

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem samonastavitelného výtlačného ventilu pístového kompresoru firmy Emerson. Práce obsahuje rešerši současného stavu poznání, technický rozbor ventilu, výpočty podkladových parametrů. Poté je prezentován konstrukční návrh. Součástí práce je výroba prototypu a jeho provozní otestování, ze kterého jsou vyvozeny závěry pro další vývoj.

KLÍČOVÁ SLOVA

Samonastavitelný výtlačný ventil, Discus, pístový kompresor, voskový aktuátor, slitiny s tvarovou pamětí, bimetal

ANOTATION

This dissertation deals with design of self adjustable discharge valve used in Emerson reciprocating compressors. This work contains research of current state of knowledge, technical analysis of the valve and calculations of basis parameters. Constructional proposal is then presented. Part of the dissertation is manufacturing of prototype and its test. Finally, conclusions for further development are made.

KEYWORDS

Self adjustable discharge valve, Discus, reciprocating compressor, wax actuator, shape memory alloys, bimetal

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KURUC, M. Samonastavitelný výtlačný ventil. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedlička, Emerson Climate Technologies, s.r.o.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Samonastavitelný výtlačný ventil* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Jedličky, a že jsem uvedl v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 15. května 2013

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu, Ing. Janu Jedličkovi za vedení, rady, připomínky a vstřícnost při tvorbě této práce. Dále děkuji své matce za její podporu, bez níž by mé studium nebylo možné.

OBSAH

ÚVOD	9
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
1.1 Kompresory	10
1.2 Veličiny a pojmy	10
1.3 Kompresory Copeland Stream	11
1.4 Bimetal	11
1.4.1 Aplikace	12
1.5 Slitiny s tvarovou pamětí	12
1.5.1 Superelasticita	14
1.5.2 Složení	14
1.5.3 Hystereze	15
1.5.4 Aplikace	15
1.5.5 Přehled trhu	17
1.6 Voskový aktuátor	18
1.6.1 Komerční aplikace	19
1.6.2 Přehled trhu	20
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE	22
2.1 Formulace řešeného problému	22
2.2 Technická a vývojová analýza	23
2.2.1 Výtlačný ventil Discus	23
2.2.2 Určení návrhových parametrů	25
2.2.3 Nároky a požadavky na řešení	29
2.3 Cíle práce	30
3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	31
3.1 Bimetalový pásek	31
3.2 Slitiny s tvarovou pamětí	33
3.3 Voskový aktuátor	34
3.4 Zhodnocení variant a výběr	34
4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	35
4.1 Popis řešení	35
4.1.1 Použitý aktuátor	38
4.1.2 Montáž	38
4.2 Test prototypu	39
4.2.1 Vyhodnocení testu	40
4.3 Návrhy řešení problémů a další úpravy	43
4.3.1 Omezení zdvihu aktuátoru	43
4.3.2 Změna aktuátoru	43
4.3.3 Pákový převod	44
4.4 Ekonomický rozbor	44
5 DISKUZE	45
6 ZÁVĚR	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	52
SEZNAM TABULEK	53
SEZNAM PŘÍLOH	54

ÚVOD

Odhaduje se, že na běh kompresorů je celosvětově spotřebována třetina veškeré vyrobené elektřiny [1]. Z tohoto důvodu je velká snaha o snížení jejich energetických nároků. Po přibližně sto letech vývoje kompresorů jsou možnosti významných zlepšení v konstrukci téměř vyčerpány, proto jsou dnes zkoumány možnosti i malých úspor.

Při velkém podílu kompresorů na spotřebě energie se i malý pokles spotřeby projeví velkými úsporami nejen v globálním měřítku. Pro provozovatele kompresorů představuje jejich spotřeba často významnou složku jejich nákladů, neboť často běží nepřetržitě.

Firma Emerson Climate Technologies ve svých výrobcích používá patentově chráněné řešení výtlačného ventilu, nazývané Discus, které je předmětem této práce. Firma se snaží o další zlepšení účinnosti kompresorů, což má přinést jak úsporu provozních nákladů, tak zvýšení konkurenceschopnosti na trhu.

Součástí práce je rešerše současného stavu poznání, určení návrhových parametrů, dále konstrukční návrh a sestavení prototypu, který byl podroben otestování. Z výsledků zkoušky jsou následně vyvozena doporučení pro další vývoj.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Kompresory

Jako kompresory jsou označována zařízení, která převádějí přivedenou energii na tlak pracovního plynu. Toho je dosaženo zmenšením jeho objemu. Kompresory jsou nejčastěji poháněny elektromotorem, méně často pak spalovacím motorem. Kompresory se dají členit podle způsobu komprese plynu na dva druhy: objemové a rychlostní. Objemové kompresory dosahují stlačení plynu zmenšením pracovního prostoru. Dělí se dále na rotační a pístové. Pístové kompresory používají klikový mechanismus, který uvádí do pohybu píst. Ten stlačuje plyn uzavřený ve válci. Vytlačování zajišťuje buď ventilový rozvod, nebo membrána. Rotační kompresory ke změně objemu využívají geometrii rotoru. Patří mezi ně např. kompresory křídlové, spirálové, zubové, šroubové aj.

Rychlostní kompresory ke zvýšení tlaku používají změnu hybnosti proudů. Plyn je zpomalen a jeho kinetická energie se přeměňuje na tlakovou. Rychlostní kompresory se dělí na lopatkové a proudové. Podle převažujícího směru proudění plynu je lze rozdělit na axiální či radiální.

Hermeticky uzavřené kompresory jsou při výrobě svařeny a nejdou nedestruktivně rozebrat kvůli údržbě nebo opravám. Jejich výhodou je minimální riziko úniku chladiva. Naopak u semihermetických typů jsou k bloku kryty přišroubovány, takže lze zpřístupnit jeho vnitřní komponenty. Motor může být buďto integrován v těle kompresoru, nebo je stroj poháněn externím motorem pomocí vstupního hřídele. Motor může být chlazen vzduchem nebo u integrovaných typů samotným procházejícím chladivem.

1.2 Veličiny a pojmy

Při hodnocení provozu kompresorů se používá několik základních veličin. Ty jsou uvedeny v normě ČSN EN 13771-1 *Kompresory a kondenzační jednotky pro chlazení – Měření výkonnosti a zkušební metody – Část 1: Chladivové kompresory*, která se používá pro zkoušení kompresorů.

Volumetrická účinnost η_V popisuje dokonalost plnění válců kompresoru. Jedná se o porovnávací, bezrozměrnou veličinu. Hodnota 1 značí maximální teoretický objem plynu v pracovním prostoru. Reálný objem nasátého plynu je vždy menší. Volumetrická účinnost je ovlivněna především geometrií sání, dispozicemi sacího ventilu a mění se i s otáčkami stroje a pracovním tlakem.

Isoentropická účinnost η_i je více ovlivněna výtlačným ventilem a motorem kompresoru. Jde o součin hmotnostního toku a rozdílu entalpií na vstupu a výstupu, dělený příkonem kompresoru. Isoentropická účinnost je porovnávací veličina. Nejvyšší účinnosti $\eta_i=1$ dosahuje ideální kompresor bez třecích ztrát, ve kterém probíhá isentropický děj. Isoentropická účinnost je poměr práce, kterou spotřebuje ideální stroj oproti skutečnému pro dosažení stejného termodynamického stavu na výstupu kompresoru.

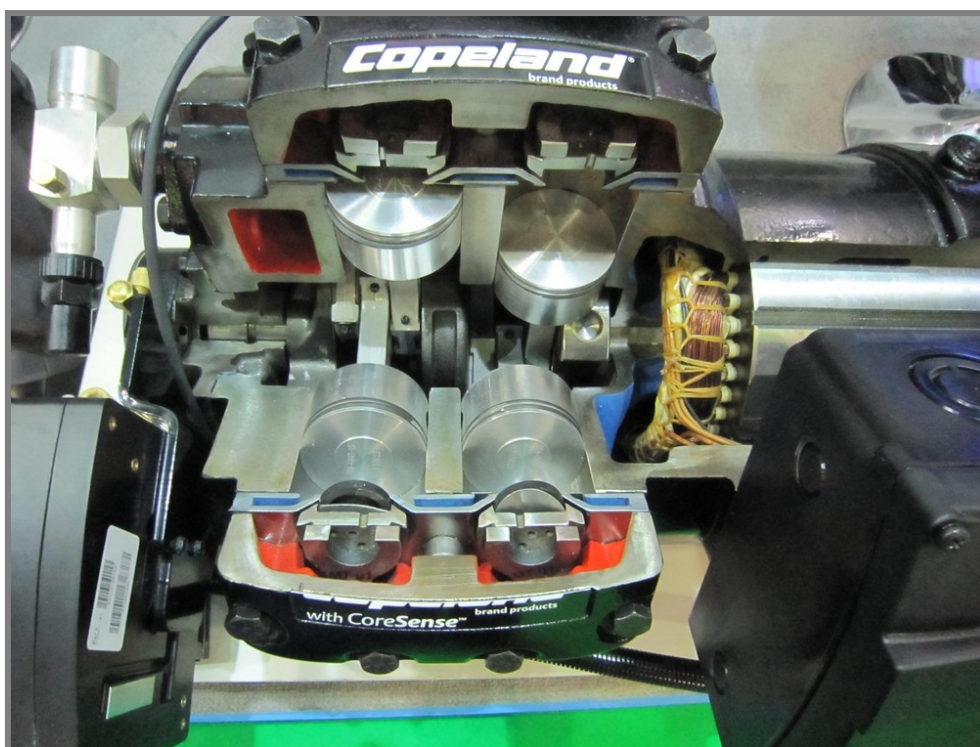
Chladicí kapacita Φ_0 je součin hmotnostního průtoku a rozdílu měrné entalpie na výtlaku a sání kompresoru. Měrnou jednotkou je W.

Chladicí faktor (coefficient of performance, COP) je poměr chladicí kapacity a příkonu kompresoru. Jde o bezrozměrnou veličinu ($W \cdot W^{-1}$).

Tlakový poměr σ_c značí poměr tlaků na výtlaku a sání kompresoru.

1.3 Kompresory Copeland Stream

Předmětem diplomové práce jsou kompresory značky Copeland řady Stream. Jedná se o pístové stacionární kompresory. Tato řada zahrnuje několik typů výrobků, které mají různé výkony, počet válců apod., přitom však sdílejí zásadní konstrukční charakteristiky. Mezi tyto společné prvky patří také hlava válců sací a výtlačné ventily. Tato řada kompresorů je koncipována jako jednostupňová, takže veškerá komprese se odehrává v jednom kroku. Pístové kompresory patří do třídy objemových kompresorů, tzn. komprese média je dosaženo zmenšením pracovního prostoru [1]. Kompresní poměr je proměnný na základě podmínek na sání, nejde tedy o kompresor s tzv. vestavěným tlakovým poměrem. Dosahovaný tlakový poměr je proměnný, dosahuje však maximálně $\sigma_c=22$, což jej řadí od kategorie nízkotlakých strojů. Projektovaný objemový průtok $\dot{V}_d$ se podle typu pohybuje od 61,7 do 153,2 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ při 50 Hz, což je zařazuje do kategorie malých kompresorů [1].



Obr. 1–1 Řez šestiválcovým kompresorem řady Stream [2]

Kompresory řady Stream jsou semihermetické konstrukce, což znamená, že se dají nedestruktivně rozebrat a znovu složit. Pracují v uzavřeném technologickém okruhu, jsou označovány jako oběhové. Jejich pracovním médiem je primárně chladivo R404A (směs tri-, tetra- a pentafluorethanu) [3] s možností nasazení jiných chladiv: R134a, R22, R407A, R407C a R407F.

1.4 Bimetal

Označení bimetal se používá pro pevné spojení dvou kovů. Nejčastější forma tohoto prvku je tenký pásek. Bimetal výhodně využívá rozdílné teplotní roztažnosti různých materiálů. Při změně teploty dochází k objemové expanzi kovů. Při tvaru pásku je dominantní změna jeho délky, přičemž změna ostatních rozměrů je zanedbatelná. I tato dominantní změna je však v běžném rozsahu teplot velmi malá. Spojením dvou kovů však dochází ke značné deformaci ve směru kolmém k ose pásku.

Hodnoty deformací bimetalu jsou ovlivněny několika faktory. Prvním je volba materiálů. Pro co největší deformaci je žádoucí, aby použité materiály měly co nejvíce rozdílný koeficient roztažnosti. Obecně mají největší roztažnost plynné látky, dále kapaliny. Pevné látky mají roztažnost relativně malou. V praxi ve výrobě bimetalů se nejčastěji používá kombinace invar-mosaz. Invar se vyznačuje nejmenší roztažností ze všech kovů a stejně jako mosaz je chemicky stabilní za většiny podmínek. Zároveň je přijatelná jeho cena. V případě nasazení bimetalu za vyšších teplot je mosaz nahrazena nerezovou ocelí.

Druhým významným faktorem, který ovlivňuje chování bimetalu, je jeho konstrukce. Při stejné délce pásku a změně teploty se deformace pásku zmenšuje s jeho rostoucí tloušťkou. Druhým podstatným parametrem bimetalu je síla, kterou dokáže vyvinout, pokud je mu v deformaci zabráněno. Síla bimetalu je naopak přímo úměrná jeho tloušťce. Jelikož tyto dva důležité parametry jsou protichůdné, je při volbě konstruktér nucen správně vyvážit požadované vlastnosti.

Kromě absolutní tloušťky bimetalu jeho deformaci a sílu ovlivňuje i poměr tlouštěk jeho složek. Obě hodnoty jsou největší při shodné tloušťce složek. Proto se v praxi používá téměř výhradně tento poměr.

Deformace pásku je na teplotě lineárně závislá. Z toho plyne, že pokud je třeba skokové přepínání stavu při malé změně teploty, je nutné využít dalších konstrukčních prvků pro dosažení tohoto chování. Těmito prvky jsou například pružiny, které přeskočí při dostatečné síle (tzv. snap action).

1.4.1 Aplikace

Bimetal se ve většině případů používá jako regulační prvky, kde nejsou kladeny velké nároky na jimi vyvinutou sílu. Využívány jsou také jako senzory. Typické použití je v ručičkových teploměrech. Většinu aplikací tvoří termostaty v mnoha oblastech. Bimetal lze nalézt např. v rychlovarných konvicích, boilerech či pokojových termostatech. Slouží také jako bezpečnostní prvky, jedním z příkladů je systém, který uzavírá přívod plynu v průtokovém ohříváči při zhasnutí plamínku. Uplatnění našel také jako elektrický jistič atd. V mnoha uplatněních jej ovšem nahradily elektronické senzory, které umožňují aktivní regulaci systému.

Spojení dvou a více kovů se využívá také z jiných důvodů, než je tepelná roztažnost. Velmi časté je pokovení základního materiálu. V těchto případech se využívají odlišné vlastnosti obou látek. Masově je využíváno zinkování ocelových dílů v automobilovém průmyslu, kde se využívá pevnost a nízká cena oceli jako základního materiálu a korozní odolnosti zinku. Dalším případem je pozlacování či postříbřování vodičů, kde se využívá vysoká vodivost zlata nebo stříbra, které je nevhodné jako konstrukční materiál kvůli nízké pevnosti a vysoké ceně. Samostatnou kapitolou jsou povrchové vrstvy za účelem zvýšení tvrdosti povrchu, snížení jeho opotřebení, tření apod. Tyto aplikace zahrnují např. chromování hlavních střelných zbraní nebo vrstvy TiN na řezných nástrojích. Rozšířené je spojování rychlořezné oceli k základu z běžné oceli při výrobě listů pásových pil. Rychlořezná ocel zajišťuje dlouhou životnost zubů, zatímco podklad poskytuje pružnost a houževnatost.

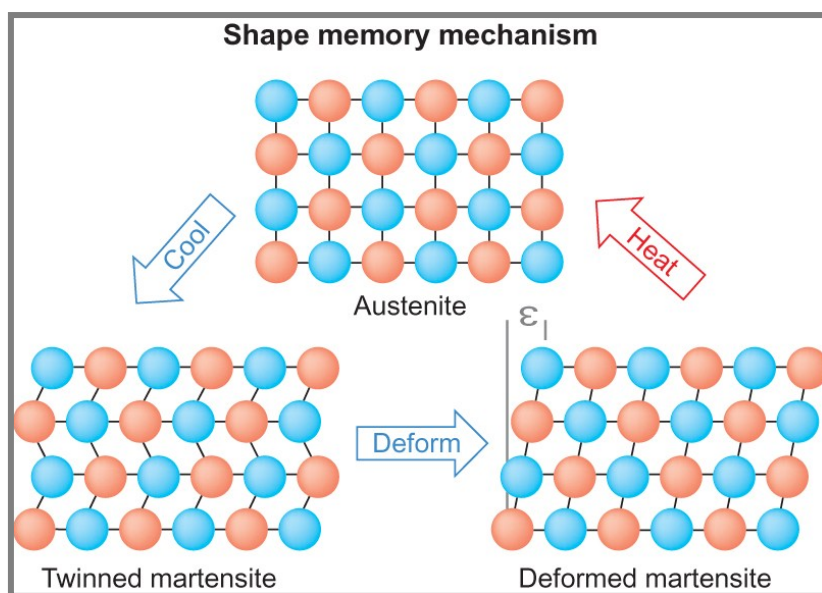
1.5 Slitiny s tvarovou pamětí

Jako slitiny s tvarovou pamětí jsou označovány kovové materiály, které vykazují netypické deformační chování v určitém rozsahu teplot. Tyto materiály jsou i v české literatuře označovány zkratkou SMA, z anglického shape memory alloys.

