FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

Studijní program:	Konstruování strojů a technických zařízení
Číslo studijního programu:	N0715A270017
Studijní specializace:	Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

NÁVRH PŘÍRUBY ČERPACÍHO PALIVOVÉHO MODULU PRO AUTOMOBILY S PLUG-IN HYBRIDNÍM POHONEM

Diplomová práce

Autor práce:	Bc. Karolína Tůmová
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.

Plzeň 2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Karolína TŮMOVÁ**
Osobní číslo:	**S22N0033P**
Studijní program:	**N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace:	**Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**
Téma práce:	**Návrh příruby čerpacího palivového modulu pro automobily s plug-in hybridním pohonem**
Zadávající katedra:	**Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:
Cílem diplomové práce je technický návrh příruby pro čerpací palivový modul umístěný v nádrži automobilu s plug-in hybridním pohonem. Technické řešení by mělo obsahovat specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost a respektování potřebných norem i předpisů. Konstrukční návrh by měl obsahovat rozbor technických možností jednotlivých řešení, splňovat požadavky technické jednoduchosti s respektováním bezpečnostních požadavků. U výsledného technického řešení provést komplexní zhodnocení parametrů.
Základní technické údaje:
Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.
Osnova diplomové práce:

1. Vypracování rešerše včetně systematického popisu funkce.
2. Vypracování rozboru technických parametrů.
3. Vypracování vybrané varianty řešení včetně výpočtového hodnocení.
4. Zhodnocení vybraného konstrukčního návrhu.

Konzultant: Ing. Martin Gorschenek, Ph.D. (Strkan s.r.o., m.gorschenek@strkan.cz)

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] VALA, M. Teorie a konstrukce silničních vozidel I. Univerzita Pardubice, Pardubice, 2003
[2] VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: Vlk, 2005
[3] ŘAŠA, J., ŠVERCL, J.: Strojnické tabulky. Scientia, Praha, 2004
[4] SHIGLLEY, J., E., MISCHKE, C., R., BUDYNAS, R., G. Konstruování strojních součástí. VUT v Brně, Brno, 2010
[5] Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Ing. Zdeněk Chval, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v Seznamu použitých zdrojů, který je součástí této práce, a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí vloženou do IS STAG.

V Plzni dne:

---

podpis autora

Poděkování

Tímto bych ráda vyjádřila poděkování vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Josefovi Formánkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, podnětné a cenné informace. Současně bych chtěla poděkovat všem respondentům, kteří mi věnovali svůj čas, za vstřícnost a ochotu. Mé poděkování také náleží mé rodině a mým přátelům, kteří mě podpořili při vytváření této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem příruby pro čerpací palivový modul určený pro osobní automobily s plug-in hybridním pohonem. Cílem práce bylo navrhnout specifický výrobek, který plní funkci uzavření a utěsnění palivové nádrže osobních vozidel. Zároveň také zajišťuje dopravu paliva z nádrže ke spalovacímu prostoru vozidla za pomoci připojitelného příslušenství. V prvním kroku procesu návrhu byla provedena důkladná rešerše trhu, během níž byly nalezeny existující příruby používané pro plug-in hybridní vozidla. Tato analýza poskytla ucelený pohled na současné trendy a technologické inovace v oblasti uzavírání a utěsňování palivových nádrží. Na základě této rešerše bylo nalezeno několik konstrukčních řešení, které posloužily jako zdroj inspirace pro vlastní konstrukční návrh příruby vytvářený v softwaru NX Siemens. Následně byla provedena inženýrsko-manažerská specifikace požadavků na navrhovaný technický systém. Konečné konkurenceschopné ohodnocení bylo realizováno jak pro výchozí alternativy, tak pro vlastní definitivní návrh. Dalším z klíčových rozhodnutí v praktické části diplomové práce byl výběr materiálu pro navrhovanou přírubu. Na základě požadavků na mechanické vlastnosti, odolnost, cenovou dostupnost aj. bylo provedeno komplexní posouzení a výběr jednoho z dostupných materiálů. Po zvolení materiálu byly provedeny prvotní výpočty hrubé stavební struktury, které sloužily k orientačnímu zvolení základních rozměrů a ověření pevnostních vlastností navrhovaného technického systému. V poslední fázi práce byly za pomocí softwaru Ansys provedeny ověřující numerické analýzy technického systému na základě specifikovaných požadavků v zadání. Tato fáze zahrnovala modální analýzu, ověření pevnosti systému namáhaného náhodnými vibracemi, analýzu místa inicializace tvorby trhliny při velkém zrychlení a ověření lisovací a vylisovací síly tyčky. Na základě výsledků těchto analýz byla příruba postupně upravována, aby co nejlépe splňovala stanovené požadavky.

