombinace materiálů těsnících ploch.....	18
2.5.1 Karbid wolframu / karbid wolframu	18
2.5.2 Karbid křemíku / karbid křemíku.....	18
2.5.3 Uhlík / WC nebo SiC	18
2.5.4 Uhlík / keramika (oxid hlinitý)	18
3 Mechanické ucpávky	19
3.1 Princip.....	19
3.1.1 Těsnící mezera.....	20
3.1.2 Vyvážené / nevyvážené ucpávky	20
3.1.3 Proplachování.....	21
3.2 O-kroužkové mechanické ucpávky.....	21
3.3 Vlnovcové mechanické ucpávky	22
3.3.1 S pryžovým vlnovcem.....	22
3.3.2 S kovovým vlnovcem.....	22
3.4 Ucpávky typu Cartrige.....	23

3.5	Dvojité mechanické ucpávky	23
3.5.1	Tandemové uložení.....	23
3.5.2	Uložení „zády k sobě“	24
4	Stlačované ucpávky.....	25
4.1	Princip	25
4.3	Základní konstrukce	26
4.4	Struktura šňůr	27
5	Bezdotykové ucpávky	28
5.1	Labyrintové ucpávky	28
5.2	Odstředivé ucpávky	29
5.3	S magnetickou kapalinou	29
6	Ucpávky raketových turbo-čerpadel	30
6.1	Labyrintová ucpávka bez injektoru	30
6.2	Labyrintová ucpávka s injektorem	31
7	Sekundární ucpávky	32
7.1	V-kroužky.....	32
7.1.1	Princip a funkce	32
7.1.2	Provedení	33
7.2	O-kroužky.....	34
7.2.1	Princip a funkce	34
7.2.2	Provedení drážky	35
7.2.3	Výhody a nevýhody	35
8	Gufera.....	36
8.1	Provedení vnějšího průměru a břitu	37
8.1.1	Vnější průměr	37
8.1.2	Břit	37
8.3	Kroužky pro všeobecné použití	38
8.4	Kroužky pro těžký průmysl	39
9	Návrh stlačované ucpávky pro vybrané čerpadlo	40
9.1	Zadané hodnoty a parametry	40
9.2	Volba těsnících kroužků a výšky ucpávky	41
9.2.1	Materiál těsnících kroužků	41
9.2.2	Počet kroužků a výška ucpávky.....	42
9.3	Výpočet potřebného napětí na víku	44
	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM ROVNIC	53

ÚVOD

Jen málo strojů, ať už v průmyslu nebo běžném životě, je tak všestranně používaných a potřebných jako jsou čerpadla. Tato zařízení zajišťují jeden z nejdůležitějších technických úkolů – dopravu kapalin, a to především vody, která je nezbytnou součástí potravy živé přírody a důležitou podmínkou průmyslové i zemědělské výroby. Současný technický rozvoj klade čím dál větší nároky nejen na celkovou koncepci čerpadel, ale i na řešení jednotlivých strojních prvků, které ženou vývoj tohoto odvětví strojírenství kupředu. Jedním z hlavních činitelů, které mají vliv na kvalitu chodu těchto strojů, je jejich dokonalé a spolehlivé utěsnění. Velké množství typů čerpadel, jež byly v průběhu času navrženy, konstruovány a vylepšovány, přispělo ke vzniku velkého množství hřídelových těsnění a ucpávek. Tyto prvky, sloužící k zabránění úniku ať už maziva, nebo kapalného média z pracovního prostoru, jsou nezbytné pro správné fungování těchto strojů.

První kapitola této práce pojednává o faktorech, které ovlivňují správný chod a funkci ucpávek. V druhé kapitole jsou rozebrány základní materiály pro výrobu primárních a sekundárních ucpávek. V dalších kapitolách jsou pak popsány základní typy ucpávek, které se používají k utěsnění pracovních komor jednoduchých odstředivých čerpadel. V nemalém množství případů se jako konstrukční prvky hlavních ucpávek používají ucpávky sekundární. Šestá kapitola je věnována právě jim. Jako poslední jsou v práci zmíněny také gufera. V čerpadlech se jako samotné ucpávky používají jen zřídka, jsou ovšem užívány jako rozběhová či pojistná těsnění.

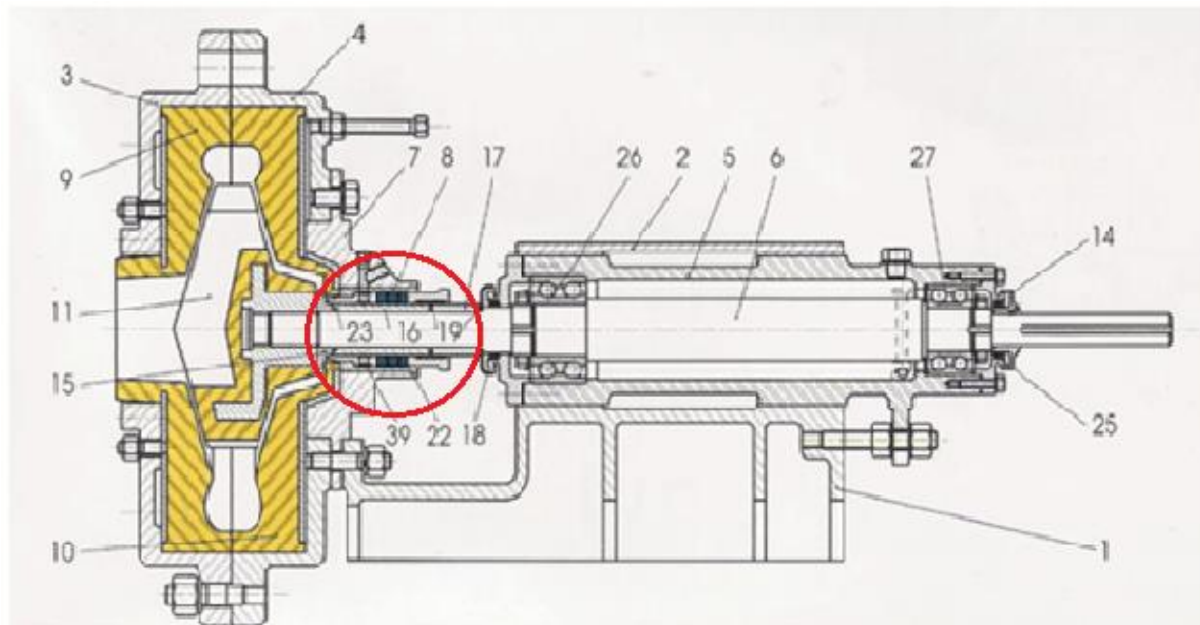
Poslední část této práce je věnována praktickému návrhu stlačované ucpávky vybraného odstředivého čerpadla.

1 Problematika ucpávek

Hřídelové ucpávky jsou konstrukční prvky čerpadel, které jsou určeny k utěsnění mezery mezi rotující a nepohyblivou částí. Jejich hlavním úkolem je utěsnit pracovní komoru čerpadla, zadržet mazivo, zabránit průniku nečistot, oddělit dvě média nebo utěsnit při působení tlaku. Pro dosažení maximální účinnosti hřídelových ucpávek za provozu, je třeba dbát na minimalizaci tření a opotřebení i za nepříznivých provozních podmínek. [1] [2]

Tato kapitola se zabývá faktory, které ovlivňují chod a funkci ucpávek, a na které je třeba při použití a navrhování ucpávek dbát. Jedná se o spotřebu energie třením, hlučnost a průsak kapaliny. Jsou zde rozebrány jednotlivě, v praxi však působí v synergii a musejí být vnímány jako jeden celek. [3]

Na následujícím obrázku lze vidět řez kalovým čerpadlem a jeho hřídelovou ucpávku (stlačitelnou ucpávku), která je použita na utěsnění pracovní komory čerpadla.

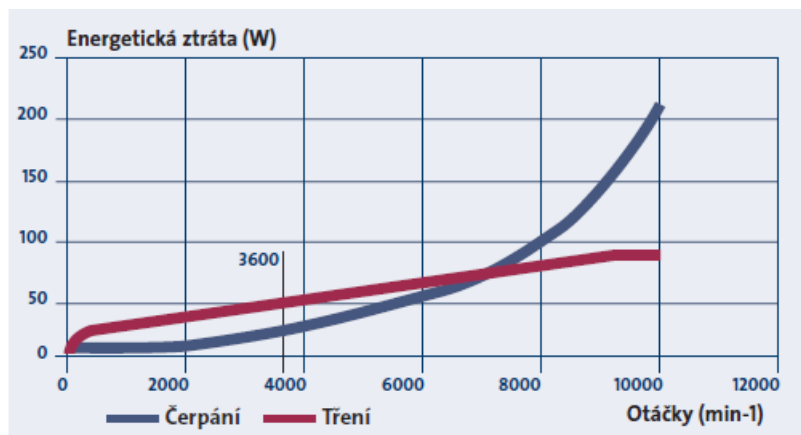


Obrázek 1-1 Řez kalovým čerpadlem [4]

Legenda k obrázku: 1-koník, 2-příklop koníku, 3-skříň přední, 4-skříň zadní, 5-pouzdro koníku, 6-hřídel, 7-těleso ucpávky, 8-pouzdro ucpávky tělesa, 9-vložka přední, 10-vložka zadní, 11-oběžné kolo, 14-prachovka, 15-odstříkovací kroužek, 16-pouzdro ucpávky, 17-distanční pouzdro, 18-odstříkovací proužek, 19-těsnění IT, 22-těsnící šňůra, 23-O-kroužek, 25-gufero, 26ložisko, 27-ložisko, 39-zahlcovací pouzdro

1.1 Spotřeba energie

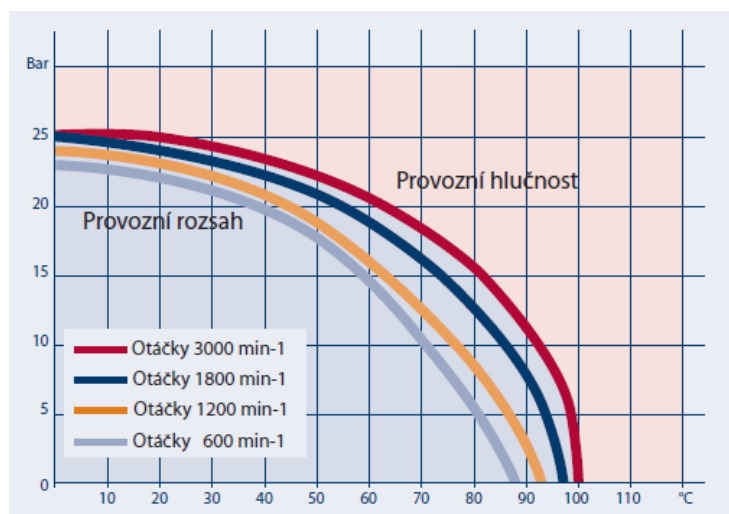
Ke správnému běhu čerpadla a funkci ucpávky je potřeba dodání značné energie. Ta je spotřebována nejen samotným čerpáním pracovní kapaliny, která se rapidně zvyšuje s obvodovou rychlostí hřídele (s třetí mocninou), ale i třením styčných ploch samotných ucpávek. Výjimku v případě tření mají tzv. bezdotykové ucpávky (viz pátá kapitola). Míra takto spotřebované energie závisí na konstrukčním řešení ucpávky, podmínkách mazání a materiálech použitých na výrobu těsnících prvků a hřídele. Na následujícím grafu (obr. 1-2) lze vidět, že spotřeba energie třením je opravdu nemalá (pro ilustraci je použit graf 12-ti milimetrové mechanické ucpávky). Tam, kde to aplikace dovolí, je vhodné volit správnou ucpávku pro minimalizaci těchto ztrát. [1] [3]



Obrázek 1-2 Spotřeba energie u mechanické ucpávky (12 mm) [3].

1.2 Provozní hlučnost

Volba materiálu jak těsnící plochy ucpávky, tak hřídele, má zásadní vliv na provozní hlučnost čerpadla. Hlučnost vzniká převážně při čerpání kapaliny s nízkou viskozitou v důsledku špatného mazání v ucpávkách. Při čerpání vody je třeba dbát na fakt, že viskozita vody klesá se zvyšující se teplotou. To znamená, že čím vyšší pracovní teplota je, tím horší jsou mazací podmínky ucpávky. Redukování otáček čerpadla v tomto případě nepomůže, naopak to špatnému vlivu ještě pomůže. Při dosažení bodu varu je kapalina z mazaných ploch odpařována, což se projeví dalším zhoršením mazání a zvýšením provozní hlučnosti. Na následujícím grafu (pro ilustraci použit pracovní rozsah mechanických ucpávek) lze vidět provozní oblasti mechanických ucpávek pro určité tlaky, otáčky a teploty. [1] [3]

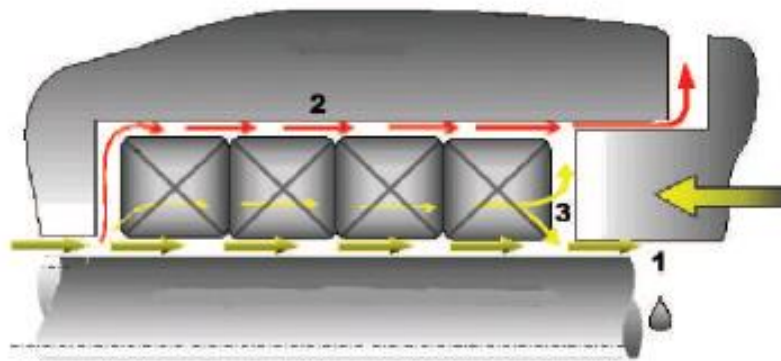


Obrázek 1-3 Provozní oblasti mechanických ucpávek [3].

1.3 Průsak

Průsak, v některých literaturách uváděn taky jako „lekáž“ (toto slangové označení vzniklo z anglického slova „leakage“ nebo průsak) je únik pracovní kapaliny přes ucpávky. Pro správný těsnicí účinek ucpávky je třeba ho co nejvíc minimalizovat. V některých případech je mírný průsak žádoucí pro minimalizaci tření a tím zahřívání těsnění. Průsak však musí být optimalizovaný, aby nedocházelo k nadměrnému mazání styčných ploch. Ucpávka by pak ztrácela těsnicí účinek. V praxi průsak čerpadla při provozu kolísá, protože ho nelze se 100% přesností teoreticky určit. Závisí totiž na řadě faktorů, jako je: typ a materiál styčných ploch, druh čerpané kapaliny, zatížení přítlačných prvků atd. Grafy a tabulky technických katalogů, které určují míru průsaku jednotlivých ucpávek je proto třeba brát jen jako orientační. [3]

Na následujícím obrázku (pro ilustraci použita stlačovaná „měkká“ ucpávka) lze vidět hlavní tři druhy průsaků. Hřídelový průsak (obr. 1-4, poz. 1), jež je z hlediska mazání v některých aplikacích žádoucí. Obvodový (obr. 1-4, poz. 2), který by v případě správné montáže ucpávky neměl nikdy nastat. A průřezový (obr. 1-4, poz. 3), který se v minimální míře vyskytuje u každé ucpávky a závisí na materiálu těsnících ploch (v tomto případě materiálu kroužku stlačované ucpávky). [3] [5]



Obrázek 1-4 Průsaky stlačované ucpávky [5].

2 Materiály pro výrobu těsnění a ucpávek

Výroba těsnění a ucpávek si žádá užití nejrůznějších materiálů (látek), jejichž původ je buď nerostný, živočišný, rostlinný, nebo se jedná o materiály chemicky vyrobené. Mohou být použity jak samostatně, tak i ve vzájemných kombinacích s různými tvary (lisované, lepené, splétané apod.). V situacích, kdy je třeba zlepšení určitých vlastností (např. mazivosti či chemické odolnosti), se materiály impregnují. Řada materiálů a technologií výroby se v dnešní době vyskytují zřídka nebo vůbec. [6]

Podle prostředí, ve kterém budou ucpávky a těsnění užívána se liší i nároky na jejich materiálové vlastnosti. Především se bude jednat o vlastnosti, jako jsou: odolnost proti kyselému či zásaditému prostředí, tepelná odolnost, chování při nízkých teplotách, propustnost pro plyny, odolnost proti bobtnání a pružnost.