Nejdůležitější vlastností těchto materiálů je tzv. paměťový efekt (shape memory effect, SME). Jedná se o schopnost tělesa zaujmout původní tvar poté, co byl zdeformován. Na rozdíl od běžné elastické deformace kovů tato deformace po ukončení působení síly neodezní. Nejedná se ovšem ani o deformaci plastickou, protože ve struktuře nedochází pohybu skluzových dislokací. Paměťový efekt nastává při přechodu materiálu přes tranzitní teplotu. Pokud objekt zdeformujeme, ponechá si nový tvar, stejně jako klasický kovový předmět. Když následně objekt zahřejeme nad tranzitní teplotu, objekt se samovolně vrátí do původního tvaru. Po ochlazení se tvar nezmění. Toto chování, kdy ke změně tvaru dojde pouze při zahřátí, je označováno jako jednosměrný paměťový efekt (one-way shape memory effect, OWSME).

Některé materiály vykazují chování známé jako dvousměrný paměťový efekt (two-way shape memory effect, TWSME). Tyto objekty mění svůj stav při zahřátí i ochlazení, tedy při pohybu teplot oběma směry. K dosažení tohoto chování je potřeba provést proces, nazývaný „trénink.“ Tento proces zahrnuje opakovanou deformaci spojenou s tepelným zpracováním materiálu.

Změna makroskopického tvaru tělesa vyrobeného z SMA je způsobena pochody na mikroskopické úrovni materiálu. Slitiny při nižších teplotách mají strukturu martenzitu s několika variantami krystalické mřížky. Při přechodu přes tranzitní teplotu dojde ke změně mřížky a vzniku austenitu, který má mřížku kubickou. U austenitové mřížky je možná pouze jedna konfigurace atomů, proto se deformované těleso po zahřátí vrátí vždy do svého původního tvaru. Naopak u martenzitu je možných více variant, proto se při deformaci přizpůsobí vnějším silám. Pokud na něj žádné síly nepůsobí, zůstane ve tvaru získaném za vyšších teplot, tedy austenitickým.



Obr. 1–2 Krystalické struktury paměťových slitin [4]

Pokud mluvíme o austenitu a martenzitu, nejedná se na rozdíl od podobných fází v ocelích o tuhý roztok uhlíku v železe. V případě SMA jde o roztok dvou či více kovů, např. titanu a niklu, nebo u další velké skupiny mědi se zinkem, hliníkem či titanem. Společné je pouze uspořádání atomů v krystalické mřížce.

1.5.1 Superelastická

Slitiny s tvarovou pamětí mohou vykazovat také superelastické chování. Při deformaci materiálu je vyvoláno napětí, které má za následek fázovou přeměnu. U klasických materiálů jsou elastické deformace umožněny natahováním vazeb mezi atomy. U superelastických slitin je tato deformace doprovázena přeměnou mřížky materiálu a tudíž umožňuje přetvoření mnohem větší než u běžných slitin. Udává se až 10% přetvoření, oproti např. 2 % u oceli [5]. Superelastická se projevuje při teplotách mírně nad A_f (viz níže), kde dochází přeměně z austenitu na martenzit působením napětí. Po odlehčení dojde k návratu k austenitické struktuře, obojí za konstantní teploty. Další neobvyklou vlastností je průběh napětí v závislosti na deformaci. U běžných kovů je lineární, zatímco u nitinolu konstantní. Předmět tedy vyvíjí stále stejnou sílu, ať je zdeformován v téměř jakékoli míře.

1.5.2 Složení

Od objevu paměťového jevu bylo toto chování popsáno u mnoha slitin. Zároveň bylo zjištěno, že pro fungování jevu je potřeba udržovat poměr v zastoupení jednotlivých složek ve velmi úzkém rozmezí. Pokud tento poměr není dodržen, dochází buď ke kontaminaci krystalické mřížky atomy jiných prvků, nebo přebytek jednoho prvku neumožňuje vytvoření mřížky. Vysoká přesnost složení je také příčinou toho, že se aplikace SMA rozšiřují poměrně pomalu, navzdory tomu, že první použití přišlo na trh už v 60. letech. V praxi se uplatňují dvě skupiny SMA, a to slitiny nikl-titan a slitiny na bázi mědi. Ostatní materiály se nevyrábějí ve větším měřítku a prozatím neopustily laboratoře [6].

NiTi slitiny

Nejrozšířenější skupinou SMA jsou slitiny nikl-titan, často označované nitinol. Název pochází ze zkratk obou prvků a názvu laboratoří, ve kterých byl vyvinut; *Naval Ordnance Laboratory*. NiTi slitiny mají v základní podobě poměr atomů 1:1, přičemž pro modifikaci vlastností se používají jednak přísady, a jednak se mění obsah titanu od 49 do 51 %. Pro technické aplikace je tato skupina SMA nejvhodnější z několika hledisek. Vyznačuje se dobrou kujností. Jelikož jde o intermetalickou slitinu, je vysoce chemicky odolná a biokompatibilní [6] [7]. Také její mechanické vlastnosti jsou ze všech typů nejlepší. Míra vratného přetvoření dosahuje až 8 %, při cyklickém zatěžování u dvousměrného efektu je to do 4 %. Mezi používané legury patří přebytek niklu, železa, chromu, mědi. Jejich účelem je zlepšení mechanických vlastností nebo změna transformačních teplot. Naopak běžné příměsi zhoršují jejich vlastnosti, podobně jako u běžných slitin. Vlastnosti NiTi slitin také významně závisí na technologickém postupu. Používá se tažení, žíhání aj. Některé z postupů jsou nezbytné pro dosažení paměťového jevu. Společně s vysokou reaktivností titanu, která vyžaduje další speciální opatření, to má za následek vysokou cenu SMA slitin oproti běžným kovům. Nejrozšířenější polotovary jsou drátky od velmi malých průměrů (0,01 mm). Materiál se dodává buď v tepelně zpracovaném tvaru s paměťovým efektem, nebo bez něj, kdy je potřeba jej zpracovat pro vyvolání paměťového jevu. V konstrukcích se nejčastěji používají tyto polotovary bez dalších úprav, jelikož jejich obrábění a svařování je obtížné. Transformační teploty se podle složení pohybují od -50 do 110°C.

Slitiny na bázi mědi

Druhou v praxi používanou skupinou SMA jsou slitiny mědi. Jedná se o soustavy CuZnAl a CuAlNi s možností různých legur, nejčastěji se jedná o mangan.

CuZnAl obsahuje 60 až 80 atomárních procent mědi, obsah zinku se pohybuje od 15 do 30 %, přičemž zbytek tvoří hliník, případně malé množství dalších přísad. Při tavení slitiny CuZnAl je potřeba ochranná atmosféra inertního plynu, která zabraňuje vypařování zinku a oxidaci hliníku. Slitiny CuAlNi tvoří základ mědi, 11 až 14,5 hm. % hliníku a 3 až 5 % niklu. Zbytek mohou opět tvořit legující prvky.

Přesný technologický postup se liší podle složení konkrétní slitiny. Některé lze válcovat za studena, jiné jsou za nižších teplot křehké. Pro dosažení paměťového efektu je nezbytné provést kalení vodou nebo chlazení na vzduchu, opět podle konkrétní slitiny.

Tepečná stabilita Cu-slitin je obecně horší než u NiTi. Jsou náchylné k tepelné degradaci a stárnutí už za poměrně nízkých teplot. Maximální teploty, kterým mohou být materiály dlouhodobě vystaveny, jsou 150 °C u CuZnAl a 200 °C u CuAlNi [6]. Mezi výhody slitin mědi oproti NiTi systémům patří lepší obrobiteľnosť a nižší cena. Obecně jsou také schopny dosáhnout vyšších transformačních teplot. Naopak oproti NiTi slitinám mají horší mechanické vlastnosti, např. maximální vratné přetvoření kolem 4 %, při cyklickém zatěžování přibližně 1,5 % [7].

1.5.3 Hystereze

Fázová transformace nenastává v jednom bodě, ale v určitém teplotním rozmezí. Při popisu transformačních procesů jsou podstatné čtyři teploty. Při ohřívání slitina dosáhne nejprve teploty A_s (austenite start), která označuje začátek tvorby austenitu. Tato fáze je ukončena při teplotě A_f (austenite finish), kdy 100% materiálu tvoří austenitická fáze. Při ochlazování se začnou tvořit první zárodky martenzitu při teplotě M_s (martensite start), a s klesající teplotou jeho podíl stoupá. Po dosažení teploty M_f (martensite finish) je všechna hmota plně martenzitická. Teplota začátku a konce fázové přeměny je rozdílná při ochlazování a ohřívání, SMA tedy vykazují hysterezní chování. Při návrhu konstrukcí je tedy třeba počítat s tím, že např. aktuátor sepne při určité teplotě, ale do původní polohy se navrátí až při teplotě o něco nižší. Typický rozsah hystereze různých slitin je uveden v tab. 1–1.

Tab. 1–1 Mechanické vlastnosti komerčně dostupných slitin [6]

Veličina	Jednotka	Složení					
		NiTi		CuZnAl		CuAlNi	
		austenit	martenzit	austenit	martenzit	austenit	martenzit
modul pružnosti v tahu	GPa	83	28-41	72	70	85	80
mez kluzu	MPa	195-690	70-140	350	80	400	130
mez pevnosti	MPa	895		600		500-800	
transformační teplota	°C	-200 ÷ 110		max. 120		max. 200	
vratné přetvoření	%	max. 8,5		4		4	
hystereze	Δ °C	30		15-25		15-20	

1.5.4 Aplikace

Velmi významné aplikace SMA se nacházejí v lékařství. Běžně se provádí implantace cévního stentu, jehož úkolem je roztáhnutí ucpané cévy. Stent má formu sítky ve tvaru válce a je vyroben z materiálu, jehož transformační teplota je nižší než teplota těla. Při zavádění na místo určení je zdeformován na menší průměr. Stent je

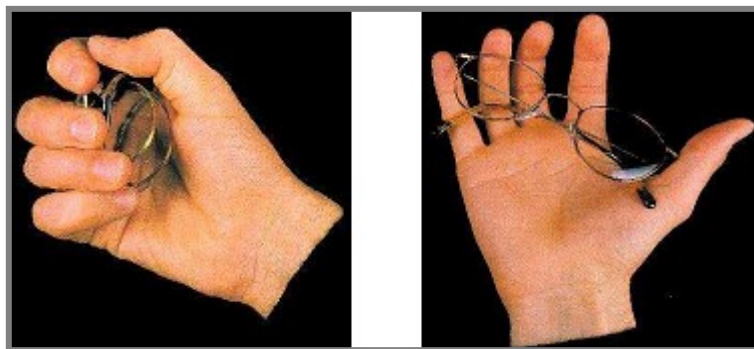
1.5.3

1.5.4

na místo určení zaváděn v úzkém katetru, který zabraňuje tomu, aby stent předčasně expandoval na svůj konečný tvar. Po zavedení do těla pacienta je katetr vyjmut, stent se vlivem teploty těla roztáhne a začne plnit svoji funkci [4].

Další medicínskou aplikací jsou dentální rovnátka. Byly vyvinuty a patentovány G. F. Andreasenem roku 1977 [8]. Využívají konstantního průběhu napětí bez ohledu na míru deformace. Díky této vlastnosti působí na pacientův chrup stále stejnou silou a jejich efekt je mnohem větší než u klasických postupů.

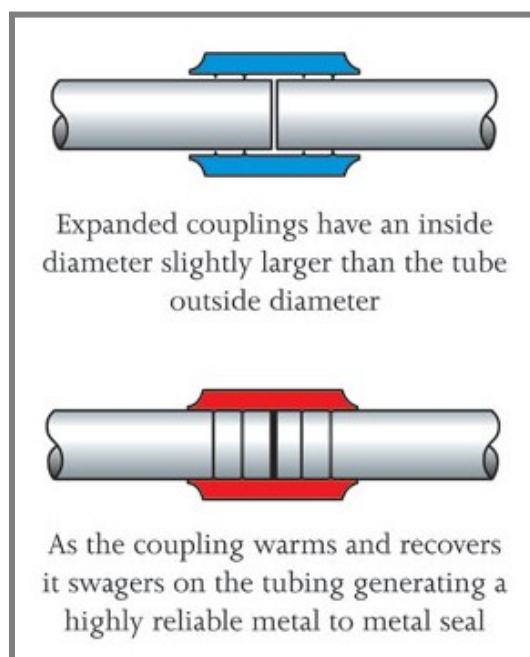
V praxi našla superelastická uplatnění u obrouček brýlí, které lze zdeformovat k nepoznání a po odeznění sil se navrátí do původního tvaru.



Obr. 1–3 Deformace obrouček brýlí a jejich návrat do původního tvaru [9]

Pravděpodobně nejmasovější použití našel nitinol u produktu Cryofit firmy Raychem v 70. letech, dnes je vyráběn firmou AeroFit. Jedná se o spojku trubek ve tvaru válce. Spojka je vyrobena s vnitřním průměrem menším než vnější průměr spojovaných trubek. Za studena je pak roztahována tak, aby se dala navléct na trubky. Po ohřátí se snaží opět stáhnout na původní rozměr. Díky tomu velmi pevně spojí konce trubek [6][10]. Při této aplikaci je požadována síla, ale žádný pohyb, a není tedy produkována práce.

Slitiny s tvarovou pamětí jsou využívány také jako spínače nebo relé. V těchto funkcích se požaduje zdvih, ale téměř žádná síla, objekt tedy opět nevykonává žádnou práci. Prvky mohou např. spínat obvod na základě okolní teploty nebo sloužit jako pojistné ventily pro případ požáru. Další možností je spínač zapojit do elektrického obvodu. Při průchodu elektrického proudu se prvek zahřívá. Pokud dosáhne určené teploty, uzavře či otevře například ventil. SMA prvky našly využití také jako termostaty v rychlovarných konvicích nebo směšovače ve vodovodních bateriích.



Obr. 1–4 CryoFit [11]

Významné využití a klíčové pro potřeby problému v řešeného v této diplomové práci představuje využití SMA jako aktuátoru. V této aplikaci se požaduje, aby prvek vykonával práci, tzn. vykonával pohyb proti působící síle. Velké využití nachází aktuátory z NiTi ve vesmírných aplikacích, kde se naplno projeví jejich přednosti: mechanická odolnost, konstrukční jednoduchost, nízká hmotnost a vysoká spolehlivost. Za tyto vlastnosti vděčí faktu, že k vyvození pohybu nepotřebují složité mechanismy, ale využívají vlastnosti samotného materiálu. Příkladem může být technologie Frangibolt od firmy TiNi Aerospace [12]. V tomto případě je aktuátor použit jako speciální podložka pod šroub, který je opatřen vrubem. Po skončení funkce šroubového spoje je do aktuátoru přiveden proud, což vede k jeho zahřátí. Důsledkem následné fázové přeměny je prodloužení aktuátoru a přetržení šroubu v místě vrubu. V praxi tedy vykonává podobnou činnost jako pyrotechnické šrouby.

1.5.5 Přehled trhu

1.5.5

Na trhu je poměrně mnoho výrobců, kteří nabízejí zboží vyrobené z SMA. V převážné většině případů se jedná o polotovary. Nejčastěji jsou to dráty o průměrech od 0,025 mm až do několika mm, dále tyče, pásy nebo trubičky. Přitom nejvíce je zastoupena NiTi slitina, která má nejlepší termomechanické vlastnosti.

Firma **NDC** nabízí širokou řadu produktů. Jde o dráty průměrů 0,1 až 6,35 mm, trubičky v rozmezí 0,15 až 14 mm, tyče do průměru 89 mm, pásy, čtyřhranné tyče nebo plechy.

Dalším výrobcem je firma **Dynalloy**, jejíž výrobky nesou obchodní označení Flexinol. Její nabídka obsahuje drátky o průměrech 0,025 až 0,5 mm nebo pásy o tloušťkách 0,015 až 0,04 mm.

Francouzská společnost **Nimesis** nabízí kromě NiTi výrobků také Cu-slitiny, obojí také v různých složeních. Prodává drátky od 0,01 mm až po tyče průměru 35 mm. Do jejího sortimentu patří mimo jiné ingoty o rozměrech až 370x85 mm.

