

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Přírodovědecká fakulta**

**Návrh šroubového spoje lambda sondy  
do vysokoteplotní aplikace**

Bakalářská práce

**Marek Valenta**

Školitel: doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Pavel Tichánek

České Budějovice 2021

## **Bibliografické údaje:**

Valenta, M., 2021: Návrh šroubového spoje lambda sondy do vysokoteplotní aplikace [Design of lambda probe screw connection into high temperature application. Bc. Thesis, in Czech] – 54 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

## **Annotation:**

This bachelor's thesis deals with the design of a lambda probe screw connection to fulfil emission standards. The work describes the function of a lambda probe in the automotive industry, including description of their most frequently used types. The work includes description of measuring methods of leaks. The practical output of the work proposes the screw design to eliminate emission leak breaking the standards.

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 12.4.2021

  
.....  
Marek Valenta



Přírodovědecká  
fakulta  
Faculty  
of Science

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

Opatření proděkana pro studium P5, příloha 2

## ODŮVODNĚNÍ VYPUŠTĚNÍ NĚKTERÝCH ČÁSTÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bakalářská práce studenta Marka Valenty s názvem Návrh šroubového spoje lambda sondy do vysokoteplotní aplikace, vedená doc. RNDr. Vítězslav Straňákem, Ph.D., byla vypracována ve společnosti Robert Bosch, s.r.o. České Budějovice v rámci společného studijního programu Mechatronika, realizovaného podle Dohody o společné akreditaci a vzájemné spolupráci při zajišťování bakalářského studijního programu Mechatronika a dále v souladu s čl.2, ods.5 Dohody o vzájemné spolupráci při uskutečňování bakalářského studijního programu Mechatronika. Práce se zabývá řešením problému z vývojové praxe společnosti Robert Bosch, s.r.o. a z tohoto důvodu obsahuje utajované skutečnosti. Tyto skutečnosti jsou obsaženy pouze v plné verzi práce, která je archivována Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích a není veřejně dostupná.

V Českých Budějovicích dne 12. 04. 2021

Student: Marek Valenta

podpis:

Vedoucí práce: doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.

podpis:

**Poděkování:**

Chci poděkovat panu Ing. Pavlu Tichánkovi za poskytnuté materiály a konzultace k problematice, panu Ing. Janu Kanavalovi, Ph.D. za trpělivost a odbornou pomoc při řešení návrhu šroubového spoje a panu doc. RNDr. Vítězslavu Straňákovi, Ph.D. za vedení práce z pohledu splnění podmínek odbornosti textu a úprav.

# OBSAH

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| <b>1.</b> | <b>Úvod.....</b>   | <b>1</b>                               |
| <b>2.</b> | <b>Cíle práce .....</b>  | <b>2</b>                               |
| <b>3.</b> | <b>Lambda sonda .....</b>  | <b>3</b>                               |
| 3.1.      | Historie .....   | 3                                      |
| 3.2.      | Funkce lambda sondy.....   | 3                                      |
| 3.3.      | Dvoubodová (skoková) lambda sonda .....                              | 6                                      |
| 3.4.      | Planární širokopásmová lambda sonda.....                             | 6                                      |
| <b>4.</b> | <b>Materiálové vlastnosti železa .....</b>                           | <b>8</b>                               |
| 4.1.      | Legování oceli .....   | 9                                      |
| 4.2.      | Feritická ocel.....  | 11                                     |
| 4.3.      | Austenitická ocel .....  | 11                                     |
| <b>5.</b> | <b>Šroubové spoje.....</b>   | <b>13</b>                              |
| 5.1.      | Závity .....   | 13                                     |
| 5.2.      | Materiály šroubů a matic .....                                       | 15                                     |
| 5.3.      | Síly působící na šroubový spoj.....                                  | 15                                     |
| 5.4.      | Pevnostní kontrola šroubu .....                                      | 17                                     |
| 5.4.1.    | Pevnostní kontrola předepjatého spoje .....                          | 18                                     |
| 5.5.      | Realizace momentů v předepjatém šroubovém spoji.....                 | 21                                     |
| 5.6.      | Realizace sil v teplotně namáhaném předepjatém šroubovém spoji ..... | 22                                     |
| 5.7.      | Odvození předepjaté síly v teplotně zatíženém šroubovém spoji .....  | 23                                     |
| <b>6.</b> | <b>Šroubový spoj lambda sondy .....</b>                              | <b>25</b>                              |
| <b>7.</b> | <b>Měření těsnosti šroubového spoje lambda sondy .....</b>           | <b>28</b>                              |
| 7.1.      | Bubble-leak test.....  | <b>Chyba! Záložka není definována.</b> |
| 7.2.      | Schreiner-leak test.....   | <b>Chyba! Záložka není definována.</b> |
| <b>8.</b> | <b>Výpočet šroubového spoje .....</b>                                | <b>42</b>                              |
| 8.1.      | Předepjatá síla .....  | 44                                     |
| 8.2.      | Utahovací síla matice .....  | 44                                     |
| 8.3.      | Výpočet tuhostí .....  | 45                                     |
| 8.4.      | Výpočet bezpečnosti .....  | 47                                     |
| 8.5.      | Teplotní namáhání šroubového spoje.....                              | 47                                     |
| 8.6.      | Prodloužení příruby a šroubu od teplotního zatížení.....             | 48                                     |
| 8.7.      | Pevnostní kontrola při vlivu teploty .....                           | 48                                     |
| 8.8.      | Výběr materiálu příruby .....  | 50                                     |
| 8.9.      | Tuhost příruby nového řešení .....                                   | 50                                     |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 8.10.      | Předejzatá síla nového řešení po zahřátí .....           | 51        |
| 8.11.      | Prodloužení příruby od teplotního zatížení .....         | 51        |
| 8.12.      | Pevnostní kontrola při vlivu teploty nového řešení ..... | 51        |
| 8.13.      | Další možné návrhy .....                                 | 52        |
| <b>9.</b>  | <b>Závěr.....</b>  | <b>53</b> |
| <b>10.</b> | <b>Literatura a použité zdroje.....</b>                  | <b>54</b> |

## Seznam použitých veličin

| Značení     | Název   | Jednotka |
|-------------|---|----------|
| $\alpha$    | Mez kluzu materiálu šroubu                          | [°]      |
| $\alpha_1$  | Úhel svírající smykové napětí s hlavním napětím     | [°]      |
| $\psi$      | Úhel stoupání                                       | [°]      |
| $\varphi$   | Třecí úhel  | [°]      |
| $\varphi'$  | Třecí úhel v závitu                                 | [°]      |
| $M_u$       | Utahovací moment                                    | [N·mm]   |
| $M_{tm}$    | Moment tření na matici                              | [N·mm]   |
| $M_{tz}$    | Moment tření na závitu                              | [N·mm]   |
| $M_k$       | Kroutící moment                                     | [N·mm]   |
| $s_K$       | Průměr šestihranu šroubu                            | [mm]     |
| $D_o$       | Průměr otvoru v přírubě                             | [mm]     |
| $d_2$       | Střední průměr závitu                               | [mm]     |
| $d_3$       | Průměr jádra  | [mm]     |
| $d_4$       | Průměr otvoru ve šroubu                             | [mm]     |
| $l_s$       | Délka šroubu se závitem                             | [mm]     |
| $l_{př}$    | Délka příruby                                       | [mm]     |
| $l_{přdef}$ | Délka příruby po deformaci (montáži)                | [mm]     |
| $l_1$       | Délka 2/3 deformace hlavy šroubu                    | [mm]     |
| $l_2$       | Délka drážky šroubu                                 | [mm]     |
| $l_3$       | Délka 1/2 deformace matice                          | [mm]     |
| $E_{př}$    | Modul pružnosti příruby 1.4512                      | [MPa]    |
| $E_s$       | Modul pružnosti šroubu 1.4104                       | [MPa]    |
| $E_{přt}$   | Modul pružnosti příruby 1.4512 při teplotě 700 [°C] | [MPa]    |
| $E_{st}$    | Modul pružnosti šroubu 1.4104 při teplotě 700 [°C]  | [MPa]    |
| $E_{př1}$   | Modul pružnosti příruby C276                        | [MPa]    |
| $E_{přt1}$  | Modul pružnosti příruby C276 při teplotě 700 [°C]   | [MPa]    |
| $f_z$       | Třecí součinitel                                    | [-]      |
| $f_m$       | Třecí součinitel mezi maticí a podložkou            | [-]      |
| $T_{max}$   | Maximální teplota                                   | [°C]     |
| $T_0$       | Pokojeová teplota                                   | [°C]     |
| $F_0$       | Předepjata síla                                     | [N]      |

|                  |   |                     |
|------------------|---|---------------------|
| $F_{0t}$         | Předepjata síla při teplotním namáhání                        | [N]                 |
| $F_z$            | Utahovací síla  | [N]                 |
| $c_s$            | Tuhost šroubu stávajícího řešení                              | [MPa]               |
| $c_{př}$         | Tuhost příruby stávajícího řešení                             | [MPa]               |
| $c_{př1}$        | Tuhost příruby nového řešení                                  | [MPa]               |
| $c_{st}$         | Tuhost šroubu stávajícího řešení při teplotě 700 [°C]         | [MPa]               |
| $c_{přt}$        | Tuhost příruby stávajícího řešení při teplotě 700 [°C]        | [MPa]               |
| $c_{přt1}$       | Tuhost příruby nového řešení při teplotě 700 [°C]             | [MPa]               |
| $k_s$            | Bezpečnost  | [-]                 |
| $k_{st}$         | Bezpečnost po teplotním zatížení stávajícího řešení           | [-]                 |
| $k_{st1}$        | Bezpečnost po teplotním zatížení nového řešení                | [-]                 |
| $\sigma_t$       | Tečné napětí  | [MPa]               |
| $\tau$           | Smykové napětí  | [MPa]               |
| $\sigma_{tt}$    | Tečné napětí po teplotním zatížení stávajícího řešení         | [MPa]               |
| $\tau_t$         | Smykové napětí po teplotním zatížení stávajícího řešení       | [MPa]               |
| $\sigma_{tt1}$   | Tečné napětí po teplotním zatížení nového řešení              | [MPa]               |
| $\tau_{t1}$      | Smykové napětí po teplotním zatížení nového řešení            | [MPa]               |
| $\alpha_s$       | Teplotní součinitel délkové roztažnosti šroubu                | [°C <sup>-1</sup> ] |
| $\alpha_{př}$    | Teplotní součinitel délkové roztažnosti příruby               | [°C <sup>-1</sup> ] |
| $\alpha_{př1}$   | Teplotní součinitel délkové roztažnosti příruby nového řešení | [°C <sup>-1</sup> ] |
| $R_e$            | Mez kluzu materiálu šroubu                                    | [MPa]               |
| $(Rp_{0,2})$     |   |                     |
| $R_{et}$         | Mez kluzu materiálu šroubu při teplotním namáhání             | [MPa]               |
| $(Rp_{0,2t})$    |   |                     |
| $T_{max}$        | Maximální teplota   | [°C]                |
| $T_0$            | Pokojová teplota  | [°C]                |
| $W_K$            | Modul průřezu v krutu   | [mm <sup>3</sup> ]  |
| $\lambda'_s$     | Prodloužení šroubu stávajícího řešení při teplotním namáhání  | [mm]                |
| $\lambda'_{př}$  | Prodloužení příruby stávajícího řešení při teplotním namáhání | [mm]                |
| $\lambda'_{s1}$  | Prodloužení šroubu nového řešení při teplotním namáhání       | [mm]                |
| $\lambda'_{př1}$ | Prodloužení příruby nového řešení při teplotním namáhání      | [mm]                |



# 1. Úvod

Již v začátcích první průmyslové revoluce se začaly projevovat dopady škodlivých plynů na jednotlivé aglomerace. Začalo přibývat škodlivého smogu a s tím spojené zdravotní komplikace obyvatel. S postupem času, v závislosti na přibývajícím industrializaci, se tato situace více prohlubovala a lidé začali zaznamenávat dopady na životní prostředí. Přibývajícím problémy a zhoršující se globální dopady, přiměly svět k zavedení emisních norem.

První emisní normy se zavedly v začátcích druhé poloviny 20. století v USA. S dalším vývojem se zpříšňovaly a s jistými úpravami se zaváděly v ostatních státech. V dnešní době jsou emisní normy neodmyslitelnou součástí našeho světa a zabývají se rozmanitým spektrem využitelnosti, od emisních norem pro automobilový průmysl, po emisní normy pro kotle, za účelem redukce emisí a zlepšení dopadů na ekologii prostředí.

Jeden z hlavních světových producentů výfukových plynů je automobilový průmysl. V průběhu vývoje a historie se začaly uplatňovat různorodé systémy, které měly za účel snížit emise z automobilů. V prvopočátcích se začal používat katalyzátor, který se poté doplňoval o další součásti napomáhající k lepší funkci výfukového systému. Mezi tyto úpravy patří např. NO<sub>x</sub> senzory, kapalné aditivum Adblue (přísady do paliva), speciální úpravy chodu motoru a také lambda sonda. Problematikou lambda sondy s ohledem na výfukový systém je i její netěsnost přes šroubový spoj, kde může docházet k únikům výfukových plynů při provozních tlacích, které mají za následek teoretický nárůst emisních zplodin a porušení norem, ačkoliv emisní legislativa dnes přesně nedefinuje netěsnosti ve spojích výfukového systému. Tato problematika je hlavní motivací předložené práce s cílem vyřešit a navrhnout optimální řešení konstrukce šroubového spoje lambda sondy ve výfukovém systému.