2.1 Kaučuky (pryže)

Kaučuk je polymerní materiál přírodního nebo syntetického původu. Je to základní surovina pro výrobu pryží. Kaučuk je za tepla lepivý, za studena tuhý a nepružný. Zatímco pryž (vulkanizát) se vyznačuje velkou pružností, tedy schopností se účinkem vnější síly výrazně deformovat a poté opět zaujmout původní tvar. Kaučuky lze podle jejich původu rozdělit do dvou kategorií, a to na přírodní a syntetické. [7]

2.1.1 Nitrilkaučuk

Jde o materiál, jehož vlastnosti jsou dobře využitelné ve strojírenství. Tento kaučuk představuje „univerzální“ materiál pro výrobu těsnění. Má velmi dobrou odolnost vůči velkému množství médií, jako např. minerální oleje (nebo plastických maziv na jejich bázi), rostlinné či živočišné oleje a horká voda. Pryže z nitrilkaučuku snáší i krátkodobý běh na sucho a jejich provozní teplota se pohybuje v rozmezí -50 až +100 °C. [2]

2.1.2 Duratemp (SKF)

Jedná se o hydrogenovanou nitrilovou pryž vyvinutou společností SKF, která se vyznačuje podstatně vyšší odolností proti mechanickému poškození v porovnání s nitrilkaučukem. Proto se tyto těsnění vyznačují dlouhou životností. Duratemp má rovněž vyšší odolnost vůči teplotě, stárnutí a tvrdnutí při působení horkého oleje nebo ozónu. Maximální provozní teplota se pohybuje okolo +150 °C. [2]

2.1.3 Duralip (SKF)

Jedná se o karboxylátovou nitrilovou pryž vyvinutou společností SKF. Tento materiál spojuje kladné vlastnosti nitrilkaučuku společně s vysokou odolností proti opotřebení. Těsnění z tohoto materiálu jsou užívána především v těžkém průmyslu, kde hrozí proniknutí abrazivních částic (písku, zeminy nebo okují) do těsnicích ploch na hřídeli. [2]

2.1.4 Duralife (SKF)

Jedná se o fluorokaučukovou pryž vyvinutou společností SKF, která vyniká velmi dobře tepelnou a chemickou odolností. Vyznačuje se i dobrou odolností proti stárnutí, ozónu a velmi nízkou propustností plynů. Tato těsnění jsou vhodná pro teploty až +200 °C. Jsou rovněž odolná vůči olejům a hydraulickým kapalinám, palivům a minerálním kyselinám, které vyvolávají poškození u těsnění z jiného materiálu. Fluorokaučuky mají jedinou nevýhodu – při vysoké teplotě (cca +300 °C) uvolňují toxické plyny a páry, se kterými je i po ochlazení nebezpečné manipulovat. [2]

2.1.6 Polyakrylátový elastomer

Těsnění a ucpávky z tohoto materiálu se vyznačují vyšší teplotní odolností než z nitrilkačuku či duraltempu. Tento materiál je vhodný pro teploty dosahující až +170 °C. Těsnění z polyakrylátu jsou odolná vůči stárnutí, ozonu a mazivům obsahujícím přísady. Neměla by být vystavována působení vody, kyselin, zásad a neměla by běžet nasucho. [2]

2.1.7 Silikonová pryž

„Silikonová pryž se vyznačuje vysokou tepelnou odolností a může se používat při teplotách v rozmezí -70 až +160 °C“. Další důležitou vlastností silikonové pryže je schopnosti absorbovat maziva, a tedy snižovat tření a opotřebení na minimum. Těsnění z tohoto materiálu jsou výhradně vhodná pro extrémní teploty (ať už vysoké nebo nízké). [2]

2.2 Plastické látky tvrditelné a netvrditelné

Syntetické nebo polysyntetické organické sloučeniny polymerních materiálů, které často obsahují další látky ke zlepšení jejich užitečných vlastností, např. odolnosti proti stárnutí, větší houževnatosti a pružnosti. Mezi jejich hlavní výhody patří malá hmotnost, chemická odolnost a jednodušší složení.

2.2.1 Polytetrafluoroetylén

Tento velmi tuhý a houževnatý termoplastický polymer známý též pod jinými názvy (PTFE, Ftoroplast, Klingerflon, Teflon apod.) má velmi vysokou chemickou odolnost s rozsahem provozních teplot od -70 do +200 °C. Má velmi malou pružnost, kterou si zachovává i při vyšších teplotách. PTFE má hladký povrch odolný vůči nečistotám s velmi nízkým koeficientem tření. Díky tomu tyto těsnění mohou běžet nasucho a mají dobré elektricky izolační vlastnosti. Velkou nevýhodou těchto těsnění je tzv. studený tok (tečení vlivem mechanického namáhání). [6]

2.2.2 Polyamidy

Těsnění z tohoto materiálu vynikají odolností proti opotřebení, malým součinitelům tření a jsou odolné proti účinku benzínu, olejů a roztokům soli. V suchu tvrdnou a stávají se křehkými, proto k dosažení optimálních vlastností nemá vlhkost prostředí klesnout pod 40 % relativní vlhkosti. Při uložení ve vodě těsnění z tohoto materiálu značně bobtnají, je proto nutné tuto skutečnost zahrnout do návrhu uložení. Polyamidů se používá při výrobě těsnění plochých (nepohybových), ale i těsnění tvářených (manžety). Klasické polyamidy mají tendenci se samovolně navařovat na třecí plochu, proto není vhodným materiálem pro těsnění hřídelů. Tuto negativní vlastnost však nemá tzv. alkalický polyamid, polyamid s přísadou grafitu a sírníku ke zlepšení kluzných vlastností. [6]

2.2.3 Polyuretany

Vlastnosti tohoto materiálu jsou přímo závislé na jeho chemickém složení, od kterého se také odvíjí jeho struktura. Podle prostorové struktury jde buďto o materiály tvrdé a křehké, nebo měkké a pružné (kaučukovité), které mají dobré mechanické vlastnosti, s velmi dobrou chemickou odolností, odolností vůči minerálním olejům a benzínu. Těsnění z tohoto materiálu jsou méně navlhavé než polyamidy. [6]

2.2.4 Termosety

Vlastnosti termosetů se odvíjejí od druhu polymeru a plniva, které jsou užity k jejich výrobě. Plnivy mohou být látky organické (celulóza, bavlna, dřevitá moučka apod.) nebo látky minerální jako grafit, břidličná moučka a sklo. Při použití vhodného plniva, které má vliv na tepelnou odolnost materiálu, mohou mít termosety velmi dobré mechanické vlastnosti. Díky jejich velké tuhosti se pro výrobu těsnění užívají méně, jsou ale důležitým materiálem pro výrobu přítlačných prvků u mechanických nebo jinak kombinovaných ucpávek. [6]

2.3 Látky organického původu

Tyto materiály jsou tvořeny převážně organickými sloučeninami, které však mohou obsahovat i příměsi sloučenin anorganických. Jedná se o různorodé směsi, které mohou mít libovolné složení, mohou být heterogenní nebo homogenní. [8]

2.3.1 Plst'

Tento levný materiál s vynikající absorpcí kapalin, poměrně malým součinitelem tření a schopností pružení do určité míry, je používán k výrobě těsnění a ucpávkových šňůr, která jsou jednoduchá s rozsahem pracovních teplot od -40 do +90 °C. Pro zlepšení vlastností plstěných těsnění se tento materiál impregnuje různými látkami, např. parafinem, tuky, oleji, grafitem, popř. roztoky kaučukovitých látek. Těsnění z tohoto materiálu nejsou vhodná k utěsňování olejů s nízkou viskozitou. [2]

Z plstě si vyrábějí i tzv. kombinovaná těsnění, která jsou používána pro rotační pohyb. Skládají se z vrstev plsti a dalších látek různých vlastností, vzájemně spojených lepením (plst' laminátová). „Jednotlivé vrstvy pak slouží např. jako zásobník maziva, další jako těsnicí zábrana apod. Tento druh těsnění je v zahraničí velmi rozšířen a ve velkém výběru normalizován.“ [6]

2.3.2 Bavlna, konopí, juta, len

Tento materiál je dodáván ve formě šňůr s tepelnou odolností do +120 °C. Ke zvýšení odolnosti a snížení tření se výrobky z těchto vláknin impregnují. Provazcová těsnění se používají pro utěsnění nižších tlaků. Bavlněná těsnicí šňůra impregnovaná teflonem (PTFE), je vhodná pro statické i dynamické použití. [6]

2.4 Látky minerálního původu

Minerální látka je taková látka, která je nerostného (neorganického) původu. Mezi takové látky se řadí např. minerál (prvky nebo chemické sloučeniny přírodního původu), hornina (směs tvořená minerály a případně i dalšími součástmi) a minerální voda (vodný roztok minerálů). [9]

2.4.1 Uhlík (grafit)

Tento materiál je k výrobě těsnění používán díky své unikátní vlastnosti, kterou je jeho spojování s materiály vodivými i nevodivými. Uhlíkové konstrukční prvky se používají například jako součásti mechanických ucpávek, nebo také v samostatném provedení jako těsnicí kroužky, pístní kroužky apod. Jeho výhodou je nízký třecí odpor a značná samomaznost. Výrobky z uhlíku jsou velmi tvrdé a křehké. Velmi často se uhlík používá jako plnivo v kaučukovitých a plastických materiálech k dosažení samomaznosti nebo ke zlepšení odvodu třecího tepla. Má velice dobrou chemickou odolnost. [6]

2.4.2 Keramické hmoty

Tyto materiály se většinou používají ve směsích s jinými látkami. Využívá se u nich hlavně jejich tvrdosti a nízkého součinitele tření. Jsou obzvláště vhodné pro vysoké pracovní rychlosti a jejich chemická odolnost má jen malou konkurenci. Při použití tohoto materiálu, díky jeho vysoké tvrdosti (takže také velké křehkosti), je kladen velký důraz na eliminaci rázů. Je používán například pro výrobu těsnících kluzných kroužků, nebo některých speciálních mechanických ucpávek. [6]

2.4.3 Kovy

Kovy mají velké množství kladných vlastností, které jsou u čerpadel velmi žádané. Kovová těsnění jsou používána buď samostatně (pístní kroužky, statická těsnění, kovové těsnící šňůry pro vysoké teploty apod.), nebo v kombinaci s jinými materiály (pro zlepšení pevnosti a tepelné vodivosti – například u těsnění šňůrových nebo uhlíkových), popřípadě jako výztuže nebo povrchové ochrany. [6]

U výrobků jako jsou mechanické ucpávky, hřídelové těsnící kroužky a manžetové ucpávky s plynulým vyrovnáváním přitlačných sil jsou to také pružiny, na které se kovy používají. Tyto pružiny jsou vyráběné z běžných (uhlíkových) a antikoročních ocelí. [2] [6]

Všeobecně se dá použití kovů shrnout tak, že kde jde o současné působení vysokých tlaků, teplot a rychlostí, je ve většině případů korektní použít tento materiál. Jedná se především o rychloběžné dynamické ucpávky, kde je nutné při velkém mechanickém namáhání zajistit co nejlepší odvod tepla a co nejmenší třecí odpor. Při používání kovů je třeba si uvědomit jejich chování při zvyšování teplot. Konkrétně pevnost a pružnost kovů se stoupající teplotou obvykle velmi rychle klesá. [6]

2.5 Kombinace materiálů těsnících ploch

Tato podkapitola pojednává o materiálech (materiálových kombinacích) těsnících ploch hřídelových mechanických ucpávek čerpadel. Volba vhodné kombinace je rozhodující pro funkčnost a délku životnosti mechanických ucpávek čerpadel.

2.5.1 Karbid wolframu / karbid wolframu

Ucpávky z tohoto tvrdokovu na bázi tvrdé fáze karbidu wolframu (dále už jen WC) mají velkou odolnost proti korozi. Materiálová kombinace má tyto významné vlastnosti: maximální odolnost proti opotřebení, robustnost a odolnost i v případě neopatrné manipulace. Velkou nevýhodou je téměř nulová schopnost provozu nasucho. [1]

2.5.2 Karbid křemíku / karbid křemíku

Alternativou k provedení WC/WC jsou hřídelové ucpávky s těsnícími plochami karbid křemíku / karbid křemíku (dále už jen SiC). Tento materiál se používá tam, kde je požadována větší odolnost proti korozi. Materiálová kombinace má tyto významné vlastnosti: extrémní odolnost vůči opotřebení a velkou odolnost proti korozi (bez ohledu na druh čerpané kapaliny). Podobně jako u kombinace WC/WC je i tato varianta vysoce náchylná pro provoz nasucho. Navíc jsou na rozdíl od kombinace WC/WC velice křehké a vyžadují opatrnou manipulaci. [1]

2.5.3 Uhlík / WC nebo SiC

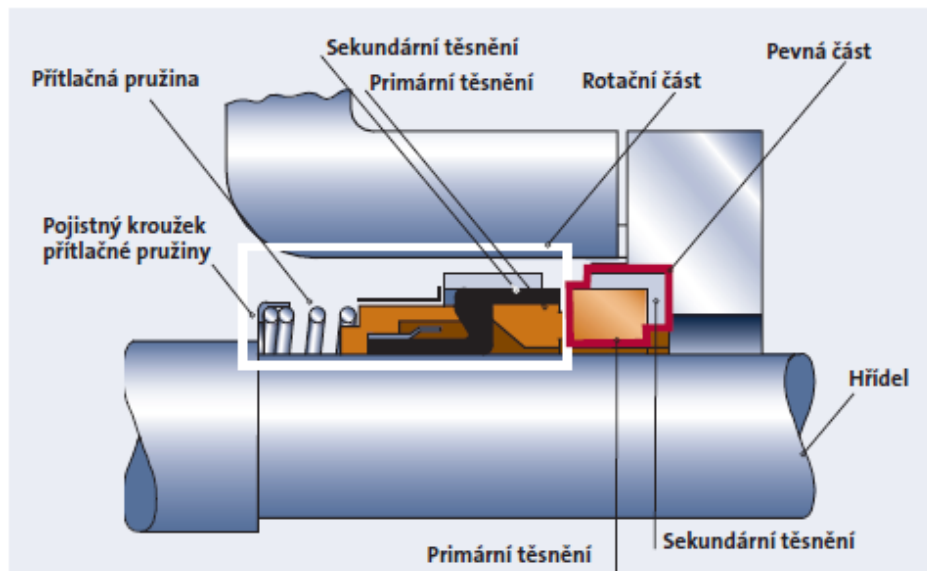
Důležitou vlastností těsnících ploch z uhlíku je jejich samomaznost. Díky tomu jsou hřídelové ucpávky s touto kombinací materiálu používány při špatných mazacích podmínkách (vysoké teploty), kdy se u ní neprojevuje provozní hlučnost. Materiálová kombinace má tyto významné vlastnosti: dobrá odolnost proti korozi, výborné vlastnosti při provozu nasucho (krátkodobý provoz). Podobně jako u varianty SiC/SiC, i ucpávky z těchto materiálů vyžadují opatrnou manipulaci díky velké křehkosti. [1]

2.5.4 Uhlík / keramika (oxid hlinitý)

Ucpávky s kombinací těchto materiálu jsou velice univerzální a používány pro nepříliš náročné provozní aplikace. Uhlík dává této ucpávce vlastnosti podobné těm, vyrobených v provedení uhlík / WC (s omezenými rozsahy tlaku a teploty). Tato materiálová kombinace má následující vlastnosti: relativně dobré při provozu nasucho (např. při náhlém vniknutí vody do zahřáté ucpávky) s omezenou odolností proti korozi. Nevýhodou je křehkost a opotřebitelnost (při čerpaní kapalin obsahující mechanické nečistoty). [1]

3 Mechanické ucpávky

Jednou z nejvíc používaných ucpávek jsou mechanické ucpávky. Jsou prostorově kompaktní, nepotřebují téměř žádnou údržbu a utěsní poměrně velké tlaky. Jejich nevýhodou je složitá konstrukce a poměrně vysoká cena a nároky na výrobu (jak ucpávky samotné, tak těsněných a úložných ploch). Skládají se ze dvou hlavních částí, rotační a pevné (obr. 3-1). [1] [3]



Obrázek 3-1 Hlavní komponenty mechanické ucpávky [3].

K těmto částem jsou pak navíc přidávány pomocné prvky pro správné fungování ucpávky (obr. 3-2) Jsou to např. sekundární těsnění, přítlačná pružina, pojistné kroužky či statická těsnění. [1] [3]

Mechanická ucpávka	Popis
Rotační	Styčná plocha (primární těsnicí plocha)
	Sekundární těsnění
	Přítlačná pružina
Pevná část	Pojistný kroužek přítlačné pružiny (přenos krouticího momentu)
	Sedlo (styčné plochy, primární těsnicí plocha)
	Statické těsnění (sekundární těsnění)

Obrázek 3-2 Komponenty ucpávky [3].

