



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE**

APLIKACE KOMBINOVANÝCH TĚSNĚNÍ V ENERGETICE

APPLICATION OF COMBINED SEAL IN THE ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LIBOR NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL SVOBODA

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Libor Novák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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:

Aplikace kombinovaných těsnění v energetice

v anglickém jazyce:

Application of combined seal in the energy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je zpracovat přehled těsnění a materiálů používaných v energetice s ohledem na jejich charakteristické vlastnosti, technologickou náročnost a vhodnost použití pro normalizované nebo nenormalizované přírubové spoje. Součástí práce je detailní popis spirálového a hřebenového těsnění, principu funkce a technologie výroby.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Vypracovat přehled těsnění používaných v energetice.
- 2) Porovnání spirálového a hřebenového těsnění na základě jejich parametrů a mechanických a těsnostních vlastností.
- 3) Srovnáním několika konkrétních typů a rozměrů těsnění ve vybraných aplikacích.

Seznam odborné literatury:

ČSN EN 13 555, ČSN EN 1591-2,
www.gasketdata.org, www.mico.cz,
Prospekty jednotlivých výrobců těsnění.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Svoboda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rozdělením těsnících prvků, které jsou užívány pro utěšňování přírubových a dalších spojů v energetickém a petrochemickém průmyslu. Součástí této práce je detailní popis hřebenového a spirálového těsnění s jejich konkrétním srovnáním.

KLÍČOVÁ SLOVA

těsnění přírubových spojů, hřebenová těsnění, spirálová těsnění, vlastnosti těsnění

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the sealing elements, which are used for sealing flange and other connections in the energy and petrochemical industries. Part of this work is a detailed description of kammprofile and spiral gasket and comparison of them.

KEYWORDS

gaskets, kammprofile gaskets, spiral-wound gaskets, seals properties



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, L. Aplikace kombinovaných těsnění v energetice. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Svoboda.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Svobody a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Jméno a přímení



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Svobodovi za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce. Především však děkuji svým rodičům za podporu a trpělivost v průběhu celého studia.



OBSAH

Úvod.....	10
1 Rozdělení těsnění používaných v energetice	11
1.1 Ne-kovová plochá těsnění	12
1.1.1 Pryžová a Vláknito-pryžová těsnění	12
1.1.2 Grafitová těsnění	13
1.1.3 Polytetrafluorethylenová těsnění.....	14
1.1.4 Oblast použití ne-kovových plochých těsnění	14
1.2 Kovová těsnění.....	15
1.2.1 Zvlněná těsnění	15
1.2.2 Prstencová těsnění RTJ	15
1.2.3 Delta těsnění.....	16
1.3 Kombinovaná těsnění	17
1.3.1 Obalovaná těsnění	17
1.3.2 Hřebenová těsnění.....	17
1.3.3 Spirálová těsnění	18
1.3.4 Oblast použití kombinovaných těsnění	19
2 Charakteristické vlastnosti těsnění a jejich určování	20
2.1 Parametry těsnění dle normy ČSN 13 555 a jejich zkoušení	20
2.1.1 Parametr Těsnění Q_{Smax} a jeho stanovení.....	20
2.1.2 Parametry těsnění $Q_{min(L)}$ a $Q_{Smin(L)}$ a jejich stanovení.....	22
2.1.3 Parametr Těsnění P_{QR}	23
2.1.4 Třída netěsnosti L_N	23
2.1.5 Náhradní modul pružnosti E_G	24
2.2 Další normy pro určování vlastností přírubových těsnění.....	25
3 Spirálová těsnění.....	26
3.1 Princip funkce a výroba spirálového těsnění.....	26
3.2 Konstrukční řešení.....	27
3.2.1 Základní konstrukce spirálových těsnění	28
3.2.2 Spirálová těsnění s vnějším kovovým prstencem	29
3.2.3 Spirálová těsnění s vnitřním kovovým prstencem	30
3.2.4 Spirálové těsnění s vnitřním i vnějším kovovým prstencem	30
3.2.5 Spirálová těsnění pro těsnění výměníků tepla.....	30
3.2.6 Spirálově vinuté těsnění s integrálním prstencem.....	30
3.3 Materiály spirálových těsnění	31
3.3.1 Materiály měkkých těsnících pásků.....	31



3.3.2	Materiály kovových pásků.....	33
3.3.3	Označování materiálů spirálových těsnění	33
4	Hřebenová těsnění	34
4.1	Princip funkce a postup výroby hřebenových těsnění	34
4.2	Konstrukční řešení	35
4.2.1	Základní konstrukce bez středícího kroužku	35
4.2.2	Hřebenová těsnění se středícím kroužkem	36
4.2.3	Hřebenová těsnění s kompenzací ohybu přírub.....	37
4.2.4	Hřebenová těsnění se dvěma těsníci prvky	38
4.3	Materiály hřebenových těsnění	39
4.3.1	Materiály těsnícího obložení	39
4.3.2	Materiály kovových jader hřebenových těsnění	39
4.3.3	Označování materiálů hřebenových těsnění	40
5	Porovnání hřebenového a spirálového těsnění	41
5.1	Hřebenová a spirálová těsnění	41
5.1.1	Spirálová těsnění	41
5.1.2	Hřebenová těsnění	43
5.2	Konkrétní srovnání hřebenového a spirálového těsnění	43
	Závěr.....	45
	Použité informační zdroje.....	46
	Seznam použitých zkratk	48
	Seznam použitých symbolů	48
	Seznam použitých obrázků a tabulek	49



ÚVOD

Průmyslová těsnění jsou nenahraditelnými prvky, potřebnými pro propojování dílčích částí rozsáhlých potrubních systémů a připojování různých aparátů chemických i energetických zařízení. Utěšňování těchto přírubových spojů je většinou nejslabším článkem daného systému, a proto mu musí být věnována patřičná pozornost. S vývojem energetického a chemického průmyslu si utěšňování přírubových spojů získalo nezastupitelné místo v technické praxi a rozvinulo se do vlastního vědního oboru.

Cena za netěsnosti spojů, a s tím vzniklé ztráty, je v dnešním průmyslu nesmírná. V případě havárie jdou denní ztráty do desítek milionů, především v důsledku ne-výroby, případně neplnění smluvených závazků na dodávku produktů či energie. S případným únikem produktů nebo přepravovaného media je spojeno také nebezpečí poškození životního prostředí. V neposlední řadě je nutné mít na zřeteli zdraví a bezpečí zaměstnanců a obyvatelstva. Proto je povinností konstruktérů těmto rizikům předcházet vhodnou konstrukcí přírubových spojů a zvláště pak vhodnou volbou těsnících prvků.

Je vcelku zřejmé, že absolutně těsné spojení je pojem abstraktní. Avšak zda spojení je či není dostatečně těsné, je třeba hodnotit s ohledem na konkrétní aplikace. V mnoha případech může být zcela vyhovující stupeň netěsnosti představující únik jedné kapky za minutu. Jindy musí těsněný spoj splnit nulový počet bublinek při tlakovém (vzduchovém) testu pod vodou. Avšak, stále je zde mnoho aplikací, které vyžadují podstoupení sofistikovanějších testů k zaručení bezpečnosti daných zařízení (chemický průmysl, jaderné elektrárny...). Náročnost testů závisí na míře rizika spojeného s případnou havárií zařízení v důsledku netěsnosti spoje. Pozornost musí být věnována nejenom volbě vhodného těsnění a jeho materiálu, ale také správnému postupu při instalaci těsnících prvků. Nevhodnou instalací může dojít k poruše bez ohledu na kvalitu těsnění.

Tato práce si klade za cíl seznámit čtenáře se současnými trendy v utěšňování přírubových spojů. Zabývá se rozdělením statických těsnění podle materiálového složení a popisem jednotlivých konstrukčních řešení. Zvláštní důraz je pak kladen na popis hřebenových a spirálových těsnění, která jsou užívána pro nejnáročnější aplikace.

1 ROZDĚLENÍ TĚSNĚNÍ POUŽÍVANÝCH V ENERGETICE

Těsnění používaná v energetice a chemickém průmyslu mohou být obecně rozdělena na statická a dynamická.

STATICKÁ TĚSNĚNÍ jsou užívána při spojování dvou vzájemně se nepohybujících elementů, které jsou v průběhu provozu v neustálém kontaktu. Typickým příkladem použití jsou potrubní systémy, kde jsou jednotlivé díly pospojovány přírubovými spoji a statická těsnění v nich zaručují těsnost celého systému. Statická těsnění jsou dále využívána při utěšňování různých poklopů a průzorů chemických aparátů, kde snižují možnost úniku zpracovávaných látek. Typy statických těsnění lze nejlépe rozdělit podle materiálů použitých na jejich konstrukci, a sice do tří skupin na kovové, ne-kovové a kombinované. Jejich detailnějším popisem se zabývá oddíl 1.1.

DYNAMICKÁ TĚSNĚNÍ jsou naopak užívána pro spojování součástí, jež jsou vůči sobě pohyblivé. Může se jednat o rotační, stejně tak jako o přímočarý pohyb, například těsnění v ovládacích prvcích potrubních systémů a pístových energetických zařízeních. Dynamická těsnění jsou v této práci uvedena pouze pro úplnost, jejich detailnějším rozdělením se tato práce nezabývá.

ROZDĚLENÍ STATICKÝCH TĚSNĚNÍ

Nejdůležitějšími vlastnostmi statických těsnění pro přírubové spoje jsou schopnost přizpůsobit se nerovnostem přírub a jejich rozměrovým změnám, které jsou způsobeny teplotními změnami v průběhu provozu těsněného systému.



Obr. 1-1-Rozdělení statických těsnění[12]

1.1 NE-KOVOVÁ PLOCHÁ TĚSNĚNÍ

Ne-kovová plochá těsnění jsou základním typem přírubových těsnění. Tato těsnění lze vyrábět ze široké škály materiálů. Pro utěšňování jsou používána od samého vzniku problematiky průmyslového těsnění. V průběhu let docházelo a stále dochází ke zlepšování jejich mechanických vlastností a chemicko-korozní odolnosti. Nejnázorněji se dají rozdělit podle použitého materiálu na pryžová, vláknito-pryžová, grafitová, teflonová (PTFE), MICA a další.

1.1.1 PRYŽOVÁ A VLÁKNITO-PRYŽOVÁ TĚSNĚNÍ

PRYŽOVÁ TĚSNĚNÍ jsou vyráběna z kaučuku. Kaučuky se dělí na přírodní a syntetické. Přírodní kaučuk je složkou mléčné šťávy stromu kaučukovníku. V období 2. Světové války, vedlo omezené množství zdrojů přírodního kaučuku k rozvoji syntetických kaučuků. Paleta syntetických kaučuků je velmi široká. Některé ze syntetických kaučuků, užívaných pro výrobu statických těsnění, jsou uvedeny v Tab.1.

Jako pojiva se ve vláknito-pryžových těsněních používají např.: Butadien styrenový-SBN nebo Etylen propylenový-EPDM. Celkový výčet syntetických kaučuků je samozřejmě mnohem rozsáhlejší.

Těsnicí materiál je vyráběn v plochých deskách, z nichž je požadovaný tvar těsnění vyřezáván, případně vysekáván výrobcem. Na Obr. 1-2 jsou zobrazena různá tvarová provedení pryžových a vláknito-pryžových těsnění.[12]



Obr. 1-2 Příklady pryžových a vláknito-pryžových těsnění[12]

VLÁKNITO-PRYŽOVÁ TĚSNĚNÍ jsou v podstatě pryžová těsnění vyztužená vlákny různých materiálů. Na počátku vláknito-pryžových těsnění byla azbestová těsnění. Azbest byl tehdy považován za téměř zázračný materiál a byl hojně užíván v mnoha odvětvích. Obsah vláken v takových těsněních činil 70 až 90 % celkového objemu, zbytek vyplňovala pojiva a plniva. Po zjištění a prokázání karcinogenních účinků azbestu došlo postupně k zákazu jeho užívání, ve většině zemí. Se zákazem jeho používání vznikla potřeba ho nahradit bez-azbestovými těsněními. K vyztužování těsnicích desek jsou dnes používány minerální i syntetické materiály, jež zobrazuje Tab.1

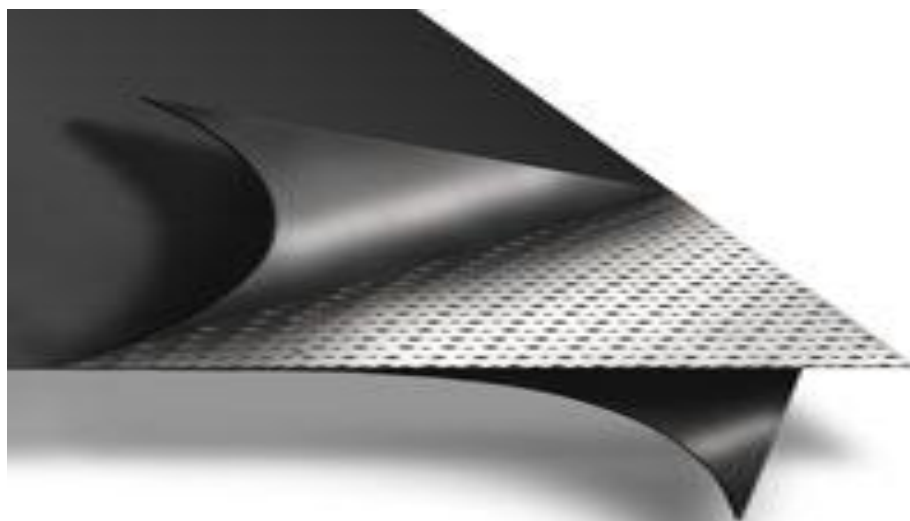
Vzhledem k vysoké ceně těchto vláken oproti azbestovým vláknům je jejich obsah v celkovém objemu těsnicích materiálů pouze 5 až 50 %. Současné vláknito-pryžové materiály jsou z důvodu vyššího obsahu elastomerů citlivé na překročení 150°C, kdy dochází k tvrdnutí a degradaci elasticity.[12] [13]

Tab. 1-Tabulka materiálů vláknito-pryžových těsnění[13]

VLÁKNA:	POJIVA:	PLNIVA:
celulóza	NBR (100° C)	křída
aramid	SBR (110° C)	mastek
uhlík	EPDM (140° C)	aj.
sklo	FPM (250° C)	POMOCNÉ PROSTŘEDKY
minerály	aj.	vulkanizátory

1.1.2 GRAFITOVÁ TĚSNĚNÍ

Těsnění z expandovaného grafitu jsou používána pro utěšňování agresivnějších médií než vláknito-pryžová těsnění. Expandovaný grafit vzniká expanzí téměř čistého grafitu působením iontů kyseliny sírové, vysoké teploty a tlaku. Grafit zvětší svůj objem až 300krát. Následně se expandovaný grafit válcuje do folií maximální tloušťky 1mm. Tyto folie jsou, buď dodávány v rolích k dalšímu zpracování (např. jako těsnicí složka kombinovaných těsnění), nebo jsou z nich vyráběny přímo těsnicí desky. Pro vyztužení jsou do těchto desek většinou vloženy plastové nebo kovové folie. Tyto vyztužovací folie mají podle konstrukce hladký nebo perforovaný povrch. Perforovaná vyztužná folie je zobrazena na Obr. 1-3 .[3]



Obr. 1-3 Příklad těsnění z expandovaného grafitu[18]