V teoretické části je čtenář obeznámen se základním popisem funkce lambda sondy, včetně popisu typů nejpoužívanějších lambda sond, funkčností, historií a jejím umístěním ve výfukovém systému automobilu. Dále se zaměřuje na obecnou teorii šroubových spojů.

V praktické části je vyhodnocena problematika úniku výfukových plynů přes šroubový spoj s ohledem na jednotlivé provozní tlaky. Na základě této analýzy je vypracován návrh nového designu a provedení šroubového spoje tak, aby došlo k potlačení nechtěného úniku výfukových plynů.

## 2. Cíle práce

- 1) Rešerše problematiky teplotně zatížených šroubových spojů
- 2) Nalezení řešení a výpočet šroubového spojení lambda sondy za účelem zmenšení úniků výfukových plynů.
- 3) Změření úniků stávajícího šroubového spoje lambda sondy pomocí měřících metod:
  - Bubble-leak test
  - Schreiner-leak test

## **3. Lambda sonda**

K detekci a snížení emisí v automobilovém průmyslu se používá velké množství systémů, které se liší podle typu motoru, montáže a způsobem implementace. Pro zážehový a vznětový motor se nejčastěji používají lambda sondy. Patří mezi detektory kyslíku, čímž ve zpětnovazebném řízení napomáhají k optimalizaci a vylepšení chodu motoru a výfukového systému.

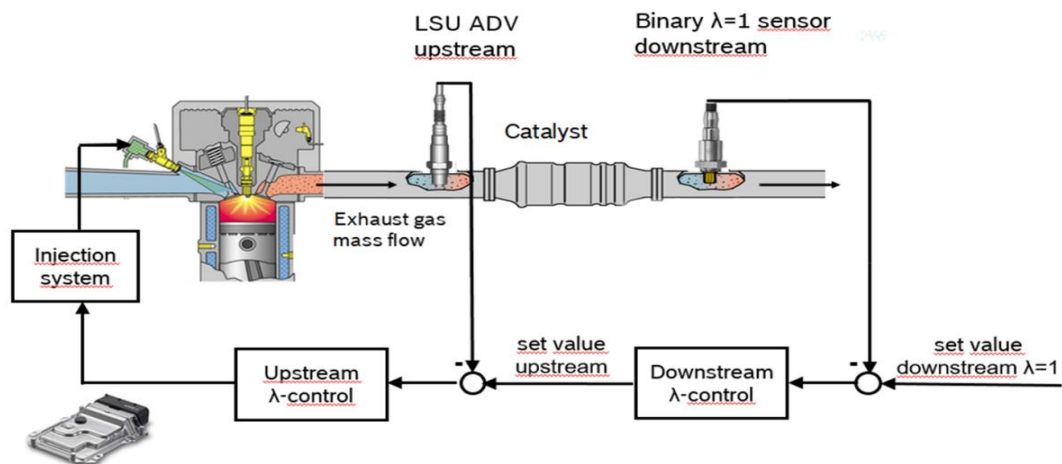
### **3.1. Historie**

Se začátkem industrializace a použití nových technologií výroby v 80. a 90 letech 20. století došlo ke snížení pořizovacích cen automobilů, které se staly dostupnější i v rozvojových zemích (např. Indie a Čína), čímž se v průběhu let začaly projevovat negativní dopady na životní prostředí a populaci [1]. Postupně byly za použití vědeckých postupů zajišťovány nedostatky motoru s ohledem na jeho nedokonalost spalování a vytváření škodlivých emisí. Přirozeně nastala otázka, jak těmto negativním jevům předejít se zachováním komfortu pro koncové spotřebitele. Prvním konceptem byl katalyzátor, který díky chemické katalytické reakci, redukoval množství toxických plynů jejich přeměnou na méně škodlivé složky. Katalyzátor se stal hlavní komponentou výfukového systému a vedl ke snížení emisí automobilů o téměř 50 % [2, 3]. Ovšem nastávající emisní normy, které se začaly vytvářet v 60. letech v Kalifornii, byly na tehdejší dobu tak přísné, že podnítily vývoj dalších komponentů, které pomohly ke snížení emisí. Jednou z mnoha vylepšení byla i lambda sonda. Vývoj prvního typu lambda sond probíhal v druhé polovině 70. let 20. století a hlavním motivem jejího vývoje, byla snaha o vylepšení funkce katalyzátoru a snížení emisí. Do dnešní doby není vývoj zcela ukončen a samotná sonda se průběžně vylepšuje v závislosti na vývoji trhu, konkurence, zpříšňování emisních norem a požadavků zákazníka.

### **3.2. Funkce lambda sondy**

Jedním z hlavních aspektů funkčnosti motoru je složení paliva, které se vstřikuje do motoru. Prvotně je nastaveno množství vzduchu motorem, kterému se pak přizpůsobuje dodané množství paliva, které se smísí se vzduchem a přes škrťací klapku se vhání do spalovacích válců. Způsob získávání informací pro řízení poměru palivové směsi, je založen na měření zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. K tomuto účelu slouží lambda sonda, která po změření posílá

informaci do řídicí jednotky motoru a ta následně upravuje poměr složení a množství směsi s ohledem na efektivitu [2].



Obr. 1: Příklad umístění lambda sondy ve výfukovém systému.

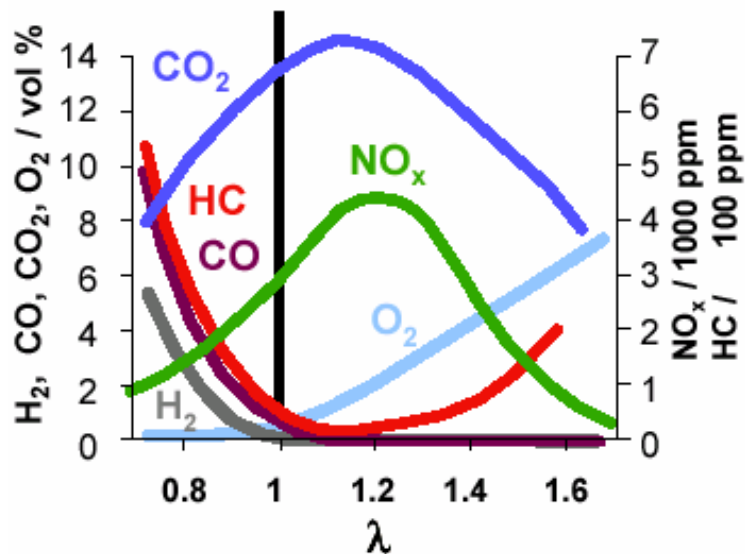
Plyn je vháněn do lambda sondy LSU ADV, poté do katalyzátoru a dále do lambda sondy, která kontroluje hodnotu  $\lambda = 1$ . Po změření tyto lambda sondy dají signál kontrolním jednotkám (Upstream a Downstream  $\lambda$ -control), které nastaví správnou hodnotu  $\lambda$  a informaci zašlou do řídicí jednotky vstřikovacího systému. (Převzato z interních zdrojů firmy)

Z obrázku 1. je patrné, že lambda sonda je jakýsi doplněk a součástka, která se zpravidla umísťuje před a v některých případech i za katalyzátor. Lambda sonda za katalyzátorem hlídá jeho správnou funkci, kdežto sonda před katalyzátorem zpracovává přímé informace o chodu motoru a jeho spalování. Hlavním parametrem je součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , který udává poměr hmotnosti vzduchu ve směsi vůči hmotnosti paliva [2]:

$$\lambda = \frac{(m_{\text{vzduch}}/m_{\text{palivo}})_{\text{skutečný}}}{(m_{\text{vzduch}}/m_{\text{palivo}})_{\text{stechiometrický}}} \quad (1)$$

Mohou nastat tři možnosti poměru součinitele  $\lambda$ . Jednotlivá množství škodlivých plynů vůči parametru  $\lambda$  jsou znázorněny na obr. 2. [2]:

- $\lambda = 1$ - tzv. stechiometrická směs, kompromis mezi chudší a obohacenou směsí,
- $\lambda > 1$ - obohacená směs, emise oxidu uhelnatého CO a uhlovodíku HC je nejnižší a je zde malé množství kyslíku,
- $\lambda < 1$ - chudá směs, emise oxidu dusíku  $\text{NO}_x$  bude nejnižší a je zde velké množství kyslíku [1].



Obr. 2: Tabulka součinitele  $\lambda$  vůči škodlivým plynům CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a HC. (Převzato z interních zdrojů firmy)

U všech snímačů plynů se setkáváme s problémem, který je nazýván „otrava“ sondy. Sonda se při měření bez ochrany může stát nepoužitelnou a to vede k jejímu trvalému poškození. Takovéto sondy nelze opravit a mění se za jiné kusy.

Měřicím elementem (Nernstův článek) lambda sondy je elektrochemický galvanický článek (elektrolyt- senzor viz obr. 3). Tento element představuje hlavní keramickou konstrukční součást sondy pro měření obsahu kyslíku z oxidu zirkoničitého, výjimečně z oxidu titaničitého. V dnešní době bývá vyroben z oxidu zirkoničitého dopovaným oxidem yttritým. Pro maximální odezvu sondy je zapotřebí, aby dosahovala vhodných provozních teplot (350 °C), kdy se ionty kyslíku stávají vodivými. Ionty kyslíku jsou při provozní teplotě schopny přeskokovat do volných děr, vytvořenými oxidem yttritým (podobné jako P polovodiče), čímž vzniká elektrické napětí, které indikuje signál pro řídicí jednotku. Teploty nesmí dosahovat kritických hodnot (850 °C), protože se tím zkracuje životnost sondy. Provozní teploty sondy je dosaženo elektronicky řízeným topným tělesem, které je přímo integrováno v měřicím elementu senzoru. Tento element je složen z keramických folií (oxidu zirkoničitého nebo titaničitého), které jsou vyrobeny přesnou sítotiskovou technologií, a tím umožňují zakomponovat do keramického článku i vyhřívací těleso. Přesnější popis konstrukce lambda sondy je znázorněná na obr. 3. [2-4].

Sond existuje mnoho druhů, ale nejvíce používané moderní sondy jsou planární širokopásmové sondy a dvoubodové sondy. Tyto sondy se používají zvláště, anebo se vzájemnou kombinací [2-4].

„Následující pasáž o rozsahu 1. obrázku obsahuje utajované skutečnosti a je obsažena pouze v plné verzi práce, která je uložena na Přírodovědecké fakultě JU“.

### **3.3. Dvoubodová (skoková) lambda sonda**

Používají se u zážehových motorů s dvoubodovou regulací parametru  $\lambda$ , kdy informují, zda je ve spalínách chudá či bohatá směs. V případě bohaté směsi sonda vykazuje větší napětí, které je snímáno Nernstovým článkem. Materiál tohoto článku, jak již bylo zmíněno výše, je z oxidu zirkoničitého dopovaný oxidem yttritým, který je z jedné strany uzavřen a z druhé ovlivňován médiem plynu. Polarita na straně ovlivněné médiem je kladná a na straně referenčního vzduchu záporná. Povrch článku je konstruován s platinovými elektrodami, které slouží jako katalyzátor. Plyny z motoru jsou přiváděny přes malé otvory do sondy, která je umístěna přímo ve výfuku, zde se díky katalýze uvádí do stechiometrické hodnoty [2, 4].

### **3.4. Planární širokopásmová lambda sonda**

Širokopásmové sondy dokáží měřit s velikou přesností v každé hodnotě parametru lambda. Oproti dvoubodové lambda sondě mají výhodu určení přesné hodnoty, kterou nemusí měřit jen při stechiometrickém poměru. Elektrolyticky jsou podobné dvoubodové lambda sondě, ovšem s nově integrovaným druhým elektrochemickým článkem. K původnímu Nernstovu článku je přidán přečerpávající článek sloužící k přečerpávání iontů kyslíku. Tyto dva články tvoří mezi sebou měřící prostor neboli difuzní kanálek. Po zavedení napětí na platinové elektrody, se začnou přečerpávat spaliny do difuzního kanálku nebo zpět a zde Nernstův článek začne regulovat toto napětí tak, aby v kanálku byl konstantní parametr  $\lambda$  se stechiometrickou hodnotou ( $\lambda=1$ ) a tudíž nemusel vhnět další kyslík. Pokud je směs chudá,

Nernstův článek se snaží čerpat kyslík zpět z difuzního kanálku, v rámci bohaté směsi je tomu naopak [2-4].

K osazení lambda sondy do výfukového systému patří také neodmyslitelná konstrukční část, a tím je šroubový spoj, který potřebuje splňovat specifické požadavky z pohledu materiálu i konstrukce.

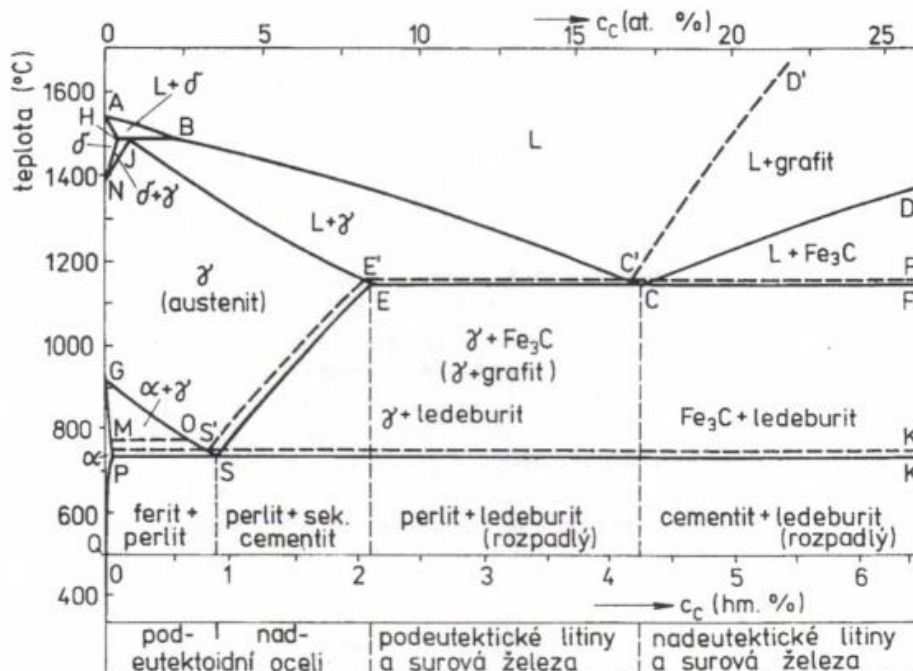
## 4. Materiálové vlastnosti železa

U šroubového spoje lambda sondy se setkáváme s materiálovými kombinacemi nerezových ocelí. Volba materiálu je důležitá z pohledu konstrukce, chování šroubového spojení při vyšších teplotách a jeho korozivzdorných vlastnostech.