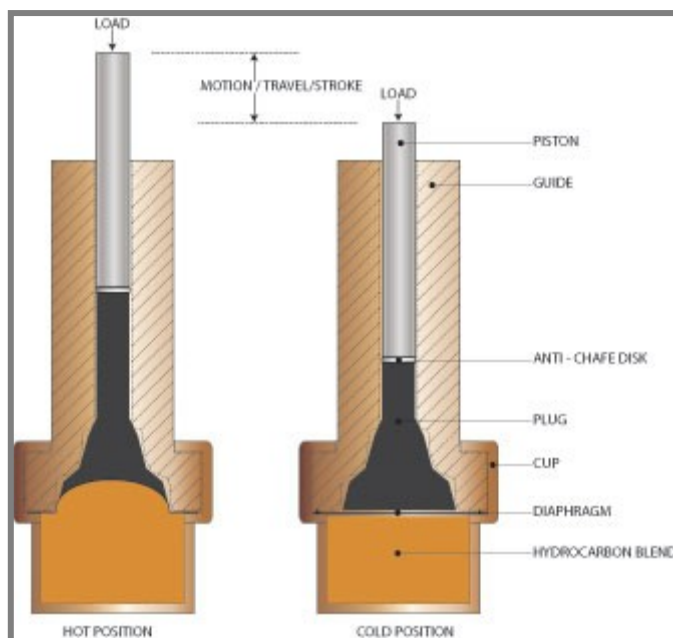
Podobnou nabídkou NiTi výrobků disponuje také firma Memry. Firma ElastaMet se specializuje na monokrystalické výrobky z NiTi slitiny.

Zástupcem firem, které kromě polotovarů nabízí i jednoduché komponenty z SMA, je SAES Getters. Nabízí pružiny z nitinolu pro aktuátory pod obchodním jménem SmartFlex.

1.6 Voskový aktuátor

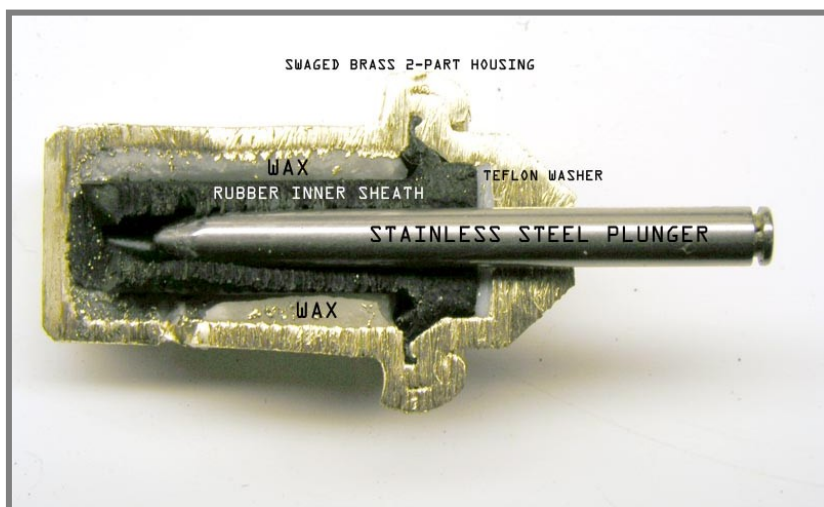
Voskový aktuátor, nebo též voskový element či termoelement, je jednoduché zařízení, které přeměňuje tepelnou energii na mechanickou práci. Tělo aktuátoru obsahuje voskovou náplň, do které je umístěn výsuvný trn. Od voskové náplně je oddělen gumovým pouzdrem, které zabráňuje vytečení vosku v roztaveném stavu. Zároveň plní funkci přenašeče tlaku na trn.

Konstrukce aktuátorů je možné rozdělit na dva typy. První typ je aktuátor s plochou membránou (flat diaphragm element) [13]. Vosková náplň je uzavřena ve válcovitém tvaru, přičemž jeho jedno čelo je tvořeno gumovou přepážkou. Za tou se nachází výsuvný trn, uložený v kovovém vedení. Při roztavení a expanzi vosku se membrána vyduje. Tento pohyb způsobí vysunutí trnu z těla.



Obr. 1–5 Voskový aktuátor typu flat diaphragm [14]

Druhým typem je aktuátor se zanořeným trnem (squeeze-push element). V této konstrukci je trn opatřen gumovým pláštěm a zasunut do voskové náplně. Při expanzi vosku je gumové pouzdro stlačováno. Pouzdro tuto sílu předává čepu, který je tím nucen k vysouvání. Trn je mírně kuželového tvaru, který má za následek, že výslednice sil působí žadaným směrem. Mezi tělem aktuátoru a trnem je navíc ještě teflonové těsnění, které zabráňuje průniku nečistot nebo vody. Těsnění se deformuje podle aktuálního průměru trnu, který se díky jeho tvaru při pohybu mění.



Obr. 1–6 Voskový aktuátor typu squeeze-push, používaný v termostatech spalovacích motorů [15]

Výhodou typu s pevnou membránou je jeho větší odolnost a vyšší přesnost kontroly zdvihu. Druhý typ je o něco méně přesný, ale umožňuje při stejných rozměrech větší zdvih trnu.

Důležitý aspekt termoelementů je stejně jako u SMA hystereze. Při zvyšování teploty dojde k plnému vysunutí trnu při poněkud vyšší teplotě, než při jaké začne jeho zpětné zasouvání. To je způsobeno jednak tepelnou setrvačností a jednak třením mezi jednotlivými komponenty.

1.6.1 Komerční aplikace

Voskové elementy jsou v průmyslové praxi široce rozšířené. Nenahraditelnou funkci plní jako termostaty při tepelné regulaci ve spalovacích motorech automobilů. Zde reagují na teplotu chladicí kapaliny. K aktuátoru jsou připevněny kovové disky, které fungují jako ventily. Při studeném motoru je termostat zasunut, a uzavírá chladicí okruh k chladiči. Po zvýšení teploty se aktuátor vysune a umožní proudění chladicí kapaliny k chladiči.

Voskové aktuátory jsou masově rozšířené ve vytápění budov, kde jsou využívány jako činný prvek v termostatických ventilech [16]. Na rozdíl od předchozího příkladu je zde žádoucí plynulá regulace průtoku vody. Tomu je přizpůsobeno složení vosku, takže je dosaženo postupného tání v širokém rozsahu teplot. Expanze vosku zavírá průtočný ventil v topení podle teploty okolí. Činný prvek je umístěn na závitu, aby se otáčením ventilu dala nastavit požadovaná teplota.

Velké uplatnění aktuátorů je v regulaci teploty vody ve směšovačích. Zde slouží jako regulační či pojistný prvek. V prvním případě udržují teplotu např. ve sprchách na zvolené hodnotě. Ve druhém případě zabraňují náhlým výkyvům teploty a tak zabraňují např. opaření. Často kombinují obě funkce [17].

Ve výše popsaných případech je voskový element nasazen jako čidlo i aktuátor v jednom. To znamená, že reaguje na okolní teplotu bez jakéhokoliv jiného řídicího prvku. V dokonaleji řízených soustavách ovšem aktuátory může doplňovat aktivní kontrolní prvek. Nejčastěji jde o elektricky vyhřívané těleso, např. termistor či odporový drát. Jeho zahřátí způsobuje zahřátí voskového elementu. Tento princip se uplatňuje také v obou popsaných případech. U automobilů umožňuje přesné řízení teploty motoru řídicí jednotkou, které snižuje emise a spotřebu [18]. U

termostatických hlavice pak umožňuje optimální vytápění daných místností v danou dobu [16].

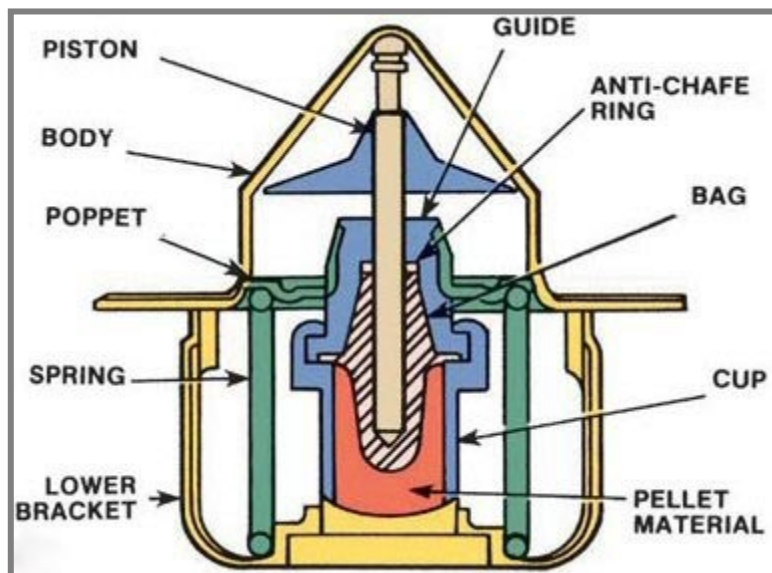
Konkrétnímu použití je přizpůsobena jak konstrukce elementu, tak složení vosku. Chování vosku je určeno jeho složením. Ve většině případů se používá parafínový vosk, což je směs organických uhlovodíků. Čím delší řetězce uhlovodíků jsou použity, tím vyšší je jejich teplota tání. Pro plynulou regulaci se používá směs s velkým rozsahem délky řetězců. Pro použití v termostatech, kde je zapotřebí reakce na překročení určité meze, se používají směsi s homogenním složením, tzn. že jednotlivé složky vosku mají podobnou délku řetězce. Běžný rozsah tání těchto tzv. termostatických směsí je 15 °C. Obvyklá změna objemu dosahuje 10 až 16 % [19] [20].

1.6.2 Přehled trhu

Největším odběratelem voskových elementů je automobilový průmysl. Z toho vyplývá, že nejvíce výrobců buď přímo vyrábí termostaty, nebo termoelementy dodává jiným producentům. Rešerše možných dodavatelů byla zaměřena na renomované výrobce, jednak aby se vyloučila možnost selhání prototypu z důvodu nízké kvality aktuátoru, a jednak proto, že zaslání vzorků je rychlejší a flexibilnější od evropských výrobců.

Velké výrobní kapacity voskových termostátů se nacházejí v Německu. Mezi významné výrobce patří firmy **Wahler** a **Behr**. Dalším velkým producentem je **Vernet** z Francie, který používá pro své produkty název Calorstat. Výrobky této trojice lze nalézt ve většině automobilů vyrobených v Evropě. Producenti nabízejí širokou škálu produktů, v důsledku čehož lze často vybírat konkrétní náhradní díly od všech těchto výrobců. V termostatech se uplatňuje typ aktuátoru squeeze-push.

Firma Vernet se kromě toho zabývá výrobou průmyslových aktuátorů. Dalším výrobcem, který vyrábí automobilové i průmyslové aktuátory, je turecká společnost Kirpart.



Obr. 1–7 Automobilový termostát [21]

Jiní výrobci se specializují na průmyslové aplikace. Často nabízejí zakázkový vývoj podle konkrétních požadavků odběratele, stejně jako standardní produkty. V průmyslu se častěji objevuje membránová varianta elementu.

Mezi tyto výrobce patří **Rostra Vernatherm**. Nabízí několik řad výrobků. Jsou určeny pro provoz v teplotách od 0 do 150 °C. Různé modely nabízejí zdvih v rozsahu 0,25 až 11,4 mm s maximální silou 310 N. Kromě toho nabízí také řadu mikroaktuátorů o zdvihu 0,6 mm při celkové délce do 9 mm.

Také firma Vernet nabízí aktuátory pro průmyslové a sanitární využití. Rozsah zdvihů se pohybuje od 1,5 do 16 mm a provozní teplota od -20 do 130 °C.

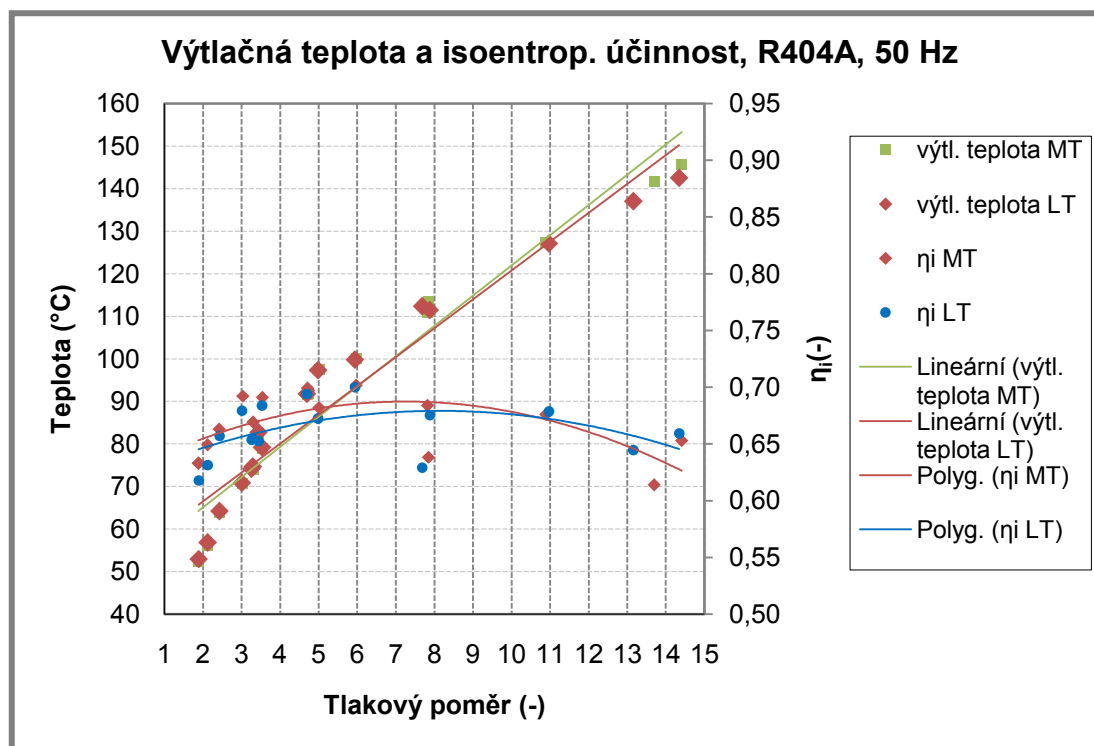
Nabídka firmy **Caltherm** zahrnuje šest řad aktuátorů se zdvihem v rozsahu 0,6 až 10,4 mm. Maximální síla trnu může být 310 N a otevírání při teplotě od 18 do 99 °C. Dalším výrobcem je **Therm-Omega-Tech**, jehož aktuátory umožňují otevírání od -9 do 150 °C. Stejně jako výše zmínění výrobci, nabízí vývoj aktuátoru na zakázku.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

2.1 Formulace řešeného problému

Každý kompresor je během provozu nasazen za rozdílných podmínek. Zásadní provozní parametr je stav chladiva na sání kompresoru. Rozsah stavů chladiva v chladicím okruhu, ve kterých je kompresor schopen běžet, se nazývá provozní obálka. Provozní stav je charakterizován především vypařovací teplotou a kondenzační teplotou chladiva. Chování ventilu je konstrukčně optimalizováno pro jistou oblast provozní obálky. V této oblasti je jeho účinnost nejvyšší, zatímco na opačném okraji obálky je nižší.

V průmyslové praxi se pro hodnocení výkonů kompresorů používají standardizované provozní stavy (rating points), dané normou EN 12 900. Nejčastěji je uvažována teplota chladiva v sání (suction gas return temperature, SGRT) 20 °C a udávají se parametry stroje pro různé vypařovací teploty média. V praxi to znamená různý tlak plynu na sání kompresoru.



Obr. 2-1 Průběh isentropické účinnosti a výtlačné teploty v závislosti na tlakovém poměru (zdroj: ECT)

V současné době jsou vyráběny vždy dvě varianty každého kompresoru. Bylo zjištěno, že pro vyšší tlakové poměry, které znamenají vyšší výtlačné teploty, je žádoucí pozdější otevírání ventilu, než pro nižší teploty. Varianty určené pro vyšší tlakové poměry jsou opatřeny čtyřmi pružinami, varianty pro nižší poměry dvěma kusy (viz obr. 2–3). Tyto varianty jsou označovány jako MT (medium temperature) a LT (low temperature) podle stejnojmenných provozních stavů. Podle konkrétního nasazení kompresoru je v současné době instalována vhodná varianta. Veličinou, která vypovídá o funkci výtlačného ventilu, je isentropická účinnost η_i . Jak je vidět na obr. 2-1, bod, ve kterém se protínají křivky účinnosti obou variant, nastává při teplotě na výtlaku přibližně 125 °C.

Cílem zadání je navrhnout takový systém ovládání ventilu, který by přizpůsoboval chování výtláčného ventilu aktuálnímu provoznímu režimu. Jelikož tento systém musí být umístěn na ventilové desce, musí reagovat na změnu výtláčné teploty.

Upravený ventil tedy má simulovat MT konfiguraci ventilu při nižších teplotách na výtlaku a LT konfiguraci za vyšších teplot. Optimální dělicí bod je teplota 125 °C.