Klíčová slova

Čerpací palivový modul; příruba; plug-in hybridní vozidlo; těsnost; pevnost; vedení paliva; termoplasty; MKP analýza.

Abstract

This thesis deals with the design of a flange for a fuel supply module intended for passenger cars with plug-in hybrid vehicles. The aim of the thesis was to design a specific product that performs the function of closing and sealing the fuel tank of passenger vehicles. At the same time, it also provides for the transport of fuel from the tank to the combustion zone of the vehicle using an attachable accessory. In the first step of the process, a thorough market search was carried out to find existing flanges used for plug-in hybrid vehicles. This analysis provided a comprehensive view of the current trends and technological innovations in fuel tank sealing. Based on this research, several design solutions were found that served as a source of inspiration for the own design of the flange created in the Siemens NX software. Subsequently, an engineering-managerial specification of requirements for the proposed technical system was carried out. The final competitive evaluation was carried out for both initial alternatives and the final definitive design. Another key decision in the practical part of the thesis was the selection of material for the proposed flange. Based on the requirements for mechanical properties, durability, price affordability, etc. A comprehensive assessment and selection of one of the available materials was carried out. After selecting the material, the initial calculations of the rough structural design were performed to provide an indication of the basic dimensions and to verify the strength properties of the proposed technical system. In the final phase of the work, numerical analyses of the technical system were performed using Ansys software to verify the specified requirements in the customer specifications. This phase included modal analysis, verification of the strength of the system stressed by random vibration, analysis of the initiation point of crack formation at high acceleration, and verification of the compression and extrusion force of the rod. Based on the results of these analyses, the flange was progressively modified to best fulfill the specified requirements.

Key words

Fuel supply module; flange; plug-in hybrid vehicle; tightness; strength; fuel line; thermoplastics; FEM analysis.

Obsah

1 Úvod ... 13
2 Osobní automobily s plug-in hybridním pohonem ... 14
3 Analýza současných palivových systémů osobních vozidel ... 15
3.1 Palivová nádrž ... 16
3.2 Nádobka s aktivním uhlím ... 18
3.3 Nádržový čerpací palivový modul ... 18
4 Používané materiály pro příruby palivových čerpacích modulů ... 21
5 Specifikace požadavků na technický systém ... 24
6 Vlastní řešení technického systému ... 27
6.1 Inženýrsko-manažerská specifikace ... 27
6.2 Koncepční konstrukční návrh ... 32
6.2.1 Technický transformační proces ... 32
6.2.2 Návrh jednotlivých variant designu ... 33
6.2.3 Výběr materiálu ... 34
6.3 Návrh hrubé stavební struktury příruby ... 36
6.3.1 Návrh tloušťky příruby ... 37
6.3.2 Návrh pouzder pro tyčky ... 46
6.3.3 Návrh žebrování příruby ... 49
6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur ... 52
6.4.1 Dynamické zatížení prudkým zrychlením modulu ... 54
6.4.2 Náhodné vibrace ... 56
6.4.3 Namáhání teplotou a tlakem ... 59
6.4.4 Síly pro nalisování a vylisování ... 63
6.5 Definitivní stavební struktura ... 67
7 Závěr ... 70
Reference ... 71
Příloha A Inženýrsko-manažerská specifikace požadavků na TS ... 74
Příloha B Vyhodnocovací tabulka jednotlivých materiálů ... 77
Příloha C Materiálový list Hostaform® C 13021 ... 78
Příloha D Výpočet tloušťky hlavní stěny pomocí MITCalc ... 81