Čisté železo je jeden z nejvíce celosvětově produkovaných kovových materiálů. V chemické tabulce prvků se značí Fe a jeho teplota tání je 1536 °C. V závislosti na teplotě se vyskytuje ve čtyřech modifikacích [5, 6]:

- $\alpha$ - stabilní fáze modifikace do 912 °C s krystalovou mřížkou prostorově středěnou, tato modifikace je magnetická jen do teploty 760 °C,
- $\beta$ - nemagnetická fáze modifikace  $\alpha$  nad 760 °C s krystalovou mřížkou prostorově středěnou,
- $\gamma$ - fáze stabilní mezi teplotami 912 - 1392 °C s krychlovou mřížkou plošně středěnou,
- $\delta$ - fáze nad 1392 °C až do teploty tavení 1536 °C nabývá znovu krystalovou mřížku prostorově středěnou.

Jelikož čisté železo je tvárné, měkké, má malou pevnost a menší mez kluzu (hodnota napětí, při kterém se materiál začne trvale deformovat), ke zlepšení jeho mechanických vlastností se přidává do jeho obsahu uhlík [5, 6].



Obr. 4.: Metastabilní diagram soustavy Fe- Fe<sub>3</sub>C.  
 $\alpha$ -ferit,  $\gamma$ - austenit,  $\delta$ - delta ferit, L- tavenina. Zdroj:[5]



|       | Teploty bodů a čar ve °C |          | Koncentrace bodů v % C |                  |
|-------|--------------------------|----------|------------------------|------------------|
|       | Soustava                 |          | Soustava               |                  |
|       | metastabilní             | stabilní | metastabilní           | stabilní         |
| A     | 1 538                    |          | A                      | 0,00             |
| H-J-B | 1 495                    |          | H                      | 0,10             |
| N     | 1 394                    |          | J                      | 0,16             |
| E-C-F | 1 147                    | 1 154    | B                      | 0,51             |
| G     | 912                      |          | E                      | 2,08             |
| M-O   | 770                      |          | C                      | 4,30             |
| P-S-K | 727                      | 738      | F                      | 6,89             |
| D     | 1 227                    |          | S                      | 0,77             |
|       |                          |          | P                      | 0,02             |
|       |                          |          | Q                      | 10 <sup>-7</sup> |
|       |                          |          |                        | není stanoven    |
|       |                          |          |                        | 4,26             |
|       |                          |          |                        | 0,69             |
|       |                          |          |                        | 0,018            |

Obr. 5.: Konkrétní tabulka teplot a koncentrací uhlíku v diagramu Fe- Fe<sub>3</sub>C na obrázku 4.  
Zdroj:[5]

Uhlík se při nižších koncentracích rozpouští, ale při vyšších koncentracích překročí svojí rozpustnost a vytvoří sloučeninu karbidu železa Fe<sub>3</sub>C, která není termodynamicky stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Při specifických termodynamických podmínkách může nastat chemické vyloučení uhlíku ve formě grafitu. Tato fáze je na rozdíl od předešlé stabilní. Nejdůležitější fází u slitin železa je tzv. metastabilní soustava Fe-Fe<sub>3</sub>C, uvedená na obrázku 4., podle které chladnou oceli a s tím související obr. 5., který znázorňuje konkrétní teploty metastabilního diagramu [5, 6].

#### 4.1. Legování oceli

I přes užitečné vlastnosti příměsi uhlíku, se používají další metody ke zlepšení vlastností oceli. Jedním z nich je metoda legování. Legování je v principu přidávání kovových nebo nekovových prvků do oceli, tzv. legur.

Legující prvky se používají [6]:

- ke zlepšení mechanických vlastností- mangan, nikl, chrom, křemík, vanad, wolfram a molybden,
- ke zlepšení prokalitelnosti (ohřev oceli na tzv. kalící teplotu, následné ochlazení za účelem zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností)- vanad, molybden, chrom, mangan,
- ke zlepšení odolnosti proti opotřebení- wolfram, molybden, vanad, chrom,
- proti oxidaci- křemík, hliník, chrom,
- ke zvýšení žáruvzdornosti- molybden, wolfram, vanad, chrom,

- ke zvýšení korozivzdornosti v agresivním prostředí- nikl, molybden, měď, křemík chrom.

Rozpustnost legujících prvků závisí na umístění daného prvku v periodické tabulce prvků, jeho atomového poloměru a také na krystalové mřížce. Důležitou součástí každého procesu výroby oceli je nutnost počítat s tzv. doprovodnými prvky, které se vytváří při samotné výrobě slitin železa ve vysoké peci. Některé z těchto prvků se využívají i jako legury. Tyto se dělí na [6, 7]:

- škodlivé- nečistoty, kyslík, dusík, síra, fosfor, vodík,
- prospěšné- slouží k odstranění nečistot- křemík, mangan, hliník.

Kyslík je důležitým prvkem při výrobě slitin železa. Po deoxidačních procesech, které slouží k přesnému stanovení procenta kyslíku ve slitině, jich zde zůstává malé množství, které už při koncentraci 0,01 % mění mechanické vlastnosti oceli (zvýšení křehkosti a tvrdosti) [6, 7].

Dusík se vyskytuje v ocelích v maximálním množství 0,02 % a vniká do slitiny železa z prostředí pece. Jeho přítomnost zapříčiňuje tzv. stárnutí oceli, což se vyznačuje snížením plasticity a zvýšením pevnosti, tvrdosti a meze kluzu [6, 7].

Síra se vyznačuje jako prvek s nízkou teplotou tavení, která je 985 °C, a proto snižuje slitinám železa jejich tvárnost. U oceli se vyskytuje maximálně do 0,07 %. Mimo to snižuje schopnosti svařitelnosti, korozní odolnosti a mechanické vlastnosti při dynamickém namáhání.

Fosfor negativně ovlivňuje svařitelnost a křehkost feritu. U slitin se vyskytuje do 0,04 % a dostává se zde díky vsázkám. Zatímco u litin se vyskytuje do 0,5 % a má pozitivní vliv na tvrdost, tekutost a celkovou odolnost [6, 7].

Vodík snižuje mechanické vlastnosti a to především pevnost a tažnost už při menším množství ( $2 \cdot 10^{-4}$  %). V oceli se vyskytuje díky vodním páráům, které vznikají ve vysoké peci. Metan  $CH_4$ , který je sloučeninou vodíku, může zapříčinit tzv. vodíkovou korozi a tím také snížit mechanické vlastnosti. Vodík můžeme odstranit žiháním, anebo snížením tlaku pro odlévání [6, 7].

Křemík patří ke skupině prvků, které mají kladný vliv na celkový výsledek výroby. Používá se také v hojném množství v ocelích pro elektrotechniku, kde se vyskytuje v rozmezí 2,5 - 4,5 % a zlepšuje elektrické vlastnosti. V obyčejných ocelích se vyskytuje maximálně do 1,5 %. Zvyšuje pevnost a tvrdost, odolnost proti oxidaci a při vyšším množství i korozivzdornost způsobenou kyselinami. Jeho rozpustnost je definována v oblasti austenitu a feritu [6, 7].

Mangan je nejvíce rozšířeným prvkem objevujícím se v ocelích a to od 0,1 do 0,8 %. Toto procento se může lišit u nízkoaliovaných a austenitických ocelí. Slouží ke zlepšení tvárnosti a tudíž snížení obsahu síry. Dále slouží ke zlepšení součinitele tepelné roztažnosti, mechanických vlastností jako je mez pevnosti a kluzu [6, 7].

Chrom je především známý svojí korozivzdorností, která umožňuje používat jednotlivé druhy ocelí v teplotně namáhaných aplikacích. Nanáší se na povrch oceli [6].

## 4.2. Feritická ocel

Z obrázku 4. je patrné, že v modifikaci železa  $\alpha$  je maximální rozpustnost uhlíku do 0,02 % při maximální teplotě 727 °C. Příčinou této teplotní a uhlíkové kombinace se vytvoří intersticiální tuhý roztok uhlíku s kubickou prostorově středěnou mřížkou, nazývaný také ferit. Dále se ferit vyskytuje v  $\delta$  fázi, která je stabilní v teplotách 1392 - 1536 °C a obsahuje maximálně 0,1 % uhlíku. V této oceli se nejlépe rozpouští prvky s prostorově středěnou mřížkou [6].

Feritické oceli obsahují přibližně 11,5 - 30 % legujícího prvku chromu a řadí se tak mezi korozivzdorné oceli. Podle obsahu chromu se dělí do tří skupin [8]:

- 16 - 18 % Cr- tyto oceli se dále legují molybdenem Mo, anebo titanem Ti, čímž zvyšujeme jejich korozivzdornost (obsah uhlíku C nepřesahuje 0,08 %),
- 11,5 - 13,5 % Cr- má obsah uhlíku C 0,08%, legují se titanem Ti, ale také niobem Ni a hliníkem Al,
- 20 - 30 % Cr- korozivzdorní skupina feritických ocelí s obsahem uhlíku C v rozmezí 0,02 - 0,2 %, dále se leguje molybdenem Mo od 0,5 do 4 %, bohužel vysoká korozivzdornost nese sebou i nevýhody jejich křehnutí při větších teplotách.

Obecně se feritické oceli vyznačují horší obrobiteľností, při vyšších teplotách začínají křehnout (900 °C) a při teplotách v rozmezí 350 - 500 °C ztrácí houževnatost a tažnost. Jsou však dobře ohybatelné a tvárné. Používají se ve výrobě nábytku, automobilovém průmyslu, ve vzduchotechnice, potravinářském průmyslu, výrobě kuchyňských potřeb atd. [8].

## 4.3. Austenitická ocel

Austenit je intersticiální tuhý roztok uhlíku s kubickou, plošně středěnou mřížkou, vznikající v modifikaci železa  $\gamma$ . Tato modifikace je charakterizována největší rozpustností

uhlíku v diagramu železo-uhlík a to od 0,8 % do 2,11 %. Teplota, při které vzniká, je v rozmezích 727 - 1147 °C, kdy se rozpouští prvky s kubickou, plošně středěnou mřížkou [6].

Zajímavou ocelí, která vznikne přechlazením (kalením), kdy se již neuskutečňuje difúze, je martenzit tzv. nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku. Chemické sloužení zůstává stejné, ale mění se mřížka na prostorově středěnou. Oproti austenitu je martenzit více tvrdý i přes to, že má stejné složení uhlíku. Důvodem je vznik martenzitických krystalů v každém austenitickém zrna [6].

Austenit se vyznačují se vysokou houževnatostí, dobrou tažností a svařitelností, ale menší mezí kluzu (230 - 300 MPa). Ve srovnání s feritickými oceli je více korozivzdorný především u mezikrystalové, bodové a štěrbinové korozi. Jeho obsah chromu Cr se pohybuje mezi 16 až 22%, dále se leguje niklem Ni (8 - 40 %) a molybdenem Mo (0 - 5 %) [8].

## 5. Šroubové spoje

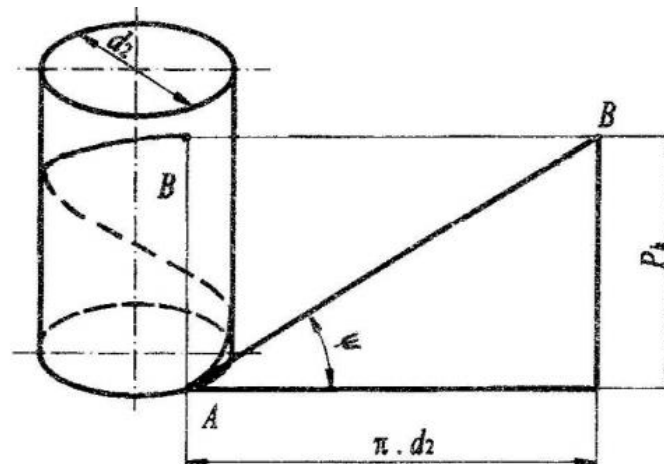
Pro úplný konstrukční návrh šroubového spoje lambda sondy se musí zohlednit i mechanická stránka návrhu, která je důležitá z pohledu aplikovatelnosti řešení. Mechanický návrh umožní více nahlédnout do chování šroubového spoje lambda sondy v určitých situacích namáhání.