2.2 Technická a vývojová analýza

2.2

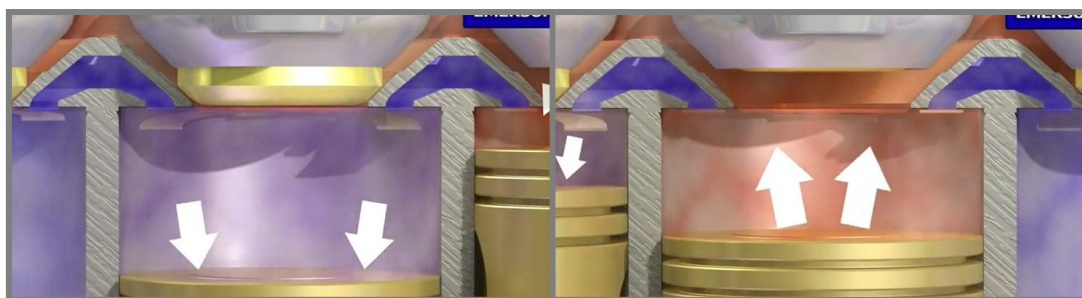
Základním konstrukčním celkem je skříň kompresoru, která slouží k uložení klikového mechanismu. Skříň dále obsahuje hnací elektromotor. Pracovní část stroje se dělí na vysokotlakou a nízkotlakou. Tyto části od sebe odděluje ventilová deska. V nízkotlaké části se nachází válce, kde pracují písty vykonávající vratný pohyb. Tento pohyb je umožněn klikovou hřídelí, která převádí otáčky elektromotoru na reciproký pohyb.

Nad ventilovou deskou se nachází hlava kompresoru. Jde o masivní odlitek, který musí odolat vysokým tlakům. Ventilová deska je složena z tvarovaných plechů, které obsahují různé otvory. Každý plech má jiný tvar a po jejich naskládání na sebe vznikne soustava kanálů, ve kterých proudí médium potřebným způsobem. Tyto kanály slouží k rozvádění plynu. Vstupní otvory přivádějí médium ze sání. Tento proud směřuje sacím ventilem do válců. Sací ventil je vyroben z plechu, má tvar jazýčku a je ovládán rozdílem tlaků. Při pohybu pístu dolů se vytváří podtlak a jazýček se vyhne, čímž umožní vtok média. Po dosažení dolní úvratě se tlaky v sání a ve válci vyrovnají a jazýček přívod plynu uzavře. Následuje fáze komprese při pohybu pístu nahoru.

2.2.1 Výtláčný ventil Discus

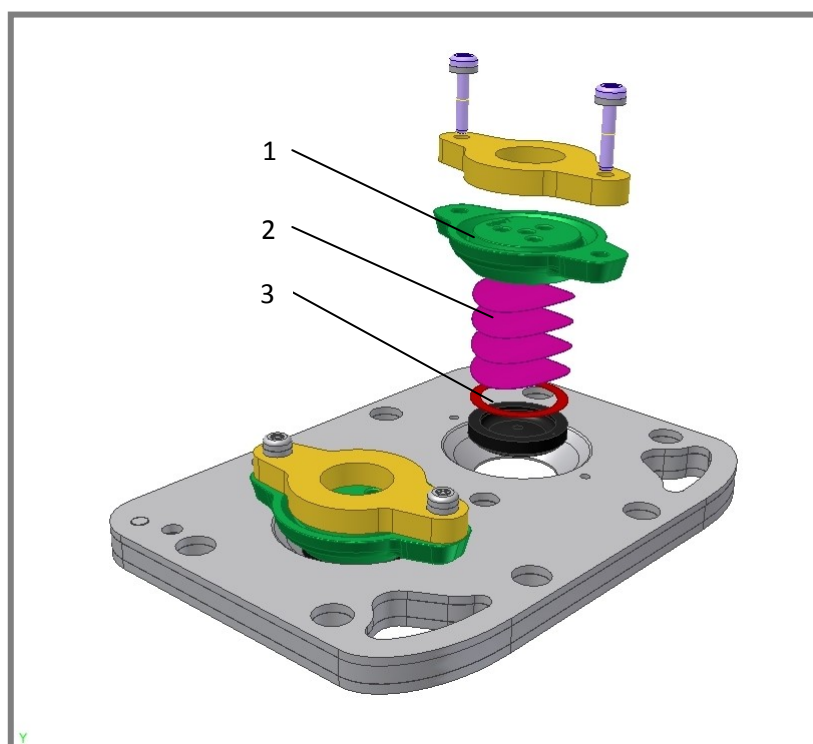
2.2.1

U většiny kompresorů tohoto typu se jako výtláčný ventil používá jazýček stejně jako u sacího ventilu. V případě řady Stream se využívá jiná konstrukce. Jde o řešení nazývané Discus, které je společností Emerson patentované [22]. Stlačené médium putuje do hlavy kompresoru přes výtláčný ventil ve ventilové desce, který je ovládán tzv. pukem. Puk je diskovitá součást, která dosedá na sedlo ventilu (poz. 3 na obr. 2–3). Oba prvky mají tvar kuželu, proto po dosednutí puk otvor dokonale utěsňuje. Toho je dosaženo při montáži pomocí přesného vystředění puku nad sedlo.



Obr. 2–2 Systém Discus při sání (vlevo) a výtlaku [23]

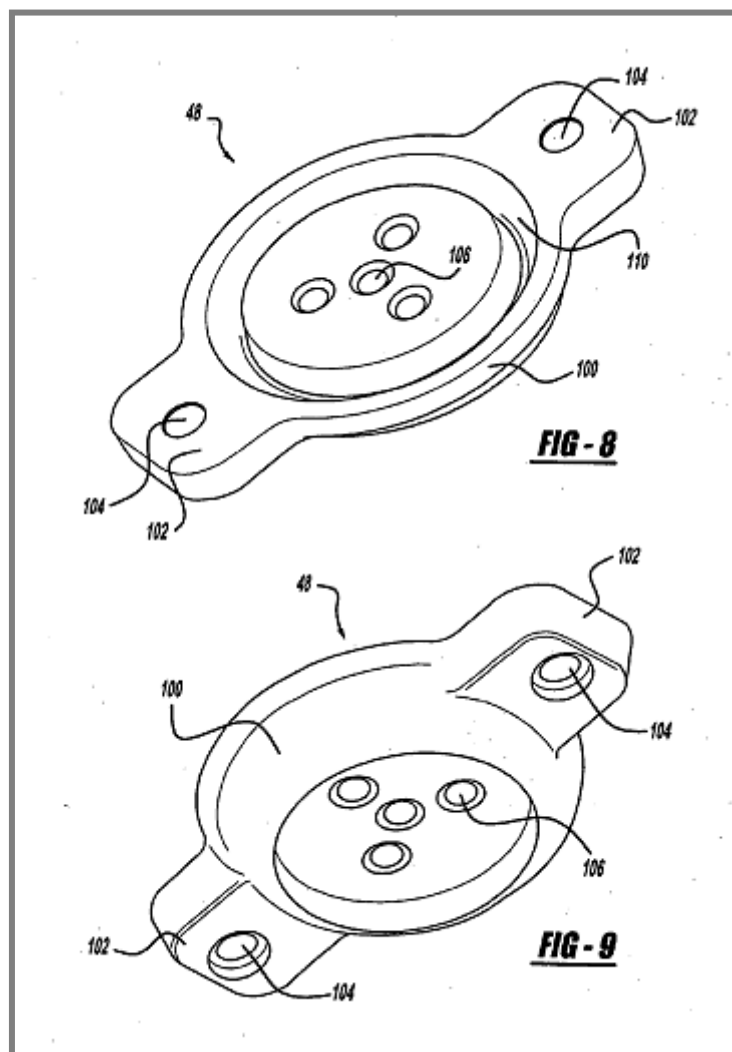
Výhodou konstrukce Discus oproti klasickým jazýčkovým typům je menší škodlivý prostor. Jde o objem plynu, který z geometrických důvodů zůstane ve válci po dosažení horní úvratě. Na stlačení tohoto plynu byla vynaložena energie, nicméně nebyl dopraven do chladicího okruhu. Proto dochází k jeho opětovné expanzi, což snižuje účinnost stroje. Škodlivý prostor nelze úplně odstranit, nicméně u systému Discus je menší než u klasické konstrukce. Zasluhou toho dosahují kompresory Stream vyšší účinnosti oproti obdobným strojům s jazýčkovým ventilem.



Obr. 2–3 Původní ventilová deska, konfigurace LT

Na ventilové desce v ose ventilu je připevněn držák, běžně nazývaný retainer (poz. 1). Tento díl má v sobě zahĺoubení, ve kterém je umístěn puk. Retainer má složitý tvar (obr. 2–4). Příčinou je jednak optimalizace proudění plynu bez turbulencí, jednak efektivní výroba práškovou metalurgií. Je vyroben práškovou technologií z nízkouhlíkové molybdenové oceli. Retainer je podroben tepelnému zpracování pro dosažení vysoké tvrdosti povrchu. Od zahĺoubení k horní ploše jím prochází tři díry, které slouží jako nouzové kanály pro kapalinu, která by se dostala do kompresoru v případě havárie. Dále obsahuje centrální díru, která slouží pro vystředění při montáži. K ventilové desce je připevněn pomocí dvou šroubů palcové normy se závitem #10-32 UNF o délce 0,5 palce. Provoz kompresoru je doprovázen silnými vibracemi, proto jsou šrouby zajištěny proti uvolnění podložkou typu Nord-Lock NL5spss. Šrouby i podložky jsou z nerezavějící oceli.

Zavírání ventilu zajišťují pružiny (poz. 2), jejichž tvar se dá popsat jako kruhový segment listové pružiny. Z toho vyplývá, že časování otevření ventilu není pevně dáno, ale je určeno tuhostí pružin. Výrobce tuto možnost uplatňuje tak, že do ventilu instaluje buďto dvě nebo čtyři pružiny. Pozdější otevření pružin je žádoucí pro vyšší teploty média na výtlaku, dřívější otevření pro teploty nižší. Jako materiál pro tyto pružiny je použit plech o tloušťce 0,2 mm z leštěné nerezové pružinové oceli Sandvik 7C27Mo2. Mezi pružinami a pukem je umístěna ještě tenká kovová podložka. Celkový možný zdvih puku je 3,863 mm. Jako doraz jeho pohybu slouží dno zahĺoubení retaineru. Puk je vyroben z kompozitu polyetherketonu a uhlíkových vláken.



Obr. 2–4 Retainer [22]

2.2.2 Určení návrhových parametrů

2.2.2

Při řešení zadaného problému nebylo známo několik základních parametrů. Mezi tyto neznámé patřila charakteristika pružin ventilu a dynamické chování ventilového puku. Oba tyto údaje jsou potřebné pro návrh nové konstrukce.

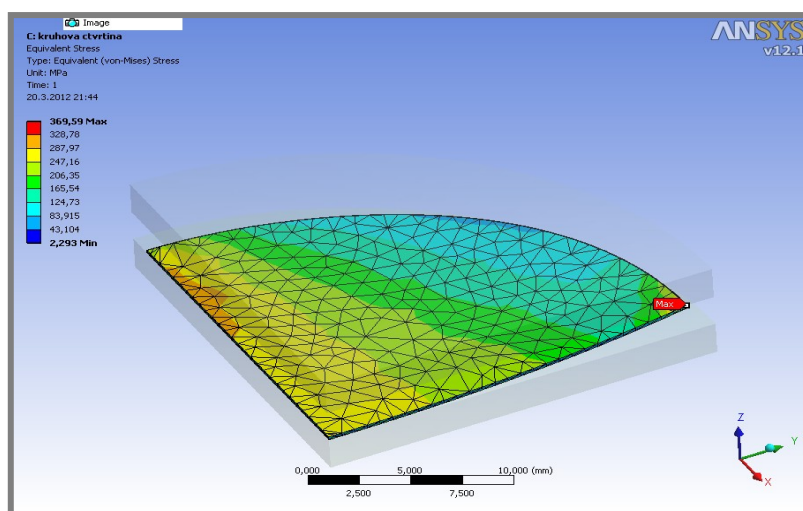
Znalost tuhosti pružiny je nezbytná jednak pro zjištění předpětí, které vyvolává, a jednak slouží jako podklad pro určení zdvihu aktuátoru při změnách charakteristik. Tento zdvih má pak sloužit pro simulaci předpětí čtyř pružin.

Analýza pružin pomocí MKP

Pro zjištění vlastností pružin byly zvoleny dva přístupy; výpočetní a experimentální. Pro výpočetní metodu byla využita metoda konečných prvků prostřednictvím software Ansys verze 12.1. Pro výpočet byla úloha maximálně zjednodušena, aby byl zkrácen výpočetní čas potřebný pro řešení.

Byl vytvořen model ventilové pružiny, který využíval její dvojité symetrie. Do simulace vstupovala čtvrtina pružiny, kdy zbytek tělesa simulovaly okrajové podmínky, konkrétně vazba frictionless support (obr. 2–5). Jako nejvhodnější způsob zatěžování se ukázalo použití dvou nedeformovatelných desek, které pružinu stlačují. Mezi deskami a pružinou byl aplikován kontakt pomocí prvků target-contact.

Úloha se ukázala jako velice náročná. Jedná se o kombinovanou úlohu kontaktní a elasticko-deformační. Obě tyto složky znamenaly nelineární řešení a značně zvyšovaly výpočetní náročnost, a zároveň zhoršovaly konvergenci. Mnoho pokusů při ladění podmínek a řešičů sice přineslo pokroky, výsledky však nebyly průkazné. Tyto problémy pak ještě vzrostly při pokusu o řešení úlohy pro více pružin na sobě. Pružiny k sobě přiléhají celou plochou, zároveň však krajní pružiny mají bodový a lineární kontakt s deskami, to vše při jejich velké deformaci. Už při simulaci dvou pružin se nepodařilo dosáhnout konvergence řešení.



Obr. 2–5 Model pružiny pro simulaci v MKP

Experimentální měření

Za účelem experimentálního zjištění tuhosti byl vytvořen jednoduchý měřicí přípravek. K jeho konstrukci byla použita stavebnice Merkur. V dílnách Ústavu konstruování pak bylo provedeno měření. Měřicí soustava je vidět na obr. 2–6. Měřicí přípravek má povahu dlouhého ramena, na jehož konci je plošina, na kterou je umisťována zátěž. Na druhém konci ramena se nachází základna, která je zajištěna do dílenského svěráku pro zajištění stability. Měření byl podroben kompletní ventil, od retaineru po ventilový puk, ale obrácený dnem vzhůru. Tím bylo dosaženo stabilní základny, kterou tvořila horní plocha retaineru, a zároveň zajištěn pohyb puku v axiálním směru. Výška puku při různém zatížení byla odečítána pomocí vertikálního posuvného měřidla (tzv. nádrh). Jako zátěž byla použita kalibrovaná závaží.

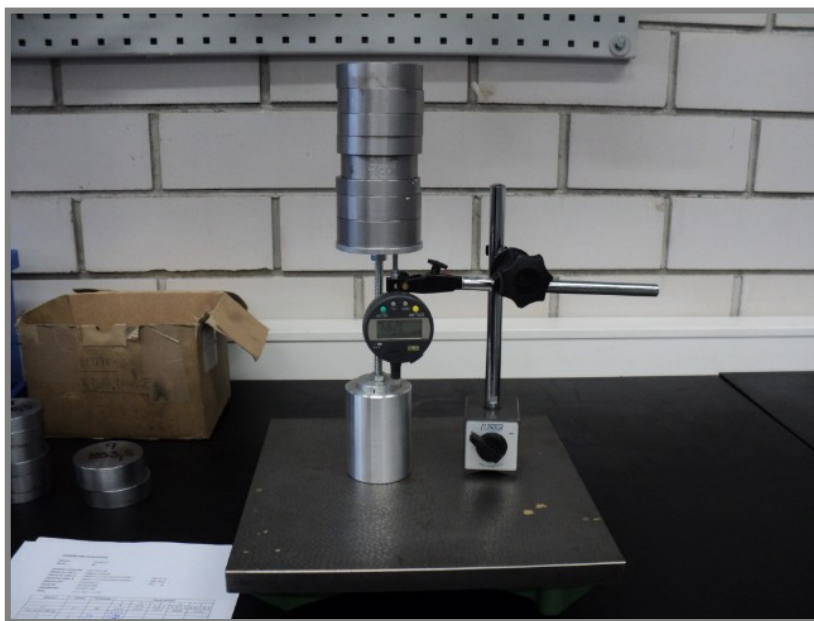


Obr. 2–6 Měřicí soustava

Postupně byla měřena sestava s jednou až třemi ventilovými pružinami. Každé měření bylo provedeno na několika kusech, případně kombinacích pružin pro zvýšení spolehlivosti měření. Změření čtyř pružin se ukázalo jako nemožné. Síly potřebné pro deformaci pružin přesahovaly možnosti závaží, které byly k dispozici. Měřicí konstrukce také vykazovala příliš velké elastické deformace.

Při měření vyšlo dále najevo, že měřením na této sestavě není možné dosáhnout potřebné přesnosti. Přesnost byla ovlivňována malou tuhostí konstrukce. Dalším faktorem je odezírání naměřené hodnoty posuvu pouhým okem, což nezajišťuje potřebnou přesnost. Velkou chybu do měření vnášelo to, že poloha puku byla určena kontaktně. V každém konkrétním případě tedy záleželo na tom, jak přesně byl určen okamžik dotyku jazýčku nádrhu a puku.

Přesnější změření pružin obstarala firma ECT. Pro měření byl použit speciální přípravek (obr. 2–7). Ten má tvar dutého válce, do kterého jsou vloženy pružiny. Na pružiny je položen držák, který je díky svému tvaru přesně veden dutinou přípravku. Disponuje plošinou, na kterou jsou přikládána závaží z ocelových disků. Do vhodné polohy je pomocí stojánku umístěn úchylkoměr, který měří změnu polohy při jednotlivých zatíženích.