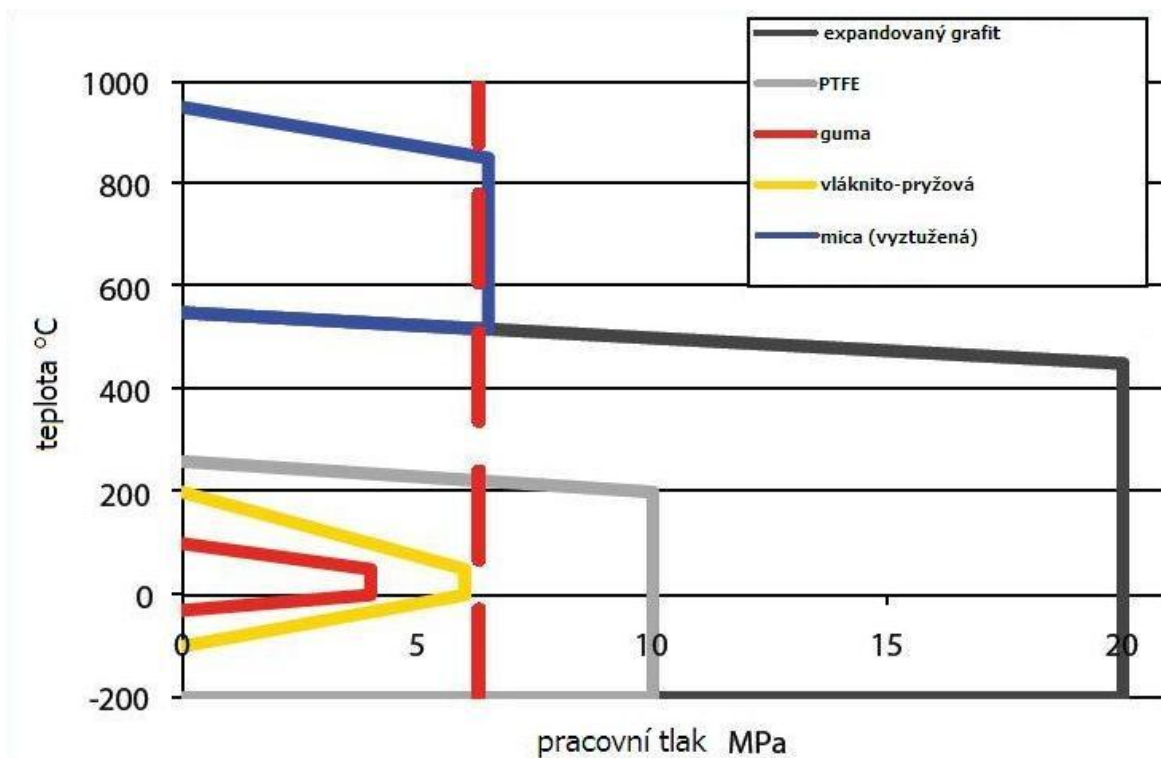
1.1.3 POLYTETRAFLUORETHYLENOVÁ TĚSNĚNÍ

Vyznačují se velmi dobrou chemickou odolností, což umožňuje jejich široké použití v chemickém a petrochemickém průmyslu. Mimo to mají PTFE těsnění výborné termomechanické a elektro-izolační vlastnosti. Vzhledem k tomu, že PTFE je ekologicky a zdravotně nezávadný materiál, jsou těsnění z něj vyrobená velmi vhodná i pro použití v potravinářském průmyslu.

Těsnicí materiál PTFE je dodáván smotaný v rolích, z nichž jsou těsnění vyřezávána, případně vysekávána na příslušném zařízení. Čistý PTFE je náchylný ke studenému creep efektu. Výrobci těsnění se snaží tomu předcházet různými úpravami. Plochá PTFE těsnění jsou dělena následovně:

- a) virginální – čistý
- b) expandovaný
- c) plněný

1.1.4 OBLAST POUŽITÍ NE-KOVOVÝCH PLOCHÝCH TĚSNĚNÍ



Obr. 1-4 Tlakové a teplotní limity použití ne-kovových plochých těsnění[12]

1.2 KOVOVÁ TĚSNĚNÍ

Kovová těsnění se používají pro náročnější aplikace než vláknito-pryžová těsnění. Jsou vhodná pro vyšší teploty a pracovní tlaky. Při utěšňování se využívá plasticity kovových materiálů při zatížení. S ohledem na to, že tato schopnost je v porovnání s ostatními těsnícími materiály podstatně nižší, vyžadují kovová těsnění velmi vysoké utahovací tlaky. Vyvozované utahovací tlaky se často blíží mezi pevnosti těsnícího materiálu, což může být příčinou vzniku trhlin v materiálu. Trhlinami může docházet k difuzi nebo přímo k úniku media do okolí. Proto je třeba pro spoje s kovovými těsněními používat příruby, jejichž těsnící plochy jsou kvalitně opracovány. Většina výrobců uvádí požadovanou drsnost povrchu maximálně do Ra1,6.

Základními typy kovových těsnění jsou zvlněná prstencová a delta těsnění. Jejich detailnější popis a principy jsou popsány v následujících odstavcích.[2]

1.2.1 ZVLNĚNÁ TĚSNĚNÍ

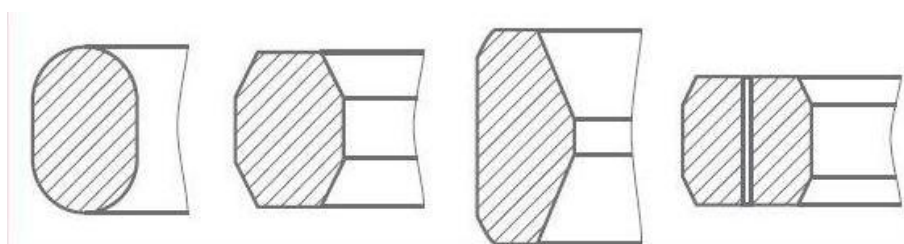
Zvlněná těsnění lze vyrábět ve velkém množství tvarů (kruhy, ovály, obdélníky), stejně tak jako lze použít širokou škálu materiálů. Standardně se však používají plechy z nerezové oceli. Profily zvlněnání lze také libovolně kombinovat. Základní profil zvlněného těsnění je vyobrazena na Obr. 1-5.[12]



Obr. 1-5 Profil zvlněného těsnění[12]

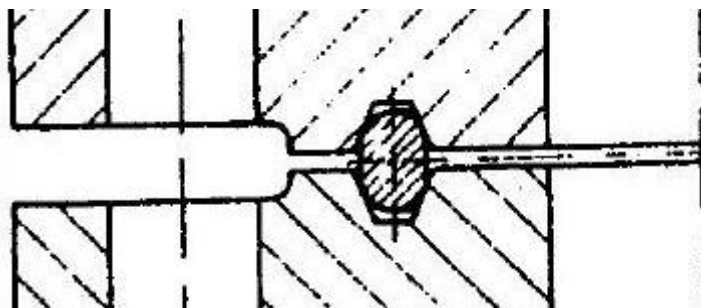
1.2.2 PRSTENCOVÁ TĚSNĚNÍ RTJ

Kovové těsnící kroužky RTJ jsou užívány především v olejářském, plynařském a ropném průmyslu. Používají se pro utěšňování přírubových spojů, které jsou vystaveny vysokým teplotám (až 1000°C) a vysokým pracovním tlakům (až 150 MPa). RTJ prstencová těsnění jsou standardně vyráběna ve dvou základních profilech, oválná a oktagonální. Avšak mohou být vyrobena v prakticky libovolném profilu, který se různí podle výrobce. Různé profily zobrazuje Obr. 1-1.



Obr. 1-6 Různé profily RTJ kroužků[12]

Tyto kovové těsnicí kroužky jsou uloženy v kuželových nebo oválných drážkách. K plastikaci těsnění dochází na styčných plochách těsnících RTJ kroužků a kuželových (oválných) drážek v přírubách, jak zobrazuje Obr. 1-7 Příklad uložení oválného kovového RTJ kroužku..



Obr. 1-7 Příklad uložení oválného kovového RTJ kroužku.[14]

Možnost použití libovolného kovu zaručuje RTJ kroužkům výbornou těsnost v rozličných podmínkách. Jako materiál těchto kroužků byly dříve často používány nikl a hliník, dnes se standardně používají uhlíkové i nerez oceli. Doporučuje se, aby materiál těsnících kroužků byl měkčí než materiál přírub.

Těsnění kov na kov má hlavní nevýhodu ve vysokém opotřebením těsnících ploch přírub, čímž je zvýšena cena a náročnost případného přetěsnění takového přírubového spoje.

1.2.3 DELTA TĚSNĚNÍ

Delta těsnění je speciálním typem těsnění uloženého v drážkách s rovinnou těsnící plochou. Delta kroužek má částečně samo-těsnící účinek. Toto těsnění je vhodné pro aparátové i potrubní příruby vysokotlakých zařízení. Na Obr. 1-8 je uveden řez přírubovým spojem s delta kroužkem, kde lze názorně vidět uložení kroužku ve spoji. Po montážním utahení dochází k utěsnění přírubového spoje vlivem plastikace kroužku. K ještě vyššímu těsnicímu efektu dochází vlivem působení vnitřního (pracovního) tlaku těsněného systému.[14]



Obr. 1-8 Příklad použití Delta těsnícího kroužku[14]

1.3 KOMBINOVANÁ TĚSNĚNÍ

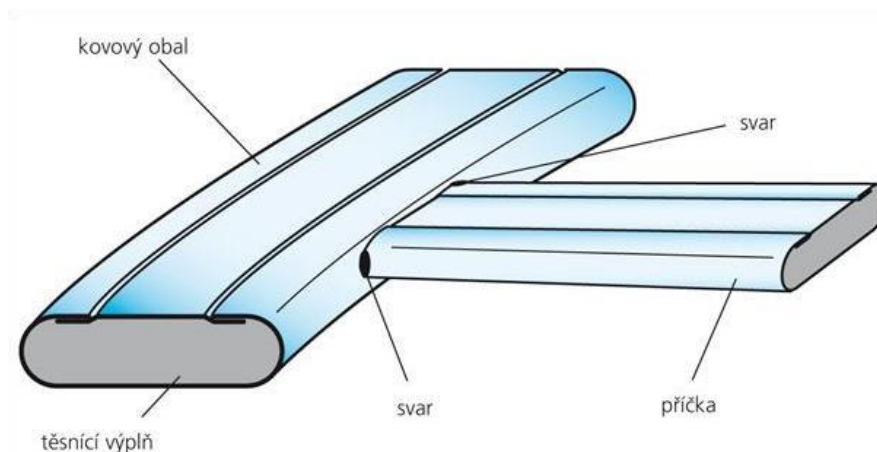
Skupina kombinovaných těsnění zahrnuje všechna těsnění, jež ve své konstrukci kombinují kov a jiný měkký těsnicí materiál. Kovová složka těchto těsnění zvyšuje jejich stabilitu a odolnost proti vystřelení. Kombinovaná těsnění lze rozdělit na obalovaná, hřebenová a spirálová. V případě posledních dvou jmenovaných je měkký těsnicí materiál (pryž, PTFE, nebo expandovaný grafit) v přímém kontaktu s přírubami spoje. V případě obalovaných těsnění je měkký materiál umístěn v plechové obálce.

Hlavní výhodou kombinovaných těsnění je, že umožňují použití širokého rozpětí mezi minimální a maximální přípustnou hodnotou utahovacího tlak. V případě jednosložkových těsnění je rozsah minimální a maximální hodnoty utahovacího tlaku mnohem menší.

1.3.1 OBALOVANÁ TĚSNĚNÍ

Obalovaná těsnění se skládají z měkké těsnicí výplně, která je uzavřena v plechové obálce. Těsnicí výplň zajišťuje pružnost a stlačitelnost, zatímco plechový obal zabezpečuje dobrou těsnivost a pevnost celého těsnění v tlaku. Schéma konstrukce obalovaného těsnění je na

Obr. 1-9. Díky tomu že lze obalovaná těsnění vyrábět v různých tvarových obměnách, jsou obzvláště vhodná pro utěšňování přírub výměníků tepla. Obalovaná těsnění do většího průměru 1 m jsou obvykle vyráběna z jednoho kusu. Těsnění větších průměrů je potřeba svařovat. Výborné těsnicí vlastnosti jsou podmíněny dobrým stavem těsnicích ploch přírub. Při dotažení obalovaného těsnění mezi přírubami, dochází ke zhruba 30% snížení jeho tloušťky. Materiál plechové obálky musí být volen s ohledem na chemickou kompatibilitu s těsněným médiem.[6]



Obr. 1-9 Schéma konstrukce obalovaných těsnění[6]

1.3.2 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ

Hřebenová těsnění jsou velmi populární konstrukcí posledních desetiletí. Jedná se v podstatě o kovové, profilované, nosné jádro a těsnicí obložení. Toto obložení z měkkého, těsnicího materiálu je ke kovovému jádru přilepeno nebo nalisováno. Hřebenová těsnění jsou velmi vhodná pro utěšňování spojů v náročných provozních podmínkách, jako jsou vysoké teploty a tlaky. U hřebenových těsnění dochází ke kombinaci měkkého těsnicího materiálu (velká schopnost přizpůsobení nerovností příruby těsnění) a kovového jádra (velká stabilita a vyšší mez pevnosti v tlaku).



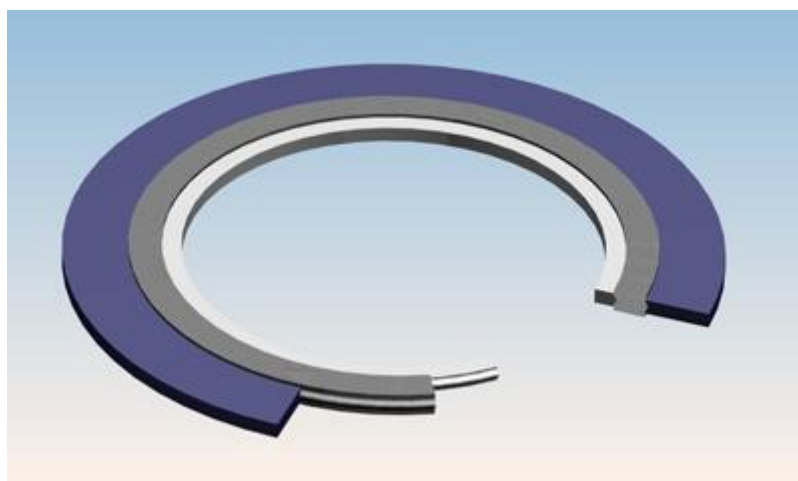
Obr. 1-10 Hřebenová těsnění[17]

Tloušťka těsnícího obložení a tvar kovového jádra jsou navrženy tak, aby při utažení mezi přírubami došlo k jejímu silnému stlačení. Díky malé šířce těsnící plochy, je dostačující nižší utahovací síla a tudíž jsou i svorníky méně zatěžovány.

Detailně se popisem a funkcí hřebenových těsnění zabývá 4. kapitola této práce.

1.3.3 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ

Spirálová těsnění jsou vyráběna z měkkých a kovových pásků, které jsou na speciálním zařízení navijeny do patřičných rozměrů těsnění. Jako měkká těsnící složka jsou nejčastěji používány expandovaný grafit nebo PTFE. Kovové pásky zaručují výborné zpětné odpružení, což spirálovému těsnění dodává charakteristický „pružinový efekt“.