Šroubové spoje jsou nejpoužívanější napříč velkým spektrem oborů. Patří ke spojům rozebíratelným a vyznačují se dobrou manipulací při montáži a demontáži. Šroubový spoj se skládá ze samostatného šroubu a šroubové plochy (závitu). Spoj je charakterizován spolehlivostí, jednoduchostí, pevností a dobrým sevřením daných součástí. Mezi jejich zápory se uvádí zvýšení hmotnosti a zeslabení materiálu nezbytnou konstrukcí. Dále jsou citlivé na chvění, které snižuje jejich utahovací moment. Šroubové spoje se dělí na [9, 10]:

- spojovací- pro spojení součástí,
- pohyblivé- ke změně otáčivého pohybu na posuvný pohyb a naopak,
- speciální typy- např. rozpěrací, základové a stavěcí šrouby.

### 5.1. Závit

Závit je hlavní konstrukční součást šroubového spoje, jeho významným prvkem je šroubovice. Šroubovici si lze představit jako navinutí pravoúhlého trojúhelníku na rotačně symetrický válec. Vyrábějí se závit vnitřní a vnější a to obráběním pomocí závitníků, frézováním, soustružením, elektroerozí, anebo závitovými čelistmi. Druhý způsob výroby je tvářením (válcováním). U šroubovice můžeme určit její úhel stoupaní  $\psi$ , který se odvodí za pomoci goniometrických vztahů viz obr. 6. [9, 10, 13].



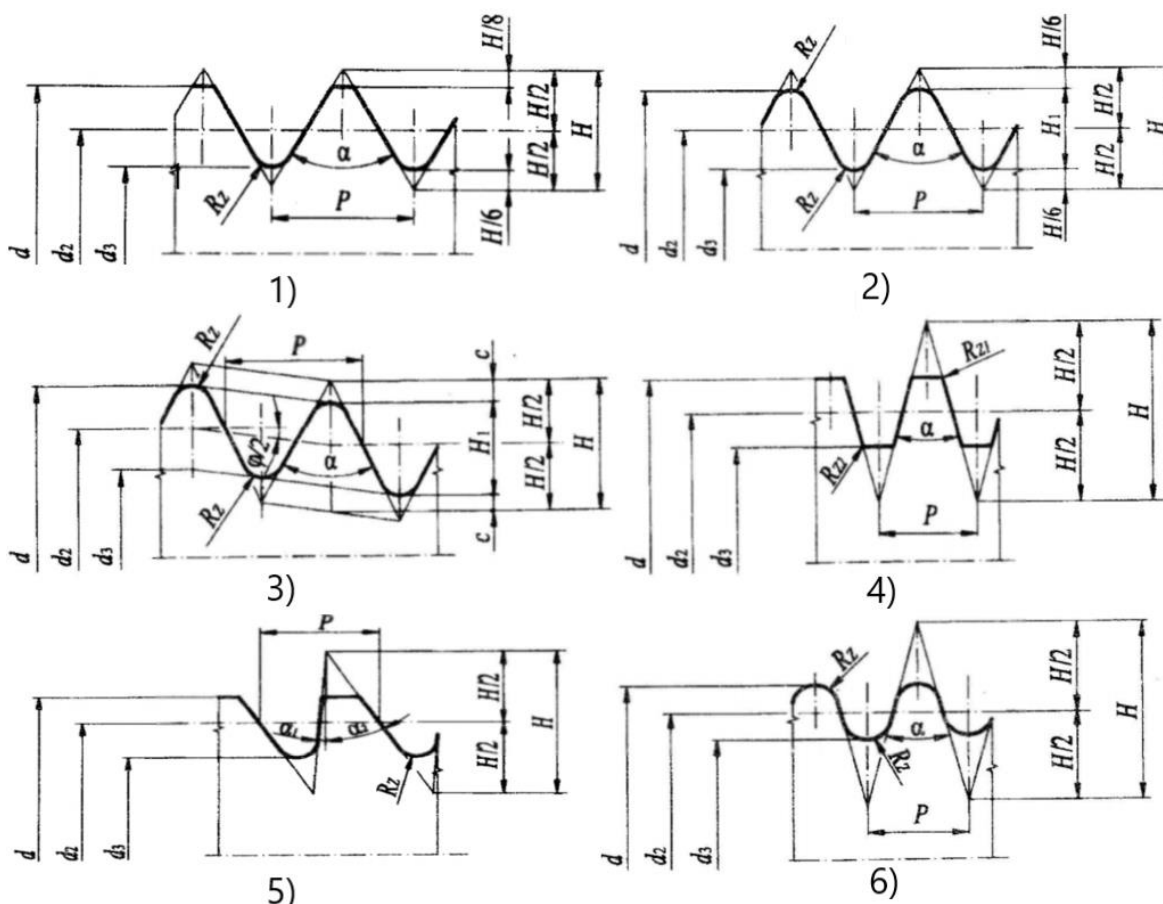
Obr. 6.: Válec se šroubovicí a pravoúhlým trojúhelníkem. Zdroj: [9]

Vztah je dán geometrickými parametry stoupání závitu  $P_h$ , středního průměru závitu  $d_2$  a již zmíněného úhlu stoupání  $\psi$  [9,10]:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{P_h}{\pi \cdot d_2}. \quad (2)$$

Další rozdělení závitů je podle jejich profilů. Výběr tvaru je proměnlivý a používá se v závislosti na aplikaci viz obr. 7. [9]:

- plochý (čtverec, obdélník),
- ostrý (trojúhelník, lichoběžník),
- oblý.



Obr. 7.: Vybrané druhy tvarů závitů. 1) Metrický závit 2) Whitworthův závit 3) Trubkový závit 4) Lichoběžníkový rovnoramenný jednochodý závit 5) Lichoběžníkový nerovnoramenný závit 6) Oblý závit Zdroj: [9]

## 5.2. Materiály šroubů a matic

Pro šroubové spoje se vybírá materiál v závislosti na charakteru aplikace, s hlavním důrazem na jejich tažnost a mez kluzu. K výběru slouží tabulky, které se řídí normami podle lokality, kde se nachází zákazník, anebo podle jeho specifického požadavku. Pro konstrukci šroubů a matic se používají [9]:

- legované oceli ( $R_m = 800 - 1200$  MPa),
- ušlechtilé uhlíkové oceli,
- konstrukční oceli.

Na hlavě šroubu lze také nalézt dvojici číslic (např. 5.6.). První číslo značí mez pevnosti ( $5 = 500$  MPa) materiálu šroubu a druhé mez kluzu materiálu nebo procento meze kluzu z meze pevnosti, které se vynásobí deseti (druhé číslo 6 znamená 60 % z meze pevnosti prvního čísla). Matice se značí jedním číslem, který je totožný s prvním číslem značení šroubu [11].

## 5.3. Síly působící na šroubový spoj

V praxi na šroubový spoj působí mnoho různých sil, které vytvářejí např. silový moment působící v ose šroubu, příčně nebo kolmo na osu nebo silový moment působící v obecném směru. Nejdůležitější silou je předepjatá síla  $F_0$ . Tato síla svírá spojované součásti a příruby namáhá na tlak. Samotný šroub je namáhán tahem a krutem [9].

Mohou nastat dva případy montáže [9]:

- utahování matice (montáž),
- uvolňování matice (demontáž).

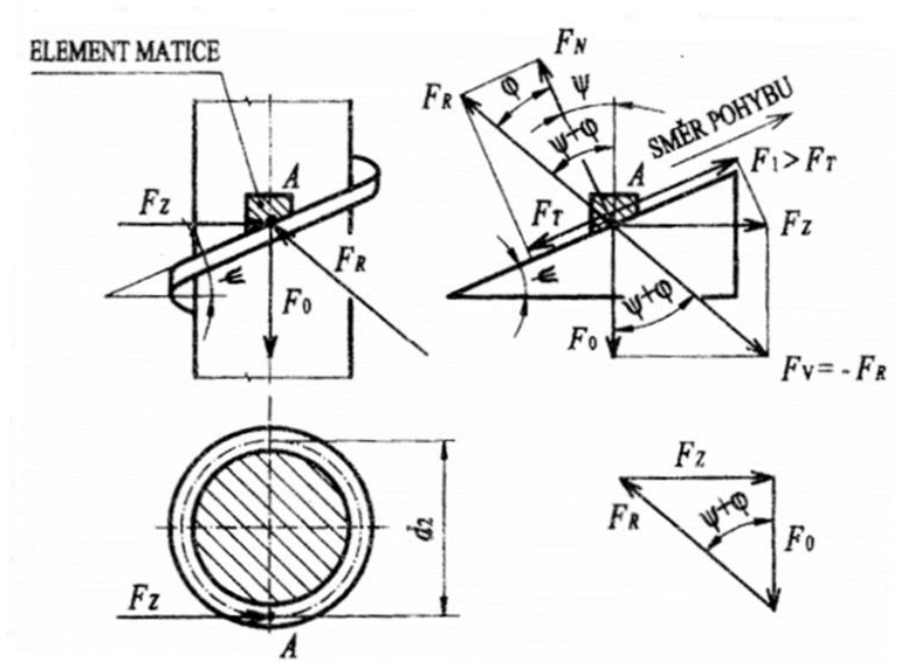
Síla pro utahení matice se může odvodit ze silového trojúhelníku viz obr. 8., který obsahuje síly působící na závit, včetně třecí síly  $F_T$ , normálové síly  $F_N$  a šikmé reakce  $F_R$ . Síla potřebná pro utahení je [9, 12]:

$$F_z = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi), \quad (3)$$

kde  $F_z$  značí utahovací sílu a třecí úhel  $\varphi$  pro plochý (čtvercový) závit, ten lze vypočítat z třecího součinitele  $f_z$  vztahem [9]:

$$\operatorname{tg}\varphi = f_z. \quad (4)$$

Třecí součinitel  $f_z$  se určuje experimentálně, anebo je také dostupný v tabulkách pro jednotlivé druhy závitů [9].



Obr. 8.: Odvození síly pro utahování matice (plochý závit). Zdroj:[8]

U uvolňování matic mohou nastat dva případy šroubu [9]:

- 1) nesamosvorný šroub,
- 2) samosvorný šroub.

### 1) Nesamosvorný šroub

Uvolnění po dané rovině probíhá pouze za pomoci síly vyvolané tíhou břemene. Odvození potřebné síly je obdobné jako u utahování matic a je dáno vztahem [9]:

$$F_z = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\psi - \varphi). \quad (5)$$

Zde si můžeme všimnout, že jediný rozdíl oproti vzorci (1) je v opačném znaménku funkce tangens a pro dané úhly platí  $\psi > \varphi$  [9].

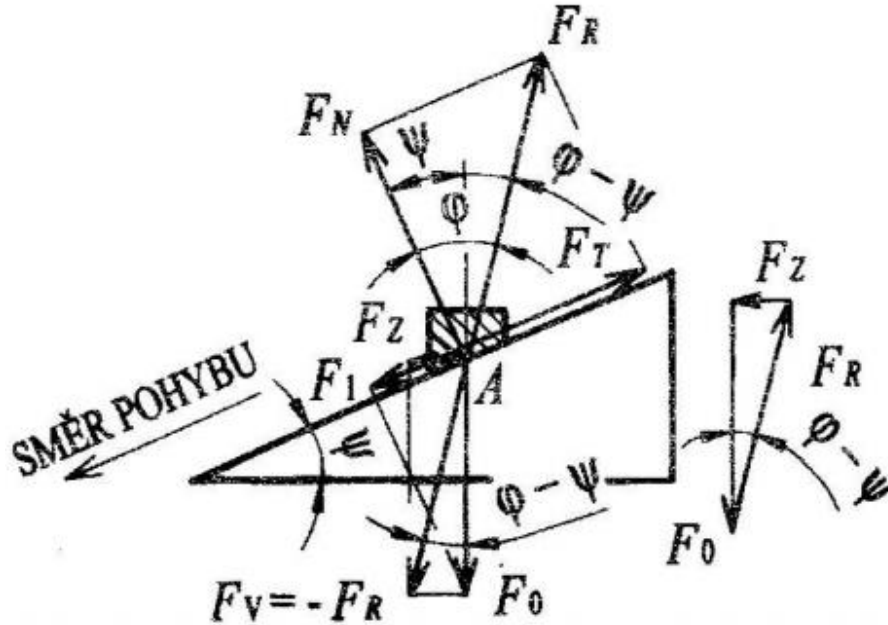
### 2) Samosvorný šroub

Nejčastější řešení, kdy se uvažuje, že matice se nebude uvolňovat silou vlastní tíhy a z toho vyplývá, že dané břemeno se nemůže samovolně pohnout. Proto platí, že úhel  $\psi < \varphi$ . Pro tento případ platí vztah [9, 13]:



$$F_z = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \psi). \quad (6)$$

Vztah se znovu odvodí ze silového trojúhelníku viz obr. 9.



Obr. 9.: Odvození síly samosvorného šroubu. Zdroj:[9]

### 2.1) Odvození samosvornosti

Z obr. 9. je patrné, že pro splnění samosvornosti, musí být z podmínky rovnováhy sil, hnací síla  $F_1$  menší než třecí síla  $F_T$  [9, 13]:

$$F_1 \leq F_T. \quad (7)$$

Dosažením za  $F_1$  a  $F_T$  dostaneme [9, 13]:

$$F_0 \cdot \sin \Psi \leq F_0 \cdot \cos \Psi \cdot f_z. \quad (8)$$

Převedením  $\cos \psi$  na druhou stranu rovnice a dosažením za  $f_z = \operatorname{tg} \varphi$  vyjde [9, 13]:

$$\operatorname{tg} \Psi \leq \operatorname{tg} \varphi. \quad (9)$$

## 5.4. Pevnostní kontrola šroubu

Pro správné určení pevnostních podmínek se musí nejdříve stanovit, namáhání spoje v dané aplikaci. Spoj může být namáhán:

- příčnou silou,
- silou působící ve směru osy šroubu.