3.1 Princip

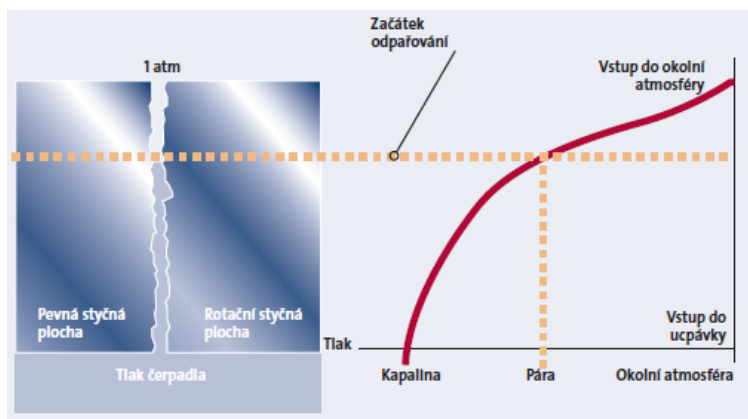
Rotační část ucpávky je nasazena na hřídeli a společně s ní se otáčí za chodu čerpadla. Pevná (statická) část ucpávky je zasazena v tělese čerpadla. Díky tlaku čerpané kapaliny společně se silou vyvozenou pomocí pružiny dochází ke vzájemnému styku ploch primárních těsnění mechanické ucpávky. V úzké spáře mezi těmito plochami se za rotaci hřídele vytváří tenká vrstva kapaliny, která se odpaří dřív, než dojde k jejímu styku s atmosférou. Tento opakující se jev zajišťuje těsnost mechanické ucpávky vůči pracovní kapalině. [1] [3]

Sekundární těsnicí části slouží k zabránění průniku kapaliny mezi tělem ucpávky a hřídelí. Mechanická síla pružiny zajišťuje přitlačení primárních těsnících ploch k sobě a její pojistný kroužek na ni přenáší krouticí moment hřídele. U vlnovcových ucpávek se místo pružiny k přenosu krouticího momentu používá samotného vlnovce. [1] [3]

3.1.1 Těsnící mezera

Těsnící mezera je úzká spára mezi styčnými plochami ucpávky. Při provozu čerpadla (rotaci hřídele) vytváří pracovní kapalina mezi těmito plochami tenký mazací film, který je tvořen dvěma důležitými složkami, hydrostatickou a hydrodynamickou. Hydrostatickou složku mazacího filmu vytváří samotná čerpaná kapalina vtlačovaná (nebo jiná externě přiváděná kapalina) do mezery mezi plochami. Tlakem, který vzniká při rotaci hřídele, je pak vytvářena složka hydrodynamická. [1] [3]

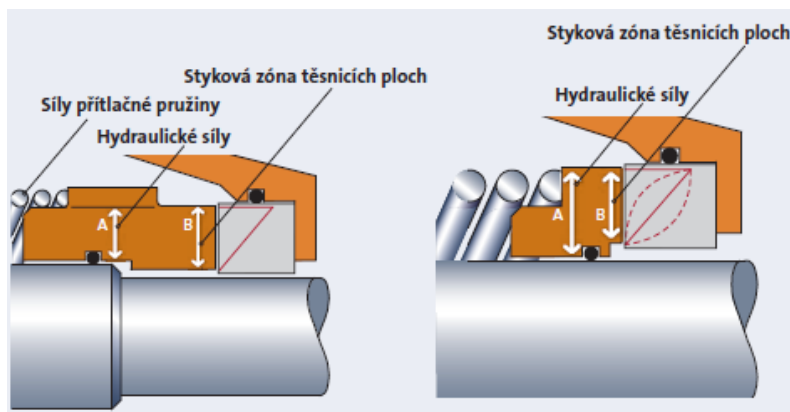
Tloušťka tohoto mazacího filmu závisí na několika faktorech: otáčky čerpadla, teplota a viskozita čerpané kapaliny a axiální síly, které vyvozuje mechanická ucpávka. Mazací film (resp. čerpaná kapalina) je v těsnící spáře neustále vyměňována díky odpařování kapaliny do okolní atmosféry a kruhovému pohybu kapaliny v těsnící mezeře. Tak jako u většiny navrhovaných částí mechanických ucpávek, i těsnící spára má své optimální rozměry a poměry mazacích vlastností. Na následujícím schématu lze vidět, že optimálních vlastností lze docílit při vyplnění téměř celé spáry mazacím filmem. Výjimkou je velmi úzká odpařovací zóna. [1] [3]



Obrázek 3-3 Optimální vyplnění těsnící spáry [3].

3.1.2 Vyvážené / nevyvážené ucpávky

Při chodu čerpadla působí na ucpávku axiální síly z jedné strany vyvozena pružinou a z druhé tlakem čerpané kapaliny, který vzniká v ucpávce. Pro správnou funkci ucpávky je potřeba zajistit odpovídající přitlačný tlak mezi jejími styčnými plochami. Volí se mezi dvěma různými typy, vyváženou a nevyváženou. Silové působení těchto typů ucpávek lze vidět na následujícím obrázku. Vyvážené ucpávky jsou méně náchylné na opotřebení, jelikož styčná plocha primárního těsnění je o poznání menší (hlavní rozdíl mezi vyváženou a nevyváženou ucpávkou). Jsou ovšem více rozměrově náročné než nevyvážená varianta (obr. 3-4 vpravo), která je ovšem náchylnější na opotřebení. [1] [3]



Obrázek 3-4 Působení sil vyvážené / nevyvážené ucpávky [3].

3.1.3 Proplachování

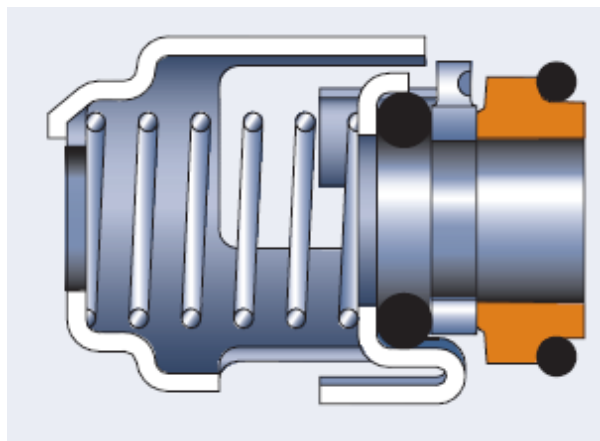
Některé aplikace si vyžadují tzv. proplachování ucpávky. Tento pomocný cyklus snižuje teplotu ucpávky a rovněž zabraňuje jejímu zanášení usazeninami. Existují dva typy proplachovacích systémů, vnější a vnitřní. Vnitřní systém proplachování odvádí malé množství čerpané kapaliny obtokem zpět do tělesa ucpávky. Tento systém se používá v teplovodních aplikacích pro snížení vzniku nadbytečného tepla. V aplikacích, kdy čerpadlo (mechanická ucpávka) pracuje s kapalinou s vydírajícími nečistotami, se používá vnějšího systému. U tohoto systému se používá proplachovací kapaliny, která je externě přiváděna do mechanické ucpávky. [1] [3]



Obrázek 3-5 Proplachování mechanické ucpávky [3].

3.2 O-kroužkové mechanické ucpávky

První z hlavních druhů mechanických ucpávek je ucpávka s pryžovými O-kroužky. Tyto O-kroužky zajišťují těsnění mezi rotující částí ucpávky a hřídelem. Aby mohl kroužek absorbovat axiální posuv kvůli změnám teploty a stavu opotřebení, musí volně klouzat po hřídeli. U těchto ucpávek je třeba dbát na správnou polohu pevného sedla, aby nedocházelo k nadměrnému odírání a opotřebovávání kroužku (i hřídele). Velmi škodlivé jsou pak usazeniny na hřídeli (rez), které mohou bránit kroužku v axiálním pohybu. Mechanické ucpávky s O-kroužky jsou vhodné pro horké kapaliny a vysokotlaké aplikace. V závislosti na těchto aplikacích se používají kroužky z olejovzdorné pryže NBR nebo pryže EPDM s vysokou odolností vůči chemikáliím (někdy také pryže FKM s vysokou teplotní odolností). [1] [3]



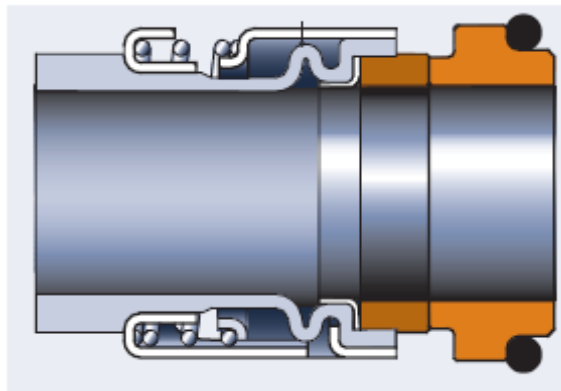
Obrázek 3-6 O-kroužková mechanická ucpávka [3].

3.3 Vlncové mechanické ucpávky

Dalším z hlavních typů mechanických ucpávek jsou ucpávky, jejichž charakteristickým prvkem je tzv. vlnovec. Ten nahrazuje funkci dynamického těsnění mezi rotujícím kroužkem a hřídelí. Existují dva typy ucpávek, které se liší materiálem vlnovce a jsou to ucpávky s pryžovým nebo kovovým vlnovcem. [1] [3]

3.3.1 S pryžovým vlnovcem

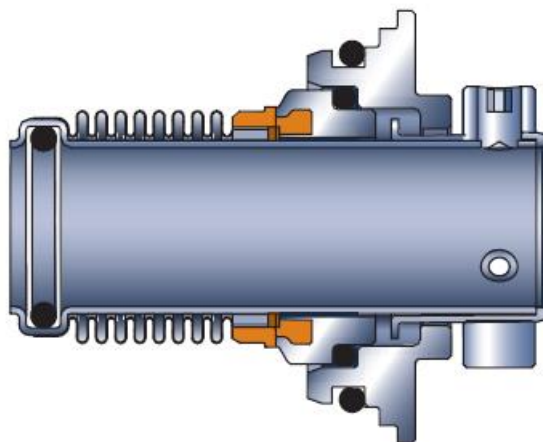
Mechanické ucpávky s pryžovým vlnovcem jsou vhodné pro aplikace se zvýšenou tvorbou usazenin na hřídeli (pryž není tak náchylná jako kov) a pro čerpání kapalin s obsahem pevných složek. Nejsou však odolné vůči teplé kapalině a vysokému tlaku. Podle daných provozních podmínek může být vlnovec vyroben z některých již dříve uváděných typů pryže (NBR, EPDM a FKM jak v případě O-kroužků). Při výrobě vlnovců se uplatňují dva jejich geometrické typy: skládané nebo svinované vlnovce. [1] [3]



Obrázek 3-7 Ucpávka se skládaným pryžovým vlnovcem [3].

3.3.2 S kovovým vlnovcem

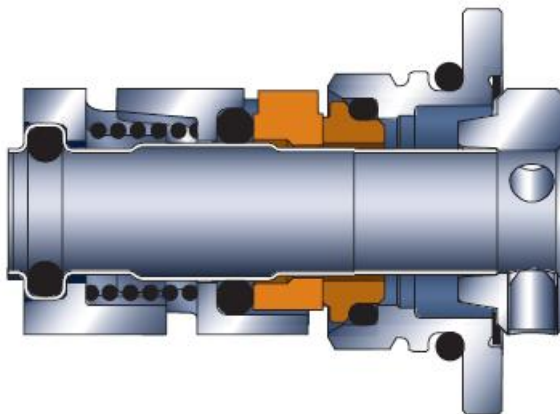
Tato ucpávka se od předchozí liší tím, že kovový vlnovec nenahrazuje pouze dynamický těsnicí prvek mezi rotačním kroužkem a hřídelí, ale i samotnou přítlačnou pružinu. Vlnovec pak vytváří potřebnou přítlačnou sílu ke styku těsnících ploch. Velikost těchto sil se odvíjí od počtu zvlnění. Ucpávky s kovovým vlnovcem jsou obzvláště vhodné pro čerpání horkých kapalin a pro vysokotlaké aplikace. Nejsou náchylné na usazeniny, je však třeba dbát na vyrovnání čerpacího agregátu. V takovém případě je totiž prohnutý vlnovec náchylný na únavové porušování, čímž může dojít k poškození ucpávky. [1] [3]



Obrázek 3-8 Ucpávka s kovovým vlnovcem [3].

3.4 Ucpávky typu Cartrige

Speciálně konstruované mechanické ucpávky typu Cartrige tvoří jednu kompaktní jednotku, která může být okamžitě instalována do čerpadla. Mimo její jednoduchý a rychlý servis má navíc ještě ochráněné styčné plochy a předepjatou přitlačnou pružinu. Kombinuje pak výhody kompaktní jednotky a vždy jedné z přechozích variant. Každá z přechozích typů ucpávek může být po určité úpravě konstruována jako „Cartrige verze“. [1] [3]



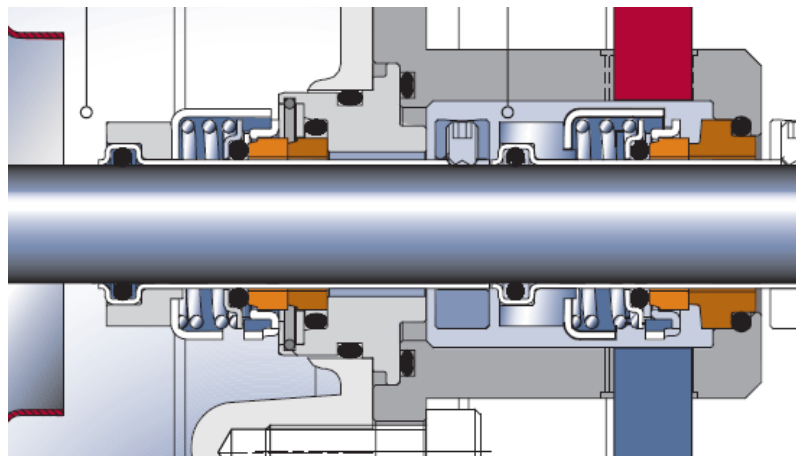
Obrázek 3-9 O-kroužková ucpávka typu Cartrige [3].

3.5 Dvojitě mechanické ucpávky

Tento typ ucpávek se používá v případech, kdy je nedostačující jednoduchá mechanická ucpávka. Bývají to aplikace při velmi vysokých (či velmi nízkých) tlacích nebo při čerpání kapaliny s mechanickými nečistotami. Svoje uplatnění nacházejí i při čerpání toxických, agresivních či výbušných kapalinách, kdy hraje velkou roli ochrana okolního prostředí. Existují dva typy těchto ucpávek: ucpávky uložené za sebou (v tandemu) a v uspořádání „zády k sobě“. [1] [3]

3.5.1 Tandemové uložení

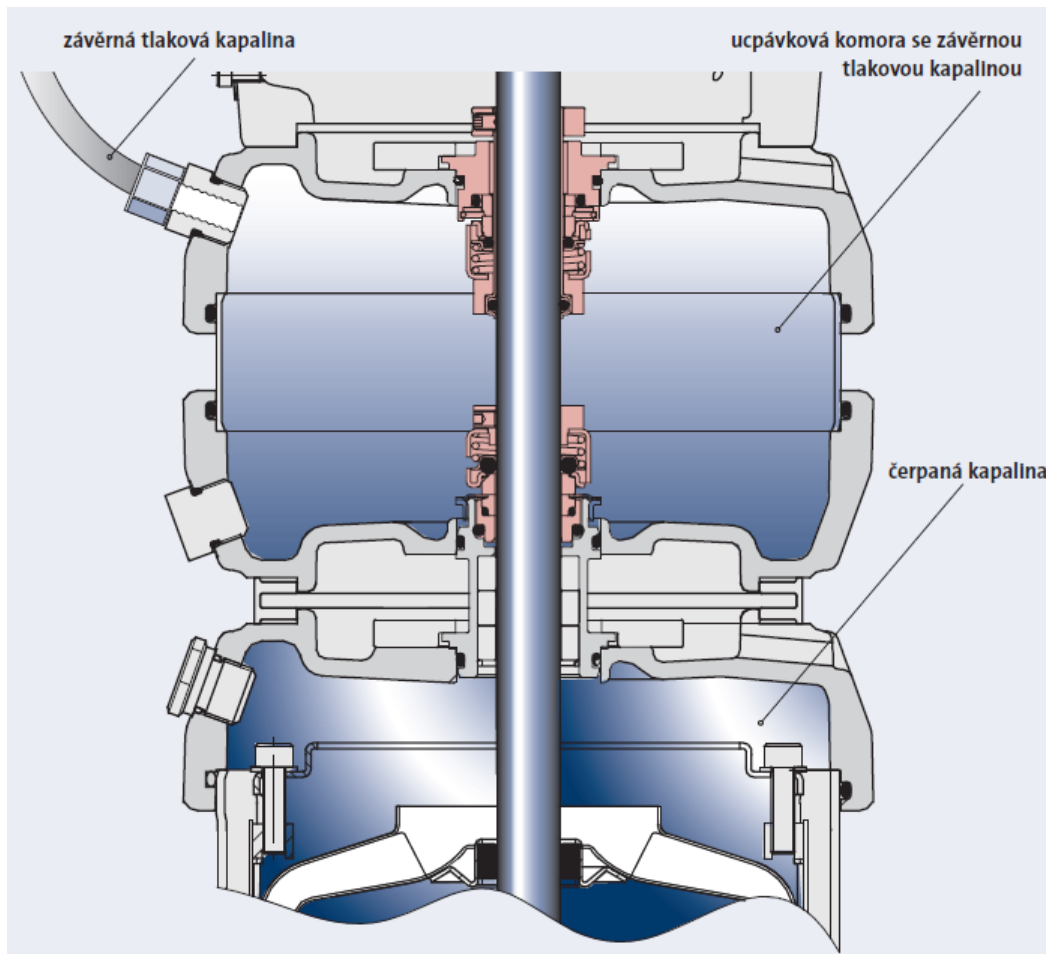
Tento systému uložení spočívá ve dvou za sebou skládaných ucpávek, které jsou uloženy v zvláštní ucpávkové komoře. Dvojitá ucpávka s tandemovým uložením musí být vybavena systémem na proplachování. Jsou tři způsoby proplachování. Cirkulace proplachovací kapaliny, kdy kapalina pomocí čerpadla (nebo gravitačně) obíhá mechanickou ucpávkou. Průplach se slepým zakončením anebo s odváděním proplachovací kapaliny (do kanalizace). [1] [3]



Obrázek 3-10 Dvojitá mechanická ucpávka s tandemovým uložením [3].