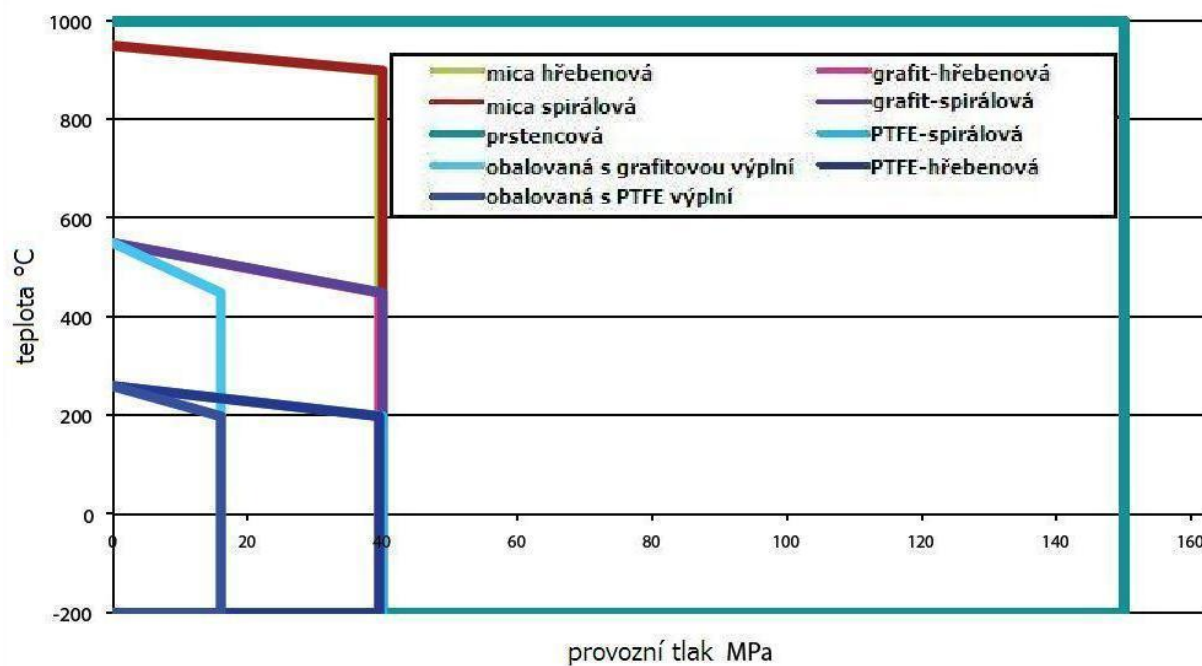


Obr. 1-11 Schéma spirálového těsnění[18]

Spirálově vinutá těsnění mohou být vyráběna v obměnách s vnějším středícím kroužkem, vnitřním středícím kroužkem nebo v kombinaci obou. Schéma kombinace obou středících kroužků lze vidět na Obr. 1-11.

Detailně se spirálovými těsněními zabývá 3. kapitola této práce.

1.3.4 OBLAST POUŽITÍ KOMBINOVANÝCH TĚSNĚNÍ



Obr. 1-12 Oblast použití kombinovaných a kovových těsnění[12]



2 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI TĚSNĚNÍ A JEJICH URČOVÁNÍ

Přírubové spoje by, v dnešní době, měly být konstruovány, jako jediný celek. Musí při tom být bráno v úvahu, že při provozu dochází ke vzájemnému ovlivnění všech tří komponent (příruba, těsnění, svorník). Při provozu dochází k teplotnímu ovlivnění, stejně jako ovlivnění vlivem creep-efektu a jiných. Těsnostně-pevnostní výpočet dnes, díky rozvoji výpočetní techniky, dovoluje spojení obou těchto hledisek. Detailním postupem výpočtu a všemi náležitostmi, jež je nutné znát, se zabývá norma ČSN EN 1591. S ohledem na náročnost výpočtu je však tento postup povinný pouze v jaderné energetice a v chemických zařízeních, kde by mohly vznikat emise nebezpečných látek. Pro běžná zařízení se v dnešní době u nás příliš nepoužívá. Je ale zřejmé, že snížením rizika havárie přírubového spoje se zvyšuje ekonomičnost a bezpečnost provozu tlakových zařízení. Nejenom pro těsnostně-pevnostní výpočet, ale i pro účely správného dimenzování těsnění pro přírubové spoje, je nutné znát nebo určit některé charakteristické vlastnosti přírubových těsnění. Stanovením konstrukčních parametrů přírubových těsnění a postupy zkoušení těchto parametrů se zabývá norma ČSN EN13 555.

2.1 PARAMETRY TĚSNĚNÍ DLE NORMY ČSN 13 555 A JEJICH ZKOUŠENÍ

Tab. 2 Parametry přírubových těsnění

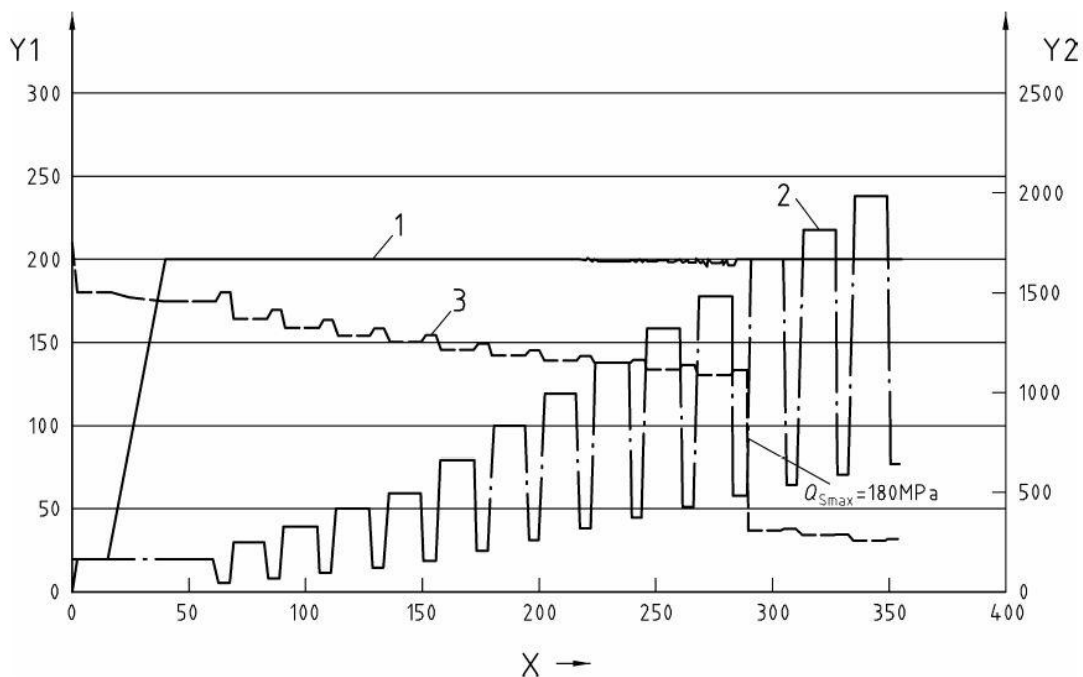
Parametr těsnění	Definice
Q_{max}	nejvyšší utahovací tlak, působící na těsnění bez jeho poškození
$Q_{\text{min(L)}}$	nejmenší povolený utahovací tlak při montáži
$Q_{\text{Smin(L)}}$	nejmenší utahovací tlak při provozních podmínkách
P_{QR}	Součinitel, který zahrnuje efekt relaxace těsnění před a po dlouhodobém zatížení za provozní teploty
L_{N}	Třída netěsnosti
E_{G}	Náhradní modul pružnosti

2.1.1 PARAMETR TĚSNĚNÍ Q_{SMAX} A JEHO STANOVENÍ

Udává nejvyšší hodnotu utahovacího tlaku, kterým je možné za provozních teplot na přírubové těsnění působit, aniž dojde k jeho vybočení či jinému poškození tlakem.

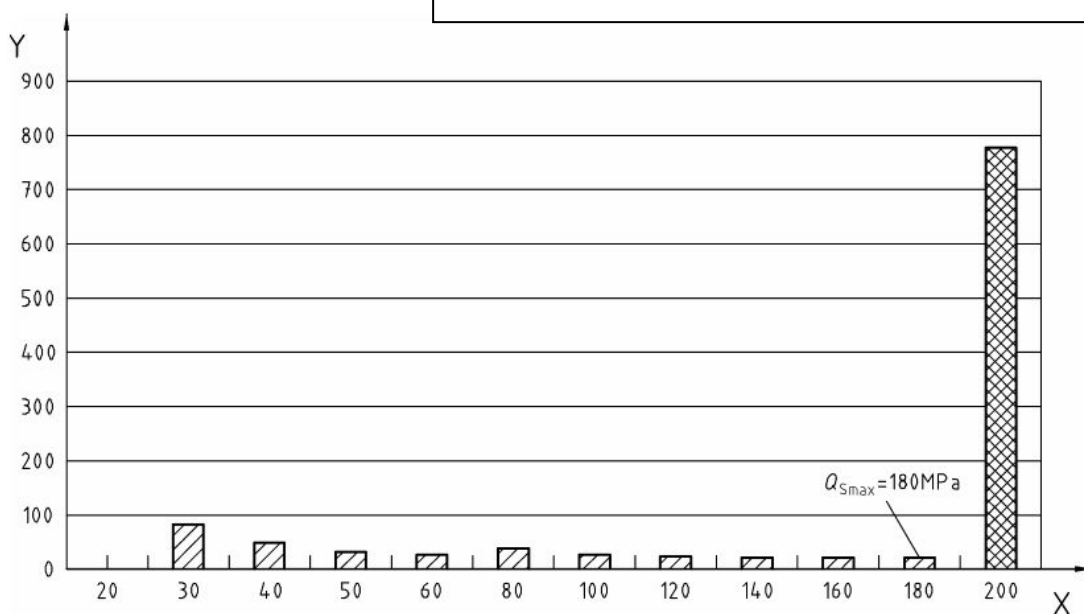
Způsob určování Q_{Smax} se zakládá na postupném zvýšení teploty na požadovanou hodnotu, po němž je těsnění průběžně stlačováno a odlehčováno. Každý stlačovací cyklus po odlehčovacím cyklu stlačuje těsnění vyšším utahovacím tlakem. Postup měření a hodnoty utahovacích tlaků jednotlivých cyklů jsou pevně dány normou a tento postup je zobrazen na Obr. 2-1. Zkouška by měla být provedena minimálně pro tři různé teploty, zahrnující okolní teplotu ($23 \pm 5^\circ\text{C}$) a teplotu těsně pod hodnotou nejvyšší teploty použitelnosti těsnění. Utahovací tlak se pohybuje od hodnoty výchozího utahovacího tlaku, až do hodnoty při níž dojde k selhání těsnění. Test může být také ukončen při dosažení mezních hodnot zkušebního

zařízení nebo nejvyššího dovoleného tlaku, který uvádí výrobce těsnění. Při každém stlačovacím cyklu je zaznamenán pokles tloušťky těsnění na jednotku utahovacího tlaku. Za hodnotu Q_{Smax} je považován plošný tlak, jež působí na těsnění ve stlačovacím cyklu před selháním těsnění, při dané teplotě. Vzhledem k tomu, že hodnota Q_{Smax} je velmi závislá na tloušťce těsnění, mohou být naměřené hodnoty vztahovány pouze pro tloušťku těsnění použitou při této zkoušce.



Obr. 2-1 Stanovení Q_{Smax} [11]

1 Teplota [°C]	X Čas [min]
2 Utahovací tlak [MPa]	Y1 Teplota [°C]
3 Tloušťka těsnění [μ m]	Y2 Tloušťka těsnění [μ m]



Obr. 2-2 Stanovení Q_{Smax} [11]

X-Utahovací tlak [MPa]
Y –Snížení tloušťky na jednotku utahovacího tlaku [μ m/MPa]

2.1.2 PARAMETRY TĚSNĚNÍ $Q_{\min(L)}$ A $Q_{S\min(L)}$ A JEJICH STANOVENÍ

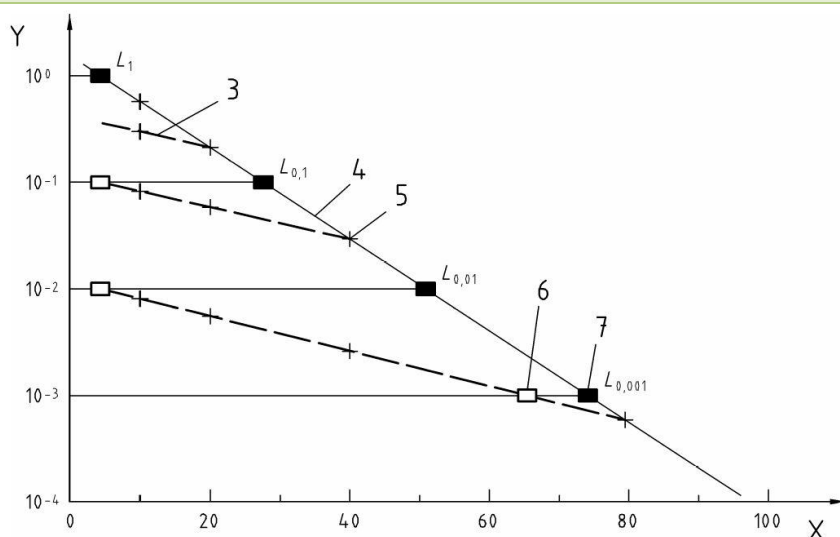
Parametr $Q_{\min(L)}$ udává nejnižší možný utahovací tlak, který při okolní teplotě zajistí dostatečné stlačení těsnění tak, aby došlo k uzavření kanálků a nerovností těsnících ploch přírub. Jeho velikost je právě taková, aby při dodržení požadované třídy netěsnosti L , odolával přírubový spoj vnitřnímu zkušebnímu tlaku.

Parametr $Q_{S\min(L)}$, udává hodnotu nejnižšího utahovacího tlaku, při provozních podmínkách tzn. při provozní teplotě a po ukončení zatěžování.

Postup stanovení hodnot $Q_{\min(L)}$ a $Q_{S\min(L)}$ vychází z cyklického stlačování a odlehčování zkoušeného těsnění. V průběhu takového namáhání je prováděno měření netěsnosti, při konstantním vnitřním tlaku. Pro tuto zkoušku by měl být použit vnitřní přetlak 4MPa, ale v případě potřeby lze použít i přetlak vyšší. Zkušebním plynem je výhradně helium. Zatěžovací a odlehčovací tlaky na těsnění jsou pevně dány normou, viz Tab. 2-2.

Tab. 2-2 Zatěžovací a odlehčovací tlaky na těsnění[11]

Účinný utahovací tlak [MPa]	Odlehčování účinného utahovacího tlaku [MPa]
10	neodlehčeno
20	10
40	20, 10
60	20, 10
80	40, 20, 10
100	neodlehčeno
120	neodlehčeno
140	40, 20, 10
160	40, 20, 10



Obr. 2-3 Graf zatížení[11]

3-Odlehčovací křivka	4-Zatěžovací křivka	5-Bod měření	6- $Q_{S\min(L)}$	7- $Q_{\min(L)}$	X-Efektivní napětí těsnění	Y-Stupeň netěsnosti
----------------------	---------------------	--------------	-------------------	------------------	----------------------------	---------------------



Parametr $Q_{\min(L)}$ lze určit z grafu zatížení viz Obr. 2-3. Jeho hodnota se nachází v průsečíku křivky zatížení a hladiny požadované třídy netěsnosti (bod č. 7).

Hodnotu $Q_{S\min(L)}$ lze odečíst v tomtéž grafu na průsečíku odlehčovací křivky a hladiny požadované třídy netěsnosti (bod č. 6).

2.1.3 PARAMETR TĚSNĚNÍ P_{QR}

Je součinitel, zohledňující efekt relaxace mezi přírubovým šroubovým spojením před a po dlouhodobém zatížení, při současném působení provozní teploty.