Spoj může být namáhán provozní statickou silou působící v ose šroubu. Tato síla se ve výpočtu šroubového spoje lambda sondy zanedbává. Dalším druhem namáhání, který se může objevit v odlišných aplikacích, je proměnlivé namáhání [9].

#### 5.4.1. Pevnostní kontrola předepjatého spoje

Předpětí spoje vzniká za pomoci utahení šroubu a vzniku síly  $F_0$ , která předpětí způsobuje. Při dotažení silou  $F_0$  vznikají deformace, které zkracují přírubu o vzdálenost  $\Delta l_{pr}$  a prodlužují šroub o vzdálenost  $\Delta l_{s0}$  [9].

V případě, že jsou tyto deformace pružné, platí pro ně Hookeův zákon skládající se ze součinu modulu pružnosti  $E$  a poměrnému prodloužení  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  [10]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (10)$$

Po dosazení za poměrné prodloužení  $\varepsilon$  a za napětí, které je charakterizováno jako síla na jednotku plochy  $\sigma = \frac{F}{S}$ , vyjde vztah [10]:

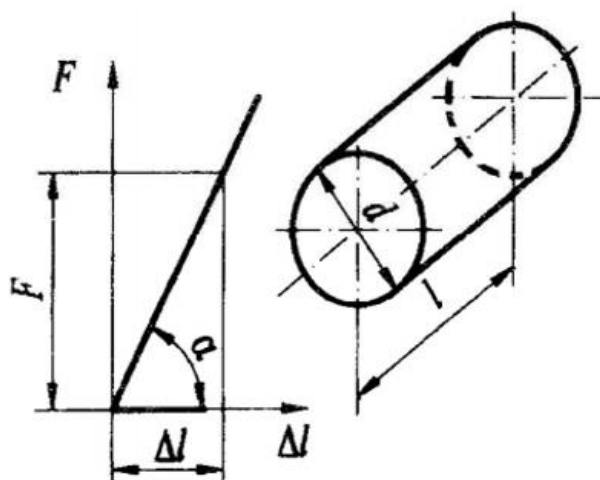
$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (11)$$

kde v obecném tvaru [10]:

$$c = \frac{E \cdot S}{l} = \frac{F}{\Delta l}. \quad (12)$$

Konstanta  $c$  značí tuhost a slouží pro výpočet změny sil po utahení šroubu. Je charakterizována jako odpor proti deformaci. Tento vzorec se může odvodit i pomocí diagramu tahové zkoušky šroubu viz obr. 10., kde [9]:

$$c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{\Delta l}. \quad (13)$$

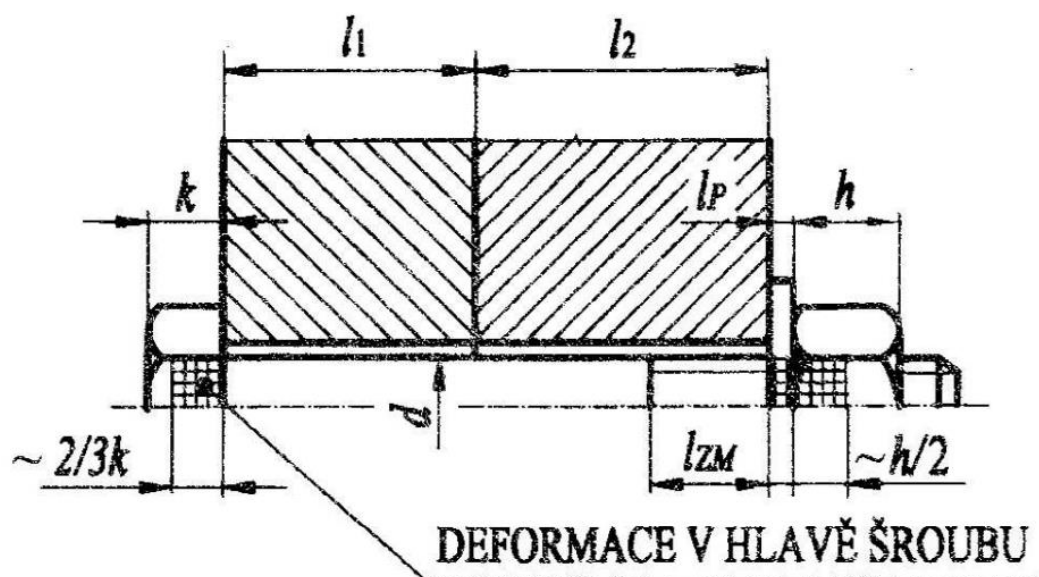


Obr. 10.: Diagram tahové zkoušky šroubu v oblasti platnosti Hookova zákona.  
Zdroj:[9]

Pokud se šroub skládá z více částí o rozdílném průměru, musíme vzorec (12) upravit. Vzorec můžeme odvodit z převrácené hodnoty tuhosti, kterou je poddajnost. Výsledným vzorcem je [9, 10]:

$$p_s = \frac{1}{c_s} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} + \dots = \sum_i \frac{1}{c_i} \quad (14)$$

Experimentální měření ukázalo, že deformace probíhá i v 2/3 hlavy šroubu a 1/2 výšky matice uvedené na obr. 11. [9]:



Obr. 11.: Deformace v hlavě šroubu a matice. Zdroj:[9]

Výpočet tuhosti přírub je podstatně složitější, jelikož deformace neprobíhá v celém průřezu. Deformace probíhá pod určitou částí matice respektive hlavou šroubu způsobenou předejzatou silou. K odvození slouží Bachův komolý dvojkůžel, který graficky znázorňuje smykové napětí, jako hlavní parametr deformace [9].

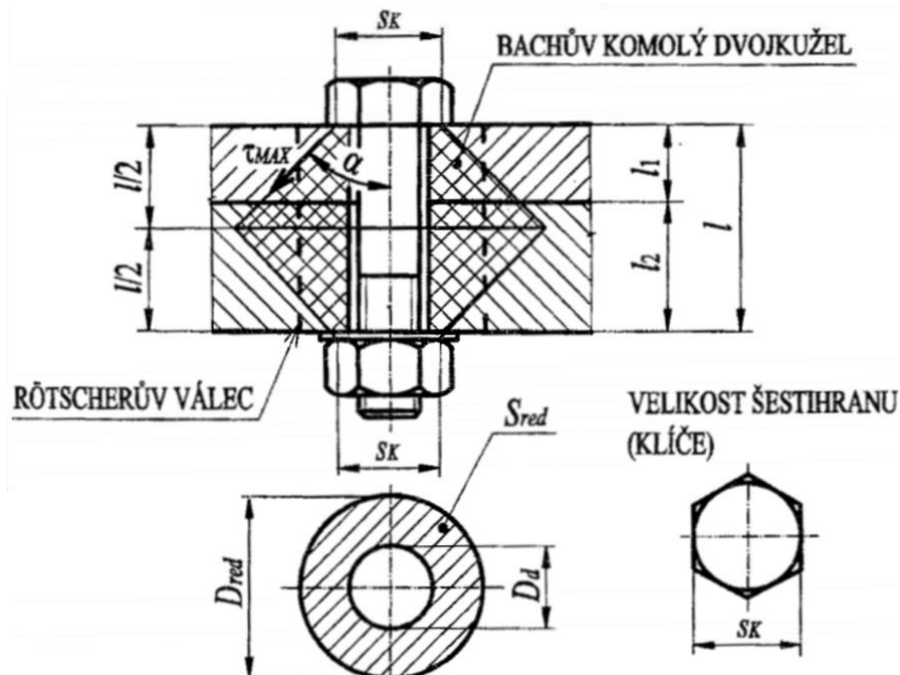
Bohužel toto řešení je složité a můžeme ho zredukovat tzv. Rötšcherovým válcem, kde průřez vyjádříme jako [9]:

$$S_{př} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{red}^2 - D_d^2). \quad (15)$$

$D_d$  značí průměr díry v přírubách a  $D_{red}$  redukovaný průměr, který je dán vztahem [9]:

$$D_{red} = s_K + \frac{l}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Parametr  $s_K$  vyjadřuje velikost matice šroubu (šestihranu) a  $l$  délku příruby. Úhel  $\alpha$  je úhel mezi osou šroubu a smykovým napětím. Určuje se experimentálně a ve většině případech je roven  $45^\circ$ . Všechny rozměry potřebné pro výpočty jsou uvedeny na obr. 12. [9].



Obr. 12.: Bachův komolý dvojkůžel s Rötšcherovým válcem. Zdroj:[9]

Pro správný konstrukční návrh je důležitý výpočet bezpečnosti, který udává, zda je možné jej pro danou aplikaci použít. Vypočítá se jako podíl meze kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ) daného materiálu a redukovaného napětí  $\sigma_{red}$  [9, 12]:

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{R_e}{\sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}} \geq 1,5. \quad (17)$$

Pro dané tečné napětí  $\sigma_t$  platí vztah [9, 12]:

$$\sigma_t = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s}{\pi \left(\frac{d_3}{2}\right)^2}, \quad (18)$$

a pro smykové napětí  $\tau$  vyznačeného podílem kroutícího momentu vůči průřezovému modulu v krutu [9, 12]:

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} d_3^3} = \frac{F_0 \cdot \text{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3}, \quad (19)$$

kde úhel  $\varphi'$  je třecí úhel v ostrém závitě a dostaneme ho obdobně jako ve vzorci (3), jen s jinými indexy. Vyjádřeno matematicky [9, 12]:

$$f'_z = \text{tg} \varphi' \cong \frac{f_z}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (20)$$

## 5.5. Realizace momentů v předepjatém šroubovém spoji

Velikost přepět'ové síly  $F_0$  je závislá na utahovacím momentu  $M_u$ . Mezi těmito parametry platí lineární závislost a utahovací moment je vyjádřen součtem momentu tření na závitě  $M_{tz}$  a momentu tření na matici  $M_{tm}$ , vyjádřeno podle obr. 11. [10, 12]:

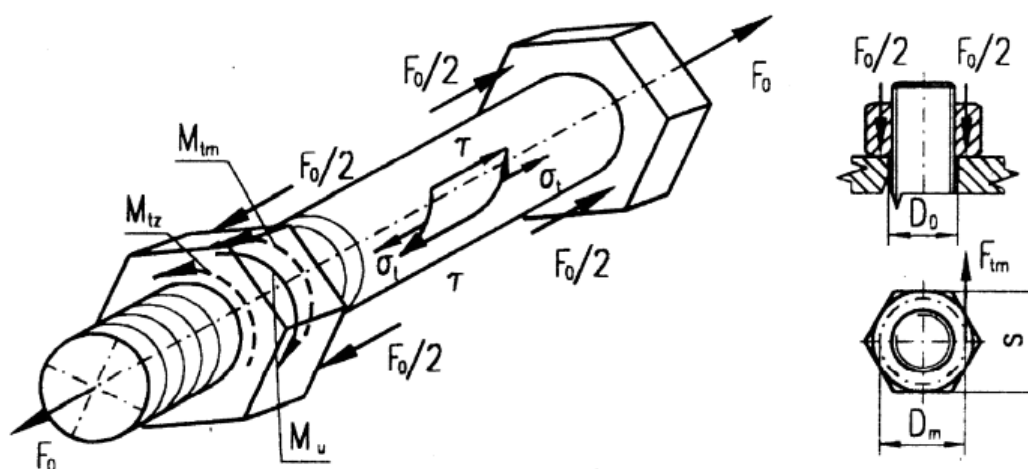
$$M_u = M_{tz} + M_{tm}, \quad (21)$$

kde moment  $M_{tz}$  a  $M_{tm}$  [10, 11]:

$$M_{tz} = F_0 \cdot \text{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}, \quad (22)$$

$$M_{tm} = F_0 \cdot f_m \cdot \frac{D_m}{2} = F_0 \cdot f_m \cdot \frac{s + D_o}{4}. \quad (23)$$

Zde  $f_m$  je součinitel smykového tření mezi maticí a podložkou, který je normalizován v tabulkách [10].



Obr. 11.: Znárodnění působení jednotlivých momentů s rozměry šroubu. Zdroj:[10]

## 5.6. Realizace sil v teplotně namáhaném předepjatém šroubovém spoji

Lambda sonda se používá v teplotně namáhaném výfukovém systému, ve kterém může na šroubový spoj působit až 720 °C. V závislosti na teplotě se mění mechanické vlastnosti šroubového spoje [14].

Výpočet předepjaté síly v závislosti na teplotě daných materiálu je komplikovaný, jelikož nevíme s jistou přesností, jak se při dané teplotě bude materiál chovat. Tato problematika se v praxi obvykle řeší různorodými zkouškami, které jsou bohužel nákladné. Proto je při konstrukci přihlíženo k empirickým zkušenostem [14].

Při výpočtu musíme zohlednit tyto možnosti kombinací [14]:

- Šroub a příruby jsou z rozdílného materiálu s rozdílnými součiniteli tepelné roztažnosti,  $\alpha_s \neq \alpha_p$ .
- Šroub a příruby jsou ze stejného materiálu se stejnými součiniteli tepelné roztažnosti,  $\alpha_s = \alpha_p$ .
- Teplota šroubu a příruby jsou odlišné,  $t_s \neq t_p$ .
- Teplota šroubu a příruby jsou stejné,  $t_s = t_p$ .