3.5.2 Uložení „zády k sobě“

Takto uložené ucpávky jsou ideálním řešením při utěšňování čerpadel pro vydírající, agresivní, výbušné či adhezivní kapaliny, které by jinak způsobily poškození nebo zablokování klasické ucpávky či ohrožovaly okolí nebo obsluhu čerpadla. Dvě ucpávky otočené zády k sobě jsou umístěny v samostatné ucpávkové komoře, ve které je potřeba udržovat stálý tlak (o 1 až 2 bary vyšší, než je tlak čerpadla). Tlak v ucpávkové komoře může být vyvolán buď nezávislým zdrojem, nebo samotným čerpadlem (dávkovací čerpadlo). Tento způsob uložení ucpávek chrání okolní prostředí a obsluhu čerpadla před účinky čerpané kapaliny. [1] [3]



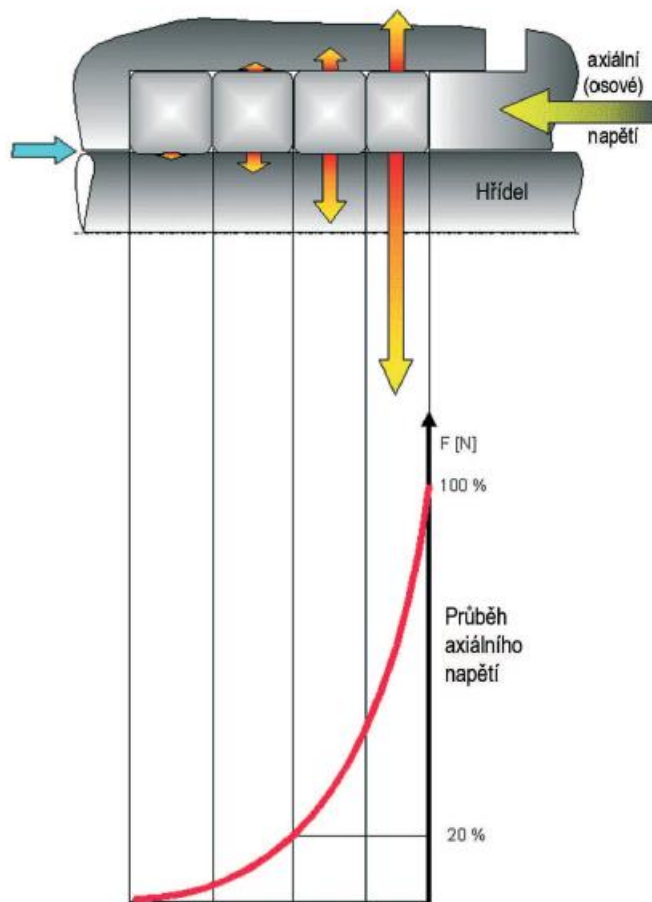
Obrázek 3-11 Dvojitá mechanická ucpávka uložena "zády k sobě" [3].

4 Stlačované ucpávky

Stlačované ucpávky slouží k utěsnění pracovní komory čerpadla již od počátku průmyslové revoluce. Jsou stále nejpoužívanějším typem ucpávek, které slouží k redukci průsaku plynů nebo kapalin a jsou používány zejména v chemickém průmyslu. Tento koncept utěsnění je sice prostorově náročnější než ucpávky mechanické, je však znatelně levnější a odolnější vůči nečistotám a průhybu hřídele. Dalšími výhodami jsou jejich dobré vlastnosti při nouzovém běhu, malá citlivost na opotřebení, jednoduchá údržba a úprava, jednoduchá konstrukce a při správné volbě materiálu i dlouhá životnost. [5] [10]

4.1 Princip

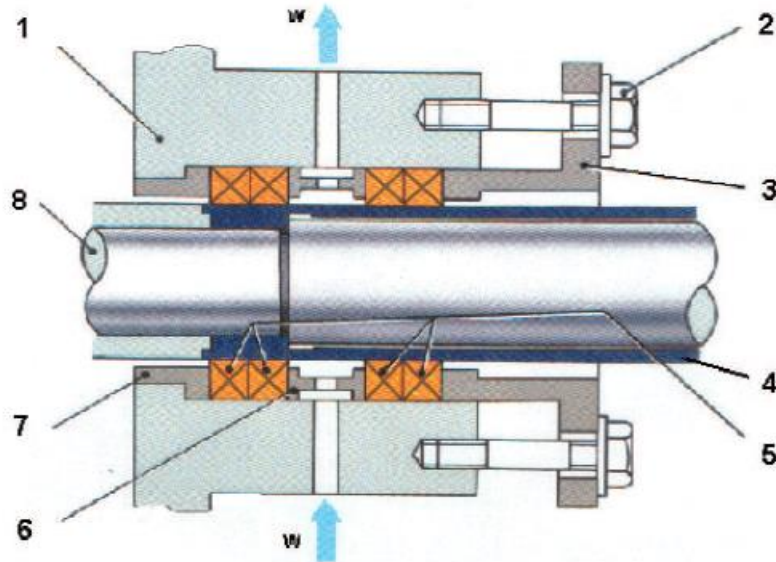
K utěsnění dochází stykem těsnících ploch a hřídele. Ucpávka složená z několika těsnících kroužků, které jsou vyrobeny z poměrně měkkých materiálů a jsou vsazeny do zástavby mezi hřídel a vnější pouzdro (pracovní komora). Utažením šroubů těsnících brýlí vzniká axiální síla, která působí na těsnící kroužky. Ta vyvolává radiální tlak, čímž dochází k utěsnění pracovního média (obr. 4-1). Při dotahování také vzniká těsnící spára, která má zanedbatelný průsak. Ten ovšem může mít v některých případech kladnou funkci mazání nebo chlazení ucpávky. [5]



Obrázek 4-1 Schéma těsnících sil [5].

4.3 Základní konstrukce

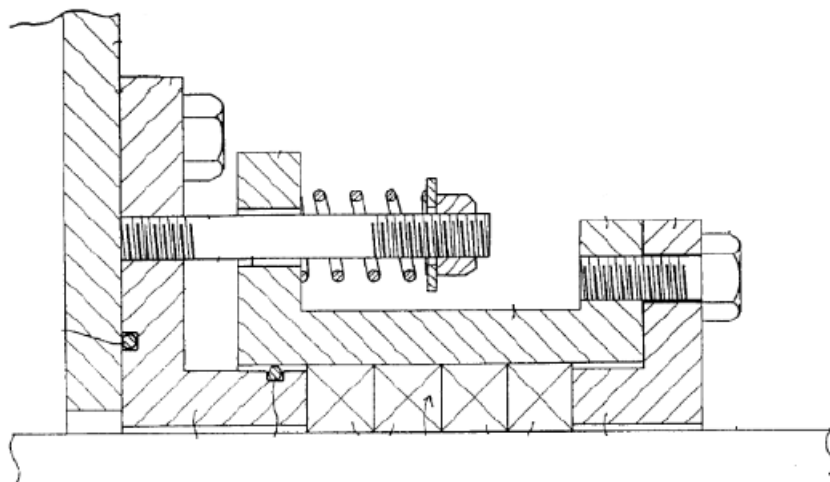
Hlavní předností stlačovaných ucpávek je jejich jednoduchá konstrukce. Mimo hlavní části ucpávky jako jsou těsnící kroužky, přitlačné brýle a šrouby, bývají ucpávky opatřeny i nejrůznějšími ochrannými pouzdry a kroužky.



Obrázek 4-2 Konstrukce ucpávky [5].

Legenda k obrázku: 1-komora tělesa, 2-přítlačné šrouby, 3-přítlačná objímka (brýle), 4-ochranné vložky hřídele, 5-těsnící kroužky (prstence), 6-lucerna (pro průtok mazací kapaliny), 7-uzavírací vložka, 8-hřídel

Většina stlačovaných ucpávek je konstruována, jak je na výše uvedeném obrázku. Některé technické aplikace si ovšem vyžadují menší úpravy. Prvním z řešení jsou speciální utahovací šrouby, kolem jejichž dřívku je namotána šroubová pružina (obr. 4-3). Ta amplifikuje utahovací moment a poskytuje jak lepší těsnící efekt, tak ochranu proti povolení šroubů. [11]



Obrázek 4-3 Ucpávka s pružinovým šroubem [11].

Druhou úpravou ucpávky je přidání šroubové pružiny přímo mezi kroužky v těsnícím prostoru (na obr. 4-2 je pozice 6 nahrazena šroubovou pružinou). Prostor mezi kroužky, který vznikne přidáním pružiny (a ve většině případů ještě distančních kroužků), slouží k odsávání těsněné tekutiny, nebo plnění přídavné tekutiny podporující těsnící efekt ucpávky. [11]

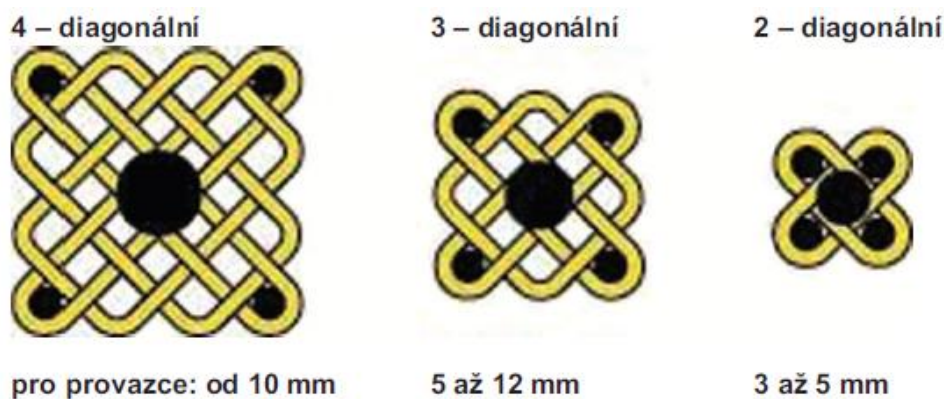
4.4 Struktura šňůr

Těsnící kroužky stlačovaných ucpávek jsou vyráběny z několikero nejpoužívanějších materiálů, jako jsou polyamid, akryl, polytetrafluoretylen, skelná či uhlíková vlákna a přírodní vlákna jako bavlna, konopí, len apod. (více o materiálech v kapitole 2), v nejrůznějších tvarech a velikostích (obr. 4-4 zleva: trapézový, čtvercový, obdélníkový, s hadicovým jádrem, kruhový a oválný). [5]



Obrázek 4-4 Pruřezy těsnící šňůr [5].

Nejdůležitější roli ovšem hraje způsob, jakým jsou dané kroužky pleteny. Mezi nejpoužívanější způsoby patří copové, soustředné a diagonální pletení. Pro odstředivá čerpadla se výhradně používá způsobu diagonálního. Název tohoto způsobu vznikl od diagonální oběžné dráhy paličky pletacího stroje. Podle požadavků na rozměr kroužku se používá stroje buď s 18, nebo 32 paličkami. Takto pletené těsnící kroužky jsou velmi robustní ale také ohebné. Mají malý průsak a při poškození vlákna se kroužek netřepí a zůstává celistvý. Rovněž mají stejnou hustotu průřezu a dobrou schopnost pojmoutí impregnace. [5]



Obrázek 4-5 Diagonálně pletené kroužky [5].

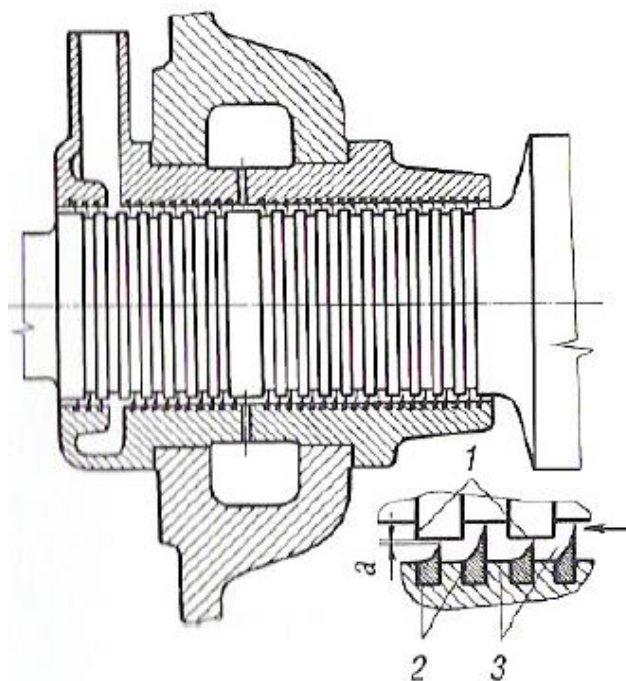
5 Bezdotykové ucpávky

Bezdotykové ucpávky jsou dalším široce využívaným typem ucpávek. Využívají bezkontaktního těsnění, které sice nevytváří médium úplnou neprostupnou bariéru, má však obrovskou výhodu, a to velice nízké tření. Tento druh těsnění se využívá pro aplikace s vysokými obvodovými rychlostmi. Základním požadavkem na konstrukci těchto ucpávek je co nejmenší možná těsnicí spára (minimalizace průsaku) mezi statickou a rotační částí čerpadla. Zároveň je však důležité, aby v žádném případě nedošlo ke kontaktu obou ploch. Utěsnění je docíleno díky rozdílu tlaků a třecímu odporu kapaliny. [10] [12]

5.1 Labyrintové ucpávky

První z bezdotykových ucpávek je tzv. labyrintová. Tato nevšedně vypadající ucpávka je tvořena velkým počtem malých zubů a mezer tak, aby mezi statorem a rotorem vznikla co nejmenší spára. Ucpávkové těleso bývá zejména dělené. Princip této ucpávky je založen na poklesu tlaku pracovního média v komůrce, čímž dojde ke zvýšení jeho rychlosti, která se v následující komůrce vířením zase sníží. Toto se opakuje po celé délce ucpávky několikrát po sobě tak, že se tlak pracovního média sníží až na atmosférický. Z toho plyne, že při zvyšujícím se počtu komůrek klesá průsak kapaliny. [10] [13]

Labyrintové ucpávky jsou poměrně složité a jejich výroba je jak časově náročná, tak finančně nákladná. Při její montáži je třeba dbát jak na házení a nesouosost hřídele, tak na její axiální posun. Ten by totiž mohl vést k okamžitému poškození ucpávky. [10] [13]

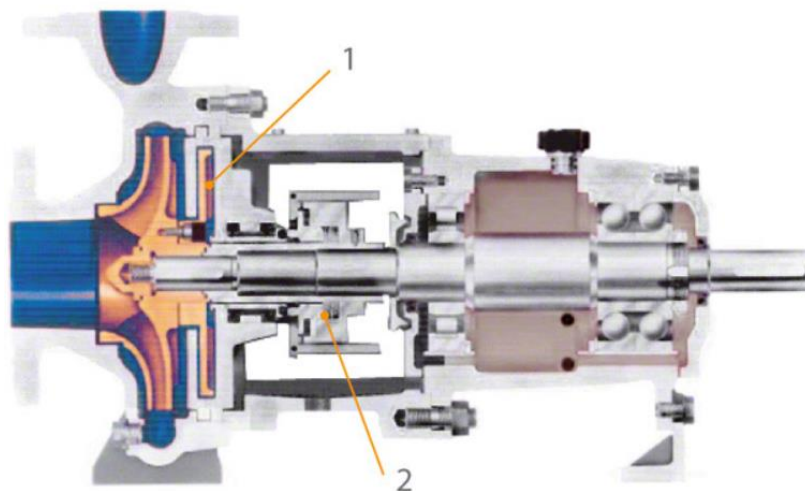


Obrázek 5-1 Labyrintová ucpávka [13].

Legenda k obrázku: a - mezera labyrintu, 1 – hřeben hřídele, 2 – těleso ucpávky, 3 – labyrintové komory.