Seznam obrázků

Obr. 1 Umístění komponent v plug-in hybridním vozidle [3] ... 14
Obr. 2 Schéma palivové soustavy se zpětným tokem [5] ... 15
Obr. 3 Schéma palivové soustavy bez zpětného toku [5] ... 16
Obr. 4 Vzájemné uspořádání příruby a zásobníku paliva ... 17
Obr. 5 Palivová nádrž s modulem pro hatchback BMW 118d E87 [7; 8] ... 17
Obr. 6 Schéma principu odvětrávání soustavy [4] ... 18
Obr. 7 Čerpací palivový modul v nádrži [12] ... 19
Obr. 8 Používaný snímač hladiny paliva v čerpacích modulech [13] ... 19
Obr. 9 Hlavní části palivového čerpadla [14] ... 20
Obr. 10 Příruba z uhlíkové oceli [15] ... 21
Obr. 11 Příruba z nerezové oceli [16] ... 22
Obr. 12 Příruba z termoplastu [18] ... 23
Obr. 13 Definování těsnící plochy příruby [6] ... 24
Obr. 14 Poloha požadovaných zákaznických konektorů [6] ... 25
Obr. 15 Konkurenční příruba od výrobce Delphi – TS0 [6] ... 27
Obr. 16 Konkurenční příruba od výrobce Denso – TSA [6] ... 28
Obr. 17 Konkurenční příruba od výrobce VDO [6] ... 28
Obr. 18 Způsob definování požadovaných vlastností a SWOT hodnocení TS ... 29
Obr. 19 Popis horní strany příruby [6] ... 30
Obr. 20 Popis spodní strany příruby [6] ... 30
Obr. 21 Černá skříňka technického transformačního procesu provozu [20] ... 32
Obr. 22 Orgánová struktura TS ... 32
Obr. 23 Designová varianta bez žeber ... 33
Obr. 24 Designová varianta s obdélníkovými žebry ... 33
Obr. 25 Designová varianta s kruhovými/paprskovitými žebry ... 33
Obr. 26 Výsledky konkurenceschopnosti vybraných materiálů ... 35
Obr. 27 Diagram podmínek spolehlivosti [17] ... 36
Obr. 28 Příruba spojená s nádrží [25] ... 37
Obr. 29 Kruhová deska vetknutá po svém vnějším obvodu a zatížená spojitým zatížením [26] ... 38
Obr. 30 Element kruhové desky zatížený ohybovými momenty [26] ... 38

Obr. 31 Podmínka rovnováhy elementu příruby [26] 39
Obr. 32 Závislost mezi úhlem natočení a posuvem [26] 39
Obr. 33 Předpokládaný průběh radiálního a tečného napětí příruby [28] 41
Obr. 34 Graf průběhu radiálního napětí na přírubě v závislosti na poloměru 42
Obr. 35 Graf průběhu tečného napětí na přírubě v závislosti na poloměru 44
Obr. 36 Průhyb příruby způsobený od spojitého zatížení [26] 44
Obr. 37 Graf průběhu průhybu příruby v závislosti na poloměru 45
Obr. 38 Tvar konce tyčky pro zalisování [6] 46
Obr. 39 Skica tyčky pro zalisování [6] 46
Obr. 40 Průběh napětí v nalisovaném spoji jednoho ze zobecněných válečků [30] 47
Obr. 41 Konstrukční návrh příruby kompletně bez vyztužujících žeber 49
Obr. 42 Řez žebrem uvnitř pouzdra pro tyčku 49
Obr. 43 Základní doporučované rozměry žebra [31] 50
Obr. 44 Vyztužení pouzdra pro zalisování tyčky 51
Obr. 45 Žebrování hlavní stěny příruby 51
Obr. 46 Definování hmotného bodu uvnitř zásobníku paliva 52
Obr. 47 Kontakt typu No Separation a Bonded 52
Obr. 48 Geometrie elementu typu SOLID187 [32] 53
Obr. 49 Diskretizace příruby 53
Obr. 50 Nastavení okrajových podmínek 54
Obr. 51 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na první alternativě příruby 55
Obr. 52 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na druhé alternativě příruby 55
Obr. 53 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na třetí alternativě příruby 56
Obr. 54 Nalezení vlastních frekvencí a tvarů 57
Obr. 55 Hodnoty náhodných vibrací 57
Obr. 56 Výsledky analýzy náhodných vibrací ve směru x a y 58
Obr. 57 Ověřující analýza náhodných vibrací v pootočeném systému o 45° 58
Obr. 58 Globální analýza napětí na přírubě při creepu 59
Obr. 59 Lokalizace největších koncentrací napětí 59
Obr. 60 Maximální průhyb na přírubě 60
Obr. 61 Diskretizace submodulu A 60