Obr. 2–7 Měřicí aparatura (zdroj: ECT)

Byly změřeny průhyby dvou a čtyř kusů pružin. Z těchto měření byl vyvozen vztah mezi zatížením a deformací pružin. Pro dvě, resp. čtyři pružiny byly získány tyto závislosti:

$$y_2 = 0,087F - 0,05$$

$$y_4 = 0,045F + 0,027$$

kde:

y_2	mm	je deformace dvou pružin
y_4	mm	deformace čtyř pružin
F	N	zátěžná síla

Díky tomu mohlo být určeno předpětí pružin v obou variantách současné konstrukce ventilu.

$$F_{2,0} = \frac{y_{2,0} + 0,05}{0,087} = \frac{0,293 \text{ mm} + 0,05}{0,087} = 3,94 \text{ N}$$

$$F_{4,0} = \frac{y_{4,0} + 0,027}{0,045} = \frac{0,735 \text{ mm} + 0,027}{0,045} = 15,73 \text{ N}$$

kde:

$F_{2,0}$	N	je předpětí dvou pružin při uzavřeném ventilu
$F_{4,0}$	N	předpětí čtyř pružin při uzavřeném ventilu
$y_{2,0}$	mm	deformace dvou pružin v uzavřeném stavu
$y_{4,0}$	mm	deformace čtyř pružin v uzavřeném stavu

Dosažením předpětí čtyř pružin byla zjištěna potřebná deformace dvou pružin. Potřebný zdvih aktuátoru je oproti této hodnotě nižší o hodnotu původní deformace $y_{2,0}$.

$$y_{2,4} = 0,087F_{4,0} - 0,05 = 0,087 \cdot 15,73 \text{ N} - 0,05 = 1,31 \text{ mm}$$

$$y_A = y_{2,4} - y_{2,0} = 1,31 \text{ mm} - 0,293 \text{ mm} = 1,017 \text{ mm}$$

kde:

$y_{2,4}$	mm	je deformace dvou pružin, při které dosahují síly $F_{4,0}$
y_A	mm	aktivní zdvih aktuátoru

Bylo tedy určeno, že zdvih aktuátoru potřebný pro přepnutí ventilu z tuhosti typu MT do typu LT má po zaokrouhlení být 1 mm. Maximální teoretická síla od pružin, které je dosaženo při jejich úplném stlačení, je:

$$F_{2,max} = \frac{y_{2,max} - 0,05}{0,087} = \frac{3,457 \text{ mm} - 0,05}{0,087} = 39,16 \text{ N}$$

kde:

$F_{2,max}$	N	síla dvou pružin při úplném stlačení
$y_{2,max}$	mm	maximální možné stlačení dvou pružin

Silové zatížení aktuátoru

Na aktuátor budou kromě stlačených pružin působit také dynamické síly. Hlavní příčinou sil je náraz ventilového puku na dno retaineru. Předpokládá se, že tyto vlivy jsou větší než statické napětí pružin a jedná se o rozhodující složku zatížení. Zjištění velikosti těchto sil je velmi problematické. Přesné chování puku není známo. Např. se neví, jestli puk opravdu naráží na dno, či zda je utlumen pružinami. Dále je otázkou, jakou rychlostí se pohybuje, případně naráží.

Tato nejistota v návrhových parametrech neumožňuje přesné určení únosnosti, kterou má vykazovat aktuátor. Proto byla tato požadovaná únosnost odhadnuta. Bylo rozhodnuto, že aktuátor musí být schopen překonat odpor nejméně 300 N.

2.2.3 Nároky a požadavky na řešení

2.2.3

Ventilová deska spolu se všemi přidruženými komponenty musí odolávat poměrně náročným podmínkám provozu. Stroj musí běžet nepřetržitě po dlouhou dobu. Vratný pohyb pístů vyvolává silné vibrace. Maximální pracovní tlak v hlavě kompresoru je 28 barů. Provozní teploty se pohybují v rozsahu od 20 do 120 °C, v některých aplikacích až 155 °C. Při testech může teplota dosáhnout až 163 °C. Krátkodobě při startu nebo doběhu stroje se mohou vyskytnout teploty kolem -50 °C. Jmenovité otáčky kompresoru činí 50 Hz (1450 min⁻¹), nicméně s použitím frekvenčního měniče je povolen rozsah 30 až 70 Hz. Těmto podmínkám je vystaven současný výtlačný ventil a bude jim vystaven i upravený model.

Z výše uvedeného vyplývá, že na konstrukci je kladen především požadavek mechanické a tepelné odolnosti. Zvýšená pozornost musí být věnována zajištění sestavy proti vibracím. Z umístění uvnitř kompresorové hlavy vyplývá také to, že nelze použít žádné elektronické, hydraulické nebo pneumatické systémy.

Konstrukční řešení také musí být ekonomicky schůdné v sériové výrobě. Musí tedy obsahovat co nejméně komponent a pokud možno nevyužívat drahé a obtížné zpracovatelné materiály.

2.3 Cíle práce

Primárním cílem této práce je konstrukční návrh výtlačného ventilu pístového kompresoru. Tento ventil má samočinně měnit svou charakteristiku v závislosti na výtlačné teplotě. Splněny musí být tyto požadavky:

- Zvýšení účinnosti kompresoru v krajních oblastech jeho provozní obálky
- Snížení nákladů na výrobu kompresoru
- Konstrukce smí využívat speciální, ale dostupné materiály s možností velkosériové výroby

Dalším cílem je vyrobení prototypu navržené konstrukce za účelem jejího provozního otestování. Na jeho základě mají být vyvozeny návrhy na zlepšení konstrukce, odstranění závad a doporučení pro další vývoj.

3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Po analýze problému bylo stanoveno, že jako funkční princip bude použito zvýšení předpětí ventilových pružin. Toho bude dosaženo změnou jejich stlačení posuvem horního dorazu. K tomu je potřeba mezi retainer a pružiny vložit nový komponent, který by se posouval podle potřeby. Tento díl převeze funkci dorazu pružin, kterou v současnosti plní dno retaineru.

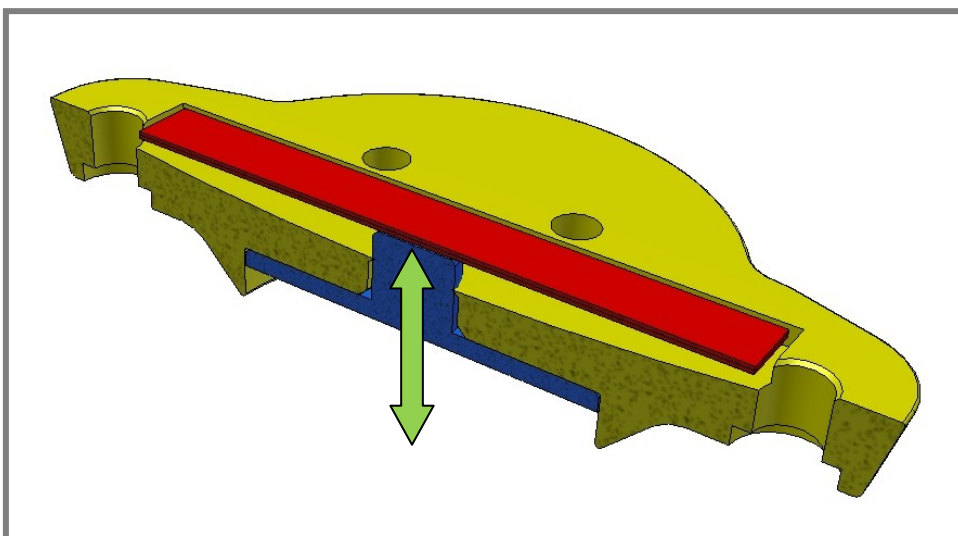
Zvýšení předpětí pružin napodobí funkci LT modelu jen částečně. Způsobí pozdější otevírání ventilu kvůli vyššímu tlaku potřebného pro překonání pružin. Na druhou stranu nelze změnit průběh jejich tuhosti. Chování puku tedy bude kompromisní mezi MT a LT variantou.

Byly zvažovány aktuátory tří funkčních principů; bimetalový pásek, konstrukce ze slitin s tvarovou pamětí a voskový aktuátor.

3.1 Bimetalový pásek

Výhody bimetalu jako aktuátoru jsou především v jeho jednoduchosti a předvídatelnosti chování. Vztahy pro deformaci jsou dobře popsány a jednoduše analyticky řešitelné. Další výhodou je rozšířenost tohoto materiálu, není tedy problém s obstaráváním dodavatelů ani vhodným typem výrobku z hlediska parametrů. Nezanedbatelnou předností je také z toho vyplývající nízká cena.

Použití bimetalového pásku jako aktuátoru je problematické ze dvou důvodů. Tím prvním je jeho lineární chování. Pro návrh ventilu bylo určeno, že žádoucí chování je přepnutí ze stavu představujícího MT variantu do stavu LT varianty. Bimetal se ovšem deformuje v celém rozsahu teplot, ve kterém se může nacházet. To znamená, že pokud by jeho parametry byly navrženy tak, aby reagoval např. při 100 °C, jeho účinek by narůstal postupně v rozsahu několika desítek stupňů. To je nežádoucí, jelikož při nižších teplotách dosahuje MT konfigurace lepší účinnosti.



Obr. 3–1 Schéma bimetalu ve funkci lineárního aktuátoru

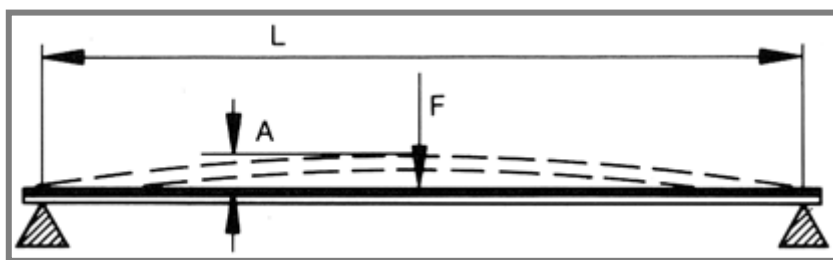
Další vlastností mluvící proti nasazení bimetalu je jeho malá silová hustota. Pro vyvození sil potřebných k překonání pružin je potřeba bimetalového pásku značných rozměrů. Síla vyvinutá páskem je přímo úměrná jeho tloušťce, s tou však klesá jeho deformace. Prohnutí pásku je dále ovlivněno jeho délkou. V důsledku těchto faktů pak vychází, že bimetalový prvek by byl příliš rozměrný pro použití v omezeném

prostoru uvnitř hlavy válců. Autorovi této práce není znám žádný příklad aplikace bimetalu jako vyložení silového prvku.

Pro výpočet rozměrů bimetalu byly zvoleny tyto výchozí parametry:

- Délka pásu 60 mm, což je maximum vzhledem k rozměrům retaineru (viz obr. 3-1)
- Teplotní rozsah, na kterém bylo uvažováno působení, byl zvolen 30 °C.
- Síla, kterou musí bimetal vyvinout, byla stanovena na 300 N.

Pro výpočet byl uvažován pásek běžného typu *Kanthal 155* [24], který dosahuje obvyklého specifického průhybu a . Bimetal je navržen jako nosník s podporami na obou koncích a silou působící v jeho středu.



Obr. 3-2 Zatížení bimetalu [25]

Změna teploty ΔT je využita na dvě složky; průhyb T_A a překonání síly T_F . Při návrhu rozměrů bimetalového pásu s ohledem na jeho co nejmenší objem platí pravidlo, že tyto dvě složky jsou rozděleny na polovinu, tedy platí

$$T_A = T_F = 0,5 \cdot \Delta T$$

Pro výpočet tloušťky pásu platí vztah

$$s = \frac{a \cdot \Delta T \cdot L^2 \cdot T_A}{4A} = \frac{15,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 30 \text{ K} \cdot 60^2 \text{ mm}^2 \cdot 0,5}{4 \cdot 1 \text{ mm}} = 0,21 \text{ mm}$$

kde:

s	mm	je tloušťka pásu
a	K^{-1}	specifický průhyb
ΔT	K	rozdíl teploty
L	mm	délka bimetalu
T_A	-	podíl změny teploty, který způsobuje průhyb
A	mm	průhyb bimetalu

Z tloušťky s vychází výpočet šířky bimetalu

$$b = \frac{\Delta F \cdot L}{E \cdot a \cdot s^2 \cdot \Delta T \cdot T_F} = \frac{300 \text{ N} \cdot 60 \text{ mm}}{170000 \text{ MPa} \cdot 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 0,21^2 \text{ mm}^2 \cdot 30 \text{ K} \cdot 0,5} = 10260 \text{ mm}$$

kde:

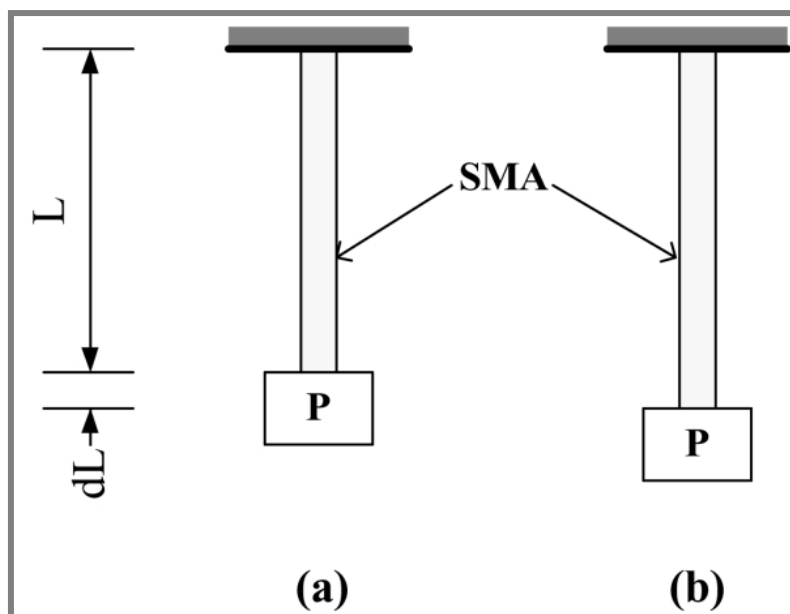
b	mm	šířka pásu
ΔF	N	síla bimetalu
E	MPa	modul pružnosti
T_F	-	podíl změny teploty, který vyvozuje sílu

Výsledná šířka bimetalu 10 260 mm je zcela mimo možnosti zástavby do hlavy válců. Jeho parametry lze měnit v určitém rozsahu (např. zvětšení tloušťky na úkor šířky), nebo lze použít více pásků na sobě. Přesto nelze dosáhnout vhodných rozměrů. Nevhodný poměr rozměrů je způsoben velkou silou, kterou musí bimetal vyvinout.

3.2 Slitiny s tvarovou pamětí

3.2

Slitiny s tvarovou pamětí nabízejí vysokou hustotu síly, takže je možná zástavba do malých prostor při dostatečné síle. Zároveň tato síla nejde na úkor rozsahu pohybu. Jejich cena je vyšší než u běžných materiálů, je však vyvážena jejich unikátními vlastnostmi, kde často nahradí dražší a složitější řešení. Zdaleka nejčastějším způsobem ovládání SMA aktuátoru je jeho zahřívání elektrickým proudem. Při jeho zahřátí dochází ke zkrácení (obr. 3–3), což umožňuje nejefektivnější využití paměťového jevu. Takto se dá element přesně a jednoduše regulovat. Vnější regulační systémy jsou ovšem pro firmu nežádoucí.



Obr. 3–3 Schéma jednoduchého aktuátoru založeného na zkrácování SMA drátu [26]

SMA jsou v dnešní době dostupné běžnému zákazníkovi. V České republice se nicméně běžně tyto produkty neprodávají, s výjimkou aplikací pro dentální použití. Prodejci ovšem neposkytují poradenství či odbornou asistenci při vývoji aplikace. Jejich role je tedy čistě zprostředkování prodeje pro místní trh.

Důležitým hlediskem je, že tvarové slitiny se v drtivé většině případů prodávají jako polotovary. Jedinou výjimku tvoří pružiny, které lze objednat s požadovanými parametry. Nelze tedy zakoupit konstrukční modul, který by se začlenil do celku.

I přes dostupnost SMA na trhu je celková obeznámenost nízká a lidí s praktickou zkušeností s těmito materiály je málo. SMA je stále považován za exotickou skupinu látek. Tento fakt představuje značnou překážku pro testování, návrh a vývoj řešení, které by využívalo tvarové slitiny. Pokud by byla zvolena varianta s tvarovou slitinou, bylo by nutné materiál podrobit testům, učení tvarů, tepelnému zpracování apod. To by přesahovalo možnosti rozsahu diplomové práce z hlediska časového,

finančního i znalostního. Z tohoto důvodu nebyla tato varianta podrobněji rozpracována.

3.3 Voskový aktuátor

Voskové aktuátory nabízejí vysokou sílu i dostatečný zdvih při malých rozměrech. Technologie je prověřená desítkami let praxe. Mimo jiné se používají jako termostaty ve spalovacích motorech, kde vykazují vysokou spolehlivost a dlouhou životnost. To vše při náročných provozních podmínkách, mezi které se řadí extrémní teploty provozu a vibrace motoru. Díky používaným materiálům, jako je mosaz, bronz nebo nerezová ocel, nečiní problémy ani chemická odolnost vůči různým látkám.