5.2 Odstředivé ucpávky

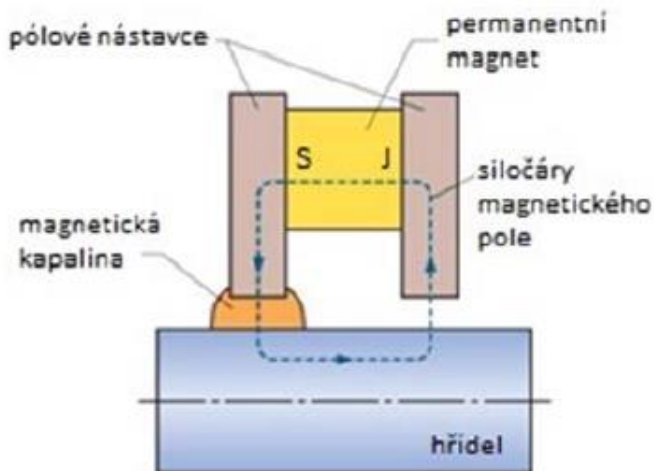
Speciální typ ucpávek, který pracuje s obvodovou rychlostí hřídele (otáčkami čerpadla) a je na ní přímo závislý. Na hřídeli je namontován disk s lopatkami (obr. 5-2, poz. 1), který při rotaci vytváří prstenec kapaliny. Tento vzniklý prstenec vytváří tlak (kapalnou bariéru), která zamezuje úniku pracovního média. Tato ucpávka je kombinována s dalšími, jako např. s mechanickou ucpávkou (obr. 5-2, poz. 2) či gufery, které zajišťují utěsnění při zastavení či rozbíhání stroje. Díky bezkontaktnímu provozu u těchto ucpávek nedochází k téměř žádnému opotřebení. [10] [13]



Obrázek 5-2 Odstředivá ucpávka [12].

5.3 S magnetickou kapalinou

Tyto ucpávky používané od 70. let minulého století jsou velmi rozšířené v oblastech utěšňování plynů a vakuových technologií, díky jejímu téměř hermetickému utěsnění. Jsou velmi oblíbené kvůli své jednoduché konstrukci a bezúdržbovému provozu (až 10 let). Pracují na principu clony, která vzniká pomocí permanentního magnetu a feromagnetické kapaliny. Magnet a magnetizovatelná hřídel pak vytváří uzavřený obvod, který udržuje kapalinu v mezeře v podobě jakéhosi „kapalného kroužku“, který je přilnutý k plochám magnetu a hřídele. [10]



Obrázek 5-3 Schéma ucpávky s magnetickou kapalinou [10].

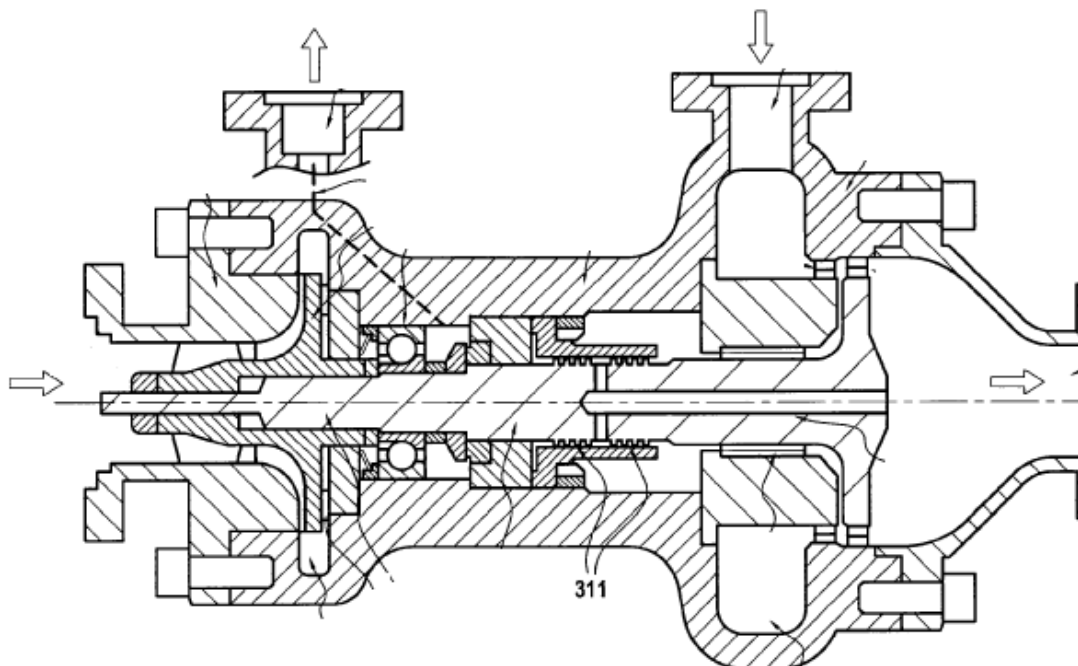
6 Ucpávky raketových turbo-čerpadel

Turbo-čerpadla používaná pro čerpání kapalného kyslíku do raketových motorů si vyžadují užití speciálního druhu labyrintových ucpávek, které ještě v zásadě bývají doplněny o čelní kontaktní těsnění (pro utěsnění látek v momentě, kdy stroj nepracuje). Tento stroj je složený z plynové turbíny a čerpadla, jejíž oběžná kola jsou uložena na společné hřídeli. Turbína poháněná plyny pak následně roztáčí oběžné kolo čerpadla, které dopravuje kapalný kyslík do motorů.

Ucpávky pro tato speciální čerpadla mají na rozdíl od těch běžných odlišný úkol. Jelikož tento stroj pracuje se dvěma médii, plyny pohánějící turbínu a kapalným kyslíkem přepravovaným čerpadlem, je nutno tyto dvě média od sebe oddělit a dokonale utěsnit. V případě nedokonalého utěsnění by došlo k chemické reakci a následnému kolapsu. [14]

6.1 Labyrintová ucpávka bez injektoru

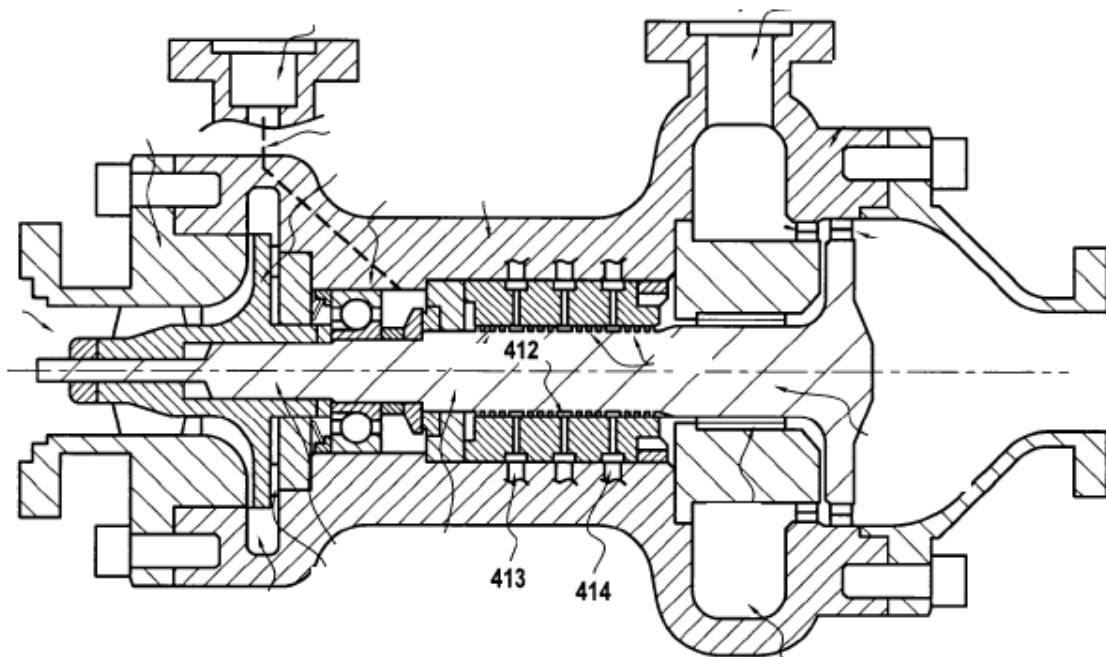
Tento typ labyrintové ucpávky používané v turbo-čerpadlech raketových motorů se ve své zásadě nijak neliší od klasické labyrintové ucpávky. Jedná se o skupinu zubů a mezer, tvořící malou těsnící spáru, která zapříčiňuje zvýšení rychlosti v komůrce a tím pádem poklesu tlaku, která se v další opět sníží (obr. 6-1, poz. 311). Navíc jsou hřídele těchto ucpávek opatřeny podélným kanálem, který slouží k odvodu přebytečného média zpět k oběžnému kolu (v tomto případě oběžnému kolu plynové turbíny). Ucpávky jsou kombinované, tj. k utěsnění druhého pracovního média (kapalného kyslíku), se používá čelní hydrodynamické ucpávky. [14]



Obrázek 6-1 Řez turbo-čerpadlem, a jeho labyrintová ucpávky [14].

6.2 Labyrintová ucpávka s injektorem

Častější variantou při řešení problému utěšňování kapalného kyslíku a turbínového paliva jsou labyrintové ucpávky opatřené tzv. injektorem. Jedná se o konstrukční úpravu, díky níž je do ucpávky vpravován inertní plyn, který dokonale oddělí (zabrání smísení) dvě pracovní média. Na následujícím obrázku (obr. 6-2) lze vidět ucpávku se třemi takovými komorami. Krajní komory slouží k odvodu přebytečného média z ucpávky zpět do pracovních komor, tj. komora na levé straně (obr. 6-2, poz. 413) slouží k odvodu přebytku kapalného kyslíku zpět k oběžnému kolu čerpadla, a komora na pravé straně (obr. 6-2, poz. 414) k odvodu přebytku paliva plynové turbíny. Do prostřední komory (obr. 6-2, poz. 412) je pak vpravován onen inertní plyn (v drtivé většině se jedná o hélium). Hélium pak v komoře tvoří neprostupnou bariéru, čímž utěšní obě pracovní látky v příslušných prostorech. [14]



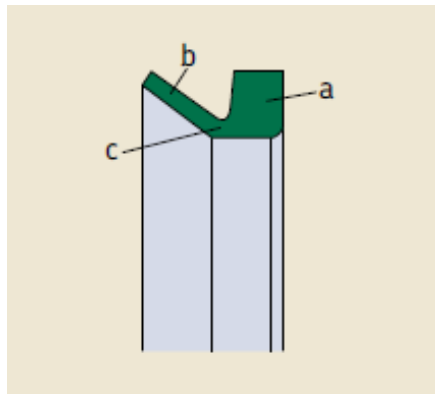
Obrázek 6-2 Řez turbo-čerpádlem a jeho labyrintová ucpávka s injektorem [14].

7 Sekundární ucpávky

Sekundární ucpávky jsou pomocné konstrukční prvky hlavních ucpávek, které zajišťují jejich správnou funkci či vylepšují jejich důležité vlastnosti.

7.1 V-kroužky

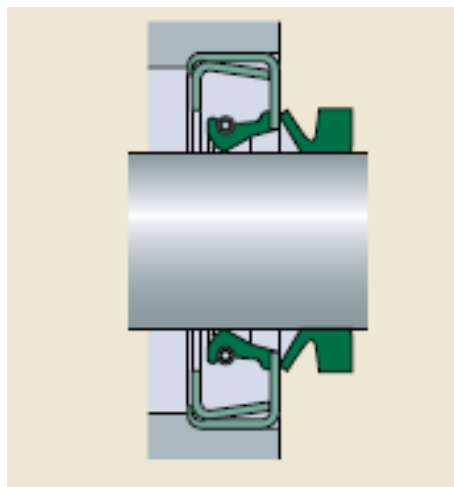
Tato těsnění, která jsou vyráběna výhradně z nitrilkaučuku (materiál s dobrou chemickou odolností a odolností proti opotřebení), jsou určena pro těsnění rotujících hřídelů při použití plastického maziva a jsou především používána jako přídatná. V případě aplikace s vyššími teplotami se používá fluorokaučukové pryže. Jsou vyráběna pouze z elastomerů bez jakýchkoliv výztužných tkanin, či ocelových drátů. Je složen z těla těsnění (obr. 7-1 a), elastického kuželovitěho břitu (obr. 7-1 b) a pružného závěsu (obr. 7-1 c). [2] [6]



Obrázek 7-1 Průřez V-kroužku [2].

7.1.1 Princip a funkce

V-kroužky jsou určeny pro těsnění ložiskových uložení. Často se ale také montují jako přídatné kroužky (obr. 7-2), které chrání hlavní ucpávku ve velice znečištěných prostředích proti nečistotám či korozi nebo ke zvýšení jejich účinnosti. Při užití V-kroužků nemusí být kladeno příliš velké zřetele na geometrickou přesnost stykové plochy, jelikož jsou díky pružnému břitu a závěsu schopny tolerovat určité úhlové naklopení hřídele a stále zajišťovat spolehlivé utěsnění. [2]



Obrázek 7-2 V-kroužek jako přídatné těsnění [2].

7.1.2 Provedení

V-kroužky jsou k dostání v několika základních provedeních. Tvar kroužků se bude lišit podle funkce, kterou má zastávat. Varianty jsou vyráběny pro hřídele různých průměrů. V-kroužek je normalizovaný prvek, většina prodejců ovšem nabízí úpravu rozměrů kroužku (jak průměru, tak tvaru) na zvláštní objednávku. Označení kroužků v následujících odstavcích a ilustračním obrázku průřezů (obr. 7-3) je v souladu s americkým i mimo americkým značením. [2] [6]

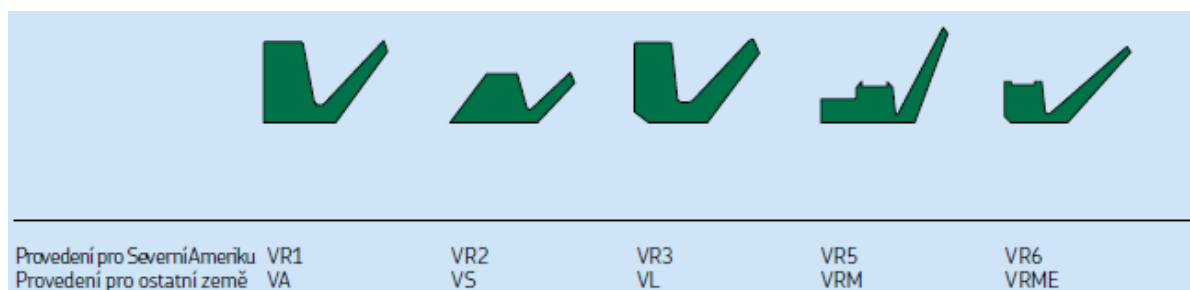
VR1/VA je standartním a nejběžnějším typem s klasickým průřezem a zadním čelem. Nejčastěji lze tento kroužek nalézt v ložiskových uloženích převodovek, elektromotorů a pohonů. [2]

VR2/VS je kroužek malého průřezu s kuželovým zadním čelem a širokým tělem, které zajišťuje stálou polohu na hřídeli. Toto provedení se nejčastěji používá v zemědělských a automobilních aplikacích. [2]

Další variantou je kroužek VR3/VL, který je charakteristický svým kompaktním axiálním průřezem. Je vhodný pro aplikace s omezeným prostorem jako náhrada za labyrintové těsnění. [2]

Široký, velkopřůměrový (avšak s malým průřezem) kroužek VR5/VRM nabízí díky speciální drážce možnost axiálního a radiálního zajištění na hřídeli pomocí běžné spojovací pásky. Tento V-kroužek je vyráběn s prodloužením, které může být namontováno do mechanických dílů, nebo zkráceno v případě omezeného prostoru. Tato varianta je určena pro vysokorychlostní aplikace. [2]

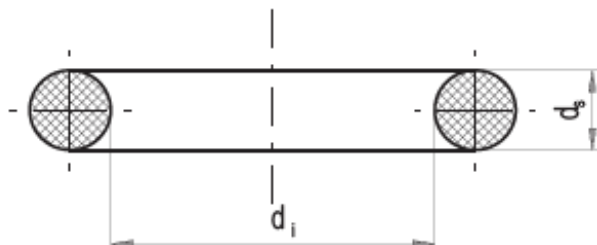
Poslední variantou je VR6/VRME, který je taktéž velkopřůměrový a je určený pro náročné provozní podmínky s velkým axiálním posunutím. Stejně jako předchozí varianta VR5/VRM může být na hřídeli zajištěn pomocí pásky, není již však opatřen prodloužením pro montážní úpravu. Tento V-kroužek je vyráběn pouze na zvláštní požadavky a objednávky. [2]



Obrázek 7-3 Provedení V-kroužků [2].

7.2 O-kroužky

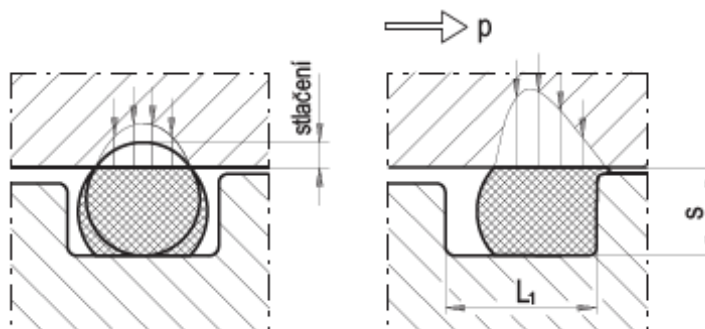
Celopryžové nebo polymerové kroužky kruhového průřezu (obr. 7-4) používané k utěsnění širokého rozsahu médií o nízkých až středních tlacích. Lze je použít i v aplikacích s vyššími tlaky, to však vyžaduje velmi přesné provedení (malé vůle a tolerance kroužků a drážek). Používají se v běžných hydraulických a pneumatických aplikacích jako statické i dynamické těsnění (hřídele, víka, příruby, armatury apod.). V čerpací technice jsou to především O-kroužky mechanických ucpávek. [6] [15]



Obrázek 7-4 Řez O-kroužkem [15].