Jeho stanovení je provedeno, postupným zvyšováním zatížení působícího na těsnění, až do hodnoty požadovaného utahovacího tlaku. Poté je na požadovanou hodnotu, postupně zvýšena také teplota. Její hodnota je udržována po dobu 4 hodin. Po tuto dobu se provádí kontinuální měření poklesu tlaku na těsnění. Parametr těsnění P_{QR} je poměrem zbytkového a počátečního zatížení těsnění.

2.1.4 TŘÍDA NETĚSNOSTI L_N

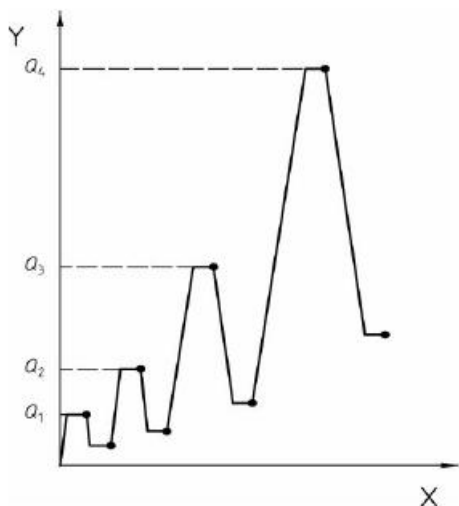
Třída netěsnosti L_N je určena specifickým množstvím netěsnosti přírubového spoje. Specifické množství netěsnosti se určuje metodou diferenčního měření tlaků a jeho hodnota musí být vztažena na plochu těsnění. Naměřený stupeň netěsnosti je dělen aritmetickým průměrem vnitřního a vnějšího obvodu těsnění. V Tab. 2-3 jsou uvedeny třídy netěsnosti a příslušná specifická množství netěsnosti. V případě potřeby může tato tabulka být analogicky rozšířena.

Tab. 2-3 Třídy netěsnosti[11]

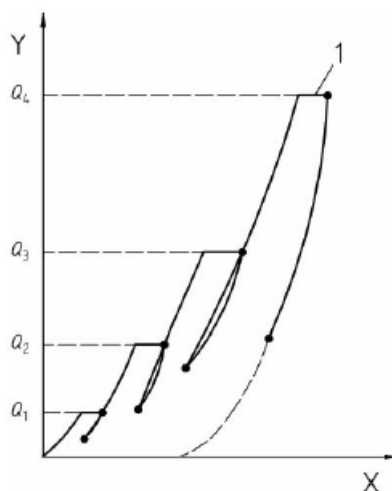
Klasifikace netěsnosti	L1,0	L0,1	L0,01
Specifické množství netěsnosti [mg/s*m]	$\leq 1,0$	$\leq 0,1$	$\leq 0,01$

2.1.5 NÁHRADNÍ MODUL PRUŽNOSTI E_G

K určení hodnot E_G je možné využít odlehčovacího cyklu při zkoušce Q_{Smax} . Z Obr. 2-4 je patrné, že hodnota E_G se mění v závislosti na vlastnostech použitého těsnění a na utahovacím tlaku, který na ně působí.



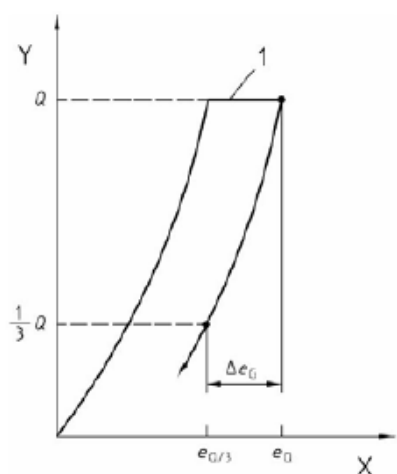
Obr. 2-4 Schéma zatěžování[11]



Obr. 2-5 Křivka stlačování[11]

X -Čas	X -Změna tloušťky těsnění
Y -Tlak na těsnění Q	Y -Tlak na těsnění
	1-Oblast tečení

Velikost náhradního modulu E_G je vlastně směrnice odlehčovacího modulu těsnění, kterou lze určit z tloušťky regenerovaného těsnění mezi dotažením na počáteční utahovací tlak a následném odlehčení na třetinu tohoto tlaku. Ve výpočtu se pro každé zatížení Q používá stejná hodnota tloušťky těsnění na počátku i na konci zatížení.



$$E_G = \frac{2}{3} \cdot Q \cdot \frac{e_0}{\Delta e_Q}$$

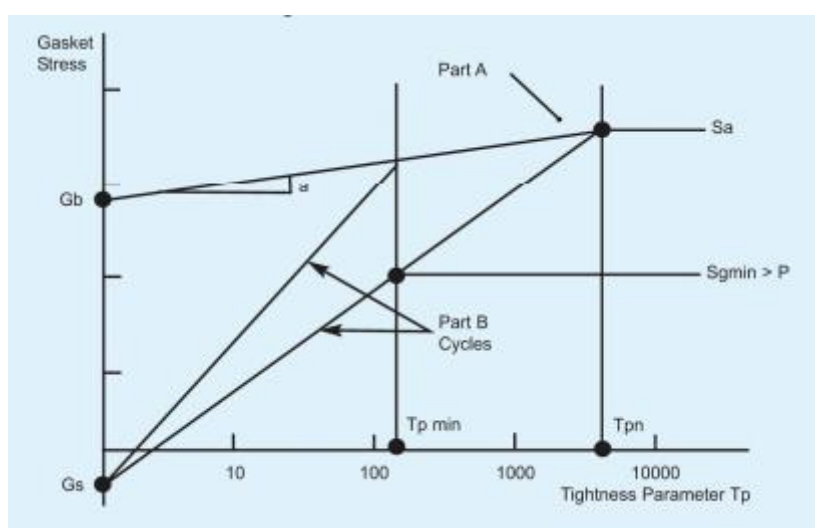
1- Tečení
X - Změna tloušťky těsnění (včetně tečení)
Y - Tlak na těsnění

Obr. 2-6 Stanovení E_G v případě tečení[11]

2.2 DALŠÍ NORMY PRO URČOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PŘÍRUBOVÝCH TĚSNĚNÍ

K určování charakteristických vlastností těsnění pro přírubové spoje existuje mnoho různých přístupů a norem. V rámci sjednocování evropských norem dochází k nahrazování jednotlivých státních norem normami evropskými, tak jako například již zmíněná norma EN 13 555 nahradila dříve používanou německou normu DIN 28090, která také popisovala metodiku zkoušení měkkých těsnění pro přírubové spoje.

V USA a zemích arabského světa je obecně velmi oblíbený ASME-code. Vzhledem k tomu, že tradiční výpočty přírubových těsnění, uvedené v ASME-code section VIII, dostatečně neodrážejí stupeň netěsnosti daného spoje, dochází již řadu let k vývoji nové metody PVRC (Pressure Vessel Research Council). Hlavním rozdílem je nahrazení tradičních parametrů m & y (utahovací tlak a faktor těsnění) konstantami G_b & G_s pro počáteční a provozní hodnoty utahovacího tlaku.[1]



Obr. 2-7 Příklad závislosti konstant těsnění G_b a G_s v závislosti na těsnosti spoje dle PVRC[1]

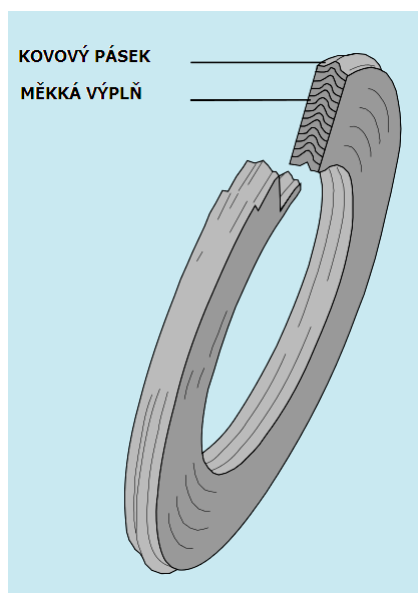
G_b, a	- Charakteristiky počátečního stlačení těsnění
G_s	- Odlehčovací charakteristika těsnění
T_{pn}	- Požadovaná těsnosti těsnění
$T_{p \min}$	- Minimální požadovaná těsnost těsnění

3 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ

Spirálová těsnění jsou osvědčenými těsnícími prvky, které umožňují použití v široké škále aplikací. Typické příklady použití jsou v rafinériích, chemických závodech, plynárenských zařízeních, zařízeních na úpravu vody a všeobecně při stavbě potrubí. Původní koncept konstrukce spirálového těsnění pochází již z roku 1912, kdy první těsnění tohoto typu uvedla na trh firma Flexitallic. Byl to významný posun oproti plochým těsněním používaným v tehdejší průmyslu. Vyšší stupeň zpětného odpružení pod různými tlaky umožnil použití těsnění spirálového typu v zařízeních s vysokými nároky na těsnost, tepelnou odolnost, a další, které s sebou přinesl rozvoj petrochemického průmyslu v první polovině 20. století. Rafinérie a chemické provozy se vyznačují častými teplotními výkyvy, vysokými provozními tlaky a chemickou náročností prostředí. Při výrobě spirálového těsnění je možné použít různé kombinace materiálů, tak aby byla zvýšena jeho chemická odolnost vůči těmto kapalinám či plynům. V průběhu více než sta let používání spirálových těsnění bylo provedeno mnoho konstrukčních a materiálových inovací. Různým konstrukčním řešením a materiálovému rozsahu jsou věnovány oddíly 3.2 a 3.3.

3.1 PRINCIP FUNKCE A VÝROBA SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ

Těsnící část spirálových těsnění je složena z kovového pásu a měkké těsnící výplně. Tyto pásy jsou spirálově navíjeny za současného působení konstantního tlaku. Kovový pásek zaručuje těsnění dobré pružící vlastnosti, naopak měkká poddajná výplň zajišťuje těsnost. Navíjení spirálových těsnění probíhá na navíjecích zařízeních v horizontální nebo

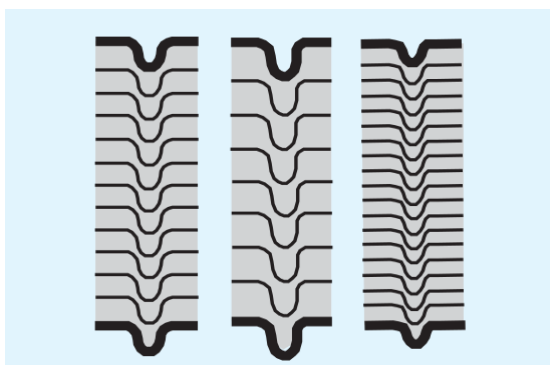


Obr. 3-1 Spirálové těsnění[1]

vertikální poloze. Tato zařízení jsou konstruována tak, aby zaručovala velkou variabilitu rozměrů a hustot navinutých těsnění. Škála rozměrů dodávaná většinou výrobci se pohybuje mezi 10mm až 3metry. Při navíjení jednotlivých pásků je na těsnění vyvíjen radiální tlak prostřednictvím přítlačného kolečka. Nejdříve je navíjen samotný kovový pásek. Působením tvarovacího kolečka je vytvářen do požadovaného V-profilu a stlačen tak, aby vytvořil dostatečně pevný kroužek (vnitřní průměr těsnění). K tomu je zapotřebí 2 až 3 vrstvy kovového pásu. Po zformování vnitřního průměru se ke



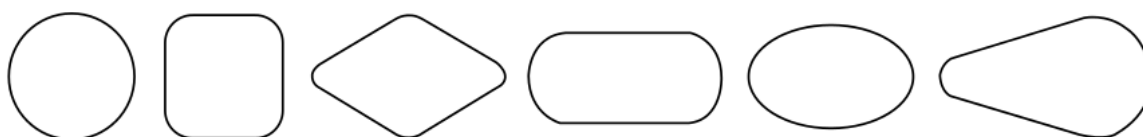
kovovému pásku připojí pásek měkkého výplňového materiálu a navíjecí zařízení navine vrstvu sestávající z obou těchto pásků. Když se velikost vnějšího průměru přiblíží výslednému vnějšímu průměru, je měkký výplňový pásek odpojen. Těsnění je následně zakončeno několika dalšími navinutími kovového pásku, jež je opět tvarován do požadovaného profilu tvarovacím kolečkem. Přítlačné kolečko zaručuje rovnoměrné stlačení pásků v průběhu celého navíjení tak, aby mělo vyrobené těsnění stejnou hustotu v celém objemu. Hustota kromě stlačení měkkých výplňových pásků závisí také na jejich tloušťce. Obecně platí, že těsnění s nižší hustotou (malé tlaky při navíjení a silnější měkké výplně) se používají pro méně náročná zařízení s nižšími pracovními tlaky. Naopak těsnění s vysokou hustotou těsnící části (vyšší tlaky při navíjení a tenčí výplňové pásky) se užívají pro náročnější zařízení s vyššími pracovními tlaky. Spirálová těsnění s vyšší hustotou vyžadují pro vytvoření těsného spoje větší utahovací tlaky. Těsnění s extrémně vysokou hustotou vyžadují utahovací tlak až 200 MPa. Měkčí spirálová těsnění by vyžadovala utahovací tlak okolo 35 MPa. Na *Obr. 3-2* jsou k porovnání zobrazeny průřezy několika těsněními s různými hustotami při dodržení identických rozměrů těsnění.



Obr. 3-2 Řez spirálovými těsněními[1]

3.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V průběhu let, kdy jsou užívána spirálově vinutá těsnění, doznala tato konstrukce mnohých úprav a vylepšení. Spirálová těsnění jsou vyráběna v mnoha tvarových variantách a materiálových kombinacích, tak aby nejlépe vyhověla náročným pracovním podmínkám. Většinou jsou spirálová těsnění dodávána ve tvaru mezikružší, mohou však být vyrobena i v jiných tvarech. Například k utěsnění průlezů a poklopů jsou k dispozici různé typické tvary těsnění, jako čtverce, kosočtverce, ovály a další, tak jak ukazuje *Obr. 3-3*. Vzhledem k celkem nenáročným změnám na výrobním zařízení lze po domluvě s výrobcem dodávat spirálová těsnění i v nestandardních tvarech.

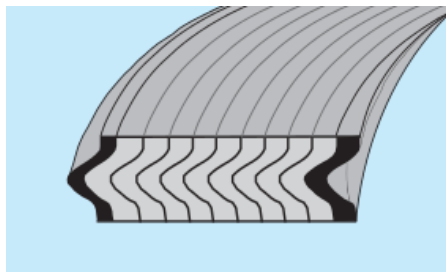


Obr. 3-3 Různé tvary spirálových těsnění[2]

Spirálová těsnění jsou na trh dodávána několika společnostmi pod mnoha různými firemními názvy. V zásadě se však dají tato těsnění rozdělit do několika skupin. Tomuto rozdělení a typickým příkladům použití jsou věnovány následující podkapitoly.