Voskové elementy jsou široce rozšířené a není proto problém najít dodavatele vhodného produktu pro danou aplikaci. Aktuátory jsou vyráběny ve velkých sériích v mnoha firmách na celém světě, proto je příznivá i jejich cena.

Kromě hotových aktuátorů se prodávají také samotné vosky všech druhů, které jsou pro tyto komponenty využívány. Jednou z variant řešení je i možnost návrhu vlastního aktuátoru, který by byl optimalizován pro konkrétní aplikaci. Tato varianta je ovšem neefektivní, jelikož by bylo nutné nastudovat rozsáhlou problematiku, nechat vyrobit několik prototypů a otestovat je. Výsledný produkt by jistě nebyl lepší než dostupná komerční řešení, přestože by na jeho zpracování bylo potřeba značných finančních prostředků a mnoho času. Pro samotné testování by bylo potřeba navrhnout či zakoupit drahá měřicí zařízení, která umožňují měření síly a zdvihu za vysokých teplot. Kromě výše uvedeného spočívá další překážka v tom, že výrobci jsou ochotni vosky prodávat pouze ve velkém množství velkoobdobatelům.

3.4 Zhodnocení variant a výběr

U všech variant byla zvažována varianta přepákování aktuátoru. U slitin s tvarovou pamětí je nějaký druh mechanismu nezbytnou součástí řešení. U bimetalu a voskového členu pak umožňuje lépe využít jejich parametrů. Např. u aktuátoru použití páky zvyšuje sílu působící na ventil, na úkor zdvihu, který je většinou větší, než je potřeba.

Jako optimální varianta byl zvolen voskový aktuátor. Jeho výhodou je konstrukční jednoduchost aktuátoru a jednoduché chování. Po zakoupení jej není třeba nijak upravovat a je okamžitě připraven k použití. Tyto produkty jsou velmi rozšířené, a proto je pro velkého odběratele relativně jednoduché jejich obstarání, přestože v České republice nebyl nalezen žádný prodejce. Jejich cena je v porovnání s dalšími komponenty kompresoru nízká. Použitý aktuátor byl zakoupen jako vzorek v počtu 10 kusů při ceně přibližně 125 Kč za kus.

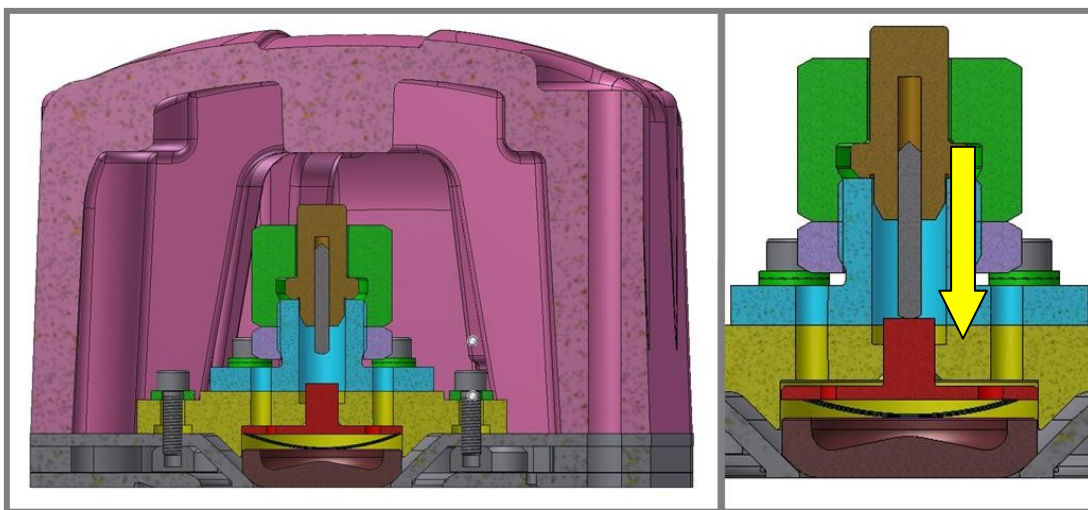
Při hledání aktuátoru bylo zřejmé, že k přepínání charakteristiky ventilu bude docházet při teplotě přibližně 100 °C. Důvodem je skutečnost, že běžně dostupné aktuátory používají směs vosku, která taje v rozsahu teplot 92-105 °C. To je dáno jejich aplikací v automobilovém průmyslu, kde je vyžadována nejčastěji teplota otevírání v rozsahu 80 až 105 °C. Tato skutečnost není optimální, nicméně pro ověření konceptu není zásadní překážkou. Činnost aktuátoru se projeví při měření při o něco nižší teplotě.

Použití pákového mechanismu bylo vyloučeno. Důvodem jsou větší nároky na prostor a vyšší složitost konstrukce, která také obsahuje více komponent.

4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Při konstrukci byl důraz kladen na zachování co největšího počtu dílů v nezměněné podobě. Příčinou byl jednak ohled na cenu a čas výroby. Druhým důvodem bylo to, že konstrukční úprava by vyžadovala zdlouhavé a nákladné testování komponent z mnoha hledisek. Stávající díly jsou ověřeny a je zaručena jejich správná funkce. Jejich tvar, materiály i postup výroby jsou často náročné. Například puk ventilu je vyroben z polymeru polyetherketon (PEEK) s obsahem uhlíkových vláken. Tento materiál je velmi obtížně obrobitelný. Jedinou schůdnou metodou jeho zpracování je vstřikování do formy, což je metoda nevhodná pro kusovou výrobu.

Díly, které je nezbytné nahradit upravenými, jsou tvarově zjednodušeny s vědomím, že to zhorší jejich užité vlastnosti. Takovým případem je nový retainer. Původní díl je vyráběn metodou práškování, která určuje některé technologické prvky. Prototyp bude zhotoven obráběním, čemuž byl přizpůsoben jeho tvar, což má za následek zhoršení aerodynamiky v jeho okolí. Při návrhu konstrukce byl obecně kladen důraz na co nejmenší počet dílů, pohyblivých i celkových.

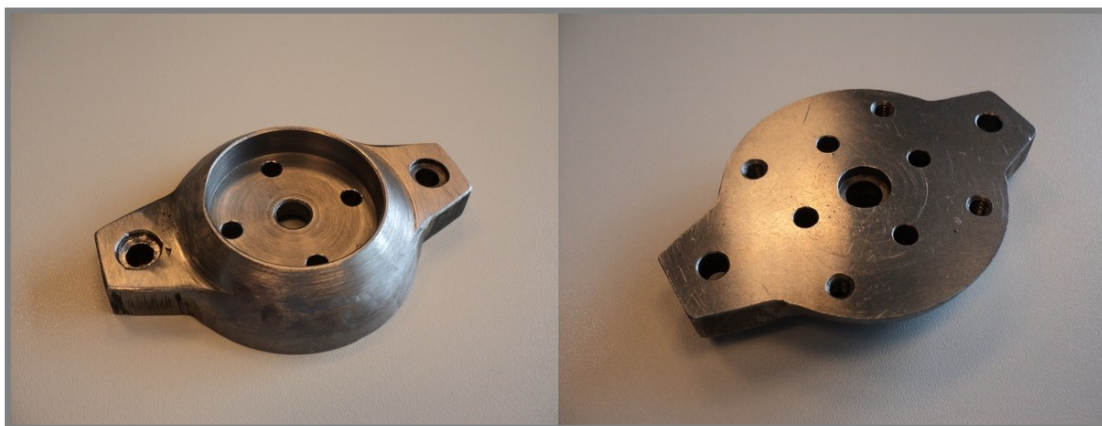


Obr. 4–1 Výtlačný ventil. Vpravo pohyb dorazu za vyšších teplot

4.1 Popis řešení

4.1

Mechanismus proměnné tuhosti ventilu je pojat jako nástavba na standardní ventil. Místo retaineru, který sloužil jako pouzdro a doraz pro puk a pružiny, byly tyto role rozděleny. Samotný **retainer** byl upraven tak, aby umožňoval montáž nových dílů. Retainer obsahuje novou průchozí díru, která je souosá s původním zahloubením pro pružiny. Tato díra slouží k vedení nového dílu, kterým je posuvný doraz. Pro jeho umístění bylo původní zahloubení zvětšeno tak, aby vzdálenost doraz-puk zůstala shodná. Tato změna si vyžádala zvětšení celkové výšky retaineru, aby se na něm nacházel dostatek materiálu. Dalším důvodem je potřeba nových děr pro šrouby na horní ploše retaineru pro uchycení dalšího komponentu. Pro odvod kapaliny v havarijních stavech slouží průchozí otvory. Jde o čtyři otvory průměru 5 mm umístěné na kružnici. Jejich počet a umístění bylo zvoleno pro správnou funkci s dorazem, jak bude popsáno níže.



Obr. 4–2 Upravený retainer

Zcela novým komponentem je **posuvný doraz**. Má tvar disku s centrálním čepem o průměru 8 mm. Tento čep slouží k vedení posuvného pohybu v díře retaineru. Jeho disk plní funkci dorazu pružin. Na tento komponent působí trn voskového aktuátoru prostřednictvím horní plochy čepu. V neaktivovaném stavu je horní plocha disku v kontaktu se dnem zahloubení retaineru. Při vyšších teplotách dojde k jeho posunu dolů a zvýšení předpětí pružin. Na disku dorazu se nachází šest děr o průměru 8 mm, které slouží pro průchod kapaliny v případě provozní havárie. Jsou umístěny na roztečné kružnici průměru 26 mm. Doraz se může volně otáčet podél své osy. Rozložení děr zajišťuje, že při libovolném natočení je k dispozici přímý kanál pro kapalinu, tzn. nedojde k blokování příslušných kanálků na retaineru.



Obr. 4–3 Posuvný doraz

Na horní plochu retaineru je připevněn **držák aktuátoru**. Má tvar válce s průchozí dírou a spodní přírubou. Celková výška je 22,6 mm a průměr příruby je 62 mm. Vnitřní otvor slouží k průchodu trnu aktuátoru. Je také vybaven osazením, na které se aktuátor umístí. Vnější válcová plocha je opatřena závitem s jemným stupáním M22x1,5. Na konci závitu je výběh pro zaručenou manipulaci s pojistnou maticí (viz níže). Spodní příruba je opatřena vybráním, které uvolňuje prostor pro šrouby, které spojují retainer a ventilovou desku.



Obr. 4–4 Držák aktuátoru

K připevnění aktuátoru slouží dva díly. Prvním je **hlavní matice**. Její funkce spočívá v sevření aktuátoru k držáku. Je vyrobena z šestihranné tyče velikosti 30 mm. Průchozí díra umožňuje průchod tělesa aktuátoru, zatímco větší slepá díra je opatřena závitem s jemným stoupáním M22x1,5.

K pojištění matice proti uvolnění v důsledku silných vibrací slouží dva prvky. Pro zajištění nebylo možné použití např. podložek, jelikož jako doraz matice slouží příruba aktuátoru. Je nežádoucí, aby na tělo aktuátoru byl vyvíjen přílišný tlak. Prvním opatřením je **pojistná (kontra) matice**. Stejně jako v případě hlavní matice je vyrobena ze šestihranné tyče. Jde o nízkou matici klasického tvaru, opatřenou stejným závitem jako u souvisejících komponent. Druhým pojišťovacím opatřením je užití **zajišťovače šroubů** Scotchgrip 2510 [27]. Tento typ byl převzat z původní konstrukce.

Ke spojení retaineru s ventilovou deskou slouží dva palcové šrouby s hlavou Torx se závitem #10-32 UNF podle normy ANSI B18.3 z nerezové oceli. Typ šroubu byl převzat z původního řešení s tím, že byla zvětšena jeho délka na 0,625 palce kvůli vyššímu retaineru. Pro zajištění proti uvolnění kvůli vibracím jsou použity podložky Nord-Lock NL5spss z nerezové oceli. Ty byly převzaty z původní konstrukce.

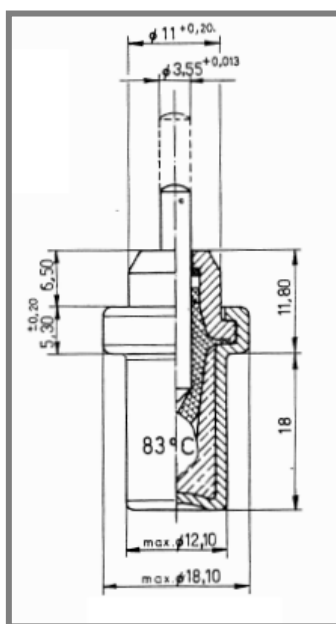
Pro spojení retaineru a držáku aktuátoru byly zvoleny čtyři šrouby M5x14 ISO 4762 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, které jsou zajištěny stejnými podložkami jako v předchozím případě. Matici tvoří závitové díry v těle retaineru.

Pod posuvným dorazem jsou uloženy dvě pružiny, prstencová podložka a ventilový puk. Tyto komponenty byly převzaty beze změn. Volba materiálu u všech upravených dílů vychází ze zkušeností s výrobou prototypů firmy Emerson, která již v minulosti prováděla experimenty s ventilem a zadávala výrobu nových dílů. Byla použita ocel S355 J2G3 (ekvivalent ČSN 11 378).

Při použití nových komponent vzroste celková výška ventilové sestavy. Z tohoto důvodu nebylo možné použít standardní hlavu válců a byla nahrazena vyšší alternativou. Tento typ (tzv. US – tall head) je používán na jiných modelech a díky modularitě výrobků ji lze bez úprav použít.

4.1.1 Použitý aktuátor

Výrobce použitého aktuátoru je turecká firma Kirpart [28]. Firma nabídla model, který svými parametry vyhovoval pro sestavení prototypu. Byl použit model označený číslem výkresu 395.031.40.02. Udávaná teplota počátku tání je 92 °C. Plné vysunutí činí 8,3 mm a je ho dosaženo při 102 °C. Spodní část těla je vyrobena z měděného taženého kalíšku, horní část je vyrobena z mosazi. Tyto díly jsou do sebe vodotěsně zalisovány tak, aby nedošlo k úniku vosku ven nebo naopak k průniku vnějšího prostředí do aktuátoru. Trn aktuátoru je zhotoven z nerezové oceli. Jedná se o komponent určený pro termostaty do motorů osobních vozidel a spadá do kategorie squeeze-push. Výrobce uváděná síla dosahuje 300 N. Náčrty aktuátoru je na obr. 4–5.

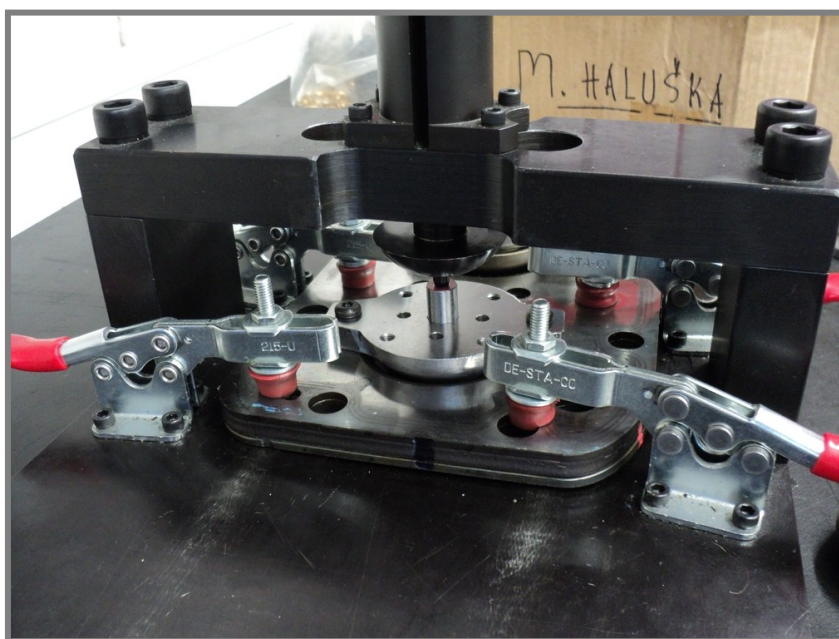


Obr. 4–5 Voskový aktuátor
Kirpart 306.031.40.02

Z konstrukčního hlediska jsou na trhu k dispozici modely vhodnější pro tuto aplikaci. Obzvláště vhodné by bylo použít některý z průmyslových modelů typu flat diaphragm, ale při poptávání bylo zjištěno, že je obtížné tyto aktuátory obstarat. Důvodem je neochota výrobců poskytnout vzorky či prodat malé množství kusů pro otestování prototypu. Další výrobci vyrábí pouze na zakázku vyvinuté produkty. Předpoklad pro další vývoj je obstarání vhodnějších aktuátorů, které je jednodušší v případě velkého odběratele.