Dalším ovlivňujícím faktorem je změna tuhosti šroubu a příruby působením teploty. Vzorce pro tuhost jednotlivých částí můžeme vyjádřit jako [14]:

$$c_{st} = c_s \cdot \frac{E_{st}}{E_s}, c_{pt} = c_p \cdot \frac{E_{pt}}{E_p}, \quad (24)$$

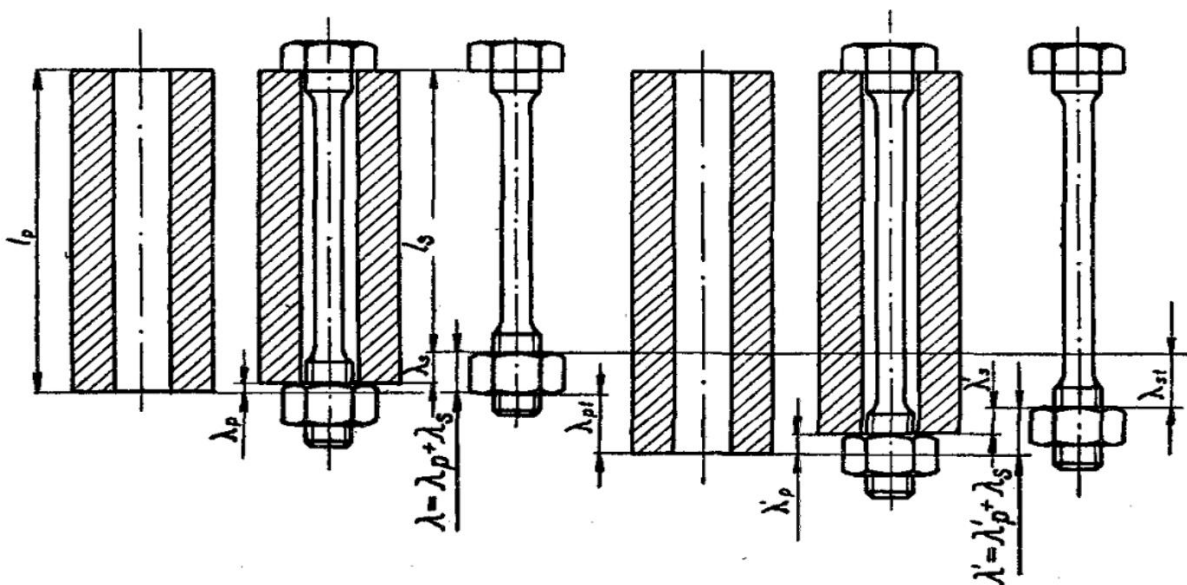
kde  $c_s$  a  $c_p$  jsou tuhosti jednotlivých částí šroubového spoje za pokojové teploty,  $E_{st}$  a  $E_{pt}$  moduly pružnosti při daném teplotním zatížení a  $E_s$  s  $E_p$  jsou moduly pružnosti při pokojové teplotě daných materiálů [14].

## 5.7. Odvození předepjaté síly v teplotně zatíženém šroubovém spoji

Předepjatá síla ve šroubovém spoji je hlavně závislá na jednotlivých deformacích (prodloužení a zkrácení) a součinitelích tepelných roztažností materiálů. Odvození lze provést jednoduchou analýzou teplotně namáhaného šroubového spoje viz obr. 12. [14].

Z obrázku 12. platí následující rovnice, skládající se z hodnot délky příruby  $I_p$  a šroubu  $I_s$ , jednotlivých koeficientů tepelné roztažnosti šroubu  $\alpha_s$  a příruby  $\alpha_p$ , dále stlačení příruby před zahřátím  $\lambda_p$  a po zahřátí  $\lambda'_p$ , prodloužení šroubu před zahřátím  $\lambda_s$  a po zahřátí  $\lambda'_s$  a v neposlední řadě jednotlivé teploty příruby  $t_p$  a šroubu  $t_s$  s počáteční teplotou  $t_0$  [14]:

$$I_p + I_p \cdot \alpha_p \cdot (t_p - t_0) + \lambda_p - \lambda'_p = I_s + I_s \cdot \alpha_s \cdot (t_s - t_0) + \lambda_s - \lambda'_s. \quad (25)$$



Obr. 12.: Teplotně namáhaný šroubový spoj. Zdroj:[14]

Prodloužení a stlačení před zahřátím se vyjádří [14]:

$$\lambda_p = I_p \cdot \frac{F_0}{S_p E_p} = \frac{F_0}{c_p}, \lambda_s = I_s \cdot \frac{F_0}{S_s E_s} = \frac{F_0}{c_s}. \quad (26)$$

Se započtením vlivu teploty pak [14]:

$$\lambda'_p = \frac{I_p F_{0t}}{S_p E_p} \cdot [1 + \alpha_p(t_p - t_0)], \lambda'_s = \frac{I_s F_{0t}}{S_s E_s} \cdot [1 + \alpha_s(t_s - t_0)]. \quad (27)$$

Dosazením rovnic (27) a (26) do rovnice (25) a vyjádřením předepjaté síly  $F_{0t}$  vyjde výsledný vztah [14]:

$$F_{0t} = \frac{F_0 \cdot \left( \frac{1}{c_s} + \frac{1}{c_p} \right) + I_p \cdot [1 + \alpha_p(t_p - t_0)] - I_s \cdot [1 + \alpha_s(t_s - t_0)]}{\frac{E_p}{c_p \cdot E_{pt}} \cdot [1 + \alpha_p(t_p - t_0)] + \frac{E_s}{c_s \cdot E_{st}} \cdot [1 + \alpha_s(t_s - t_0)]}. \quad (28)$$

Vztah lze ještě upravit na [14]:

$$F_{0t} = \frac{F_0 \cdot \left( \frac{l_p}{S_p \cdot E_p} + \frac{l_s}{S_s \cdot E_s} \right) + \alpha_p I_p (t_p - t_0) - \alpha_s I_s (t_p - t_0) + I_p - I_s}{\left( \frac{l_p}{S_p \cdot E_{pt}} + \frac{l_s}{S_s \cdot E_{st}} \right) \cdot \left[ \alpha_p (t_p - t_0) \frac{l_p}{S_p \cdot E_p} \right] + \left[ \alpha_s (t_s - t_0) \frac{l_s}{S_s \cdot E_s} \right]}. \quad (29)$$

Zjednodušení lze ještě provést s úvahou  $l_s = l_p$  a hranaté závorky ve jmenovateli jsou téměř rovné nule, lze je zanedbat a výsledný vzorec bude mít tvar [14]:

$$F_{0t} = \frac{F_0 \cdot \left( \frac{1}{S_p \cdot E_p} + \frac{1}{S_s \cdot E_s} \right) + \alpha_p (t_p - t_0) - \alpha_s (t_p - t_0)}{\left( \frac{1}{S_p \cdot E_{pt}} + \frac{1}{S_s \cdot E_{st}} \right)}. \quad (30)$$

Při vyšších teplotách může docházet u materiálu k jeho tečení a k relaxaci napětí [14].

- Tečení materiálu- pomalá a nepřetržitá plastická deformace způsobená napětími, může dojít až do fáze trvalých deformací,
- Relaxace napětí- trvalé deformace, které snižují předpětí.



## 6. Šroubový spoj lambda sondy

Jako každý šroubový spoj, tak i šroubový spoj lambda sondy má své specifické požadavky na funkci, podle své aplikace a místa použití. Lambda sonda se umísťuje do výfukového potrubí v rozmezí úhlu 45 - 105 °. Tyto úhly byly určeny po experimentálních měřeních, protože při těchto sklonech proudí dostatečné množství výfukových plynů k elementu senzoru.

Hlavními požadavky na šroubový spoj lambda sondy jsou:

- pevnost spoje,
- velikost momentu,
- těsnost spoje i při vyšších teplotách- těsnost je zapříčiněná utahovacím momentem a korozí.

Pevnost spoje je hlavním parametrem z pohledu konstrukce, který udává, zda daný spoj vydrží přesně určené namáhání. S ohledem na výsledek se rozhodujeme, zda daný materiál a konstrukci můžeme použít pro konkrétní provedení.

Moment je jeden z hlavních parametrů pro výpočet a návrh konstrukce šroubového spoje. V tomto provedení šroubového spoje se pohybujeme mezi utahovacími momenty 40 až 60 N·m, průměr je 50 N·m. Se vzrůstajícím momentem roste i těsnost daného spojení. Bohužel v praxi, z pohledu zákazníka, je toto nepříznivá situace, jelikož při demontáži lambda sondy je potřeba dané spojení odstranit pomocí běžně dostupné techniky (momentové klíče atd.) a moment by měl být, i po cyklické zátěži, do 100 N·m, aby ho bylo možné demontovat. V praxi se ukázalo, že po delším používání lambda sondy, momenty mohou přesahovat až 200 N·m. Tato skutečnost je zapříčiněná korozí a deformací jednotlivých částí šroubového spoje a je to jedna z nedílných částí, na kterou musí konstruktér brát ohled.

Těsnost spoje je důležitá z pohledu emisních norem. Při chodu motoru je možný únik výfukových plynů přes šroubový spoj. Norma EU6d udává, že celý výfukový systém by měl být ideálně těsný. Několikaletá praxe ukázala tento požadavek jako prakticky nereálný, jelikož při provozních teplotách (spoj je namáhán až 700 - 720 °C v extrémním případě viz obr. 14.), se projevuje teplotní roztažnost nerezových ocelí, která může zapříčinit zmenšení utahovacího momentu spojení a jeho následné uvolnění. Při uvedených zatěžovacích teplotách je velká pravděpodobnost vzniku koroze na závitě. Koroze může paradoxně zvýšit těsnost spoje, zároveň však zvětšuje povolovací moment.

Stávající řešení závitu lambda sondy má průměr 18 mm s jemným stoupáním 1,5 mm v toleranční třídě 6g/6H (M18x1,5), který je vyroben metodou obrábění z martenzitického materiálu 1.4104. Na samotném závitu se nachází dodatečné mazivo.

„Následující pasáž o rozsahu 2. stran obsahuje utajované skutečnosti a je obsažena pouze v plné verzi práce, která je uložena na Přírodovědecké fakultě JU“.



## **7. Měření těsnosti šroubového spoje lambda sondy**

„Následující pasáž o rozsahu 14. stran obsahuje utajované skutečnosti a je obsažena pouze v plné verzi práce, která je uložena na Přírodovědecké fakultě JU“.































## 8. Výpočet šroubového spoje

Cílem předložené práce je návrh šroubového spoje lambda sondy, který by vedl k co největší těsnosti v provozních podmínkách. Nynější řešení šroubového spoje nebylo pro tento utahovací moment analyticky spočítáno, a proto je zapotřebí celý návrh zkontrolovat i z mechanické stránky. Návrh počítá jen s obměnou materiálu, protože zásah do konstrukce závitu je z ekonomického hlediska složitý. Spoj bude postupně navrhován podle teorie uvedené v předchozích kapitolách, kde se nejprve zohlední nynější řešení, které se srovná s novým řešením materiálu.

„Následující pasáž o rozsahu 2. obrázků obsahuje utajované skutečnosti a je obsažena pouze v plné verzi práce, která je uložena na Přírodovědecké fakultě JU“.

| Název  | Značení                     | Rozměr    | Jednotka | Poznámka              |
|--|-----------------------------|-----------|----------|-----------------------|
| Průměr závitu  | $d$                         | 18,00     | [mm]     | výkres- obr. 31.      |
| Střední průměr závitu                                      | $d_2$                       | 17,12     | [mm]     | tabulky               |
| Průměr jádra   | $d_3$                       | 15,74     | [mm]     | tabulky               |
| Průměr otvoru ve šroubu                                    | $d_4$                       | 8,80      | [mm]     | výkres- obr. 31.      |
| Délka šroubu se závitem                                    | $l_{\text{š}}$              | 8,70      | [mm]     | výkres- obr. 31.      |
| Délka příruby  | $l_{\text{př}}$             | 3,45      | [mm]     | výkres- obr. 32.      |
| Délka příruby po deformaci (montáží)                       | $l_{\text{přdef}}$          | 1,20      | [mm]     | experimentální měření |
| Průměr šestihranu šroubu                                   | $s_K$                       | 24,70     | [mm]     | výkres- obr. 31.      |
| Průměr otvoru v přírubě                                    | $D_o$                       | 18,05     | [mm]     | výkres- obr. 32.      |
| Modul pružnosti příruby 1.4512                             | $E_{\text{př}}$             | 220000,00 | [MPa]    | tabulky               |
| Modul pružnosti šroubu 1.4104                              | $E_{\text{š}}$              | 215000,00 | [MPa]    | tabulky               |
| Modul pružnosti příruby 1.4512- teplota 700 [°C]           | $E_{\text{přt}}$            | 155000,00 | [MPa]    | tabulky               |
| Modul pružnosti šroubu 1.4104- teplota 700 [°C]            | $E_{\text{št}}$             | 111000,00 | [MPa]    | tabulky               |
| Koeficient teplotní roztažnosti 1.4512                     | $\alpha_{\text{př}}$        | 0,0000105 | [1/K]    | tabulky               |
| Koeficient teplotní roztažnosti 1.4104                     | $\alpha_{\text{š}}$         | 0,0000100 | [1/K]    | tabulky               |
| Úhel závitu  | $\alpha$                    | 60,00     | [°]      | tabulky               |
| Mez kluzu 1.4104   | $R_e$<br>( $Rp_{0,2}$ )     | 500,00    | [N/mm]   | tabulky               |
| Mez kluzu 1.4104 při 720[°]                                | $R_{et}$<br>( $Rp_{0,2t}$ ) | 90,00     | [N/mm]   | tabulky               |
| Třecí součinitel= třecí součinitel mezi maticí a podložkou | $f_z=f_m$                   | 0,14      | [-]      | tabulky               |
| Maximální teplota  | $T_{\text{max}}$            | 720,00    | [°C]     | -                     |
| Pokojeová teplota  | $T_0$                       | 20,00     | [°C]     | -                     |
| Utahovací moment   | $M_u$                       | 500000,00 | [N·mm]   | dáno zákazníkem       |

Tab. 4.: Vstupní parametry

Výpočet úhlu stoupání závitu se provede dle vzorce (2) s převedením goniometrické funkce tg na pravou stranu rovnice:

$$\psi = \arctg \frac{P_h}{\pi \cdot d_2} = \arctg \frac{1,5}{\pi \cdot 17,12} = 0,028 \text{ [rad]} = 1,597 \text{ [°]}.$$

## 8.1. Předepjatá síla

Ve většině aplikací je vstupní parametr návrhu předepjatá síla, v tomto případě je vstupním parametrem moment. Proto je pro výpočet potřeba úhel smykového tření, který se později projeví ve vzorci pro výpočet předepjaté síly viz vzorec (22). Postupuje se identicky podle vzorce (20), opět s převedením goniometrické funkce tg na pravou stranu rovnice:

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{f_z}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \operatorname{arctg} \frac{0,14}{\cos\left(\frac{60}{2}\right)} = 0,160 \text{ [rad]} = 9,182[^\circ].$$

Následně se použije vzorec (21), do kterého se dosadí vzorce (22) a (23) a z toho se vyjádří předepjatá síla  $F_0$ :

$$M_u = M_{tz} + M_{tm} = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + F_0 \cdot f_m \cdot \frac{s + D_o}{4}.$$

Výpočet a vyjádření  $F_0$ :

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{M_u}{\operatorname{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + f_m \cdot \frac{s + D_o}{4}} \\ &= \frac{50000}{\operatorname{tg}(1,597 + 9,182) \cdot \frac{17,12}{2} + 0,14 \cdot \frac{24,7 + 18,5}{4}} \\ &= 15914,572 \text{ [N]}. \end{aligned}$$

Předepjatá síla závisí především na utahovacím momentu. Výrazné zvýšení momentu může zvýšit sílu do kritických hodnot a zdeformovat šroubový spoj. Tím se zabývá výpočet bezpečnosti viz kapitola 8.4.