7.2.1 Princip a funkce

O-kroužky jsou samočinná těsnění, jejichž princip je založený na záměrné deformaci. Velikost této deformace se odvíjí od hloubky drážky vzhledem k použitému průřezu kroužku. Kroužek stlačený mezi drážkou a stěnou víka (příruby, čepu, náboje apod.) vyvolává přítlačné síly (někdy označované taky jako stlačení či předpjetí), které se přičítají k tlakovým silám v systému. Z toho plyne, že výsledná těsnicí síla roste se stoupajícím tlakem v systému (obr. 7-5). [6] [15]



Obrázek 7-5 Vliv růstu tlaku systému na kroužek [15].

Legenda k obrázku: p – tlak systému, S – hloubka drážky, L_1 – délka drážky

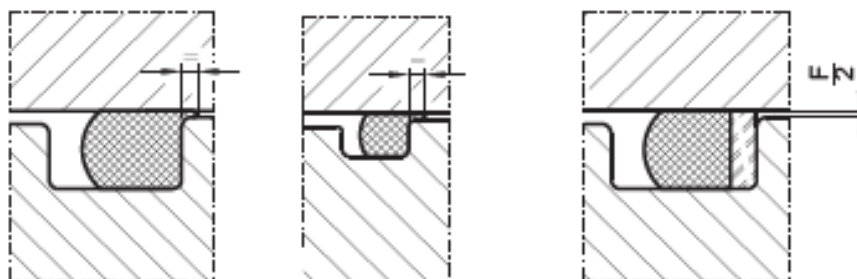
Stlačovanou tloušťku (dále označována jako d_s) O-kroužků je doporučováno volit tu největší, kterou daná situace dovoluje. Se vzrůstající tloušťkou d_s se zlepšují kladné vlastnosti kroužku. Díky větší dosedací ploše vzrůstá i účinnost těsnění. Kroužek se nemusí pro zajištění potřebného těsnícího efektu tak moc stlačovat, je teda méně trvale tlakově deformován (menší opotřebení) a díky tomu roste jeho životnost. V neposlední řadě u kroužků větších průřezů není třeba dbát takového zřetele na výrobní tolerance těsněných součástí, tj. kroužek je schopen utěsnit větší spáru (viz podkapitola „Provedení drážky“). [6] [15]

7.2.2 Provedení drážky

Standartní provedení drážky, o kterém je tato podkapitola, je obdélníkového průřezu. Existují také jiná provedení, používaná ve speciálních situacích, nebo pro zlepšení manipulace s těsněním. Drážky lichoběžníkového průřezu jsou navrhovány v případech, kdy je požadováno, aby těsnění samovolně nevypadávalo z drážky z důvodu častější demontáže (např. v poloze nad hlavou) uložení. Další variantou je trojúhelníkový zástavbový průřez. Tento tvar není příliš vhodný kvůli nedostatečnému místu pro deformaci kroužku a používá se pouze v nevyhnutelných případech. Posledním provedením jsou drážky pro těsnění vakua. Jsou podobné těm obdélníkového průřezu, ale je dbán mnohem větší důraz na přesnost výroby, jelikož je nutné, aby kroužek vyplnil co největší možný prostor drážky. [15]

Pro správné fungování O-kroužku je nutná přesná výroba usazovací drážky. Její stěny by měly být pravouhle (s tolerancí zkosení stěny do 5°). Délka a hloubka drážky musí mít příslušnou velikost, aby mohl tlak kapaliny nepřerušeně působit přes celý profil drážky. Z důvodu bobtnání a tepelné roztažnosti kroužku musí být objem drážky o 25 % větší než objem kroužku. [6] [15]

Další významnou částí drážky, nebo spíše těsnících ploch je spára, která vzniká při kontaktu těsnění s vnější těsnící plochou (obr. 7-6 označeno jako F/2). Při působení tlaku v systému dochází k přitlačení O-kroužku ke stěně drážky, čímž je (ať už ve větší nebo menší míře) vytlačován z drážky ven do této spáry. Tento nežádoucí jev se nazývá extruze a dochází při něm k velice rychlému opotřebení kroužku. Pro eliminaci tohoto jevu je potřeba co nejmenší spáry. Toho lze docílit volbou většího průřezu O-kroužku nebo kroužku z tvrdšího materiálu. Nejlepším konstrukčním řešením je ovšem kombinace O-kroužku s opěrným kroužkem (obr. 7-6), který vymezení spáru na minimum. [6] [15]



Obrázek 7-6 Extrudovaný a opěrný kroužek [15].

7.2.3 Výhody a nevýhody

Velkou výhodou těchto kroužků je jejich jednoduchost a snadná montáž (stačí pouze navléknout). Vyžadují velmi malý prostor pro uložení, nepotřebují přídržovací prvky a jsou samo těsnící (díky deformaci). Jako jedno z mála těsnění těsní oboustranně (s poměrně dobrou těsnivostí), a to přímočarý, kývavý a v omezené míře i rotační pohyb. [6]

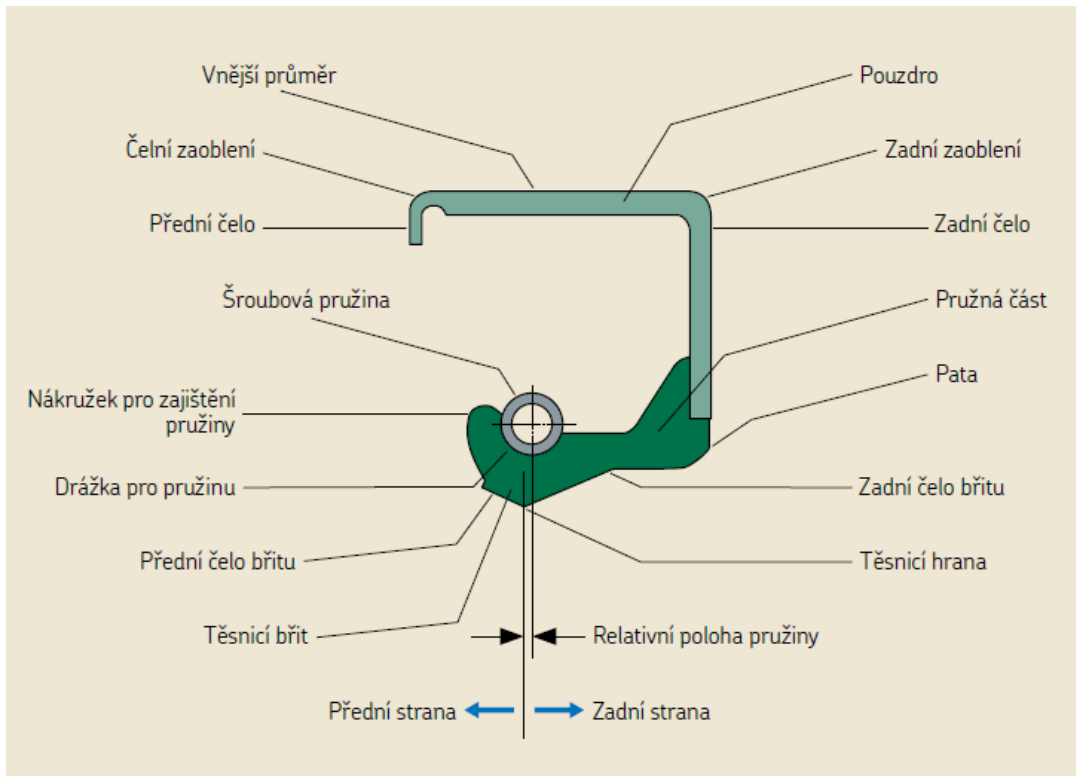
Samo těsnící efekt díky deformaci těsnění má negativní vliv na životnost kroužku v případě velkých pracovních rychlostí a opakujícím se pohybu. Vyžadují přesnější tolerance těsněných ploch a úložných drážek než některá jiná těsnění. Pro správnou funkci kroužku musí mít těsněná látka určitou samomaznost (proto je O-kroužek výhradně používán pro oleje) a nehodí se pro znečištěná média. [6]

8 Gufera

Hřídelové těsnící kroužky neboli gufera jsou především používány k utěsnění ložiskových uložení proti úniku maziva či vniknutí nečistot. Svoje místo mají ale také jako ucpávky čerpadel, kdy jde o utěsnění pracovní komory a jejich média. Použití gufer jako ucpávek má svoje omezení, a to zejména kvůli tlaku uvnitř čerpadla. Gufera lze po určité úpravě používat až do tlaku 1 MPa (toto je ovšem velmi závislé na obvodové rychlosti hřídele).

Vnější válcové pouzdro vyrobené z oceli nebo elastomeru, které se lisuje do víka ložiskových skříní, což zajistí požadovaný přesah a statické utěsnění v díře tělesa. [2] [16]

Nejdůležitější oblastí těsnění společně se stykovou plochou hřídele tvoří těsnící břit, který se běžně vyrábí z elastomeru nebo termoplastu. Těsnící hrana břitu (vytvořena lisováním, řezáním nebo broušením) je přitlačována ke stykové ploše hřídele radiální silou vyvolanou pomocí ocelové šroubové pružiny. Těsnící účinek břitu závisí na úpravě jeho stykové oblasti a může být tímto i zvýšen. [2] [16]

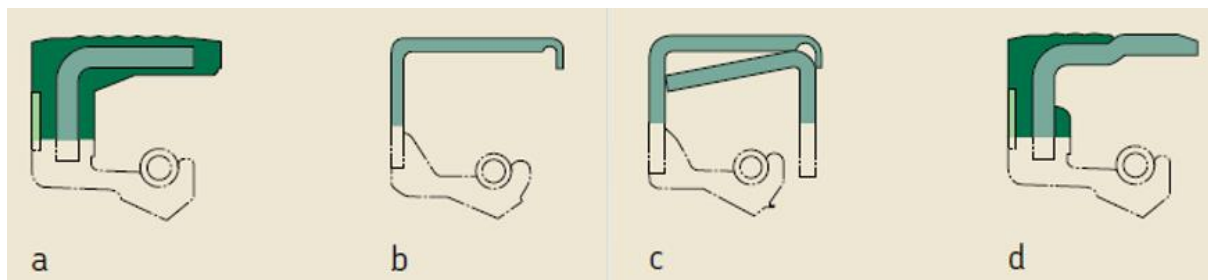


Obrázek 8-1 Kroužek s ocelovým pouzdem a jednoduchým břitem [2].

8.1 Provedení vnějšího průměru a bříty

8.1.1 Vnější průměr

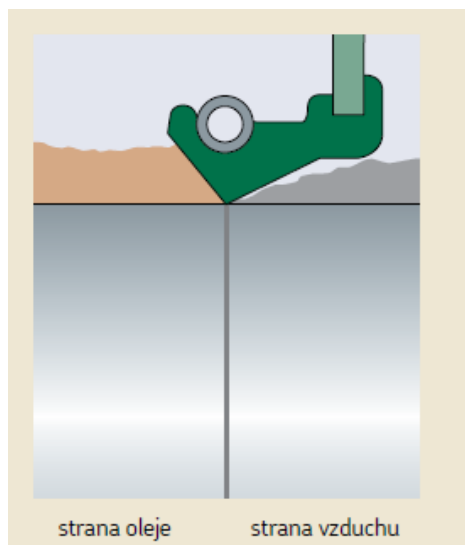
Existuje mnoho typů vnějšího průměru hřídelových kroužků. Jsou však tři hlavní typy používané v drtivé většině případů. Jejich použití bude záviset na provozních podmínkách dané aplikace. Každý jeden z typů je vhodný používat v jiných situacích. Vnější průměr z elastomeru je vhodný pro méně kvalitní otvory, ocelový vnější průměr má nejpevnější a nejspolehlivější uložení. Poslední provedení je pak kombinací dvou předchozích. Jedná se o elastomerový základ vyztužený ocelovým kroužkem. [2]



Obrázek 8-2 Provedení vnějšího průměru [2].

8.1.2 Břit

Tvar a provedení nejdůležitější částí těsnícího kroužku je výsledek mnohaletého výzkumu, ale i praktických zkušeností, které firmy vyrábějící tyto prvky získali spoluprací s uživateli. Vzdálenost těsnícího bříty a zadního čela těsnění (obr. 8-1), pevnost pružné části, úhel bříty a tuhost pružiny jsou zvolené tak, aby bylo zajištěno potřebného těsnícího efektu mezi břítem a stykovou plochou hřídele. Běžné provedení (obr. 8-4) má rovnou hranu, která na stykové ploše opisuje pomyslnou přímku. [2] [16]

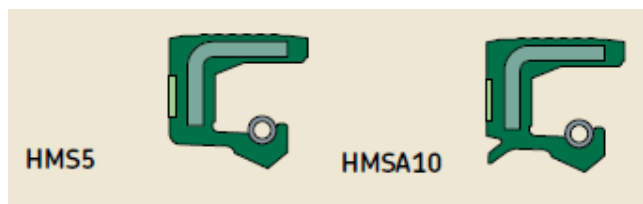


Obrázek 8-3 Běžný těsnící břit [2].

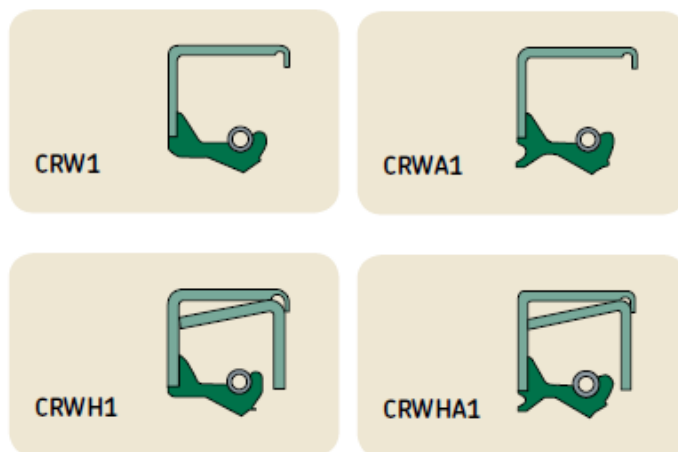
8.3 Kroužky pro všeobecné použití

Na kroužky pro všeobecné použití nejsou kladeny takové nároky jako na kroužky pro těžký průmysl. Jejich konstrukce je zpravidla jednoduchá a nenáročná. Označení kroužků v následující podkapitole je převzato od známého výrobce těsnění, firmy SKF

Těsnění s vnějším průměrem z elastomeru HMS5 a HMSA10 poskytuje dobré utěsnění i v případě větší drsnosti povrchu nebo u dělených těles. Vnější plocha kroužku má speciální vlnovou úpravu, která zabraňuje zpětnému odpružení při montáži a zajišťuje kroužek v díře. Kroužek HMSA10 má navíc bezkontaktní (ten umožňuje práci při stejných obvodových rychlostech jako v případě jednoho) přídavný břit, který chrání hlavní břit před nečistotami. [2]



Kroužky s nízkým třením CRW1, CRWA1, CRWH1 a CRWHA1 jsou opatřeny speciálním břitkem z nitrilkaučuku se sinusovou stopou (obr. 7-5), který omezuje vývin tepla. Jejich ocelové pouzdro zjednodušuje montáž a zajišťuje pevné a přesné uložení v díře tělesa. Dvojice kroužků CRW1 a CRWA1 se liší ocelovou výztuží. Druhá dvojice kroužků CRWH1 a CRWHA1 jsou opatřeny *Obrázek 8-4 Kroužek HMS a HMSA [2].*



Obrázek 8-5 Kroužky CRW1, CRWA1, CRWH1 a CRWHA1 [2].

8.4 Kroužky pro těžký průmysl

Výroba kovů, stavebnictví, větrná energie, těžba nerostů, lesnictví, to vše a více je považováno za těžký průmysl. Na gufera v těchto odvětvích je kladen velký nárok z hlediska odolnosti proti širokému rozsahu obvodových rychlostí, teplot, a především ochraně proti průniku hrubých nečistot do těsněné oblasti. Těsnění se vyrábějí v různých provedeních, která mají odlišné vlastnosti a konstrukci. Označení kroužků v následující podkapitole je převzato od známého výrobce těsnění, firmy SKF. [2] [16]

Kroužky s ocelovým pouzdem

Těsnění HDL jsou hřídelové kroužky určené pro aplikace při vysokých obvodových rychlostech, které snesou poměrně velké házení a nesouosost hřídele. Tyto kroužky jsou jedinečné díky své konstrukci s přidavnými pružinami z nerezové ocele, které jsou rozmístěny po celém jeho obvodu. Spolu s klasickou přitlačnou pružinou dokážou vyvinout značnou radiální sílu, díky které je těsnící efekt spolehlivý i v náročných podmínkách. [2]

Nejpoužívanějším typem hřídelových kroužků v těžkém průmyslu jsou těsnění HDS1 a HDS. Jsou složena z ocelového pouzdra, nitrilkaučukového těla (nebo také Duralip, Duratemp a Duralife) a nerezové přitlačné pružiny. Rozdíl mezi těmito těsněními je v uložení nerezové pružiny. Kroužek HDS1 má klasicky uloženou pružinu, kdežto HDS2 má pružinu přetaženou pružnou vrstvou, která ji zajišťuje v drážce. [2]



Obrázek 8-6 Kroužky HDL, HDS a HDS [2].