Obr. 62 Analýza napětí na submodelu A při hladinách přetlaku 61
Obr. 63 Analýza napětí na submodelu B při hladinách přetlaku 62
Obr. 64 Analýza napětí na submodelu C při hladinách přetlaku 62
Obr. 65 Kontaktní plochy pouzdra a tyčky 63
Obr. 66 Diskretizace pouzdra a tyčky 63
Obr. 67 Graf průběhu lisovací a vylisovací síly 64
Obr. 68 Analýza napětí na pouzdře 64
Obr. 69 Analýza napětí submodelu pouzdra A 65
Obr. 70 Pohled na horní a spodní stranu definitivního TS 67
Obr. 71 SWOT ohodnocení vhodnosti výchozího, konkurenčního a definitivního TS 68
Obr. 72 Potenciál konkurenceschopnosti výchozího, konkurenčního a definitivního TS 68
Obr. 73 Pohledy na sestavu nádrže s příslušenstvím 69
Obr. 74 Řez hrubou stavbou čerpacího palivového modulu umístěného v nádrži 69
Obr. A.1 Inženýrsko-manažerská specifikace na TS 74
Obr. B.1 Vyhodnocení specifikace požadavků jednotlivých alternativ 77
Obr. C.1 Materiálový list Hostaform® C 13021 [22] 78
Obr. D.1 Výpočet tloušťky hlavní stěny pomocí MITCalc [6] 81

Seznam tabulek

Tab. 1 Provozní parametry uvnitř nádrže [6] 26
Tab. 2 Rozsah parametrů pro zatížení příruby náhodnými vibracemi [6] 26
Tab. 3 Popis funkcí a systémových zatížení každého konstrukčního prvku navrhované příruby 31
Tab. 4 Porovnání vlastností navržených materiálů [22; 23; 24] 35
Tab. 5 Vlastnosti materiálu Hostaform® C 13021 [6; 22] 37
Tab. 6 Vypočtené hodnoty radiálních napětí v závislosti na poloměru 42
Tab. 7 Vypočtené hodnoty tečných napětí v závislosti na poloměru 43
Tab. 8 Vypočtené hodnoty průběhu průhybu příruby v závislosti na poloměru 45
Tab. 9 Vyhodnocení životnosti lokace A 61
Tab. 10 Vyhodnocení životnosti lokace B 62
Tab. 11 Vyhodnocení životnosti lokace C 63
Tab. 12 Relaxace napětí v lokaci pouzdra A 65
Tab. 13 Relaxace napětí v lokaci pouzdra B 66

Přehled použitých zkratek a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
FLS	Fuel Level Sensor
FSM	Fuel Supply Module
FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
PA	Polyamid
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
POM-C	Polyoxymethylen kopolymer
PPA	Polyftalamid
SW	Software
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats,
TS	Technický systém
TS0	Výchozí technický systém
TSA	Konkurenční technický systém
TS1	Navržený technický systém
VW	Volkswagen
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Další důležité zkratky jsou detailně popsány v jednotlivých kapitolách.

1 Úvod

V dnešním rychle měnícím se světě s využíváním vyspělých technologií je doprava nepostradatelnou součástí naší populace. Dopravu z velké části reprezentuje automobilový průmysl, který je jedním ze zdrojů neustálých inovací a pokroků. Automobily, stále ještě se spalovacími motory nebo i jejich kombinací s elektromotory, mají nepopíratelnou roli v uspokojování našich každodenních potřeb. Aby spalovací motory plnily svou funkci a pohybovaly se, musí být zajištěn spolehlivý přísun paliva do hnací jednotky.