4.1.2 Montáž

Při montáži prototypu jsou komponenty rozděleny do dvou skupin. Do otvoru v retaineru je zasunut posuvný doraz. Pod něj jsou naskládány v pořadí shora dolů všechny komponenty stejné jako u standardního modelu; dvě pružiny, podložka a ventilový puk. Retainer je pak pomocí speciálního přípravku usazen tak, aby byl vystředěn vůči ose ventilového otvoru (obr. 4–6). Tento krok je nezbytný, aby se zajistila dokonalá těsnost uzavření ventilu pukem. Přípravek je používán i pro montáž standardních ventilů mimo sériovou výrobu, pro upravenou variantu bylo pouze potřeba vyrobit jednoduchý adaptér kvůli jinému průměru středícího otvoru. V ustavené poloze je retainer zajištěn dvěma šrouby.



Obr. 4–6 Usazování sestavy ventilu pomocí montážního přípravku (zdroj: ECT)

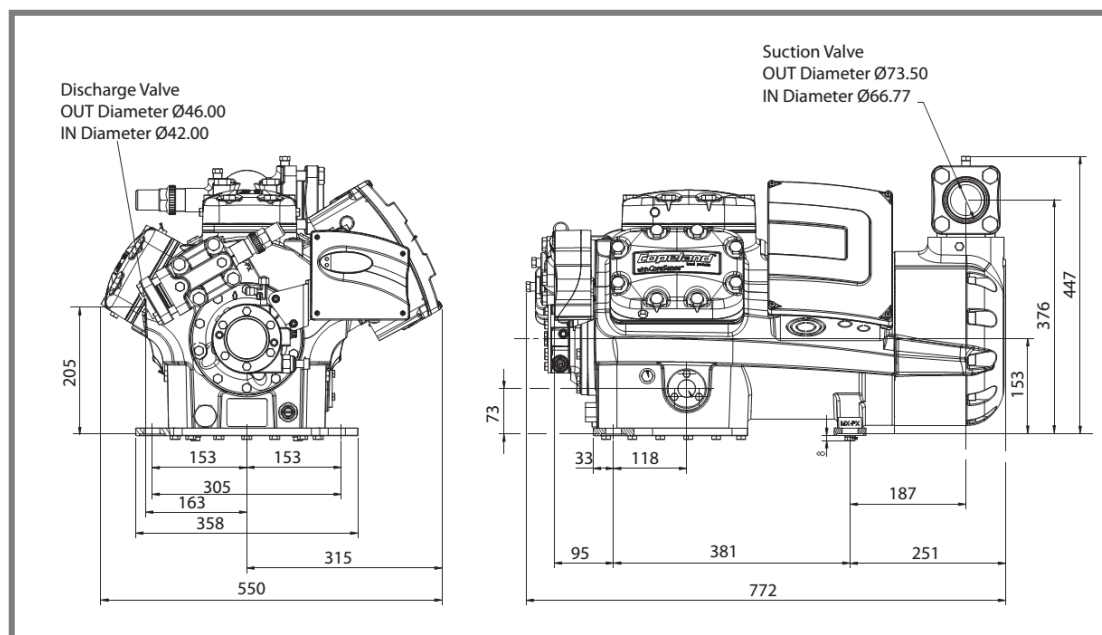
Dalším krokem je zasunutí aktuátoru do držáku. Nízká kontra matice je přitom našroubována až na doraz a na závit držáku je nanesen zajišťovač šroubů. Aktuátor je poté zajištěn primární maticí, která je dotažena přiměřeným momentem, aby nedošlo k poškození aktuátoru. Pro zajištění proti uvolnění je kontra matice utažena proti primární matici. Poté je tento celek přišroubován k retaineru. Pokud by byl přišroubován předtím, nebyl by kvůli šroubům možný přístup ke kontra matici. Celá sestava ventilové desky je poté umístěna na kompresor. Na desku je položena hlava válců. Oba komponenty jsou pak zajištěny osmi šrouby k bloku kompresoru. Po těchto krocích je kompresor připraven k instalaci do zkušebního standu a zapojení do chladicího okruhu.

4.2 Test prototypu

Upravený kompresor byl podroben standardizovanému testu podle normy ČSN EN 13771-1 *Kompresory a kondenzační jednotky pro chlazení – Měření výkonnosti a zkušební metody – Část 1: Chladivové kompresory*, konkrétně metody měření D2 v této normě popsané. Při této metodě je měřen průtok plynu na výstupu kompresoru. Dalšími měřenými hodnotami jsou např. hodnota elektrického proudu a výkonu odebíraného elektromotorem, tlak a teplota na vstupu a výstupu, nebo elektrické napětí. Z těchto údajů se pak vypočítají potřebné veličiny. Test proběhl v několika provozních stavech (rating points). Celková doba testu je přibližně 40 hodin. Prototyp byl otestován v režimu *Back to Back*. To znamená, že nejprve byl otestován standardní kompresor, poté co nejdříve ten samý kompresor, ovšem s upravenou ventilovou deskou. Zjištěné hodnoty obou jsou pak vyjádřeny v procentech hodnot tzv. pilotního kompresoru. Jde o stroj z ověřovací série, který je používán jako referenční kompresor. Údaje kompresoru jsou uvedeny v tab. 4–1.

Tab. 4–1 Parametry testovaného kompresoru (zdroj: ECT)

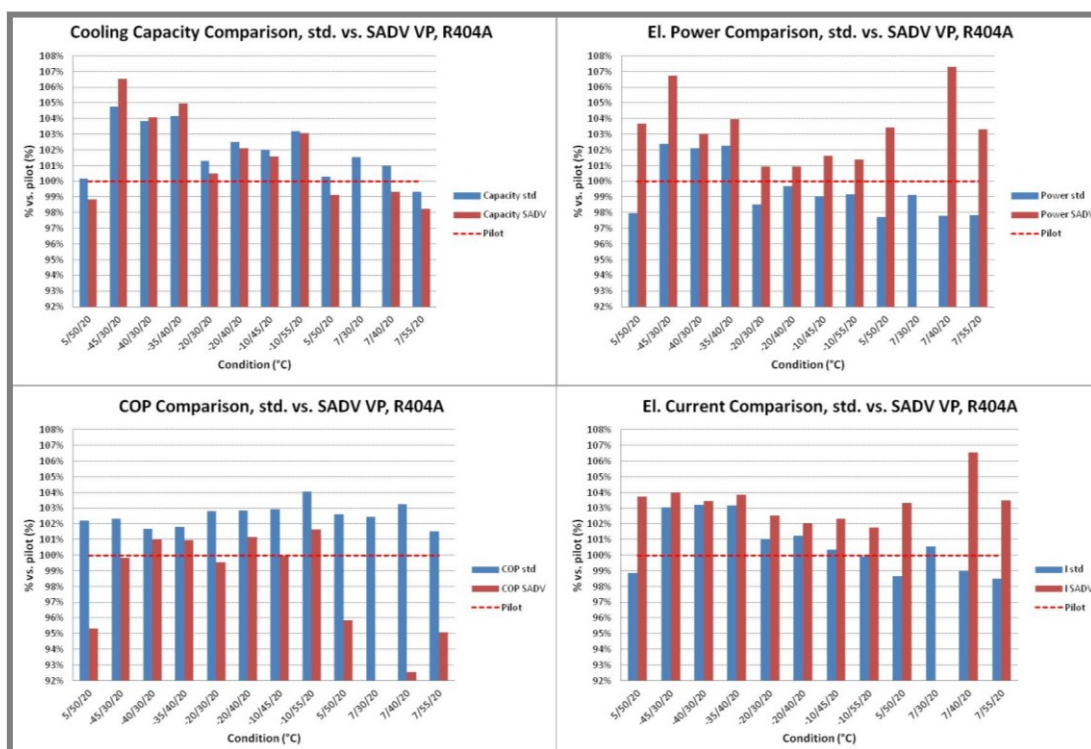
Údaj	Provozní režim (R404A)		
	-35/40/20°C	-10/45/20°C	5/50/20°C
Příkon elektromotoru [kW]	19,4	35,4	45,7
Chladicí kapacita [kW]	27,3	80,9	127,1
COP [-]	1,4	2,3	2,8
Proud [A]	45,2	65,2	79,8
Typ	6MK-50X AWM/ D		
Sériové číslo	12D45117M		
Počet válců [-]	6		
Zdvih [mm]	57,5		
Vrtání [mm]	80,6		
Celková hmotnost [kg]	230		
Rozměry [mm]	772x550x447		
Objemový průtok při 50 Hz [m ³ .h ⁻¹]	153		



Obr. 4–7 Rozměry testovaného kompresoru (zdroj: ECT)

4.2.1 Vyhodnocení testu

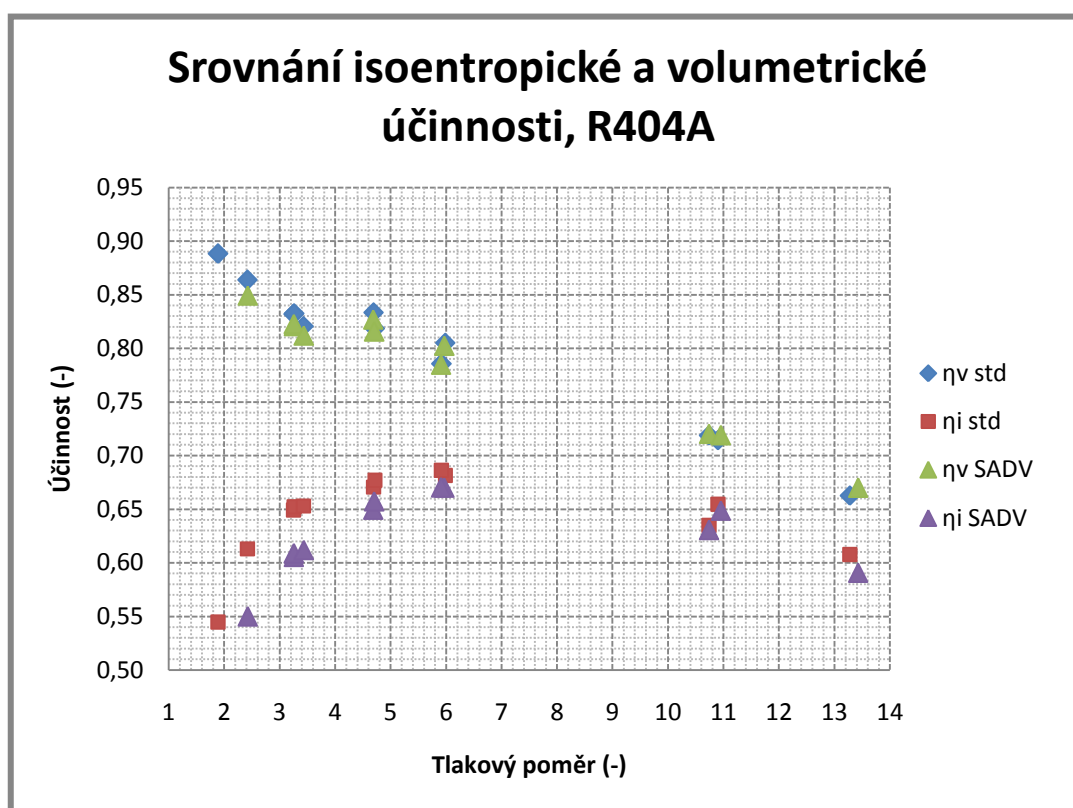
Naměřené hodnoty jsou znázorněny na obr. 4–8 pro standardní a upravenou ventilovou desku. Pro lepší přehlednost jsou uvedeny v procentech referenčního stroje, tzv. pilota. Jednotlivé sloupce označují provozní stavy ve formátu *vypařovací teplota/kondenzační teplota/teplota na sání*.



Obr. 4–8 Srovnání hodnot upraveného (SADV) a původního (std) kompresoru. Hodnoty jsou v (%) referenčního stroje (zdroj: ECT)

Z grafů lze vyvodit, že upravený ventil nezpůsobil žádné zlepšení sledovaných parametrů, došlo naopak k mírnému zhoršení všech hodnot. Průměrná hodnota chladicí kapacity klesla o 0,3 %.

Na obr. 4–9 jsou vyjádřeny hodnoty isoentropické a volumetrické účinnosti obou kompresorů. Volumetrická účinnost není přímo ovlivněna výtlačným ventilem a hodnoty jsou tedy podobné. Isoentropická účinnost je ovlivněna výtlačným ventilem a jasně se ukazuje, že upravený ventil způsobuje snížení účinnosti v řádu jednotek procent. Z uvedeného vyplývá, že konstrukční úprava nepracovala tak, jak bylo zamýšleno.



Obr. 4–9 Srovnání isoentropické a volumetrické účinnosti obou variant (zdroj: ECT)

Po testu byl kompresor rozebrán za účelem zjištění případných závad. Vyšlo najevo, že voskové aktuátory byly při testu zničeny. Trny aktuátorů byly ohnuty v radiálním směru. Posun dorazu se odehrává při maximálním zdvihu trnu tak, že je veden v těle aktuátoru jen na krátké vzdálenosti, přibližně 5 mm. Zároveň velké vysunutí způsobuje značný moment působící na uložení trnu. Vyhnutí trnu způsobilo také poškození pouzdra aktuátoru, zejména deformaci vodícího otvoru a teflonového těsnění.



Obr. 4–10 Stav aktuátorů po zkoušce

Dá se předpokládat, že k poškození došlo hned v začátku testování. V důsledku toho se nová konstrukce nijak neprojevila na výkonech kompresoru. Mírné zhoršení některých parametrů se dá přisoudit tvaru retaineru. Tento nebyl aerodynamicky optimalizován tak dokonale jako původní retainer, čímž vzrostly ztráty způsobené turbulencemi u ventilu. Při ohledávání prototypu nebyly nalezeny známky netěsnosti ventilu, z čehož vyplývá, že způsob vystředění ventilu nad sedlo ve ventilové desce je funkční.

4.3 Návrhy řešení problémů a další úpravy

4.3

Po selhání prototypu byly zanalyzovány jeho příčiny. Na základě získaných poznatků byly navrženy konstrukční úpravy, zásady a doporučení, která mají odstranit příčiny poruchy a konstrukční nedostatky.

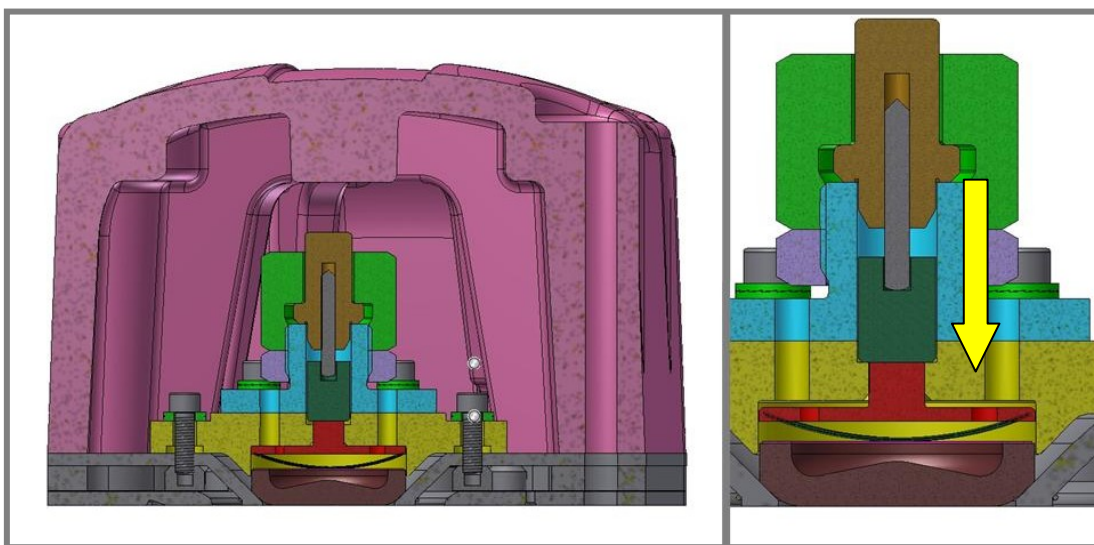
4.3.1 Omezení zdvihu aktuátoru

4.3.1

Po dalších konzultacích s výrobcem použitého aktuátoru bylo zjištěno, že pohyb trnu může být zastaven v kterékoliv poloze, aniž by hrozilo riziko poškození aktuátoru. Toho lze výhodně využít v upravené verzi. Aktuátor je umístěn níže než ve vyrobeném prototypu, a to tak, aby byl umožněn celkový zdvih o něco větší, než je třeba pro regulaci ventilu, např. 2 mm. Z této hodnoty bude využit 1 mm pro činný zdvih, a zbytek jako mrtvý chod.

Mezi trn a posuvný doraz je vložena nová komponenta, která zamezí nadměrnému pohybu trnu, který má tvar válce. Váleček se posouvá v otvoru a působí na posuvný doraz. Samotný posuvný doraz je zkrácen tak, aby vyčníval nad osazení díry v retaineru o 1 mm. Poté, co váleček urazí danou vzdálenost, dosedne na osazení retaineru.

Pro vedení trnu v axiálním směru je na válečku otvor. Ten má průměr mírně větší než průměr trnu. Toto opatření má zamezit vyhnutí trnu. Při montáži je trn umístěn do tohoto otvoru. Po otevření aktuátoru se jeho trn opře do dna otvoru a přes váleček posouvá doraz. Výhodou tohoto řešení je, že váleček není náročný na přesnost výroby. Posuv dorazu je přesně vymezen výškou jeho čepu, resp. vzdáleností, o kterou vyčnívá.