Těsnění s vnějším průměrem z elastomeru

Vnější průměr z elastomeru u těchto těsnění nabízí několik důležitých předností, které jiné používané materiály nemají. Jsou vhodná pro dělená tělesa a zabraňují poškození díry při montáži, které by jinak zapříčinilo netěsnost a únik maziva či těsněného média. Těsnění lze montovat ručně, nebo za pomoci jednoduchých nástrojů i v případě větších průměrů. [2]

Těsnění s označením HSF jsou místo ocelového pouzdra opatřena tkaninovou výztuhou vnějšího průměru, který je vyroben z elastomeru. Tato těsnění musí být zajištěna v díře tělesa pomocí víka, aby nedošlo k jeho uvolnění. Kroužky HSF2 a HSF6 jsou opatřeny radiálními mazacími drážkami, HSF3 a HSF7 ještě navíc obvodovou mazací drážkou. Tato těsnění jsou obzvláště vhodná pro aplikace v čerpadlech. [2]



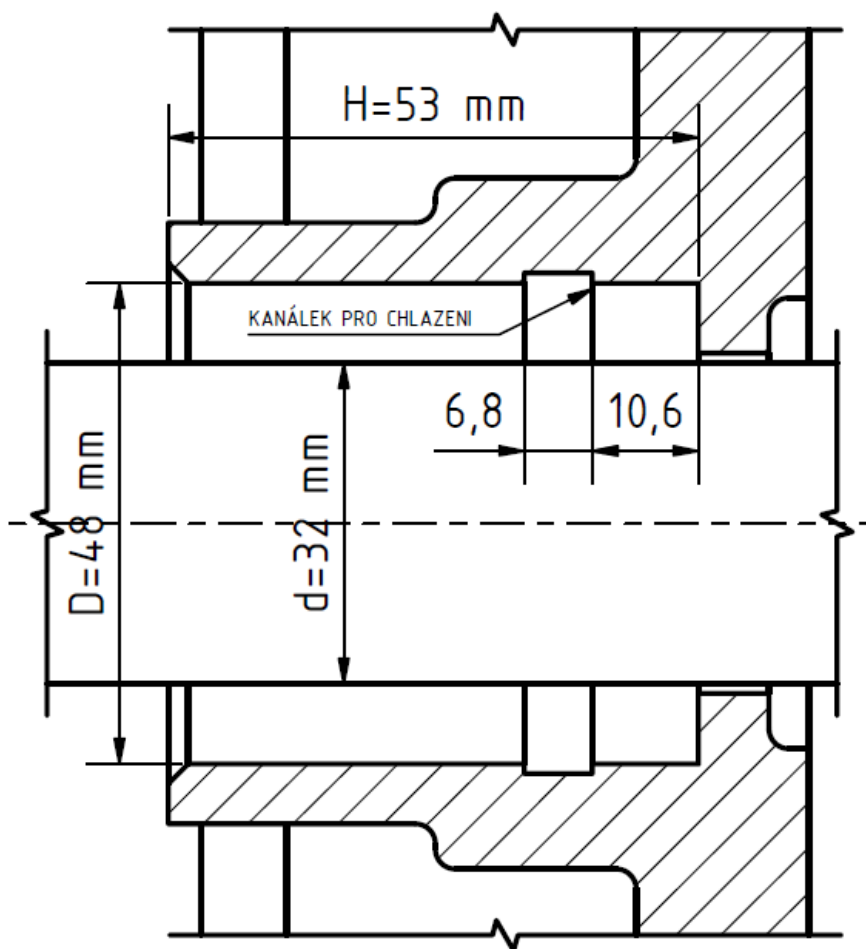
Obrázek 8-7 Kroužky HSF [2].

9 Návrh stlačované ucpávky pro vybrané čerpadlo

Návrh stlačované ucpávky je komplexní postup obsahující výpočet těsnícího prostoru, rozměrů přítlačných vík, pevnosti šroubů přítlačných vík, počtu a průřezu těsnících kroužků apod. Tato kapitola se za účelem obohacení obsahu práce o praktickou část, zabývá pouze určením počtu těsnících kroužků pomocí příslušných grafů a tabulek z norem a následného výpočtu přítlačného napětí, které je třeba vyvinout na víku ucpávky.

9.1 Zadané hodnoty a parametry

Stlačovaná ucpávka je navrhována pro kozlíkové odstředivé čerpadlo ze 70. let minulého století. Jedná se o jednostupňové čerpadlo s oběžným kolem o průměru cca 180 mm, které je využíváno v rámci výzkumných aktivit odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana. Součástí zadání jsou proto i rozměry těsnícího prostoru a průměr hřídele (obr. 9-1), které jsou v obecných případech také počítány. Zadaný přetlak v pracovní komoře Δp činí **350 kPa** a pracovní otáčky hřídele n_h činí **2900 min⁻¹**. Ucpávka je chlazena/mazána vodou z pracovní komory, která je do místa ucpávky vpravována kanálkem. Díky této skutečnosti bude součástí ucpávky také ocelový rozpěrný kroužek s otvory (lucerna), který umožní průtok vody k těsnícím kroužkům.



Obrázek 9-1 Zadané těsnící prostory a průměr hřídele.

9.2 Volba těsnících kroužků a výšky ucpávky

9.2.1 Materiál těsnících kroužků

Pro výběr materiálu těsnících kroužků je důležitých několik určujících faktorů. Maximální tlak, který je možno utěsnit, maximální obvodová rychlost hřídele, rozsah teplot pracovního média a jeho pH.

Teplotní rozsah pracovního média je zvolen pro obvyklé podmínky, tj. -10 až 100 °C. Čerpanou látkou je již dříve zmiňovaná voda s neutrálním pH, tj. 7.

Tlak pracovního média je potřeba pro určení z příložené tabulky převést na bary, to lze následovně:

$$P_{max} = \frac{\Delta p}{100} = \frac{350}{100} = 3,5 \text{ bar}$$

Rovnice 1

kde vyjadřuje

P_{max} maximální tlak pracovní látky [bar]
 Δp maximální tlak pracovní látky [kPa]

Posledním faktorem je obvodová rychlost hřídele, kterou lze vypočítat z následujícího vztahu:

$$v_{max} = \frac{\pi \times d \times n_h}{60} = \frac{\pi \times 0,032 \times 2900}{60} \doteq 4,86 \text{ m/s}$$

Rovnice 2

kde vyjadřuje

v_{max} maximální obvodová rychlost [m/s]
 d průměr hřídele čerpadla [m]
 n_h otáčky hřídele čerpadla [min^{-1}]

V tento moment, kdy jsou známy všechny potřebné parametry, je zvolen materiál těsnících kroužků z následující tabulky výrobce těsnících šňůr „TEXIM“.

Tabulka 9-1 Parametry bavlněných těsnících šňůr [16].

Těsnící ucpávkové šňůry - čerpadla, ventily				armatura	pístové čerpadlo	rotační čerpadlo	obvodová rychlost
TYP	POPIS	TEPLOTA	pH	P_{max}	P_{max}	P_{max}	S_{max}
		°C		bar	bar	bar	m/s
BL01	bavlna + lojová impregnace	-10 až 80	6 - 9	50	15	10	10
BP02	bavlna + parafínová impregnace	-10 až 100	6 - 9	60	10	10	5
BG04	bavlna + grafit s válcovým olejem	-10 až 80	6 - 9	60	10	10	10
BTG08	bavlna + teflon s grafitem	-10 až 120	6 - 9	60	10	10	10
BT09	bavlna + teflon	-10 až 120	4 - 11	60	15	10	10

Tabulka obsahuje pět vyráběných bavlněných ucpávkových šňůr z různými impregnacemi a složením. Z předešle vypočítaných a zvolených parametrů je zvolena varianta **BTG08**, bavlněná ucpávková šňůra s teflonem a grafitem. V úvahu také přichází i verze BP02 (s parafínovou impregnací), její maximální povolená obvodová rychlost je však velmi blízko vypočtené. Je proto zvolena odolnější řada, pro zamezení rychlého opotřebení.

9.2.2 Počet kroužků a výška ucpávky

Po určení vhodného materiálu těsnících kroužků přichází na řadu zvolení jejich rozměrů, počtu a doporučené výšky ucpávky. Vzhledem k rozměrovému zadání je následující postup převzat z příslušné normy k určení těsnících prostorů stlačovaných ucpávek.

Tabulka 9-2 Průměry těsnících prostorů a rozměry kroužků [17].

Rozměry v mm

d^a	D H8 ^b	s	h_k rozměr těsnění	d^a	D H8 ^b	s	h_k rozměr těsnění
10	18	4	4	80	105	12,5	12
12	22	5	5	85	110	12,5	
14	24	5		90	115	12,5	
16	28	6	6	95	120	12,5	
18	30	6		100	125	12,5	
20	32	6		105	135	15	
22	34	6		110	140	15	
25	37	6	8	120	150	15	15
28°	44	8		125	155	15	
32°	48	8		130	160	15	
36	52	8		140	170	15	
40	56	8		150	180	15	
45°	65	10	10	160	190	15	20
50°	70	10		170	210	20	
56	76	10		180	220	20	
63	83	10		190	230	20	
70°	95	12,5	12	200	240	20	
75	100	12,5					

^a Tučné vytištěné průměry hřídelů jsou přednostní.
^b V odůvodněných případech je možno využít tolerančního pole H11.
^c Průměry těsnících prostorů shodné s ČSN ISO 3069.

Z rozměrů těsnícího prostoru, konkrétně průměru hřídele $d = 32 \text{ mm}$ a průměru otvoru v tělese čerpadla $D = 48 \text{ mm}$ (obr. 9-1), lze z výše uvedené tabulky určit rozměry těsnícího kroužku. Jedná se o jeho šířku $s = 8 \text{ mm}$ a výšku $h_k = 8 \text{ mm}$.

Poslední částí této podkapitoly je určení celkové výšky ucpávky a počet kroužků. Za normálních okolností je celková výška ucpávky úzce spjata s počtem kroužků, jak lze vidět v následující tabulce.

Tabulka 9-3 Doporučený počet kroužků a výška ucpávky [17].

Rozměry v mm

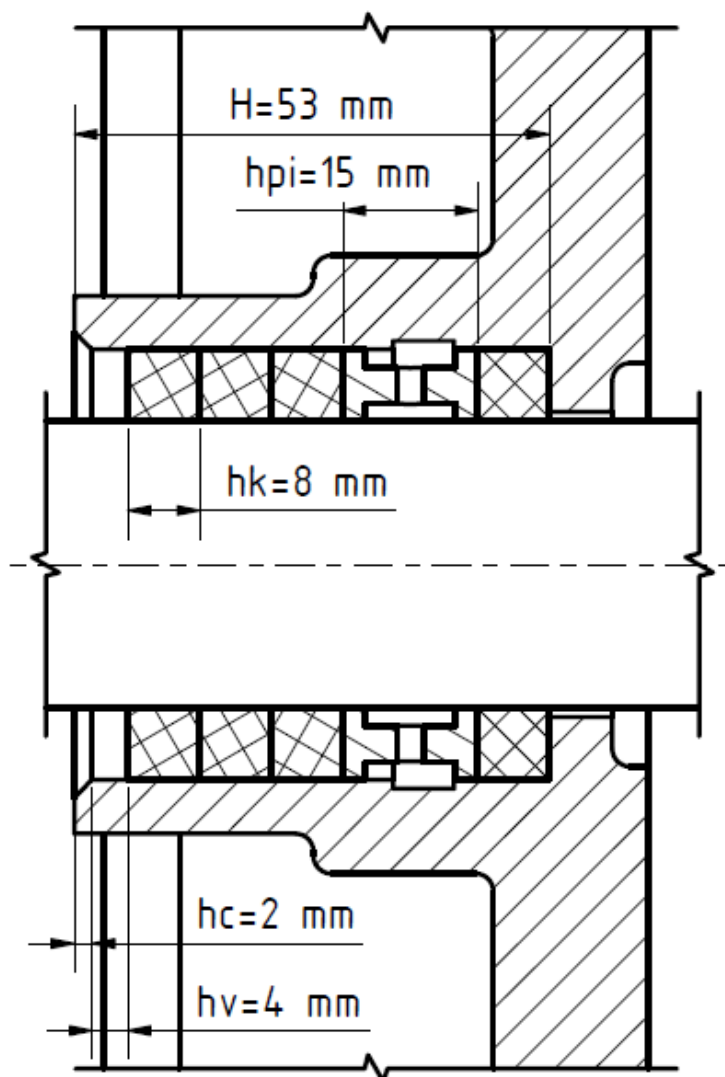
d	h_k rozměr těsnění	Výšky těsnících prostorů H		Jmenovité hodnoty	
		Tlak těsněné kapaliny v MPa			
		do 1,0	přes 1,0 do 4	h_v	h_c
		Počet těsnících kroužků			
$n = 4$	$n = 5$				
10	4	19	23	2	1
12 až 14	5	24	29	2,5	1,5
16 až 25	6	29	35	3	2
28 až 40	8	38	46	4	
45 až 63	10	48	58	5	3
70 až 100	12	55	67	4 ^a	
105 až 160	15	70	85	7	
170 až 200	20	94	114	10	4

^a Stlačením provazce $h_k = 12$ do prostoru $s = 12,5$ dojde k vytvoření vedení víka ucpávky 5 mm až 6 mm.

Jelikož tlak pracovní látky v komoře čerpadla je 350 kPa a průměr hřídele 32 mm, je počet kroužků zvolen na $n = 4$. Výška těsnícího prostoru by pak měla dle tabulky mít hodnotu 38 mm. Z geometrie čerpadla je výška těsnícího prostoru však již zadána, a to s hodnotou $H = 53 \text{ mm}$. Zbylé jmenovité hodnoty, tj. velikost sražení na vstupu ucpávky $h_c = 2 \text{ mm}$ a vůle před prvním kroužkem ucpávky $h_v = 4 \text{ mm}$, zůstávají dle tabulky.

Jelikož jde o ucpávku chlazenou/mazanou vodou z komory čerpadla, je nutné do sestavy ucpávky zakomponovat rozpěrný kroužek s otvory neboli lucernu (obr. 9-2). Výška tohoto kroužku je pro dodržení rozměrů těsnících prostorů ze zadání zvolena na hodnotu $h_{pi} = 15 \text{ mm}$.

Stlačením ucpávky se rozpěrný kroužek posune do polohy k chladicímu/mazacímu kanálku.



Obrázek 9-2 Rozměry prvků ucpávky.

Na závěr je provedena kontrola dodržení zadané výšky ucpávky. To lze udělat sečtením všech komponentů a jmenovitých rozměrů dle následujícího vztahu:

$$H_{ko} = h_c + h_v + n \times h_k + h_{pi} = 2 + 4 + 4 \times 8 + 15 = 53 \text{ mm}$$

Rovnice 3

$$H_{ko} = H = 53 \text{ mm}$$

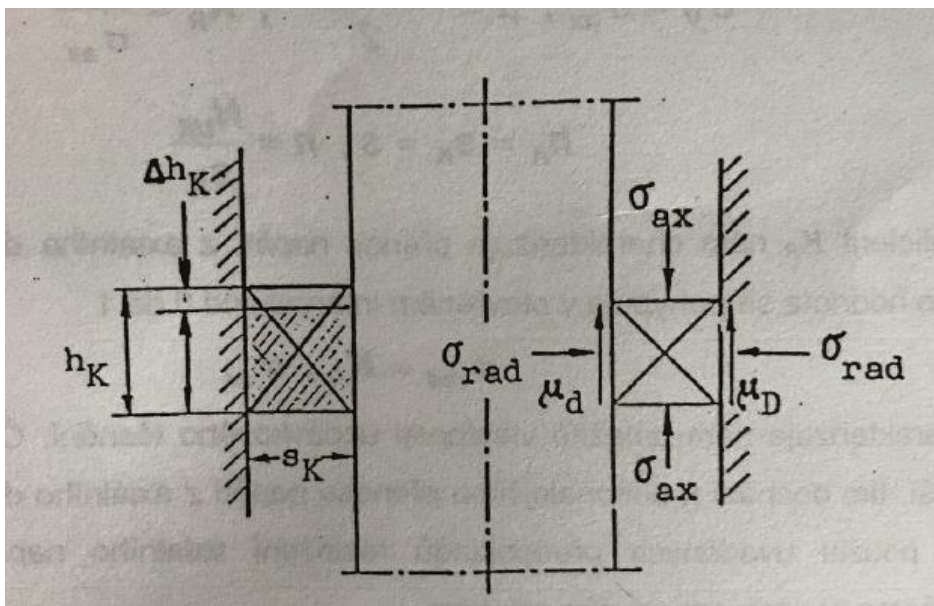
kde vyjadřuje

H_{ko}	kontrolní výška těsnícího prostoru [mm]
h_c	sražení hrany vstupu ucpávky [mm]
h_v	vůle před prvním kroužkem ucpávky [mm]
n	počet těsnících kroužků [-]
h_k	výška těsnícího kroužku [mm]
h_{pi}	výška rozpěrného kroužku (lucerny) [mm]
H	zadaná výška těsnícího prostoru [mm]

Z výpočtu jde vidět, že kontrolní výška je rovna celkové zadané výšce těsnícího prostoru ucpávky. Navržený počet kroužků a rozměr rozpěrného kroužku jsou tedy správné.