Plug-in hybridní vozidla představují stále více využívanou alternativu v oblasti automobilového průmyslu, čímž přinášejí nové výzvy a příležitosti v oblasti palivových systémů. Tato diplomová práce se zaměřuje na jeden z klíčových prvků těchto vozidel – čerpací palivový modul pro benzínovou aplikaci, a zejména na návrh příruby tohoto modulu, která hraje hlavní klíčovou roli v udržení těsnosti a v minimalizaci unikajících nežádoucích plynů z palivové nádrže.

Práce začíná teoretickým úvodem do plug-in hybridních vozidel a palivových soustav s důrazem na čerpací palivový modul. Tato část tak poskytuje teoretické základy pro porozumění problematice. Následně se diplomová práce věnuje inženýrsko-manažerské specifikaci požadovaných vlastností na technický systém a jeho hrubému návrhu stavební struktury příruby čerpacího palivového modulu. Tato fáze je zásadní pro zajištění efektivního a bezpečného provozu vozidla a slouží jako základ pro další pokročilé analýzy.

V poslední části se práce zabývá definitivním návrhem příruby čerpacího palivového modulu. Nejvhodnější stavební struktury jsou zvoleny na základě dříve představených hrubých koncepčních návrhů, které jsou následně ohodnoceny dle zvolených kritérií, přičemž jednotlivým kritériím je přiřazena různá důležitost. Vybrané návrhy jsou následně v konečné fázi ověřeny pomocí MKP analýzy a nejvíce vyhovující design příruby je poté detailně rozpracován.

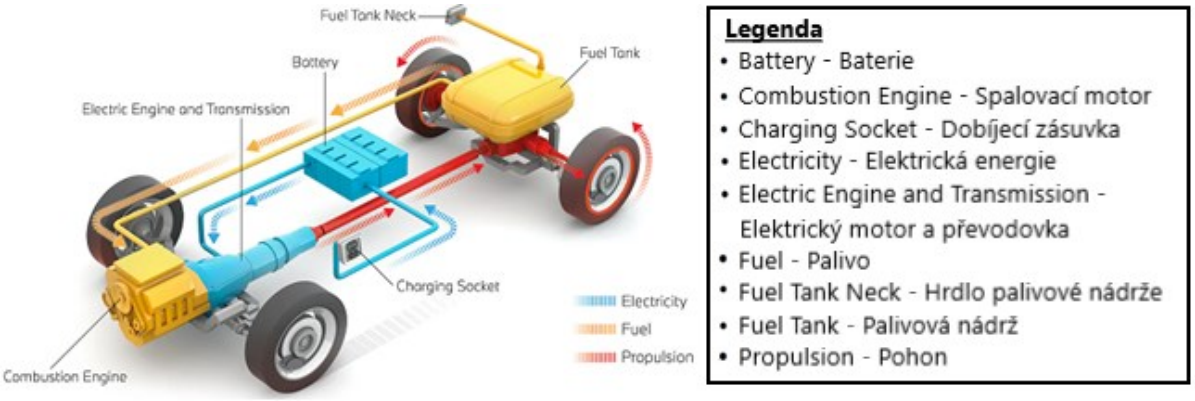
2 Osobní automobily s plug-in hybridním pohonem

Vozidla s plug-in hybridním pohonem (zkratka PHEV z anglického pojmenování Plug-in Hybrid Electric Vehicle) jsou hybridní vozidla, která nezávisle kombinují klasický zážehový motor s elektromotorem a trakční baterií, kterou lze dobíjet z elektrické sítě pomocí palubní nabíječky. Plug-in hybridy tak kombinují výhody elektrických vozidel vhodných pro jízdu ve městě a výhody výkonnějších spalovacích vozidel vhodných pro jízdu větších rychlostí a vzdáleností. Oproti konvenčním hybridním elektrickým vozidlům disponují plug-in hybridy baterií o větší kapacitě, výkonnějším elektromotorem a nabíjecím konektorem. [1]