Obr. 4–11 Úprava ventilu vložení válečku

4.3.2 Změna aktuátoru

4.3.2

Použitý aktuátor byl původně určen do automobilových termostátů, čemuž odpovídají jeho provozní vlastnosti. Konzultace s výrobcem vedly ke zjištění, že aktuátor není vhodný pro dlouhodobý provoz nad 120 °C. Pro aplikaci v této práci jsou vhodnější aktuátory průmyslové. Ty nebyly použity kvůli neochotě výrobců poskytnout zkušební vzorky. V budoucím vývoji je žádoucí pokračovat ve snaze o získání vhodného typu aktuátoru. Vhodný model má splňovat tyto nároky:

- Měl by být membránového typu, jelikož dosahuje větší přesnosti a zároveň umožňuje odolnější vedení trnu. Tato konstrukce dosahuje menších zdvihů,

což pro tuto aplikaci nepředstavuje problém, neboť ze zdvihu současného modelu byl využit pouze jeho zlomek.

- Teplota otevírání ~125 °C
- Nejvyšší provozní teplota nejméně 165 °C

Průmyslové aktuátory mohou pracovat i v teplotách nad 120 °C, s teplotou otevírání až 150 °C. Toho automobilové typy vzhledem ke svému určení nedosahují. Stejně tak je výhodou průmyslových aktuátorů i široký výběr velikostí, což umožňuje dokonalejší návrh ventilu.

V případě použití aktuátoru se zbytečně velkým zdvihem je opět žádoucí použití vodících prvků.

4.3.3 Pákový převod

Většina aktuátorů na trhu dosahuje zdvihů, které jsou větší, než je potřeba na regulaci ventilu. Proto se jako výhodné jeví použití pákového či vačkového mechanismu, který by zmenšoval zdvih dorazu a zároveň zvětšoval vyvinutou sílu. Tato varianta umožňuje i případné použití jednoho společného aktuátoru pro dva ventily, tedy pro jednu hlavu kompresoru. Další výhodou je snížení zátěže na aktuátor.

Nevýhodou této varianty je její větší složitost, a z toho plynoucí vyšší cena, menší spolehlivost a větší nároky na prostor.

4.4 Ekonomický rozbor

Výroba prototypu včetně jejího financování byla organizována ECT. Jako zhotovitel byla vybrána firma August-kovo Mikulov. Byla zadána výroba deseti kompletních sestav upravených ventilů. Cena za jednu soupravu byla 2600 Kč bez DPH. Celkové náklady za výrobu tak činily 26 000 Kč bez DPH.

Pro testování chování voskových elementů byly zakoupeny tři automobilové termostaty. Jejich celková cena byla 630 Kč včetně DPH.

Poslední položkou bylo zakoupení voskových aktuátorů firmy Kirpart. Firma dodala deset kusů typu 395.031.40.02 jako testovací vzorky za cenu 50 euro, v přepočtu přibližně 1275 Kč.

Celkové náklady na výrobu prototypu dosáhly 27 773 Kč bez DPH.

5 DISKUZE

5 ---

Řešený problém je specifický, týká se firemního proprietárního systému a nevychází z žádné předchozí práce, a proto nebylo možno předvídat veškeré okolnosti a problémy. V rozsahu této práce je proveden první pokus o dosažení stanovených cílů. Do budoucna je pro dosažení stanovených cílů potřeba další vývoj a zkoušky zdokonalených verzí konstrukce.

V této práci je provedena rešerše za účelem zjištění možných konstrukčních principů. Po jejich zhodnocení byla vybrána optimální varianta, která byla rozpracována do výrobních výkresů. Dále byla provedena analýza současné konstrukce, která doplnila některé neznámé parametry nutné pro konstrukční návrh. Byl sestrojen prototyp a ten byl podroben provozní zkoušce. Během tohoto testu byly aktuátory zničeny a úpravy se téměř neprojevily na naměřených hodnotách. Navzdory zničení aktuátorů nedošlo k poškození kompresoru, které by znamenalo vysoké finanční škody.

Z průběhu práce na řešení a testování prototypu lze vyvodit několik doporučení a zásad pro další vývoj a zdokonalení konstrukce.

Během konstrukční analýzy nebylo přesně známo chování ventilového puku. Není známo, jestli při chodu kompresoru naráží na doraz nebo je utlumen pružinami. Tato neznámá vnáší do návrhu značnou nejistotu, jelikož jde o prvek, který zásadně ovlivňuje silové nároky na aktuátor. Pro přesnější určení parametrů aktuátoru je žádoucí tuto nejistotu vyloučit. Toho lze dosáhnout buď komplexní simulací, zajištěním návrhových dat např. z archivů společnosti, nebo přímo změřením pohybu puku.

Dalším faktorem ovlivňujícím spolehlivost konstrukce je samotný aktuátor. V této práci byl z několika důvodů použit výrobek, jehož parametry nejsou pro danou aplikaci optimální. V dalším vývoji je nezbytné zajistit průmyslový aktuátor s odpovídajícími vlastnostmi. Požadavky na něj musí být aktualizovány po vyřešení problémů popsanych výše.

Upravený prototyp by také měl obsahovat dodatečné vedení trnu aktuátoru v podélné ose. Tato úprava má zajistit menší namáhání trnu a snížit riziko jeho poškození. Další možnou úpravou je použití pákového převodu pro lepší využití zdvihu a síly aktuátoru.

6 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl proveden návrh konstrukční úpravy výtlačného ventilu pístového kompresoru. Při řešení problému byla provedena rešerše za účelem zjištění a popsání současného stavu poznání. Dále byla provedena technická analýza současné konstrukce ventilu za účelem zjištění neznámých parametrů a hodnot. Při této činnosti byly využity jak postupy teoretické ve formě výpočtů a pevnostních analýz, tak experimentální, a to ve formě měření.

Bylo navrženo několik konstrukčních variant a poté vybrána optimální varianta. Tato byla podrobně rozpracována a byl vyroben zkušební prototyp, který byl podroben provozní zkoušce.

Byl navržen upravený výtlačný ventil, který reguluje teplotu na základě teploty na výtlačku. Jako regulační prvek byl použit voskový aktuátor. Při provozní zkoušce prototypu došlo k poškození aktuátoru, následkem čehož se nepodařilo dosáhnout požadovaných cílů.

Výsledky testu a příčiny poškození byly zanalyzovány a na jejich základě byly navrženy konstrukční úpravy a vyvozeny doporučení a zásady pro další postup při řešení problému. Tyto poznatky budou k dispozici firmě Emerson pro případný budoucí vývoj a zdokonalení konstrukce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAMINSKÝ, Jaroslav, Kamil KOLARČÍK a Oto PUMPRLA. *Kompresory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 122 s. ISBN 80-248-0704-1.
- [2] Introduction to Emerson Copeland "STREAM" Compressor. *Lan Hoe Enterprise (1979) Sdn. Bhd.* [online]. 2012, 14.5.2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.lanhoe.com.my/events/2012/05/introduction-to-emerson-copeland-%E2%80%9Cstream%E2%80%9D-compressor/>
- [3] EKOTEZ. *Bezpečnostní list: Chladivo R404A*. Praha, 2010. Dostupné z: http://www.ekotez.cz/_data_app_downloads/Chladivo%20R404A.pdf?PHPS ESSID=c
- [4] LOMBARDI, Sylvie a Philippe PONCET. Metallurgical principles of Nitinol and its use in interventional devices. *Controversies and Consensus in Imaging and Intervention* [online]. 2004, Autumn 2004 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://c2i2.digithalamus.com/autumn2004/Metallurgical_principles_of_Nitino l.asp
- [5] FUGAZZA, Davide. *Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: Mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations* [online]. Pavia, September 2003 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www-2.unipv.it/compmech/dissertations/fugazzamsc.pdf>. Diplomová práce. Università degli Studi di Pavia. Vedoucí práce prof. Ferdinando Auricchio.
- [6] HODGSON, Darel E., Ming H. WU a Robert J. BIERMANN. Shape Memory Alloys. In: COMMITTEE, Prepared under the direction of the ASM International Handbook. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990, s. 897-902. ISBN 9780871703781.
- [7] KNEISSEL, A.C. Microstructure and properties of NiTi and CuAlNi shape memory alloys. In: *Metalurgija: časopis Fakulteta, instituta i željezare Sisak* [online]. [cit. 2013-05-10]. ISSN 0543-5846. Dostupné z: <http://www.metalurgija.org.rs/mjom/vol14/No%202/2KNEISSEL.pdf>
- [8] ANDREASEN, George F. *Method and System for Orthodontic Moving of Teeth* [patent]. USA. Patent, US4037324A. Uděleno 26.7.1977.
- [9] FUGAZZA, Davide. *Use of Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Advanced Constitutive Modelling and Structural Applications*. Pavia, August 2005. Dostupné z: <http://www-2.unipv.it/compmech/dissertations/fugazzaphd.pdf>. Disertační práce. Università degli Studi di Pavia. Vedoucí práce prof. Ferdinando Auricchio.
- [10] AEROFIT. *Shape Memory Alloy (SMA) Fluid Fitting System: Product Handbook & Engineering Data*. Fullerton, 2009. Dostupné z: www.aerofit.com/assets/SMABook11-08.pdf
- [11] AEROFIT. *Aerofit, Inc.: The Fitting Choice* [online]. c 2012 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.aerofit.com/>
- [12] TINi AEROSPACE. *TiNi Aerospace, Inc.* [online]. c 2012 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.tiniaerospace.com/index.html>

- [13] VERNET. *Thermostatic elements*. Ollainville, 01/2006. Dostupné z: <http://www.vernet.fr/site/GB/Document.htm?document=media/Elements-UK.pdf>
- [14] Thermal Actuators. ROSTRA VERNATHERM. *Thermal Actuators, Solar Hot Water Freeze Protection Valves, Oil Valves, Pressure Relief Valves, Thermal Controls - Rostra Vernatherm* [online]. c 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.vernatherm.com/thermal-actuators.htm>
- [15] TheSamba.com :: View topic - How does the new Brazilian thermostat function?. *German Supply - Parts for Volkswagen® Cars - Home* [online]. c 2004 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.thesamba.com/vw/forum/viewtopic.php?t=102897>
- [16] BELHÁČ, Jakub. *Optimalizace pohybu termoelektrického lineárního aktuátoru*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Pavel Maliňák.
- [17] VERNET. *VERNET SA* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.vernet.fr/site/page_922.htm
- [18] GUSTAV WAHLER. *Thermostats*. Esslingen, 2008. Dostupné z: http://www.wahler.de/fileadmin/wahler/Dokumente/pdf_kataloge/Thermostat_broschuere_en.pdf
- [19] PARAMELT. *Dilavest Thermostat Waxes*. Heerhugowaard, 2012. Dostupné z: http://www.paramelt.com/files/Pdf/dilavest/Dilavest%20product%20leaflet%202012_03.pdf
- [20] Synthetic Wax. INDUSTRIAL RAW MATERIALS LLC. *Supply and Demand For Wax in the USA* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.irmwax.com/Wax/PhaseChangeWaxes/index.asp>
- [21] Thermostat. *The Web's Where You Study In!* [online]. c 2008 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.ustudy.in/node/4177>
- [22] OBARA, Richard A. COPELAND CORPORATION. *Compressor discharge valve retainer* [patent]. Evropa. patentový spis, EP1452736A1. Uděleno 1.9.2004.
- [23] Copeland Discus™ Digital Demonstration. *Youtube* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=2B7kX8RavcY>
- [24] KANTHAL. *Thermostatic Bimetal*. Hallstahammar, 2008. Dostupné z: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Thermostatic%20bimetal/Bimetal%20handbook%20ENG.pdf>
- [25] KANTHAL. *Thermostatic Bimetal Handbook*. Hallstahammar, 2008. Dostupné z: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Thermostatic%20bimetal/Bimetal%20handbook%20ENG.pdf>

- [26] On the selection of shape memory alloys for actuators. In: HUANG, W. *Materials in engineering*. Elsevier, February 2002, s. 11-19. ISSN 0261-3069. DOI: 10.1016/S0261-3069(01)00039-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306901000395>
- [27] 3M. *Automotive Structural Adhesives*. St. Paul, August 2004. Dostupné z: <http://www.konwert.com/upl/df/200810/44.pdf>
- [28] KIRPART. *Kirpart* [online]. c 2010 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://en.kirpart.com.tr/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**Seznam zkratk**

ECT	Emerson Climate Technologies
SMA	shape memory alloy
SME	shape memory effect
OWSME	one-way shape memory effect
TWSME	two-way shape memory effect
A_s	austenite start
A_f	austenite finish
M_s	martensite start
M_f	martensite finish
SGRT	suction gas return temperature
LT	low temperature
MT	medium temperature
COP	coefficient of performance
MKP	metoda konečných prvků
SADV	self adjustable discharge valve
PEEK	polyetherketon

Seznam veličin

η_V	-	volumetrická účinnost
η_i	-	isentropická účinnost
Φ_0	W	chladicí kapacita
COP	-	chladicí faktor
σ_c	-	kompresní poměr
$\dot{V}_d$	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	objemový průtok
y_2	mm	deformace dvou pružin
y_4	mm	deformace čtyř pružin
F	N	zátěžná síla
$F_{2,0}$	N	předpětí dvou pružin při uzavřeném ventilu
$F_{4,0}$	N	předpětí čtyř pružin při uzavřeném ventilu
$y_{2,0}$	mm	deformace dvou pružin v uzavřeném stavu
$y_{4,0}$	mm	deformace čtyř pružin v uzavřeném stavu
$y_{2,4}$	mm	deformace dvou pružin, při které dosahují síly $F_{4,0}$
y_A	mm	aktivní zdvih aktuátoru
$F_{2,\max}$	N	síla dvou pružin při úplném stlačení
$y_{2,\max}$	mm	maximální možné stlačení dvou pružin
s	mm	tloušťka pásku
α	K^{-1}	specifický průhyb
ΔT	K	rozdíl teploty
L	mm	délka bimetalu

A	mm	průhyb bimetalu
b	mm	šířka pásku
ΔF	N	síla bimetalu
E	MPa	modul pružnosti
T_A	-	podíl změny teploty, který způsobuje průhyb
T_F	-	podíl změny teploty, který vyvozuje sílu

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1–1 Řez šestiválcovým kompresorem řady Stream [2].....	11
Obr. 1–2 Krystalické struktury paměťových slitin [4]	13
Obr. 1–3 Deformace obrouček brýlí a jejich návrat do původního tvaru [9]	16
Obr. 1–4 CryoFit [11]	17
Obr. 1–5 Voskový aktuátor typu flat diaphragm [14].....	18
Obr. 1–6 Voskový aktuátor typu squeeze-push, používaný v termostatech spalovacích motorů [15].....	19
Obr. 1–7 Automobilový termostat [21].....	20
Obr. 2–1 Průběh isoentropické účinnosti a výtlačné teploty v závislosti na tlakovém poměru (zdroj: ECT).....	22
Obr. 2–2 Systém Discus při sání (vlevo) a výtlačku [23]	23
Obr. 2–3 Původní ventilová deska, konfigurace LT	24
Obr. 2–4 Retainer [22].....	25
Obr. 2–5 Model pružiny pro simulaci v MKP	26
Obr. 2–6 Měřicí soustava	27
Obr. 2–7 Měřicí aparatura (zdroj: ECT)	28
Obr. 3–1 Schéma bimetalu ve funkci lineárního aktuátoru	31
Obr. 3–2 Zatížení bimetalu [25].....	32
Obr. 3–3 Schéma jednoduchého aktuátoru založeného na zkracování SMA drátu [26]	33
Obr. 4–1 Výtlačný ventil. Vpravo pohyb dorazu za vyšších teplot.....	35
Obr. 4–2 Upravený retainer	36
Obr. 4–3 Posuvný doraz.....	36
Obr. 4–4 Držák aktuátoru	37
Obr. 4–5 Voskový aktuátor Kirpart 306.031.40.02.....	38
Obr. 4–6 Usazování sestavy ventilu pomocí montážního přípravku (zdroj: ECT)	39
Obr. 4–7 Rozměry testovaného kompresoru (zdroj: ECT)	40
Obr. 4–8 Srovnání hodnot upraveného (SADV) a původního (std) kompresoru. Hodnoty jsou v (%) referenčního stroje (zdroj: ECT).....	41
Obr. 4–9 Srovnání isoentropické a volumetrické účinnosti obou variant (zdroj: ECT).....	42
Obr. 4–10 Stav aktuátorů po zkoušce	42
Obr. 4–11 Úprava ventilu vložení válečku	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 1–1 Mechanické vlastnosti komerčně dostupných slitin [6]	15
Tab. 4–1 Parametry testovaného kompresoru (zdroj: ECT)	40

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresy

01-000 Výtlačný ventil

01-005 Retainer

01-007 Posuvný doraz

01-008 Držák

01-012 Pojistná matice

01-013 Pojistná matice

03-000 Výtlačný ventil - úprava

01-016 Váleček

01-017 Posuvný doraz - úprava

Ostatní

Výkres aktuátoru Kirpart 306.031.40.02

Aktuátor 395.031.40.02 – křivka závislosti zdvihu na teplotě