3.2.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE SPIRÁLOVÝCH TĚSNĚNÍ

Vnější a vnitřní průměr tohoto typu spirálového těsnění je vyztužen pouze několika vrstvami kovového pásku bez měkkého výplňového materiálu. Pružné kovové pásy navinuté společně s měkkou výplní zajišťují vyšší stabilitu těsnění a lepší charakteristiky stlačitelnosti. Prakticky, to znamená, že se zvyšuje maximální povolený tlak na těsnění Q_{max} . Tato těsnění jsou vhodná pro těsnění přírubových spojů typu pero-drážka nebo, nákrůžek-výkrůžek, nebo drážka v kombinaci s rovnou těsnicí plochou. V případě použití varianty s drážkou se z pravidla jedná o těsnění přírubového spoje ve vedlejším silovém toku. To znamená, že hlavní utahovací síla vyvolaná svorníky, působí na listech přírub. Spirálové těsnění je v tomto případě stlačeno pouze do takové míry, která je pro danou aplikaci optimální a je dána konstrukcí přírub (hloubka drážky, výška pera). Vnější obruba drážky je mírně vystouplá oproti obrubě vnitřní, tím dochází k propojení prostoru drážky s těsněním a prostoru s těsněním médiem. Je utvořen těsný spoj. Tato varianta přírubového spoje snižuje pravděpodobnost vystřelení spirálového těsnění a nevyžaduje zvláštní nároky na vystředění těsnění. Varianta přírubového spoje typu nákrůžek-výkrůžek, také umožňuje snadné vystředění a snižuje pravděpodobnost vystřelení těsnění. Většinou se však jedná o těsnění přírubového spoje v hlavním silovém toku, přičemž to opět záleží na konstrukci příruby a volbě tloušťky těsnění. Je-li těsnění použito v hlavním silovém toku, nedochází k přenosu utahovací síly na listech přírub. Listy přírub se naopak ani nedotknou a celá utahovací síla působí na spirálové těsnění.



Obr. 3-4 Řez spirálovým těsněním[1]

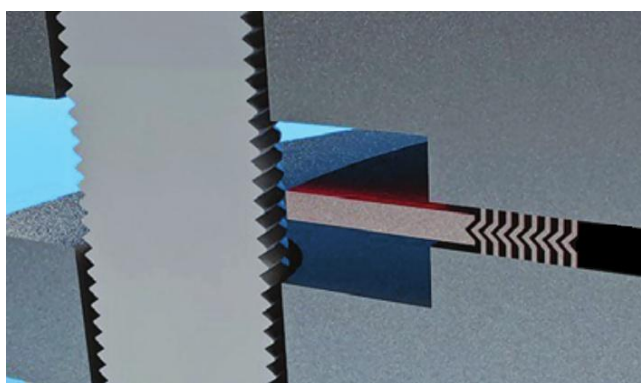
Jistou nástavbou je spirálové těsnění základního typu opatřené obručí. Tato obruč je připevněna na vnější hraně těsnění, jak je vidět na *Obr. 3-4*. Rozměry obruče jsou navrženy tak, aby její volné konce lícovaly s protilehlými šrouby přírubového spoje. Zpočátku se používala pro těsnění přírubových spojů, kde je jinak obtížné zajistit správné vystředění spirálového těsnění na těsnicí plochy přírub. Především se jedná o přírubové spoje typu rovná těsnicí plocha-těsnicí lišta a rovná těsnicí plocha-rovná těsnicí plocha. V obou případech se opět jedná o těsnění přírubového spoje v hlavním silovém toku.



Obr. 3-5 Spirálové těsnění s obručí[3]

3.2.2 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ S VNĚJŠÍM KOVOVÝM PRSTENCEM

Tato konstrukce se sestává ze spirálově vinuté těsnicí části, jež je na vnějším okraji opatřena celistvým, kovovým prstencem. Vnější, kovový prstenec je v současnosti nejpoužívanějším způsobem vystředění spirálového těsnění na těsněnou plochu, nahrazuje tak již zmíněné spirálové těsnění s obručí. Jeho výroba je významně jednodušší, což snižuje jeho výrobní náklady. Tento vnější kovový prstenec zároveň pomáhá ke snížení pravděpodobnosti vystřelení těsnění. Další jeho funkcí je vymezení maximálního stlačení. Chrání tak měkkou těsnicí část před neúměrným stlačením, které by mohlo způsobit nefunkčnost těsnění. Použitím spirálového těsnění s vnějším prstencem dochází k těsnění ve vedlejším silovém toku. Podobně jako v případě 3.2.1 při instalaci v přírubě s drážkou. Avšak vnější obruba drážky je v tomto případě nahrazena vnějším kovovým prstencem. Navíc k těmto technickým výhodám je vnější kovový prstenec užíván pro označování velikosti, tlakové třídy a materiálového složení. Velikost vnějšího prstence je stanovena tak, aby došlo k vystředění mezi šrouby spojujícími přírubový spoj. V případě těsnění poklopů, průlezů a jiných nerotačních spojů může být kovový celistvý prstenec nahrazen vinutým „prstencem“. Ten je navinut z kovových pásků, stejným způsobem jako spirálová těsnění, do příslušných tvarů viz Obr. 3-3. Materiál těchto pásků je obvykle stejný jako materiál kovových pásků použitých při navíjení těsnicí části spirálového těsnění.



Obr. 3-6 Spirálové těsnění s vnějším prstencem[3]

3.2.3 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ S VNITŘNÍM KOVOVÝM PRSTENCEM

Skládají se z měkké spirálově vinuté výplně, která je navinuta okolo vnitřního celistvého prstence. Tento prstencem působí jako výplň mezi vnitřním průměrem těsnicí části a vnitřním průměrem příruby. Snižuje tak možnost usazování pevných částic mezi přírubami a minimalizuje erozní opotřebení přírub, v této oblasti. Současně snižuje turbulentní proudění dopravovaných látek či použitých medií. Stejně jako vnější prstencem v případě 3.2.2 omezuje vnitřní prstencem maximální stlačení. V neposlední řadě zabraňuje vnitřní prstencem zborcení spirálového těsnění dovnitř, čímž umožňuje užití vyšších utahovacích tlaků. Tento typ spirálových těsnění je vhodný pro přírubové spoje typu nákrůžek-výkrůžek. Stejně jako v předešlém případě lze celistvý kovový prstencem nahradit „prstencem“ vinutým z kovových pásků, tak aby mohl být použit pro nekruhové průřezy.

3.2.4 SPIRÁLOVÉ TĚSNĚNÍ S VNITŘNÍM I VNĚJŠÍM KOVOVÝM PRSTENCEM

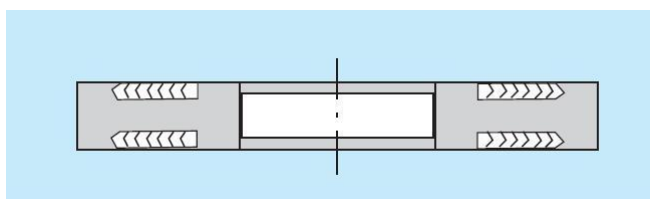
Kombinací obou předešlých těsnění a jejich výhod je velmi odolné spirálové těsnění, vhodné pro použití v zařízeních s vysokými tlaky (až 20 MPa). Spirálové těsnění lze všeobecně použít ve velkém rozmezí teplot od -200°C po 550 až 1100°C , vždy v závislosti na fyzikálních vlastnostech obou materiálů spirálového těsnění. Výhodou tohoto konstrukčního uspořádání je vysoká stabilita těsnění. Typickými příklady použití jsou rafinerie a petrochemický průmysl. Například při výrobě vodíku hydro-krakováním jsou zcela běžné teploty okolo 400°C a tlaky které převyšují 16.5 MPa. Pro těsněné spoje s nekruhovými průřezy nabízí většina výrobců variantu se spirálově vinutým vnějším i vnitřním vyztužením.

3.2.5 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ PRO TĚSNĚNÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA

Pro potřeby těsnění výměníků tepla se vyvinuly jisté nastavby spirálových těsnění s vnitřním a vnějším kroužkem, stejně tak i jejich kombinace. K těmto druhům jsou připojeny těsnicí příčky, jejichž rozmístění je dáno geometrií výměníku. Příčky jsou ke spirálově vinuté části těsnění důkladně přiletovány nebo přibodovány. Těsnicí žebra jsou vyráběna v různých variantách obalovaných těsnění a lze je umístit libovolně, podle geometrie daného výměníku. Materiál kovového obalu i měkké výplně se většinou shoduje s materiálem použitým při výrobě spirálové části. Těsnicí žebra jsou obvykle mírně tenčí než spirálově vinutá část, tak aby se jimi zbytečně nezvyšoval utahovací tlak.

3.2.6 SPIRÁLOVĚ VINUTÉ TĚSNĚNÍ S INTEGRÁLNÍM PRSTENCEM

Konstrukční řešení spočívá ve spojení dvou spirálově vinutých částí za pomoci integrálního kovového prstence. Spirálově vinuté části jsou uloženy v drážkách, jež jsou symetricky vysoustruženy na obou stranách nosného kovového prstence.



Obr. 3-7 Spirálové těsnění s integrálním prstencem[1]



Takovéto řešení zaručuje, ve srovnání s klasickou konstrukcí spirálových těsnění, snadnou a bezpečnou manipulaci vzhledem ke svému kompaktnímu řešení. Hlavní výhodou této konstrukce spirálových těsnění je použití dvou spirálově vinutých elementů, jež zaručují vysokou hodnotu zpětného odpružení. Spirálově vinuté těsnění s nosným integrálním prstencem lze použít pro těsnění přírubových spojů typu *rovná těsnící plocha-těsnící lišta*, *rovná těsnící plocha-rovná těsnící plocha* a *pero-drážka*. Je zřejmé, že ve všech třech případech se jedná o těsnění přírubového spoje ve vedlejším silovém toku. Integrální kovový prstenec chrání spirálově vinuté části před neúměrným stlačením. Zároveň snižuje nebezpečí vystřelení a brání případnému zborcení spirálově vinuté části těsnění dovnitř. Tato konstrukce spirálového těsnění je vhodná pro použití ve velmi náročných podmínkách, kde se vyskytují vysoké tlaky, teploty a jejich časté kolísání. Typickým příkladem použití jsou tepelné výměníky s pracovními tlaky okolo 25 MPa a teplotami mezi 200 až 370°C. Tato těsnění je možné vyrábět i v nadstandardních velikostech bez nebezpečí ztráty stability. Příkladem může být utěsnění víka regenerátoru při katalytickém krakování a další.[1]

3.3 MATERIÁLY SPIRÁLOVÝCH TĚSNĚNÍ

Spirálová těsnění mohou být vyráběna z různých materiálů, tak aby bylo těsnění dostatečně chemicky odolné pro danou aplikaci. Základně užívaným materiálem je uhlíková ocel. Dalšími často používanými materiály jsou monel, legované, nerezové a další oceli. Následující podkapitoly jsou věnovány některým z těchto materiálů a jejich schopnostem odolávat různým provozním podmínkám.

3.3.1 MATERIÁLY MĚKKÝCH TĚSNÍCÍCH PÁSKŮ

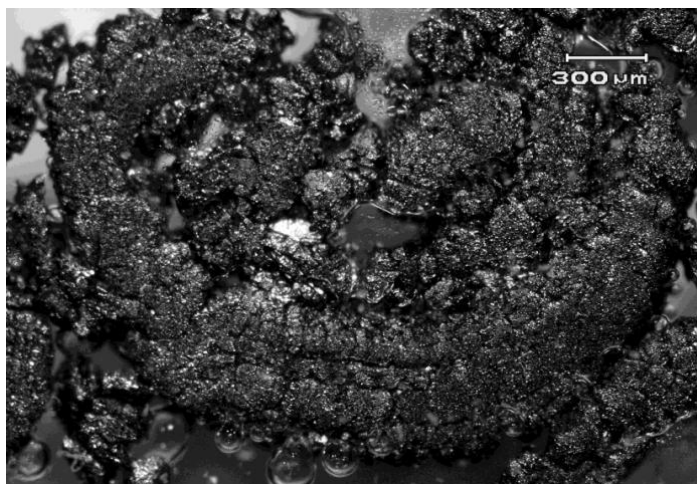
EXPANDOVANÝ GRAFIT

Základním materiálem pro výrobu expandovaného grafitu je minerální grafit, který se těží ve hlubinných dolech. Před výrobou expandovaného grafitu je třeba minerální grafit rozemlít na velmi jemné částice a vyčistit. Čištění namletého grafitu se provádí působením hydroxidu sodného (NaOH) na jemné částice grafitu při teplotě kolem 400°C. Expandování grafitu se docílí ponořením mletého minerálního grafitu, nejdříve do kyseliny chromové a potom do kyseliny sírové. Tím dochází k oddálení rovin atomové struktury dále od sebe, tedy expandování grafitu.

Dalším způsobem výroby je smíchání minerálního grafitu s kyselinou sírovou v poměru 1:1 a jeho následném oxidování peroxidem vodíku v nerezovém reaktoru (H₂O₂). Po počáteční reakci s H₂O₂ se ponechá grafitová směs expandovat ve vakuové peci, při teplotě 850°C.

Expandovaný grafit, vzniklý těmito procesy, má mnohonásobně větší objem a hlavně vnitřní povrch oproti původnímu minerálnímu grafitu. Hrubý expandovaný grafit je zbaven nežádoucích příměsí a je válcován do tenkých fólií. Na Obr. 3-5 je zobrazen mikroskopický detail expandovaného grafitu. Pro výrobu spirálových těsnění jsou tyto fólie děleny na pásy požadované šířky. Obsah uhlíku v expandovaném grafitu se pohybuje v rozmezí 85-99,5%. Rozsah teplotního použití expandovaného grafitu se pohybuje mezi 250°C až 1600°C přičemž je nutné brát v úvahu, že v oxidační atmosféře je horní hranice použití 450°C. V neoxidační atmosféře se teoreticky uvádí použití grafitu

do 3000°C, což je ovšem teplota sublimace grafitu, proto se v praxi používá pouze do teploty 1600°C.



Obr. 3-5 Detail expandovaného grafitu[10]

KERAMICKÁ VLÁKNA A SLÍDY (MICA)

Mica je bez-azbestový těsnící materiál, jež je vyráběn z chemicky a tepelně expandované slídy. Jeho hlavní předností je, že odolává vysokým teplotám (jeho teplota tání je 1250°C) a je nehořlavý. Díky tomu lze tento materiál používat v provozech s nebezpečnými, hořlavými látkami. V některých případech se používá, jako sekundární těsnění, které má za úkol chránit primární těsnění před nebezpečnými vlivy z vnějšího prostředí. Je to pružný a pevný, a také poměrně měkký materiál. Další jeho výhodou je, že má prakticky nulovou absorpci vlhkosti a velmi dobrou odolnost proti většině chemikálií (ředidla, louhy, kyseliny, minerální oleje). Těsní až po dosažení minimální teploty 100°C a rozsah použití sahá až do 1000°C.

PTFE

Polytetrafluorethylen, obchodním názvem teflon, je významným konstrukčním materiálem těsnících prvků. Díky tomu, že je složen pouze z atomů uhlíku a fluoru, s velmi dobrou vzájemnou vazbou, je schopen odolávat širokému rozsahu teplot a korozivních prostředí. Rozsah teplot použití PTFE je od -260°C po +250°C.



3.3.2 MATERIÁLY KOVOVÝCH PÁSKŮ

UHLÍKOVÉ OCELI

Jsou základním konstrukčním kovem s nízkým obsahem legur v materiálu, jejich vliv je minimální. Uhlíkové oceli jsou vhodné k tváření za studena, což je výhodné právě při formování V-profilu na navíjecím zařízení spirálových těsnění. Zároveň mají uhlíkové oceli zaručenou dobrou svařitelnost. Teplotní rozsah použití je cca od -40°C do 500°C . [6]

MONEL

Monel je slitina mědi a niklu, která se vyznačuje výbornými antikoročními vlastnostmi a vysokou chemickou odolností vůči široké škále medií. Monel má dobré mechanické vlastnosti od -200°C až do 480°C . Často se používá jako náhrada za nerezové oceli, v případě, že ty už nedostačují.