Plug-in hybridní vozidla nabízí několik významných výhod. První velkou předností plug-in hybridů je umožnění jízdy na elektrickou energii, což má příznivý vliv na snížení spotřeby paliva a emisí oxidů dusíku a skleníkových plynů. Další nespornou výhodou těchto automobilů je možnost přímého dobíjení z elektrické sítě, které přináší zvýšení dojezdu na elektřinu. Elektropohon má navíc možnost přinést dodatečný výkon pro větší akceleraci vozidla a zlepšení jeho jízdních vlastností. Pokud by ale došlo k situaci, kdy by se baterie zcela vybila, vozidlo automaticky začne využívat energii pro pohon z konvenčního spalovacího motoru. Důležité je také podotknout, že majitelé hybridních vozidel nejenže profitují z významného snížení nákladů na provoz vozidla díky nižší spotřebě, ale také jsou osvobozeni nebo výrazně zvýhodněni v platbách silniční daně, dálničního poplatku a parkovacích poplatků v městských oblastech. [1; 2]

Přestože plug-in hybridní vozidla nabízejí řadu výhod, mají i některé nedostatky. Jedna z významných nevýhod je vyšší pořizovací cena ve srovnání s konvenčními automobily. Zvýšené náklady se také týkají údržby a oprav, zejména pokud jde o komplexní elektrické systémy. Další nevýhodou bývá větší hmotnost a menší zavazadlový prostor z důvodu umístění baterie určené k pohonu.

Uspořádání jednotlivých komponent v plug-in hybridních vozidlech se odlišuje v závislosti na výrobci a modelu vozidla. Pro příklad lze uvést Obr. 1, který zjednodušeně znázorňuje rozmístění komponent ve vozidle značky BMW. Jako jeden z nejdůležitějších prvků je elektromotor, který je často uložen vedle klasického spalovacího motoru a jejich přepojování mezi sebou je mechanické – spojkou. Jejich umístění ve vozidle má významný vliv na rozložení hmotnosti vozidla a jeho jízdní vlastnosti. Trakční baterie je obvykle umístěna pod podlahou vozidla nebo u palivové nádrže, která je obvykle umístěna v zadní části vozidla pod sedačkami. Oproti palivovým nádržím u klasického pohonu se pro PHEV aplikaci používají hermeticky uzavřené nádrže, ve kterých může vznikat přetlak až 35 [kPa]. [3]



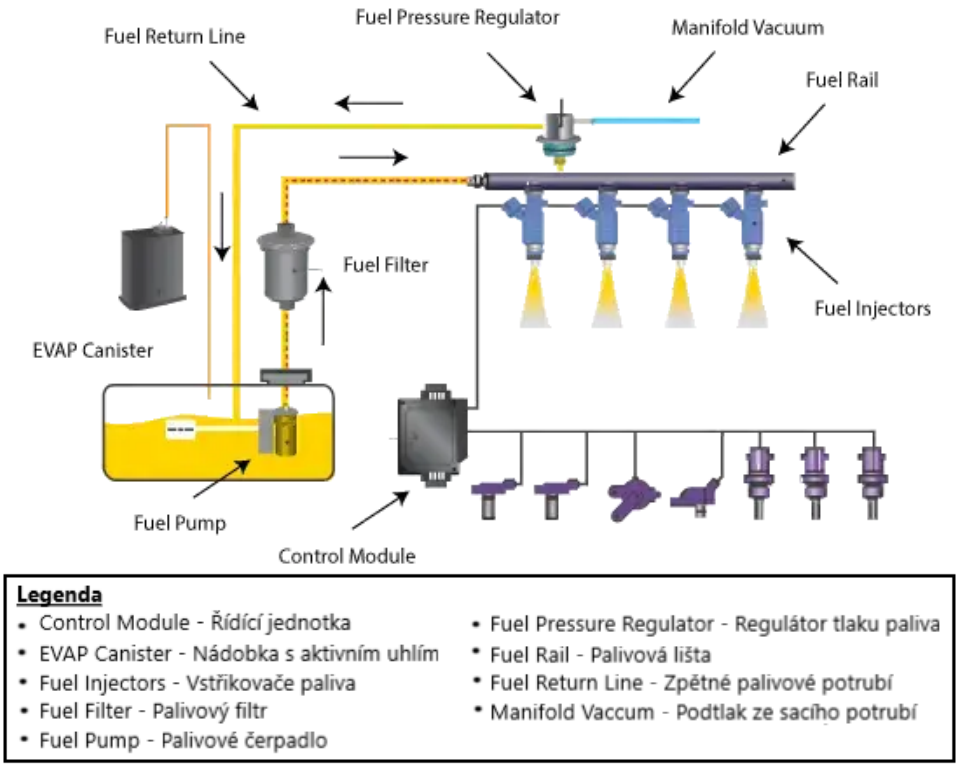
Obr. 1 Umístění komponent v plug-in hybridním vozidle [3]