## 8.2. Uťahovací síla matice

K řešení se použije vztah (3), do kterého se dosadí vzorec (4) pro úplný výsledek:

$$F_z = F_0 \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi) = 15914,572 \cdot \operatorname{tg}(1,597 + 7,9696) = 2625,224 \text{ [N]},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} f_z = 0,139 \text{ [rad]} = 7,9696 [^\circ].$$

Zde je možné i dokázat podmínku samosvornosti ze vztahu (8):

$$\Psi \leq \varphi,$$

$$1,597 \leq 7,9696.$$

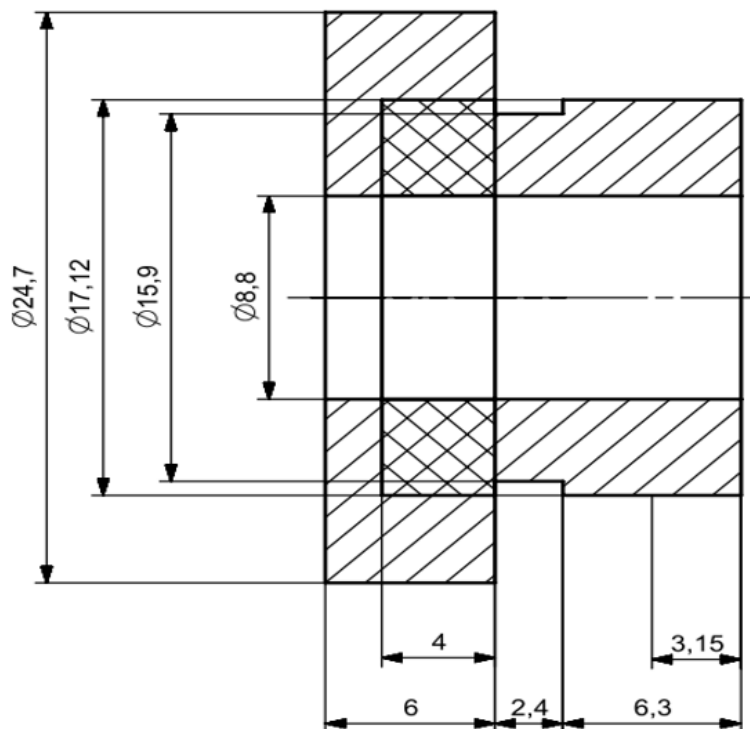
Těmito vzorci bylo dokázáno, že šroubový spoj lambda sondy je samosvorný a nebude se uvolňovat svojí vlastní tíhou.

### 8.3. Výpočet tuhostí

Do této části všechny vztahy zůstávají stejné pro jakoukoliv materiálovou kombinaci, jelikož nezohledňují modul pružnosti  $E$  anebo teplotní koeficient roztažnosti materiálu  $\alpha$ .

#### 1) Tuhosti šroubu

Z důvodu náročnosti řešení a skutečnosti, že tuhosti dosahují obrovských hodnot, můžeme si šroub zjednodušit podle schématu na obr. 33.



Obr. 33.: Řez šroubu.

Šroub se skládá z více částí o různých průměrech, proto se nemůže použít vztah (12), ale pro tuto aplikaci je vhodnější vztah (14). Výpočet je složen z tuhosti 2/3 deformace v hlavě (šestihranu) šroubu, drážky a 1/2 deformace matice (polovina závitů). Závit nepředstavuje plnou součást, a proto se uvažuje střední průměr  $d_2$  závitu. Výpočet je:

$$p_s = \frac{1}{c_s} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3},$$

$$c_1 = \frac{E_s \pi \cdot (d_2^2 - d_4^2)}{4 \cdot l_1},$$

$$c_2 = \frac{E_s \pi \cdot (d_3^2 - d_4^2)}{4 \cdot l_2},$$

$$c_3 = \frac{E_s \pi \cdot (d_2^2 - d_4^2)}{4 \cdot l_3}.$$

Po dosazení, upravení a vyjádření  $c_s$ :

$$c_s = \frac{E_s \cdot \pi}{4 \cdot \left( \frac{l_1 + l_3}{d_2^2 - d_4^2} + \frac{l_2}{d_3^2 - d_4^2} \right)} = \frac{215000 \cdot \pi}{4 \cdot \left( \frac{4 + 3,15}{17,12^2 - 8,8^2} + \frac{2,4}{15,9^2 - 8,8^2} \right)}$$

$$= 36,05 \cdot 10^5 \text{ [MPa]}.$$

Výsledek vyšel menší než u tuhosti příruby a to především díky úvaze, že šroub se skládá z více částí a je dutý.

## 2) Tuhost příruby

Návrh obsahuje pouze jednu přírubu (podložku- seal ring), která je uvedena na obrázku 13. Pro zjednodušení se příruba může uvažovat jako plná podložka, která má průřez tvaru obdélníku. Pro vyjádření tuhosti je potřeba vypočítat plochu příruby, ta je dána vzorcem (15):

$$S_{př} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{red}^2 - D_0^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (26,425^2 - 18,05^2) = 292,544 \text{ [mm}^2\text{]},$$

$$D_{red} = s_K + \frac{l_{př}}{2} \cdot \text{tg}\alpha_1 = 24,7 + \frac{3,45}{2} \cdot \text{tg}(45) = 26,425 \text{ [mm]}.$$

Poté dosazení do vzorce (12):

$$c_{př} = \frac{E_{př} \cdot S_{př}}{l_{přdef}} = \frac{220000 \cdot 292,544}{1,2} = 53,633 \cdot 10^6 \text{ [MPa]}.$$

Tuhost je charakterizována jako odpor proti deformaci, proto se musí za délku dosadit délka příruby po montáži (utažení matice). Ta byla zjištěna experimentálně za pomoci posuvného měřítka.

## 8.4. Výpočet bezpečnosti

Postupuje se analogicky podle vzorce (17):

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{R_e}{\sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}} \geq 1,5,$$
$$k_s = \frac{500}{\sqrt{81,789^2 + 3 \cdot 29,349^2}} = 5,192 \geq 1,5.$$

Návrh nepočítá s provozní silou, proto lze nahradit sílu  $F_s$  za předepjatou sílu  $F_0$ . Pro výpočet tečného a smykového napětí vycházíme ze vztahu (18) a (19):

$$\sigma_t = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_0}{\pi \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot 15914,572}{\pi \cdot 15,74^2} = 81,789 \text{ [MPa]},$$
$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} d_3^3} = \frac{F_0 \cdot \text{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3} = \frac{8 \cdot 2625,224 \cdot 17,12}{\pi \cdot 15,74^3} = 29,349 \text{ [MPa]}.$$

Z výsledku lze pozorovat, že dané parametry vyhovují bezpečnosti spoje, který je pro toto provedení předimenzovaný, a tím pádem lze zvýšit utahovací moment, pokud to bude vyžadováno (platí pouze pro teplotně nezatížený spoj).

## 8.5. Teplotní namáhání šroubového spoje

Při teplotním zatížení se mění i tuhosti jednotlivých součástí, pro výpočet můžeme použít vztah (24):

$$c_{\xi_t} = c_{\xi} \cdot \frac{E_{\xi_t}}{E_{\xi}} = 36,05 \cdot 10^5 \cdot \frac{150000}{215000} = 25,151 \cdot 10^5 \text{ [MPa]},$$
$$c_{př_t} = c_{př} \cdot \frac{E_{př_t}}{E_{př}} = 53,633 \cdot 10^6 \cdot \frac{155000}{220000} = 37,787 \cdot 10^6 \text{ [MPa]}.$$

Předepjatou sílu při teplotním zatížením můžeme analogicky vyjádřit podle vzorce (30). Tento vztah se nemusí upravovat pro toto provedení, jelikož příklad v teorii je totožný s touto aplikací. Ve vztahu uvažujeme, že příruba i šroub při teplem namáhání, mají stejné teploty, okolo 720 °C.

$$\begin{aligned}
F_{0t} &= \frac{F_0 \cdot \left( \frac{1}{S_{př} \cdot E_{př}} + \frac{1}{S_{\text{š}} \cdot E_{\text{š}}} \right) + \alpha_{př}(T_{\max} - T_0) - \alpha_{\text{š}}(T_{\max} - T_0)}{\left( \frac{1}{S_{př} \cdot E_{přt}} + \frac{1}{S_{\text{š}} \cdot E_{\text{št}}} \right)} = \\
&= \frac{15914,572 \cdot \left( \frac{1}{292,544 \cdot 220000} + \frac{1}{725,452 \cdot 215000} \right) +}{\frac{1}{292,544 \cdot 155000} +} \\
&\frac{+0,0000105 \cdot (720 - 20) - 0,00001 \cdot (720 - 20)}{\frac{1}{725,452 \cdot 150000}} = 22382,822 \text{ [N]}.
\end{aligned}$$

Výsledek předepjaté síly splňuje podmínku teorie, která říká, že síla se při teplotním zatížení zvětšuje. Tato skutečnost je zapříčiněna teplotní roztažností a modulem pružnosti jednotlivých materiálů. Bohužel se v dalších kapitolách pro teplotně zatížený spoj ukazuje, že s rostoucí předepjatou silou rapidně klesá bezpečnost.

## 8.6. Prodloužení příruby a šroubu od teplotního zatížení

S měnící se teplotou, se mění i prodloužení částí přírub a šroubu podle podmínek splňující vztah (27):

$$\begin{aligned}
\lambda'_{př} &= \frac{F_{0t}}{c_{př}} \cdot [1 + \alpha_{př}(T_{\max} - T_0)] = \frac{22382,822}{53,633 \cdot 10^6} \cdot [1 + 0,0000105 \cdot (720 - 20)] = \\
&= 4,173 \cdot 10^{-4} \text{ [mm]}, \\
\lambda'_{\text{š}} &= \frac{F_{0t}}{c_{\text{š}}} \cdot [1 + \alpha_{\text{š}}(T_{\max} - T_0)] = \frac{22382,822}{36,05 \cdot 10^5} \cdot [1 + 0,00001 \cdot (720 - 20)] \\
&= 6,166 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}.
\end{aligned}$$

I přes teploty okolo 720 °C, není prodloužení příruby a šroubu markantní, ale mohou způsobit malé úniky přes otvory, které toto prodloužení může vytvořit. Druhým případem však může být i předpoklad, že prodloužení jednotlivých částí může už existující otvory naopak utěsnit. Úvaha ohledně chování šroubového spoje je uvedena v kapitole 8.7. Prodloužení šroubu je větší z důvodu menší tuhosti.

## 8.7. Pevnostní kontrola při vlivu teploty

Postupujeme stejně jako v kapitole 6.5. s tím rozdílem, že za předepjatou sílu  $F_0$  dosadíme sílu  $F_{0t}$  a za mez kluzu dosadíme mez kluzu materiálu při teplotě 720 °C.



$$\sigma_{tt} = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_{0t}}{\pi \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot 22382,8215}{\pi \cdot 15,74^2} = 115,031 \text{ [MPa]},$$

$$\tau_t = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} d_3^3} = \frac{F_{0t} \cdot \text{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3} =$$

$$= \frac{8 \cdot 22382,822 \cdot \text{tg}(1,597 + 9,182) \cdot 17,12}{\pi \cdot 15,74^3} = 47,643 \text{ [MPa]},$$

$$k_{st} = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{R_{et}}{\sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}} = \frac{90}{\sqrt{115,031^2 + 3 \cdot 47,643^2}} = 0,636 \geq 1,5.$$

Výsledek bezpečnosti, která počítá i se zvýšenou předepjatou silou při teplotním namáhání, nesplňuje podmínku. Hlavním důvodem je, že se uvažuje reálný model meze kluzu při dané teplotě. Při této teplotě rapidně klesá mez kluzu, jelikož nastává tečení materiálu.