NEREZOVÉ OCELI

Nerezové oceli jsou vysoce legované oceli, které mají zvýšenou odolnost proti chemické a elektrochemické korozi. Tyto oceli obsahují minimálně 10,5% chromu, přičemž jeho obsah se obvykle pohybuje v rozmezí 12 až 30%. Při porovnání s nelegovanými oceli vykazují mnohonásobně větší odolnost proti korozi. Kromě vyššího obsahu chromu se při její výrobě užívá dalších legujících prvků, které dále zvyšují její odolnost vůči korozi. Mezi tyto legující prvky patří například nikl (Ni), mangan (Mn), molybden (Mo) a další prvky ovlivňující její vlastnosti. I přes vysoký obsah legujících prvků v nerezových ocelích se vždy jedná o slitinu uhlíku se železem, tedy ocel. Teplotní oblast použití nerezových ocelí se pohybuje od -250 až do 1000°C , v závislosti na jejich složení a použitých legujících prvků. [6]

3.3.3 OZNAČOVÁNÍ MATERIÁLŮ SPIRÁLOVÝCH TĚSNĚNÍ

Spirálová těsnění jsou označována textovým a číselným kódem, který bývá umístěn na vodícím kroužku těsnění. Norma ČSN EN 1514-2 určuje, že kód musí obsahovat jméno výrobce, případně jeho ochrannou známku, dále pak jmenovitou světlost (DN) a jmenovitý tlak (PN), pro něž je spirálové těsnění konstruováno. Barevné značení musí jasně určovat, z jakého materiálu jsou měkké těsnící pásy a z jakého materiálu jsou kovové pásy spirálového těsnění. Materiál kovového pásku určuje souvislý barevný pruh kolem hrany středícího kroužku. Přerušované barevné pruhy na okraji vodícího kroužku určují materiál, měkké těsnící výplně. Do rozměru DN 40 musí být spirálová těsnění označena minimálně dvěma proužky po 180° . V případě rozměrů větších než DN 40 musí označení obsahovat minimálně čtyři proužky po 90° . Barevné značení se povětšinou shoduje jak v amerických tak evropských společnostech. Barevné kódování ošetřuje výše zmiňovaná norma. [4]



4 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ

Hřebenová těsnění jsou řazena do kategorie plochých těsnění, která představují nejčastěji používanou variantu těsnění přírubových spojů. Jedná se o těsnění s kovovým jádrem, které je opatřeno vrstvou těsnícího materiálu po obou stranách základního kroužku. Tato těsnění jsou nazývána „hřebenová“ proto, že příčný řez kovového jádra připomíná svým tvarem hřebínek. V literatuře se můžeme setkat s mnoha různými názvy, jako např. hřebínková, kammprofilová, cammpofilová, kammprofil, a další. Počátky vývoje hřebenových těsnění sahají na přelom 60. a 70. let minulého století. Původní koncepce drážkovaného kovového jádra vznikla v Německu, jako varianta k tradičně používaným kombinovaným těsněním (obalovaná a spirálová těsnění). Hřebenová těsnění dosáhla, v průběhu let, značné popularity. Dokladem toho je situace v USA, kde došlo za poslední desetiletí k prudkému nárůstu použití hřebenových těsnění. V Evropě jsou užívána hřebenová těsnění k utěšňování tlakových nádrží a výměníků tepla, kde je s ohledem na konstrukční řešení (těsnící příčky) a pracovní podmínky obtížné dosáhnout dostatečné přitlačné síly. Nahrazují tak tradičně používaná obalovaná těsnění, která jsou v současnosti často používána pro těsnění výměníků tepla. Hřebenová těsnění jsou vhodná pro širokou škálu použití. Vhodnou kombinací materiálu kovového jádra a měkkých poddajných příložek lze dosáhnout dobré chemické a korozní odolnosti. Často jsou používána pro vysokotlaké a tepelně namáhané spoje. Rozdělením materiálů, které jsou typicky používány při výrobě hřebenových těsnění, je věnována oddíl 4.1 této práce. [3]

4.1 PRINCIP FUNKCE A POSTUP VÝROBY HŘEBENOVÝCH TĚSNĚNÍ

Jak již bylo řečeno, hřebenové těsnění se skládá z kovového drážkovaného jádra, k němuž jsou připevněny měkké stlačitelné příložky. Drážky na povrchu kovového jádra jsou soustředné a jejich funkcí je vytvářet oblasti s vyšší koncentrací tlaku na měkkém těsnícím materiálu tak, aby došlo k zajištění požadované úrovně těsnosti. Při stlačení těsnících ploch dochází k zatečení měkkého poddajného materiálu do nerovností na těsněných plochách ale i do drážek kovového jádra. Množství měkkého materiálu, vtlačené do drážek hřebenového profilu, způsobuje velmi dobrou schopnost zpětného odpružení. Šířka drážkování záleží na konkrétním konstrukčním řešení daného hřebenového těsnění. Rozdělením konstrukčních řešení hřebenových těsnění se zabývají další podkapitoly. Často používaným způsobem výroby kovového jádra je skružování profilovaných „pásků“. Drážkovaný profil je na tomto pásku vytvořen protahováním, případně jinou konvenční metodou obrábění. Po skružení je kovové jádro svařeno v jeden celek. Svaření musí být provedeno tak, aby došlo k provaření celé tloušťky jádra, a počet svarů nesmí překročit dva. Svary musí být následně opracovány tak, aby došlo k zachování počtu a hloubky drážek hřebenového profilu. Úchylka rovinatosti jádra může být maximálně 3mm na každých 300mm vnějšího průměru.

Další možností výroby drážkovaného jádra je soustružení. Při soustružení lze dosahovat výrazně nižších úchylek rovinatosti. Tento postup není kvůli své technické náročnosti tak obvyklý jako ten předešlý, využívají jej hlavně výrobci přesných hřebenových těsnění. Pro velké průměry je výchozím materiálem plech, pro malé průměry může být použita tyč příslušného průměru. Z plechu je pomocí laserového dělicího zařízení, vyříznut prstenec. Někteří výrobci k tomuto dělení používají zařízení s vodním paprskem tak, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění kovového jádra. Dále je nutné přesoustružit obě strany prstence, aby byla zaručena jeho konstantní tloušťka.



Konečným krokem při výrobě jádra je soustružení hřebenového profilu. Provádí se postupně z obou stran, přičemž prstenec je upnut v přípravku za vnitřní průměr.

Obložení tvaru mezikruží, z měkké těsnicí folie příslušné tloušťky, se buď vykružuje, nebo vyřezává na řezacím plotru. Po vytvoření všech komponent může být hřebenové těsnění sestaveno. Sestavení většinou probíhá až přímo při montáži, avšak někteří výrobci fixují měkká obložení k jádru již při výrobě. Před montáží nebo lepením je třeba zkontrolovat čistotu nosného hřebene. Hřeben nesmí vykazovat známky mechanického poškození a je nutné ho odmastit odmašťovadlem.

Při instalaci hřebenového těsnění je třeba dbát na správné vystředění těsnicího kroužku a na rovnoměrné stlačování těsnění. Z počátku utahování je třeba pečlivě dbát na rovnoběžnost těsnicích ploch tak, aby došlo k rovnoměrnému utěsnění.

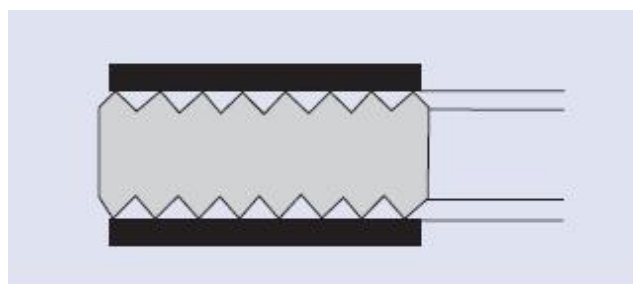
4.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Vývoj hřebenových těsnění je vzhledem k jejich popularitě v posledních letech značný a díky tomu vzniká velké množství nových konstrukčních řešení. Principiálně se vždy jedná o kovový kroužek s hřebenovým profilem a přiložené obložení z měkkého poddajného materiálu. Hlavním úkolem kovového jádra s hřebenovým profilem je zajištění dostatečné mechanické pevnosti. To je důležité zvláště u hřebenových těsnění velkých průměrů. Naopak úkolem měkkého poddajného materiálu na obložení je utěsnění nedokonalostí těsnicích ploch přírub. V mnoha případech dochází k proříznutí hřebenového profilu těsnicí folií a částečnému zaříznutí do těsnicích ploch přírub. Většina výrobců s touto eventualitou počítá, a proto nezaručují, že k proříznutí grafitové folie nedojde.

Společnosti, které vyrábějí velmi přesná hřebenová těsnění, navrhují drážkování tak, aby k proříznutí folie nedošlo. Hřebenová těsnění jsou primárně konstruována, jako neobnovitelná, avšak nedojde-li k mechanickému poškození, lze drážkovaný hřeben opakovaně použít. Obnovitelnosti hřebenových těsnění lze např. s výhodou využít při použití v jaderných elektrárnách, kde díky tomu dochází ke snížení radioaktivního odpadu z provozu.[7]

4.2.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE BEZ STŘEDÍHO KROUŽKU

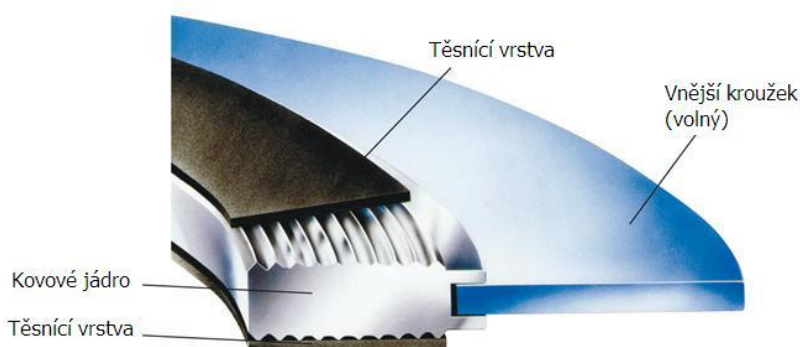
Základní konstrukční řešení hřebenového těsnění se sestává z kovového jádra, které je na těsnicích plochách opatřeno soustředným drážkováním. Drážky jsou umístěny po celé šířce nosného hřebene, jak je zobrazeno na Obr. 4-1. Tento typ hřebenových těsnění smí být použit pouze pro utěšňování přírubových spojů typu *pero-drážka* a *nákrůžek-výkružek*. V případě použití pro příruby s rovnou těsnicí plochou, by vznikaly problémy s vystředěním. Z toho důvodu je vhodnější aplikace v přírubových spojkách s osazením. Vložením do přírubové drážky nebo výkružku dochází k dostatečnému vystředění těsnění. Zvláště typické použití hřebenových těsnění základního typu je při renovaci těsnicích spojů tepelných výměníků v případě, že je potřeba snížit utahovací tlaky. V těchto případech jsou používána, jako náhrada za obalovaná těsnění, která jsou hojně používána k utěšňování tepelných výměníků. Při výměně dvouplášťového obalovaného těsnění za hřebenové těsnění, je nutné provést úpravu těsnicích ploch. V případě, že byl v původním přírubovém spoji použit koncentrující nákrůžek. Je nutné ho odstranit.[2]



Obr. 4-1 Řez hřebenovým těsněním základního typu[2]

4.2.2 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ SE STŘEDÍCÍM KROUŽKEM

Tento typ hřebenového těsnění je vhodný pro použití v přírubových spojkách s rovnými těsníci plochami případně s vystouplou těsnící lištou. Centrovací kroužek, jak už název napovídá, slouží k vystředění hřebenového těsnění. Jeho průměr je navrhován tak, aby se dotýkal vnějšími hranami šroubů přírubového spoje. Centrovací kroužek je vlastně pokračováním vnějšího okraje nosného hřebene těsnění. Jeho tloušťka je konstruována tak, aby byla menší než vrcholky drážkování hřebene. Tím je zajištěno, že utahovací tlak působí pouze na těsnící část hřebenového těsnění. Centrovací kroužek může být vyroben z jednoho stejného polotovaru společně s nosným hřebenem. Častou variantou také bývá kombinace nosného hřebene a vsazeného centrovacího kroužku z „obyčejného“ plechu. Takový centrovací kroužek je volně uložen v radiální drážce na vnějším okraji nosného hřebene. Někdy bývá nazýván plovoucí a lze ho vidět na Obr. 4-2. Další funkcí centrovacího kroužku je zvýšení odolnosti hřebenového těsnění proti vystřelení. U některých typech hřebenových těsnění se lze setkat s centrovacím kroužkem, v němž je speciálně předdefinovaný zápich. V případě poruchy a náhlého úniku média z tlakového systému vznikají vibrace na těsnění, které vyústí prasknutím centrovacího kroužku v místě zápichu. Porušení tohoto centrovacího kroužku usnadní detekování poškození přírubového těsnění.



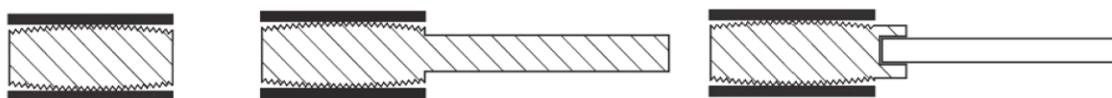
Obr. 4-2 Hřebenové těsnění s volným středícím kroužkem[6]

4.2.3 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ S KOMPENZACÍ OHYBU PŘÍRUB

Ohýbání listů přírub je neblahým jevem, který provází utěšňování přírubových spojů. Je způsobeno vysokými utahovacími silami od svorníků přírubového spoje. Tyto síly vytvářejí ohybový moment na rameni mezi osou svorníků a styčnou plochou těsnění a přírub. V případě těsnění ve vedlejším toku je vliv utahovacích sil minimální, významnější je v případě těsnění v hlavním silovém toku. Časté termické cyklování je dalším aspektem, jenž ovlivňuje ohýbání listů přírub. Při příliš velkém ohybu listu příruby může dojít k havárii, způsobené nerovnoměrným rozložením tlaku na ploše těsnění. Buď je těsnění na vnějším okraji přetíženo a na vnitřním okraji odlehčeno nebo obráceně. Snížením jmenovitých utahovacích tlaků potřebných k utěšnění přírubového spoje dochází ke snížení vlivu utahovacích sil na ohýbání listů. Stále však zbývá zatížení termickým cyklováním. Následující podkapitoly jsou věnovány některým technickým řešením tohoto problému.

HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ S KONVEXNÍM DRÁŽKOVÁNÍM HŘEBENE

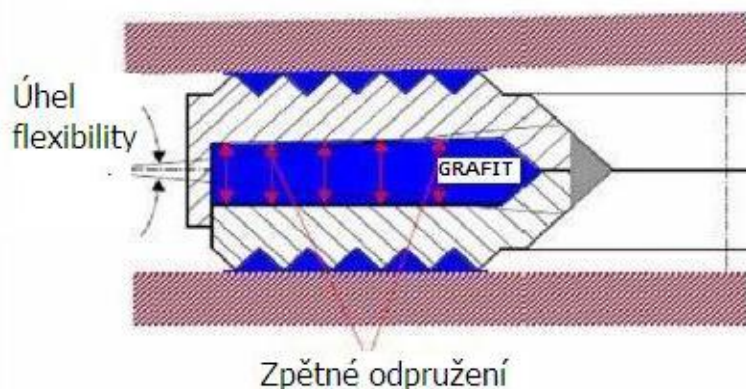
Konstrukční řešení s konvexním drážkováním je principiálně stejné jako konstrukce běžných hřebenových těsnění. Nosný hřeben jádra je však konvexně vypouklý do obou stran, jak je patrné z příčného řezu na Obr. 4-3. Na konvexní drážkování je připevněno obložení z měkkého těsnícího materiálu. K utvoření těsného spoje dochází tam, kde je největší utahovací tlak na měkké obložení. To záleží na aktuální poloze přírub vůči sobě. Hřebenová těsnění s konvexním drážkováním se vyrábějí ve všech třech výše popsaných variantách, v základní variantě a ve variantě s centrovacím hřebenem (pevným i volným).[6]



Obr. 4-3 Provedení hřebenových těsnění s konvexním drážkováním[6]

HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ S GRAFITOVOU VLOŽKOU

Hřebenové těsnění s grafitovou vložkou je zvláštní konstrukcí hřebenových těsnění, která kombinuje dobré vlastnosti zpětného odpružení klasického obložení z expandovaného grafitu a předepjaté vložky z expandovaného grafitu. Tato vložka podstatně zvyšuje hodnotu zpětného odpružení těsnění, čímž zajišťuje stabilní těsnost během provozu i při náhlém snížení předpětí šroubů přírubového spoje. Kovové jádro se skládá ze dvou částí, které mezi sebou uzavírají grafitovou vložku a jsou na vnitřním průměru svařeny dohromady.

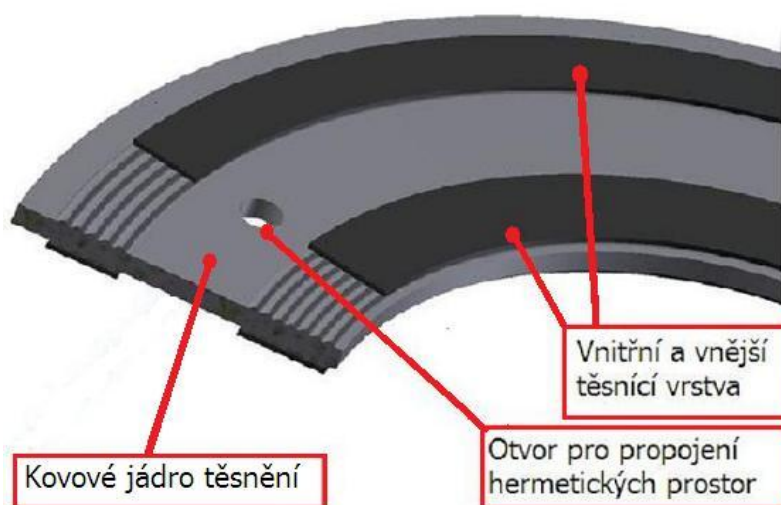


Obr. 4-4 Řez hřebenovým těsněním s grafitovou vložkou[15]

4.2.4 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ SE DVĚMA TĚSNÍCÍMI PRVKY

Pro utěšňování zvláště kritických zařízení, která pracují s velmi nebezpečnými látkami, se zpravidla používá systém s primárním a sekundárním těsnícím prvkem. Primární těsnění, které tvoří první bariéru proti úniku média, je instalováno společně se sekundárním těsněním. Sekundární těsnění uzavírá prostor mezi oběma těsněními a tím mezi nimi vzniká hermeticky těsný prostor. Na hermeticky těsný prostor je napojeno zařízení pro detekci úniku, a prostor je kontinuálně monitorován. Známkou začínající netěsnosti primárního těsnění je navýšení tlaku v tomto meziprostoru. Pokud funguje sekundární těsnění správně, lze odhalit únik přes primární těsnění již v jeho prvopočátku. To umožňuje provoznímu personálu včas reagovat na danou situaci, dle provozních předpisů. Typickým příkladem použití systému s primárním a sekundárním těsněním jsou některé spoje tlako-vodních elektráren typu VVER, ruské provenience. Ty konzervativně používají kombinaci niklového kroužku jako primární těsnění a šňůru z expandovaného grafitu (dříve z azbestu) jako sekundární těsnění. Bohužel vzhledem ke složité geometrii přírubového spoje a nerovnoměrné distribuci utahovacího tlaku může dojít k nedostatečnému utěsnění sekundárního těsnění. Právě tento problém byl řešen, na přírubovém spoji elektro-ohříváku kompenzátoru objemu v jaderné elektrárně typu VVER 1000. Původní koncepce s niklovým kroužkem a šňůrou z expandovaného grafitu byla nahrazena hřebenovým těsněním se dvěma těsnícími prvky. [7]

Nosné jádro tohoto těsnění je vyrobeno z jednoho polotovaru (mezikruží). Na vnějším a vnitřním okraji mezikruží je vyhotoveno hřebenové drážkování. Mezi dvěma drážkovanými hřebínky je tloušťka jádra snížena tak, aby zde mohl vzniknout volný prostor umožňující detekci případné netěsnosti primárního těsnění (vnitřní hřeben). Prostřední snížená část mezi hřebenovými profily je opatřena několika otvory, které umožňují propojení obou prostor mezi těsněními s jedním detekčním zařízením. Na hřebenové drážkování jsou připevněna obložení z měkkého těsnícího materiálu. Vzhledem k jednoduché geometrii tohoto těsnění, kdy primární i sekundární těsnění jsou v jedné rovině, nevzniká problém s distribucí přítlačného tlaku.



Obr. 4-5 Hřebenové těsnění se dvěma těsnícími prvky[7]



4.3 MATERIÁLY HŘEBENOVÝCH TĚSNĚNÍ

Kovová jádra jsou obvykle vyráběna z nerezové (austenitické) oceli případně uhlíkové oceli. Není to však pravidlem a způsob výroby hřebenových těsnění dovoluje použití široké palety materiálů. To je výhodou v případě utěšňování médií, vůči nimž nejsou obvykle používané materiály odolné.

Jako materiál těsnícího obložení lze také použít širokou paletu materiálů, standardně používán je expandovaný grafit, pro svoje dobré těsnící vlastnosti. Výrobci hřebenových těsnění je dodáván pod mnoha různými obchodními názvy. Není však jedinou variantou materiálu pro těsnící obložení. Pro teploty do 250°C se s ohledem na výbornou chemickou odolnost často používá PTFE. Dalšími variantami jsou bez-asbestové desky nebo měkké kovové materiály, jako např.: hliník (Al), měď (Cu) nebo stříbro (Ag).

4.3.1 MATERIÁLY TĚSNÍCÍHO OBLOŽENÍ

EXPANDOVANÝ GRAFIT & PTFE

Expandovaný grafit, používaný pro měkká obložení hřebenových těsnění se zpracovává stejným způsobem jako grafit pro spirálová těsnění, jehož postup je uveden ve 3. kapitole této práce. Tamtéž je popsáno i zpracování PTFE. Pro použití při výrobě hřebenových těsnění jsou tyto materiály dodávány v tenkých foliích různých tloušťek, které jsou navinuty v rolích. Použití těchto grafitových folií je popsáno výše.

BEZ-ASBESTOVÉ DESKY

V podstatě se jedná o pryžovou matici, která je vyztužena vlákny různých materiálů (aramid, sklo, slída), stejně tak jako u vláknito-pryžových těsnění. Avšak místo pryže mohou být použita i jiná plniva. Často používaná aramidová vlákna jsou textilie polyamidů s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem. Lze je použít do teplot nepřesahujících 350°C a vyznačují se vysokou pevností v tahu, do této skupiny patří např. kevlar.

4.3.2 MATERIÁLY KOVOVÝCH JADER HŘEBENOVÝCH TĚSNĚNÍ

Materiál vlastního hřebenového profilu určuje tvarovou stálost hřebenového těsnění. V zásadě se pro hřebenová jádra používají stejné materiály jako pro spirálová těsnění, které jsou uvedeny na konci 3. kapitoly (uhlíkové oceli, monel, nerezové oceli a další).

NEREZOVÉ OCELI

Nerezové oceli mají velmi dobrou korozní odolnost, jež lze zvyšovat přidáváním legujících prvků molybden (Mo), měď (Cu) a dalších. Oproti nerezovým ocelím pro spirálová těsnění je žádoucí dobrá obrobiteľnosť pro soustružená jádra a dobrá svařitelnost pro ohýbaná jádra.



4.3.3 OZNAČOVÁNÍ MATERIÁLŮ HŘEBENOVÝCH TĚSNĚNÍ

Hřebenová těsnění jsou označována textovým a číselným kódem, který je umístěn na kroužku těsnění. Dle normy ČSN EN 1514-6 musí tento kód obsahovat jméno výrobce, případně jeho ochrannou známku, dále pak jmenovitou světlost (DN) a jmenovitý tlak (PN), pro něž je hřebenové těsnění určeno. Pokud to tloušťka jádra, případně středícího kroužku dovoluje, musí být hřebenové těsnění označeno barevným kódem na vnější části středícího kroužku nebo jádra. Barevné označení musí jasně identifikovat materiál kovového jádra a měkké těsnicí vrstvy obložení. Souvislý pruh barvy na vnějším okraji označuje materiál kovového jádra, naopak přerušované barevné proužky označují materiál měkké těsnicí vrstvy. Do rozměru DN 40 musí být hřebenová těsnění označena minimálně dvěma proužky po 180°. V případě rozměrů větších než DN 40 označení obsahovat minimálně čtyři proužky po 90°. V případech, kdy tloušťka nedovoluje jasné označení na okraji středícího kroužku nebo jádra, je barevné značení umístěno na horním a dolním povrchu středícího kroužku. Barevné značení materiálů hřebenových těsnění je totožné se značením materiálů spirálových těsnění a je ošetřeno normou ČSN EN 1514-6.[8]

5 POROVNÁNÍ HŘEBENOVÉHO A SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ

5.1 HŘEBENOVÁ A SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ

Hřebenová a spirálová těsnění jsou hojně užívána v petrochemickém a energetickém průmyslu. Oba typy těsnění jsou vhodné pro utěsňování spojů v náročných aplikacích, kde dochází ke kolísání teplot i tlaků a tím způsobenému vzájemnému natáčení či ohýbání přírub. Detailní popis principu a různých variant těchto typů těsnění je uveden v předešlých kapitolách 3 a 4. Přestože hřebenová těsnění vykazují v posledních letech lepší těsnicí schopnosti a delší životnost, je třeba při jejich porovnávání přihlížet i k dalším specifickým obou konstrukcí[3].

5.1.1 SPIRÁLOVÁ TĚSNĚNÍ

Spirálová těsnění byla vyvinuta pro zlepšení těsnících vlastností a zvýšení bezpečnosti ve vysokotlakových aplikacích více než před 100 lety. Skládají se z proužků měkkého těsnícího materiálu a tenkých kovových proužků spirálově navinutých dohromady. Detailně se konstrukčním řešením spirálových těsnění zabývá 3. kapitola této práce.

K utěsnění spoje dochází vytlačení měkkého těsnícího materiálu z prostoru mezi kovovými proužky proti těsnícím plochám přírub včetně všech jejich nedokonalostí. K poškození spirálových těsnění může dojít při nedostatečném nebo naopak přílišném dotažení přírubového spoje. Proto je nutné dotahovat tato těsnění předepsaným tlakem. K zamezení přílišného dotažení někdy mohou sloužit vnější kovové kroužky.

Ve vzrůstající míře bývají spirálová těsnění opatřena také vnitřním kovovým kroužkem, který snižuje riziko zborcení těsnění dovnitř. Takové poškození by mohlo způsobit kontaminaci těsněného systému a další škody s tím spojené. Tento typ poškození může vzniknout i v případě kdy je těsnění dotaženo správně, ale při ohřátí komponent spoje dojde k relaxaci svorníků a ke snížení, utahovacího tlaku působícího na těsnění, pod povolenou úroveň.[3]



Obr. 5-1 Příklad zborceného spirálového těsnění[3]



Použití vnitřních kovových kroužků samozřejmě zvyšuje hodnotu maximálního utahovacího tlaku. V některých případech může dojít i ke zborcení vnitřního kovového kroužku. Jeho robustnost musí korespondovat s utahovacími tlaky v dané aplikaci.

Dalšími kritérii pro volbu těsnění jsou jeho hustota a stlačitelnost stejně tak jako snadnost manipulace s ním. Snadnost manipulace je obzvláště důležitá při instalaci v omezeném prostoru nebo například ve výškách. Spirálová těsnění jsou náchylná na působení radiální síly a při nárazu v radiálním směru se může snížit soudržnost těsnění a to se rozpadne podobně jako pružina. Obzvláště zacházení se spirálovými těsněními velkých průměrů musí být velmi opatrné, protože mají tendenci se vlnit a při špatné manipulaci může být těsnění poškozeno.



Obr. 5-2 Příklad rozsypaného spirálového těsnění[3]

Stlačitelnost spirálových těsnění je v porovnání s hřebenovými těsněními výrazně vyšší. Pohybuje se v rozsahu 0,7 až 2 mm, zatímco hřebenová těsnění vykazují zpravidla stlačitelnost do 0,6 mm.[3]



5.1.2 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ

Hřebenová těsnění byla vyvinuta jako alternativa spirálových a obalovaných těsnění v 70. letech minulého století. V průběhu let docházelo k různým konstrukčním změnám, avšak základní princip je stále stejný. Jedná se o nosný kovový prstenec, na němž je po obou stranách připevněn měkký těsnící materiál. Kovový prstenec je profilován a v řezu tvarem připomíná hřeben, odtud jeho české pojmenování. Detailně konstrukci hřebenového těsnění popisuje předcházející kapitola.

Při utahování spoje, těsněného hřebenovým těsněním, dochází ke vtlačení měkkého nekovového materiálu (expandovaný grafit, PTFE) do nerovností přírub, ale hlavně do drážek kovového jádra. V jednotlivých drážkách dochází ke ztuhnutí měkkého obložení a zvýšení jeho hustoty a přitlačné síly na povrch příruby. Drážkování také snižuje extruzi těsnícího materiálu ze spoje. Oproti spirálovým těsněním mají hřebenová těsnění dvě hlavní výhody. Kovové jádro zaručuje jeho tvarovou stálost a soudržnost, takže není tak náchylné k poškození při manipulaci. Druhou výhodou je, že měkký těsnící materiál zcela překrývá kovové jádro na rozdíl od spirálových, kde jsou v kontaktu s přírubami i kovové zpevňující pásy. V ideálním případě by tomu tak mělo být po celou dobu provozu, ale ve skutečnosti je tomu tak pouze u hřebenových těsnění některých výrobců. Stlačitelnost přesných hřebenových těsnění je tedy omezena na méně než součet tloušťek obou těsnících obložení z měkkého materiálu. U běžných hřebenových těsnění je o něco vyšší, protože připouští prořiznutí těsnící folie. Řádově se však pohybuje do 0,6 mm. Při prořiznutí vrcholů hřebenového profilu těsnícím obložení dochází k poškození těsnících ploch přírub a poškození samotného hřebenového profilu kovového jádra. Poškození profilu kovového jádra znemožňuje ve většině případů jeho opětovné použití, které je obzvláště výhodné při aplikaci hřebenových těsnění v jaderných elektrárnách, kde se díky němu nezvyšuje objem jaderného odpadu. V případě, že kovové jádro hřebenového těsnění lze znovu osadit měkkým obložení je také cena výrazně nižší než při pořízení nového těsnění. Naopak u spirálových těsnění je jakákoliv renovace použitého těsnění takřka nemyslitelná.