9.3 Výpočet potřebného napětí na víku

Pro stlačení těsnících kroužků a tím dosažení potřebného těsnícího efektu, je potřeba na víku (brýlích) dosáhnout určitého napětí. Tato kapitola obsahuje výpočet oněch napětí. Při působení tohoto axiálního napětí se kroužky ucpávky deformují a vzniká radiální napětí mezi plochou kroužku a vnitřní stěnou těsnícího prostoru, které vytváří tření/těsnící efekt. [11]



Obrázek 9-3 Rozložení napětí na kroužku ucpávky [11].

Axiální napětí působící po délce celé ucpávky lze popsat následující rovnicí:

$$\sigma_{ax} = \sigma_{ax}^0 \times e^{-(\mu_d + \mu_D) \times K_R \times H^0 / s}$$

Rovnice 4

kde vyjadřuje

σ_{ax}	axiální napětí po délce ucpávky [MPa]
σ_{ax}^0	počáteční axiální napětí [MPa]
e	Eulerovo číslo [-]
μ_d	součinitel tření na hřídeli [-]
μ_D	součinitel tření na ploše tělesa ucpávky [-]
K_R	transformační součinitel [-]
H^0	zmenšená výška ucpávky [mm]
s	šířka těsnícího kroužku [mm]

Výše uvedenou rovnicí lze nadále zjednodušit za předpokladu několika podmínek.

- Axiální napětí na víku je téměř rovno axiálnímu napětí pod víkem

$$\sigma_V = \sigma_{ax}^0$$

Rovnice 5

- Součinitel tření na povrchu hřídele je roven součiniteli tření v těsnícím prostoru
- Pro výpočet je zvolena střední hodnota součinitele tření $\mu = 0,12$

$$\mu = \frac{\mu_d + \mu_D}{2}$$

Rovnice 6

- Těsnící kroužek je čtvercového průřezu, tudíž je jeho výška rovna šířce

$$h_k = s$$

Rovnice 7

Z výše uvedené rovnice plyne skutečnost, že počet kroužků je roven podílu výšky ucpávky a šířky kroužku. Ze zadání je ale známo, že výška ucpávky je zvětšená o místo pro rozpěrný kroužek zajišťující mazání. Pro zjednodušení výpočtu bude v tomto případě počítáno s výškou ucpávky bez navýšení o místo pro rozpěrný kroužek. Tudíž je zavedena hodnota výšky zmenšené o 15 mm, tj.:

$$H^0 = H_u - h_{pi} = 47 - 15 = 32 \text{ mm}$$

Rovnice 8

kde vyjadřuje

H^0	výška ucpávky zmenšená o výšku rozpěrného kroužku [mm]
-------	--

- Po tomto zjednodušení je pak počet kroužků roven následujícímu

$$n = \frac{H^0}{h_k}$$

Rovnice 9

- Další z podmínek je hodnota transformačního součinitele, který představuje podíl radiálního ku axiálnímu napětí v ucpávce a vyjadřuje míru přenosu napětí. Pro zjednodušení výpočtu musí součinitel nabývat hodno od 0 do 1. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je přenos napětí lepší.[11]
- Pro výpočet ucpávky je zvolena hodnota transformačního koeficientu $K_R = 0,9$

$$K_R = \frac{\sigma_{rad}}{\sigma_{ax}}$$

Rovnice 10

kde vyjadřuje
 σ_{rad} radiální napětí [MPa]

Pokud tyto podmínky platí, pak po dosazení rovnic 6, 7 a 9 do rovnice 4 dostáváme zjednodušený tvar rovnice pro axiální napětí podél ucpávky.

$$\sigma_{ax} = \sigma_{ax}^0 \times e^{-2\mu \times K_R \times n}$$

Rovnice 11

Aby bylo možné tlak v pracovní komoře správně utěsnit, musí být radiální napětí na prvním kroužku ucpávky větší než dany tlak.

$$\sigma_{rad} \geq \Delta p$$

Rovnice 12

Konečný tvar rovnice pro výpočet potřebného napětí na víku ucpávky vznikne po dosazení rovnic 5, 10 a 12 do rovnice 11 a její úpravou.

$$\sigma_{v1} \geq \Delta p \times \frac{e^{2\mu \times K_R \times n}}{K_R} \geq 350 \times \frac{e^{2 \times 0,12 \times 0,9 \times 4}}{0,9} \geq 922,69 \text{ kPa}$$

Rovnice 13

Výsledkem rovnice je potřebné napětí na víku k utěsnění přetlaku 350 kPa a to $\sigma_{v1} = 922,69 \text{ kPa}$



Obrázek 9-4 Víko čerpadla, sloužící k utěsnění média při utažení napětím σ_{v1} .

ZÁVĚR

V první kapitole práce je rozebrána problematika ucpávek, důvody jejich použití a základní definice. Dále zmíněny některé faktory, které ovlivňují provoz a použití ucpávek. Jde zejména o spotřebu energie odvodem tepla při vzniku tření, provozní hlučnost a průsak. Následující druhá kapitola pojednává o základních materiálech, které jsou používány pro výrobu těsnících prvků a těsnících ploch ucpávek, společně se stručnou definicí a hlavními vlastnostmi.

V následujících třech kapitolách jsou rozebrány základní typy ucpávek, které se používají v současné čerpací technice. Každý typ je opatřen stručnou definicí, funkčním principem a popisem jeho základních částí. Nechybí ani výčet vhodných situací, ve kterých se dané typy ucpávek používají, a ve kterých nikoliv. Čtvrtá kapitola se zabývá ucpávkami raketových turbo-čerpadel, které slouží k čerpání kapalného kyslíku do motorů.

Ruku v ruce s důležitostí ucpávek samotných jdou také sekundární těsnící prvky (nebo ucpávky), které slouží ke správnému fungování celku. Jedná se o O-kroužky, které pracují na principu záměrné deformace a V-kroužky užívané pro ochranu hlavních těsnění. Předposlední kapitola je věnována hřídelovým těsnícím kroužkům, které jsou také označovány jako „gufera“. Tyto těsnící prvky se v některých případech a po určitých úpravách používají i jako jednoduché ucpávky čerpadel, ale pouze do velmi omezeného tlak pracovního média.

Poslední část práce obsahuje návrh a výpočet stlačované ucpávky s bavlněnými těsnícími kroužky. Návrh se skládá ze zvolení vhodného materiálu kroužků a jejich počtu. Součástí zadání byly rozměry těsnícího prostoru, proto v návrhu nemusí být zahrnut jejich výpočet. Následně je pomocí jednoduché úpravy rovnice pro axiální napětí podél ucpávky vypočteno potřebné napětí pro utěsnění zadaného tlaku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Grundfos Sales Czechia and Slovakia s.r.o. [online katalogový list]. *Technický katalog Grundfos – hřídelové ucpávky* [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove_ucpavky.pdf
- [2] SKF Lubrication Systems CZ, s.r.o. [online katalogový list]. *Hřídelová těsnění* [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d196802e8ff2-10919_CZ_lowres_tcm_54-129139.pdf#cid-129139
- [3] Grundfos Sales Czechia and Slovakia s.r.o. [online katalogový list]. *Příručka čerpací techniky* [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.grundfos.com/cz/learn/research-and-insights/get-the-pump-handbook>
- [4] Čerpadlo MAPE. *KOVO - STROJ SERVIS* [online]. Přerov: Kovo-stroj servis, 2009 [odlozilibor.cz](http://www.odlozilibor.cz) [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <http://www.odlozilibor.cz/index.php?co=mape100>
- [5] HENNLICH INDUSTRIETECHNIK spol. s r. o. [online katalogový list]. *Ucpávkové těsnící šňůry* [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.hennlich.cz/fileadmin/_migrated/cz_Technicke_udaje.pdf
- [6] KOPEC, Ladislav a Drahomír TUČNÍK. *Těsnění ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1967, s. [1a]. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:8d5ba2c0-5418-11e6-8361-5ef3fc9ae867>
- [7] PAVLÍČKOVÁ, Hana. *Syntetické kaučuky a jejich využití v praxi* [online]. Pardubice, 2019 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/202674040-Synteticke-kaucuky-a-jejich-vyuziti-v-praxi-hana-pavlickova.html>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [8] *Organické a anorganické látky*. Trutnov, 2012 [cit. 2021-05-06]. Dostupné také z: https://www.zs-zacler.cz/images/DUM_vlcek/p_08_ltky_organick_anorganick.pdf
- [9] *Minerální látky, makroelementy*. Brno, 2016 [cit. 2021-05-06]. Dostupné také z: https://is.muni.cz/el/med/podzim2016/BKUV011/um/UVOD-2016-Mineralni_latky-1.pdf
- [10] JANČÍK, Kryštof. *Návrh hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174600
Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [11] STIBŮREK, Šimon. *Utěsňování hřídelů tlakových nádob zpracovávaných abrazivními materiály* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80559/F2-DP-2018-Stiburek-Simon-DPStiburek_2018.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České učení technické v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
- [12] Non-contact seals with radial gap. *KSB-centrifugal pump lexicon* [online]. Berlin: KSB, c2010-2018 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/shaft-seal/191452/>
- [13] BERAN, Adam. *Utěsňování součástí a spojů* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17223897-5-utesnovani-soucasti-a-spoju.html>

- [14] DANGUY, Francois, Laurent FABBRI a Sebastien GUINGO. *Turbopump in particular for feeding rocket engines*. 2016. Spojené státy americké. US 9,435,347 B2. Zapsáno 2016-09-06.
- [15] HENNLICH INDUSTRIETECHNIK spol. s r. o. [online katalogový list]. *Statická těsnění* [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://tesneni.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/HCZ/Home/Tesneni/Produktov%C3%A9_listy/Statick%C3%A1_-_Technick%C3%A9_informace_O-krou%C5%BEky.pdf
- [16] BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. *Příručka čerpací techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN isbn80-01-01626-9.
- [17] Těsnící ucpávkové šňůry. *TEXIM: Výroba těsnění* [online]. Hradec Králové [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.teximtesneni.cz/tesnici-snury/ucpavkove-snury/>
- [18] ČSN 11 0109. *Čerpadla - těsnící prostory stlačovaných ucpávek*. 2. doplněné vydání. Praha: Český normalizační institut, c2004.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
d_s	Stlačovaná tloušťka O-kroužku	mm
L_1	Délka drážky O-kroužku	mm
p	Tlak systému	MPa
S	Hloubka drážky O-kroužku	mm
$F/2$	Těsnící spára O-kroužku	mm
Δp	Maximální tlak pracovní látky	kPa
n_h	Pracovní otáčky hřídele	min ⁻¹
H	Zadaná výška těsnícího prostoru	mm
D	Průměr otvoru v tělese čerpadla	mm
d	Průměr hřídele	mm
P_{max}	Maximální tlak pracovní látky v barech	Bar
v_{max}	Obvodová rychlost hřídele	m/s
s	Šířka těsnícího kroužku	mm
h_k	Výška těsnícího kroužku	mm
n	Počet těsnících kroužků	–
h_c	Velikost sražení na vstupu ucpávky	mm
h_v	Vůle před prvním kroužkem	mm
h_{pi}	Výška rozpěrného kroužku	mm
H_{ko}	Kontrolní výška těsnícího prostoru	mm
σ_{ax}	Axiální napětí po délce ucpávky	MPa
σ_{ax}^0	Počáteční axiální napětí	MPa
e	Eulerovo číslo	–
μ_d	Součinitel tření na hřídeli	–
μ_D	Součinitel tření na ploše tělesa ucpávky	–
K_R	Transformační součinitel	–
H^0	Zmenšená výška ucpávky	mm
σ_V	Axiální napětí na víku	MPa
μ	Střední hodnota součinitele tření	–
H_u	Nezmenšená výška ucpávky	mm
σ_{rad}	Radiální napětí	MPa
σ_{v1}	Potřebné napětí na víku	kPa

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Řez kalovým čerpadlem [4]	12
Obrázek 1-2 Spotřeba energie u mechanické ucpávky (12 mm) [3].....	13
Obrázek 1-3 Provozní oblasti mechanických ucpávek [3].....	13
Obrázek 1-4 Průsaky stlačované ucpávky [5].....	14
Obrázek 3-1 Hlavní komponenty mechanické ucpávky [3].....	19
Obrázek 3-2 Komponenty ucpávky [3].....	19
Obrázek 3-3 Optimální vyplnění těsnící spáry [3].....	20
Obrázek 3-4 Působení sil vyvážené / nevyvážené ucpávky [3].....	20
Obrázek 3-5 Proplachování mechanické ucpávky [3].....	21
Obrázek 3-6 O-kroužková mechanická ucpávka [3].....	21
Obrázek 3-7 Ucpávka se skládáním pryžovým vlnovcem [3].....	22
Obrázek 3-8 Ucpávka s kovovým vlnovcem [3].....	22
Obrázek 3-9 O-kroužková ucpávka typu Cartrige [3].....	23
Obrázek 3-10 Dvojitá mechanická ucpávka s tandemovým uložením [3].....	23
Obrázek 3-11 Dvojitá mechanická ucpávka uložena "zády k sobě" [3].....	24
Obrázek 4-1 Schéma těsnících sil [5].....	25
Obrázek 4-2 Konstrukce ucpávky [5].....	26
Obrázek 4-3 Ucpávka s pružinovým šroubem [11].....	26
Obrázek 4-4 Pružez těsnící šňůr [5].....	27
Obrázek 4-5 Diagonálně pletené kroužky [5].....	27
Obrázek 5-1 Labyrintová ucpávka [13].....	28
Obrázek 5-2 Odstředivá ucpávka [12].....	29
Obrázek 5-3 Schéma ucpávky s magnetickou kapalinou [10].....	29
Obrázek 6-1 Řez turbo-čerpadlem, a jeho labyrintová ucpávky [14].....	30
Obrázek 6-2 Řez turbo-čerpadlem a jeho labyrintová ucpávka s injektorem [14].....	31
Obrázek 7-1 Průřez V-kroužku [2].....	32
Obrázek 7-2 V-kroužek jako přídatné těsnění [2].....	32
Obrázek 7-3 Provedení V-kroužků [2].....	33
Obrázek 7-4 Řez O-kroužkem [15].....	34
Obrázek 7-5 Vliv růstu tlaku systému na kroužek [15].....	34
Obrázek 7-6 Extrudovaný a opěrný kroužek [15].....	35
Obrázek 8-1 Kroužek s ocelovým pouzdrem a jednoduchým břitem [2].....	36
Obrázek 8-2 Provedení vnějšího průměru [2].....	37
Obrázek 8-3 Běžný těsnící břit [2].....	37
Obrázek 8-4 Kroužek HMS a HMSA [2].....	38
Obrázek 8-5 Kroužky CRW1, CRWA1, CRWH1 a CRWHA1 [2].....	38
Obrázek 8-6 Kroužky HDL, HDS a HDS [2].....	39
Obrázek 8-7 Kroužky HSF [2].....	39
Obrázek 9-1 Zadané těsnící prostory a průměr hřídele.....	40
Obrázek 9-2 Rozměry prvků ucpávky.....	43
Obrázek 9-3 Rozložení napětí na kroužku ucpávky [11].....	44
Obrázek 9-4 Víko čerpadla, sloužící k utěsnění média při utažení napětím σ_{v1}	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 9-1 Parametry bavlněných těsnících šňůr [16].	41
Tabulka 9-2 Průměry těsnících prostorů a rozměry kroužků [17].	42
Tabulka 9-3 Doporučený počet kroužků a výška ucpávky [17].	42

SEZNAM ROVNIC

- Rovnice 1. Rovnice maximálního tlaku v barech
- Rovnice 2. Rovnice maximální obvodové rychlosti hřídele
- Rovnice 3. Rovnice kontrolní výšky těsnícího prostoru
- Rovnice 4. Rovnice axiálního napětí po délce ucpávky
- Rovnice 5. Rovnost axiálních napětí
- Rovnice 6. Rovnice střední hodnoty součinitele tření
- Rovnice 7. Rovnost výšky a šířky těsnícího kroužku
- Rovnice 8. Rovnice výšky zmenšené o výšku rozpěrného kroužku
- Rovnice 9. Rovnice počtu kroužků
- Rovnice 10. Rovnice transformačního součinitele
- Rovnice 11. Zjednodušená rovnice axiálního napětí po délce ucpávky
- Rovnice 12. Rovnice napětí na prvním kroužku ucpávky
- Rovnice 13. Rovnice napětí na víku ucpávky