Možné návrhy, kterými můžeme řešit tento problém, jsou dvojího typu. Každý z návrhů uvažuje jiné chování šroubového spoje:

- a) Pro lepší funkci šroubového spoje je nutné zvýšit bezpečnost. Bezpečnost zvýšíme výběrem materiálu šroubu, který bude mít při teplotách 720 °C vyšší mez kluzu, než nynější řešení, a tím docílíme menších deformací.
- b) Druhý návrh počítá s úvahou, že vyšší předepjatá síla nemusí mít negativní vliv na šroubový spoj při takové teplotě. Jelikož se při provozních teplotách vyskytuje tečení a roztažnost materiálu, mohou tyto parametry mít pozitivní vliv na vzniklé deformace spoje tím, že je zacelují. Po vypnutí motoru automobilu se teploty ve šroubu sníží, spoj zchladne, a tím pádem se vytvoří deformace, které se nemusí zohledňovat, protože cílem je, aby šroub byl těsný při provozních teplotách. V úvahu se musí brát i skutečnost, že častějším teplotním cyklením spoje, se předepjatá síla v čase snižuje, až může dosáhnout hodnot úplného uvolnění, ta je zapříčiněná relaxací napětí. To je ovšem v extrémních případech, které v praxi nenastávají. Případným řešením této problematiky by bylo dotažení spoje např. na každé prohlídce emisí. Abychom zvýšili předepjatou sílu, je potřeba nalézt materiál, který má větší koeficient teplotní roztažnosti než stávající řešení a obměnit jím nynější přírubu- podložku (seal ringu), která je uvedena na obrázku 30. s výkresem.

Řešení a) se zdá více logické, ale ekonomie výroby a delší vývoj, neumožňuje obměnu materiálu šroubu. Návrh se musí zabývat hlavně přírubovou částí (návrhem b).

## 8.8. Výběr materiálu příruby

Vhodným materiálem pro obměnu příruby se jeví slitina niklu C276. V tabulkách 5. a 6. je přesné srovnání složení daných materiálů. Feritické oceli jsou obecně méně odolné proti působení koroze. To lze také pozorovat na rozdílu chromu u materiálu 1.4512 (10,5 - 12,5 %) a C276 (16 %). Ke koroziuvzdornosti C276 přispívá i větší množství niklu. Tato skutečnost může pomoci problému velkých momentů při demontáži zapříčiněnou korozí při dlouhodobější zátěži a celkovému zreznutí a zdeformování příruby. C276 je také definován jako materiál, který se používá do teplot až 1000 °C. Další výbornou vlastností je i jeho modul pružnosti, který je podobný nerezovým ocelím.

| C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] | Cr [%]    | Ti [%] |
|-------|--------|--------|-------|-------|-----------|--------|
| 0,03  | 1      | 1      | 0,04  | 0,015 | 10,5-12,5 | 6      |

Tab. 5.: Složení feritického materiálu 1.4512.

| Ni [%] | C [%] | Mo [%] | Cr [%] | Fe [%] | W [%] | Co [%] | Mn [%] | V [%] |
|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| 57     | 0.01  | 16     | 16     | 5      | 4     | 0.2    | 1      | 0.35  |

Tab. 6.: Složení slitiny niklu C276.

## 8.9. Tuhost příruby nového řešení

Plocha příruby zůstává totožná jako u předchozího řešení, proto nemusíme řešit předešlé vztahy, jelikož do nich nevstupuje úvaha o druhu materiálu. Postupujeme analogicky a dosazujeme parametry z tabulky 7.:

|  |                |           |        |
|--|----------------|-----------|--------|
| Modul pružnosti příruby C276                   | $E_{př1}$      | 205000    | [MPa]  |
| Modul pružnosti příruby C276- teplota 700 [°C] | $E_{přt1}$     | 164000    | [MPa]  |
| Koeficient teplotní roztažnosti C276           | $\alpha_{př1}$ | 0,0000113 | [1/°C] |

Tab. 7.: Materiálové vlastnosti slitiny C276. Zdroj:[15]

$$c_{př1} = \frac{E_{př1} \cdot S_{př}}{l_{přdef}} = \frac{205000 \cdot 292,544}{1,2} = 49,976 \cdot 10^6 \text{ [MPa]}.$$

Výsledek je menší, než u předešlého řešení materiálu, avšak rozdíl je téměř zanedbatelný. Tuhost příruby při teplotním namáhání se vypočte analogicky jako v kapitole 8.5.

$$c_{přt1} = c_{př} \cdot \frac{E_{přt1}}{E_{př}} = 49,976 \cdot 10^6 \cdot \frac{164000}{205000} = 39,981 \cdot 10^6 \text{ [MPa]}.$$

Rozdíl oproti řešení stávajícího šroubového spoje lambda sondy je nepatrný.

### 8.10. Předepjatá síla nového řešení po zahřátí

$$\begin{aligned}
 F_{0t1} &= \frac{F_0 \cdot \left( \frac{1}{S_{př} \cdot E_{př}} + \frac{1}{S_{\xi} \cdot E_{\xi}} \right) + \alpha_{př}(T_{\max} - T_0) - \alpha_{\xi}(T_{\max} - T_0)}{\left( \frac{1}{S_{př} \cdot E_{přt}} + \frac{1}{S_{\xi} \cdot E_{\xi t}} \right)} = \\
 &= \frac{15914,572 \cdot \left( \frac{1}{292,544 \cdot 220000} + \frac{1}{725,452 \cdot 205000} \right) +}{\frac{1}{292,544 \cdot 164000} +} \\
 &+ \frac{0,0000113 \cdot (720 - 20) - 0,00001 \cdot (720 - 20)}{\frac{1}{725,452 \cdot 150000}} = 42096,726 \text{ [N]}.
 \end{aligned}$$

Předepjatá síla pro nové řešení vyšla podle očekávání větší. Hlavním parametrem, co ovlivňuje výslednou sílu je koeficient teplotní roztažnosti, i malý nárůst může výrazně změnit předepjatou sílu, a tím celý spoj zdeformovat a uvést do stavu, kdy nedokáže plnit svojí funkci ve výfukovém systému.

### 8.11. Prodloužení příruby od teplotního zatížení

Prodloužení šroubu a příruby se změní v závislosti na předepjaté síle:

$$\begin{aligned}
 \lambda'_{př} &= \frac{F_{0t1}}{c_{př1}} \cdot [1 + \alpha_{př}(T_{\max} - T_0)] = \frac{42096,726}{49,976 \cdot 10^6} \cdot [1 + 0,0000113 \cdot (720 - 20)] = \\
 &= 8,357 \cdot 10^{-4} \text{ [mm]}, \\
 \lambda'_{\xi} &= \frac{F_{0t}}{c_{\xi}} \cdot [1 + \alpha_{\xi}(T_{\max} - T_0)] = \frac{42096,726}{36,05 \cdot 10^6} \cdot [1 + 0,00001 \cdot (720 - 20)] \\
 &= 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ [mm]}.
 \end{aligned}$$

Koeficient teplotní roztažnosti slitiny C276 je větší, a proto se i výsledek podle očekávání zvýšil.

### 8.12. Pevnostní kontrola při vlivu teploty nového řešení

Pro úplnost je potřeba prověřit bezpečnost použití nového řešení:

$$\sigma_{tt1} = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_{0t1}}{\pi \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot 42096,726}{\pi \cdot 15,74^2} = 216,346 \text{ [MPa]},$$

$$\tau_{t1} = \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} d_3^3} = \frac{F_{0t1} \cdot \text{tg}(\Psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3} =$$

$$= \frac{8 \cdot 42096,726 \cdot \text{tg}(1,597 + 9,182) \cdot 17,12}{\pi \cdot 15,74^3} = 89,605 \text{ [MPa]},$$

$$k_{st} = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{R_{et}}{\sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}} = \frac{90}{\sqrt{216,346^2 + 3 \cdot 89,605^2}} =$$

$$0,338 \geq 1,5.$$

Oproti stávajícímu řešení je bezpečnost sice menší, ale jak bylo zmíněno v kapitole 8.8 b), tato skutečnost může mít pozitivní vliv na úniky přes šroubový spoj.

### 8.13. Další možné návrhy

V této bakalářské práci byl použit jeden z mnoha návrhů. Celý pohled na problematiku se může odvíjet z mnoha pohledů a uvažování více proměnných, které se v této aplikaci šroubového spoje objevují. Dalšími návrhy, které připadaly v úvahu jsou:

- a) Povrchová úprava jednotlivých částí šroubového spoje nanesením korozivzdorného materiálu či jiných vhodných povlaků (vrstev).
- b) Změna použitého maziva za jiné vhodné (grafitické mazivo, měděná pasta).
- c) Použití kombinace schnorr podložky s přírubou (podložkou).
- d) Použití kroužku z expandovaného grafitu s kombinací s přírubou (podložkou).
- e) Použití kroužku z expandovaného grafitu s kombinací se schnorr podložkou.
- f) Změna materiálu šroubu.
- g) Uvažování tuhosti matice jako příruby při matematickém návrhu (výše zmíněný model neuvažuje matici).

## 9. Závěr

Práce se zabývá návrhem šroubového spoje lambda sondy v aplikaci s teplotou 720°C, především pak jeho těsností ve výfukovém potrubí. Obecným cílem a smyslem této práce bylo přispět do řešení komplexního problému, kterým je snížit výfukové emise potlačením netěsností výfukového systému. Obsahuje měření úniků výfukových plynů přes šroubový spoj, předkládá analýzu stávajícího řešení šroubového spoje a na jejím základě navrhuje nové řešení založené na použití materiálu slitiny niklu C276 pro přírubu.

První, rešeršní, teoretická část se soustředí na popis problematiky lambda sond, jejich umístění do výfukového systému. S ohledem na kritický mechanický spoj sondy s výfukovým systémem je dále pozornost věnována materiálům, jejich vlastnostem a šroubovým spojům.

Praktická část spočívala v měření a prověření současného provedení šroubového spoje, kdy bylo prokázáno, že spoj je netěsný a unikají přes něj výfukové plyny do atmosféry; navzdory tomu, že by měl být celý výfukový systém těsný podle normy EU6d. Toto bylo prokázáno pomocí měřících metod Bubble-leak test a Schreiner-leak test. Proto byl spočítán mechanický návrh celého šroubového spoje, se snahou zjistit jeho chování v současných podmínkách. Výsledky mechanické analýzy spoje napomohly k přibližné představě chování šroubového spoje při provozních teplotách 720 °C. V oblasti těchto teplot už dochází k tečení materiálu a teplotní deformaci. Byl vypracován návrh řešení, který by měl potlačit nechtěné úniky výfukových plynů ze systému. Jako logickým, konstrukčně nenáročným, technologicky jednoduchým a levným řešením se jeví obměna materiálu příruby- podložky (seal ring), za materiál s větší teplotní roztažností a korozivzdorností. Návrh řešení počítá se slitinou niklu C276. Mechanický návrh pro toto nově představené řešení byl opět výpočty ověřen. Výsledky splňují požadavky. Je však nutné poznamenat, že do tohoto řešeného problému vstupuje mnoho proměnných a problém lze řešit více návrhy viz kapitola 8.15. Tyto další návrhy vznikly po bližších konzultacích s odborníky z praxe.

Všechny cíle práce byly splněny. Metody měření úniků proběhly bezproblémově a podařilo se najít vhodný model výpočtu šroubového spoje, který zohledňuje teoretické základy. Nové řešení by mělo dopomoci ke snížení úniků výfukových plynů přes šroubový spoj. Díky korozivzdornosti nově navrhovaného materiálu by mělo dojít ke zlepšení demontáže. Tento návrh se bude do budoucna projednávat a tato práce by mohla posloužit jako dobrý základ pro další koncepty vývoje.

## 10. Literatura a použité zdroje

- [1] Horejš, Karel. *Příručka pro řidiče a opraváře automobilů. II. díl*. Brno: Littera, 2009. ISBN 978-80-85763-52-2
- [2] Ference, Bohumil. *Spalovací motory, karburátory, vstřikování paliva a optimalizace parametrů motoru*. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2545-8
- [3] Gregora, Stanislav. *Elektronické a mechatronické systémy v konstrukci silničních vozidel*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008, ISBN 978-80-7194-982-8
- [4] Zabler, Erich a Kampán, Tomáš. *Snímače v motorových vozidlech*. Praha: Robert Bosch, 2003, ISBN 80-903132-5-6
- [5] Ptáček, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, ISBN 80-7204-248-3
- [6] Skálová, Jana. *Nauka o materiálech*. Plzeň: ZČU- Západočeská univerzita v Plzni, 2010, ISBN 978-80-7043-874-9
- [7] Chotěborský, Rostislav. *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2006, ISBN 80-213-1442-7
- [8] *Vlastnosti nerezových ocelí*. Dostupné z:  
<https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-1>
- [9] Kaláb, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře*. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1290-8
- [10] Dejl, Zdeněk. *Konstrukce strojů a zařízení I.: Spojovací části strojů*. Ostrava: Montanex, 2000, ISBN 80-7225-018-3
- [11] Grečenko, Alexandr. *Strojní součásti I*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2007, ISBN 978-7044-847-2
- [12] Pešík, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled, 1.díl*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010, ISBN 978-80-7372-573-0
- [13] Klimeš, Pavel. *Části a mechanismy strojů I.: Spolehlivost, dimenzování, pružiny, spoje a hřídele*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, ISBN 80-214-2421-4
- [14] Pospíšil, František. *Závitová a šroubová spojení*: Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1968
- [15] *Chemické složení slitiny C276*. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/anti-corrosion-titanium-nickel-based-alloy-hastelloy-c22-vs-c276/>