5.2 KONKRÉTNÍ SROVNÁNÍ HŘEBENOVÉHO A SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ

Pro konkrétní porovnání hřebenového a spirálového těsnění byla použita data z laboratorních zkoušek, obou jmenovaných. Pro hřebenové těsnění je poskytla společnost MiCo, spol. s r.o., která se mimo jiné zabývá výrobou hřebenových těsnění pro komplikované spoje. Pro spirálové těsnění byla porovnávaná data získaná z databáze statických těsnění prodávaných v Evropě. Tato databáze je, ve spolupráci s většinou významných výrobců těsnění, průběžně aktualizována novými daty, která jsou naměřena buď ve skutečných provozních podmínkách, nebo v laboratořích. Vzhledem k tomu, že se jedná o odlišné konstrukce těsnění a podmínky při měření mohou být mírně odlišné, nelze provádět přímé srovnání exaktně hodnotu s hodnotou. Lze však na porovnání nahlížet rámcově.



POROVNÁNÍ SPECIFICKÉHO MNOŽSTVÍ NETĚSNOSTI

Kupříkladu množství netěsnosti naměřené při vnitřním přetlaku 10 MPa a utahovacím tlaku 105 MPa byla u hřebenového těsnění naměřena hodnota netěsnosti odpovídající $2 \cdot 10^{-3} [mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$. V porovnání s množstvím netěsnosti $26 \cdot 10^{-2} [mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$, naměřeným u spirálového těsnění, při vnitřním přetlaku 4 MPa a utahovacím tlaku 100 MPa, se jedná o třídu lepší výsledek. A to i při víc jak dvojnásobné hodnotě vnitřního přetlaku. Z výsledků obou měření vyplývá, že obě těsnění byla schopna těchto hodnot dosahovat již při utahovacím tlaku 40 MPa.

POROVNÁNÍ NÁHRADNÍHO MODULU PRUŽNOSTI

V následující tabulce jsou zobrazeny hodnoty náhradních modulů pružnosti spirálového a hřebenového těsnění, při různých hodnotách utahovacích tlaků, tak jak byly zjištěny při laboratorních zkouškách. Obě zkoušky byly provedeny, při normální zkušební teplotě, která odpovídá 20-23°C. Vzhledem k tomu, že náhradní modul pružnosti E_G je závislý na předcházejícím utahovacím tlaku a výchozí tloušťce těsnění, je v tabulce uvedena také počáteční tloušťka obou těsnění. Při zjišťování náhradního modulu pružnosti u spirálového těsnění, byla zkouška ukončena při kontaktu přírub s vnějším kovovým prstencem. U hřebenového těsnění zkouška pokračovala do hodnoty utahovacího tlaku 244 MPa. V průběhu zkoušky nedošlo k porušení těsnění.

Tab. 3 Tabulka porovnání náhradních modulů pružnosti E_G [19]

Utahovací tlak [MPa]	Náhradní modul pružnosti E_G [MPa]	
	Spirálové těsnění (tl. 4,75 mm)	Hřebenové těsnění (tl. 4,98 mm)
40	1155	1673
50	1725	1988
60	3304	2356
80	Při 66.86 MPa došlo ke kontaktu vnějšího kroužku	2874
160		4873
244		6976



ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo, mimo jiné, vypracovat přehled statických těsnění, která jsou používána v energetickém a petrochemickém průmyslu. Správná volba materiálu a konstrukce statických těsnění je důležitou součástí návrhu přírubových a jiných spojů. Přehled statických těsnění je rozdělen, podle materiálů užitých v jednotlivých konstrukčních řešeních. Jedná se o plochá nekovová, kovová a kombinovaná těsnění.

Nekovová statická těsnění jsou v podstatě nejjednodušší variantou statických těsnění. Většinou se jedná o mezikruží (případně jiný tvar podle tvaru přírub), které je vystříženo nebo vyseknuto z měkkého těsnícího materiálu. Škála materiálů, z nichž lze tato těsnění vyrábět se pohybuje od vláknito-pryžových materiálů přes PTFE těsnění, až po těsnění z expandovaného grafitu. Z toho grafitová a PTFE těsnění mohou být vyztužena velmi tenkou děrovanou sítí z kovového nebo plastového materiálu. Většinou jsou vhodná pro méně náročné aplikace.

Kovová statická těsnění mají několik odlišných konstrukčních řešení. Tato těsnění lze rozdělit na kovová ze zvlněného plechu, z profilovaných prstenců a na další konstrukce. Všechna tato řešení však spojuje princip utěsnění přírubového spoje. Před utažením spoje jsou tato těsnění v kontaktu s přírubami pouze na malých styčných ploškách, které se vlivem utahovacího tlaku a následné plastikaci těsnění zvětší. I přestože se pro tato těsnění, většinou používají spíše měkké kovy je pro utěsnění potřeba poměrně vysokého utahovacího tlaku. Často dochází k velkému opotřebení těsnících ploch přírub, které znemožňuje nebo znesnadňuje jejich opětovné použití.

Kombinovaná statická těsnění spojují výhody kovových i nekovových materiálů. Dělí se na obalovaná, spirálová a hřebenová. Detailní popis posledních dvou jmenovaných je obsahem 3. a 4. kapitoly této práce. V těchto kapitolách je vysvětlen princip funkce obou typů těsnění a jsou v nich představena jejich různá konstrukční řešení. Kombinovaná těsnění se často vyrovnají kovovým těsněním, avšak utahovací tlak potřebný k jejich utěsnění je výrazně nižší. Při jejich použití také nevzniká přílišné opotřebení povrchu přírub.

Tato práce se ve 2. kapitole, také zabývá charakteristickými vlastnostmi statických těsnících prvků, tak jak je předepisuje norma ČSN 13 555. Okrajově se potom zmiňuje o některých dalších normách určujících charakteristické vlastnosti statických těsnění např.: ASME-code.

V závěru práce je porovnání spirálových a hřebenových těsnění, kde jsou nastíněny výhody a nevýhody obou typů s ohledem na snadnost manipulace, náchylnost k poškození, možnost obnovitelnosti použitých těsnění a jejich ceny. Součástí tohoto srovnání je i konkrétní porovnání několika charakteristických hodnot těsnění naměřených při laboratorních zkouškách.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] FLEXITALLIC, *Gasket design criteria* [online]. 2009.
Dostupné z: <http://www.flexitallic.eu/>
- [2] LAMONS, *Lamons gasket handbook* [online]. 2012.
Dostupné z: <http://www.lamons.com/literature.html>
- [3] YODER, Chad., David W. Reeves. *Hydrocarbon processing*. 2010, září, s.95-98.
- [4] ČSN 1514-2, *Příruby a přírubové spoje- Těsnění pro příruby s označením PN- Část 2: Spirálově vinutá těsnění pro ocelové příruby*, Český normalizační institut, Prosinec 2005, ICS 23.040.80
- [5] TICHÝ, J. *Uhlíkové materiály pro elektrochemické zdroje elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 50 s.
- [6] TEMAC. *Temac sealing solutions*[online]. 2012.
Dostupné z: <http://temac.cz/default.aspx>
- [7] SVOBODA, P., Petr Toman. *Comparison of seal nickel opposite MITes HT[®]*. European Nuclear Young Generation Forum [online]. 2011.
Dostupné z: <http://www.enygf.eu/>
- [8] ČSN 1514-6, *Příruby a přírubové spoje- Rozměry těsnění pro příruby s označením PN- Část 6: Hřebenová kovová těsnění s obložením pro ocelové příruby*, Český normalizační institut, Prosinec 2005, ICS 23. 040.80
- [9] TOMAN, P.: *Modifikace přírubového spoje elektroohříváku kompenzátoru objemu VVER 1000*. Zlín, 2011. diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická
- [10] BARATH, P. Disertační práce: *Palivové články H₂-O₂ s iontoměničovou membránou anexového a bipolárního typu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008
- [11] Norma ČSN EN 13555, *Příruby a přírubové spoje-Parametry těsnění a zkoušení vztahující se na pravidla dimenzování přírubových spojů s kruhovými přírubami a těsněním*, Srpen 2005, Český normalizační institut, ICS 23.040.60; 23.040.80
- [12] DIMER s.r.o..*S-mart gasket types & material overview*[online]. 2012.
Dostupné z: <http://www.dimer-ing.cz/>
- [13] LUKAVSKÝ, J.: *Bezazbestová těsnění pro přírubové spoje*, [online. 2000],
Dostupné z:
<http://fsinet.fsid.cvut.cz/cz/U218/peoples/hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Utesnovani/BATupr.ppt>.
- [14] SCHNEIDER, P.: *Základy konstruování procesních zařízení*, 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1999. ISBN 80-214-1483-9



- [15] MICO spol. s.r.o..*Mites HF 400*[online]. 2005.
Dostupné z: <http://www.mico.cz/cz/tesneni.php>
- [16] Mersen, [online], 2013.
Dostupné z: <http://www.mersen.com/en/products.html>
- [17] Zacha, [online], 2009.
Dostupné z: <http://www.zacha.cz/hrebenova-tesneni>
- [18] SENSOR products inc. Tactical pressure experts,[online], 2013.
Dostupné z: <http://www.sensorprod.com/index.php>.
- [19] Gasket database,[online], 2013.
Dostupné z: <http://gasketdata.org>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

PTFE	-Polytetrafluorethylen
MICA	-Název těsnících prvků na bázi hlinitokřemičitanů
SBN	-Butadien styrenový-kaučuk
EPDM	-Etylen-propylen-dien-kaučuk
NBR	-Nitril-butadien-kaučuk
FPN	-Fluor-kaučuk
RTJ	-Označení přírub a těsnění s kovovými kruhovými těsněními, (<i>Ring type joint</i>)
ČSN	-Česká státní norma
EN	-Evropská norma
DIN	-Německá národní norma, (<i>Deutsche Industrie-Norm</i>)
ASME	-American Society of Mechanical engineers
PVRC	-Pressure Vessel Research Council
DN	-Jmenovitý vnitřní průměr potrubí, (Diameter Nominal)
PN	-Jmenovitý tlak potrubí, (Pressure Nominal)
VVER	-Typ tlakovodních energetických reaktorů ruské provenience

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Q_{Smax}	-Nejvyšší utahovací tlak, působící na těsnění bez jeho poškození	[MPa]
$Q_{MIN(L)}$	-Nejnižší povolený utahovací tlak při montáži	[MPa]
$Q_{SMIN(L)}$	-Nejmenší utahovací tlak při provozních podmínkách	[MPa]
P_{QR}	-Poměr utahovacích tlaků před a po uvolnění	[-]
L_N	-Třída netěsnosti	$[mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$
E_G	-Náhradní modul pružnosti	[MPa]
G_B	-Charakteristika počátečního stlačení	[MPa]
G_S	-Odlehčovací charakteristika těsnění	[MPa]
M	-Faktor těsnění	[-]
Y	-Minimální utahovací tlak	[MPa]
T_{PN}	-Požadovaná těsnost těsnění	$[mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$
T_{PMIN}	-Minimální požadovaná těsnost těsnění	$[mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}]$
NaOH	-Hydroxid sodný	[-]
H ₂ O ₂	-Peroxid vodíku	[-]



SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

OBR. 1-1-ROZDĚLENÍ STATICKÝCH TĚSNĚNÍ[12]	11
OBR. 1-2 PŘÍKLADY PRYŽOVÝCH A VLÁKNITO-PRYŽOVÝCH TĚSNĚNÍ[12]	12
OBR. 1-3 PŘÍKLAD TĚSNĚNÍ Z EXPANDOVANÉHO GRAFITU[18]	13
OBR. 1-4 TLAKOVÉ A TEPLOTNÍ LIMITY POUŽITÍ NE-KOVOVÝCH PLOCHÝCH TĚSNĚNÍ[12]	14
OBR. 1-5 PROFIL ZVLNĚNÉHO TĚSNĚNÍ[12].....	15
OBR. 1-6 RŮZNÉ PROFILY RTJ KROUŽKŮ[12]	15
OBR. 1-7 PŘÍKLAD ULOŽENÍ OVÁLNÉHO KOVOVÉHO RTJ KROUŽKU.[14]	16
OBR. 1-8 PŘÍKLAD POUŽITÍ DELTA TĚSNÍČÍHO KROUŽKU[14]	16
OBR. 1-9 SCHÉMA KONSTRUKCE OBALOVANÝCH TĚSNĚNÍ[6]	17
OBR. 1-10 HŘEBENOVÁ TĚSNĚNÍ[17]	18
OBR. 1-11 SCHÉMA SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ[18].....	19
OBR. 1-12 OBLAST POUŽITÍ KOMBINOVANÝCH A KOVOVÝCH TĚSNĚNÍ[12].....	19
TAB. 2 PARAMETRY PŘÍRUBOVÝCH TĚSNĚNÍ.....	20
OBR. 2-2 STANOVENÍ $Q_{S_{MAX}}$ [11].....	21
OBR. 2-1 STANOVENÍ $Q_{S_{MAX}}$ [11].....	21
TAB. 2-2 ZATĚŽOVACÍ A ODLEHČOVACÍ TLAKY NA TĚSNĚNÍ[11]	22
OBR. 2-3 GRAF ZATÍŽENÍ[11]	22
TAB. 2-3 TŘÍDY NETĚSNOSTI[11]	23
OBR. 2-5 KŘIVKA STLAČOVÁNÍ[11]	24
OBR. 2-4 SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ[11]	24
OBR. 2-6 STANOVENÍ E_G V PŘÍPADĚ TEČENÍ[11]	24
OBR. 2-7 PŘÍKLAD ZÁVISLOSTI KONSTANT TĚSNĚNÍ G_B A G_S V ZÁVISLOSTI NA TĚSNOSTI SPOJE DLE PVRC[1]	25
OBR. 3-1 SPIRÁLOVÉ TĚSNĚNÍ[1]	26
OBR. 3-2 ŘEZ SPIRÁLOVÝMI TĚSNĚNÍMI[1]	27
OBR. 3-3 RŮZNÉ TVARY SPIRÁLOVÝCH TĚSNĚNÍ[2]	27
OBR. 3-4 ŘEZ SPIRÁLOVÝM TĚSNĚNÍM[1]	28
OBR. 3-5 SPIRÁLOVÉ TĚSNĚNÍ S OBRUČÍ[3].....	29
OBR. 3-6 SPIRÁLOVÉ TĚSNĚNÍ S VNĚJŠÍM PRSTENCEM[3].....	29
OBR. 3-7 SPIRÁLOVÉ TĚSNĚNÍ S INTEGRÁLNÍM PRSTENCEM[1]	30
OBR. 3-5 DETAIL EXPANDOVANÉHO GRAFITU[10]	32
OBR. 4-1ŘEZ HŘEBENOVÝM TĚSNĚNÍM ZÁKLADNÍHO TYPU[2].....	36
OBR. 4-2 HŘEBENOVÉ TĚSNĚNÍ S VOLNÝM STŘEDÍCÍM KROUŽKEM[6]	36
OBR. 4-3 PROVEDENÍ HŘEBENOVÝCH TĚSNĚNÍ S KONVEXNÍM DRÁŽKOVÁNÍM[6]	37
OBR. 4-4ŘEZ HŘEBENOVÝM TĚSNĚNÍM S GRAFITOVOU VLOŽKOU[15]	37
OBR. 4-5 HŘEBENOVÉ TĚSNĚNÍ SE DVĚMA TĚSNÍČÍMI PRVKY[7]	38
OBR. 5-1PŘÍKLAD ZBORCENÉHO SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ[3].....	41
OBR. 5-2PŘÍKLAD ROZSYPANÉHO SPIRÁLOVÉHO TĚSNĚNÍ[3].....	42
TAB. 4 TABULKA POROVNÁNÍ NÁHRADNÍCH MODULŮ PRUŽNOSTI E_G [19]	44