3 Analýza současných palivových systémů osobních vozidel

Nedílnou součástí pro zajištění hlavní funkce vozidla se spalovacím motorem je palivová soustava. Ta hraje zásadní roli v zajišťování provozní efektivity a spolehlivosti spalovacího motoru v různých provozních stavech, tzn. zprostředkovává správný přísun paliva do primárního systému, ve kterém dochází ke smíchání s přívodem vzduchu a poté následnému zapálení směsi. Přepravování paliva do primárního systému automobilu musí být natolik bezpečné, aby nedocházelo k nekontrolovatelnému úniku paliva. Během tohoto procesu je také nutné palivo čistit od nečistot a případný přebytek paliva vracet zpět do nádrže. Další podmínkou systému je zajištění předepsaného tlaku a průtoku přepravovaného paliva v soustavě, a to bez parních a vzduchových bublin. [4]

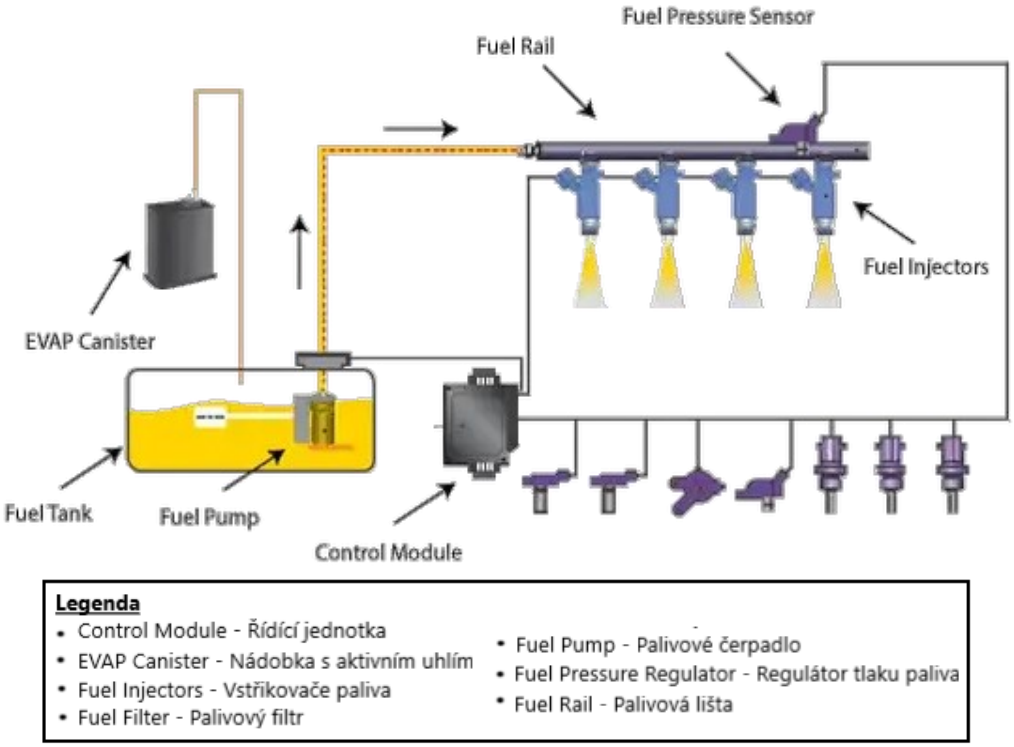
Nároky na palivovou soustavu, zvláště na tlak a průtok, se mění podle jednotlivých provozních stavů motoru. Před nastartováním vozidla musí být zajištěn předepsaný tlak v soustavě, a to zpravidla spuštěním palivového čerpadla. Impulsem pro jeho spuštění může být např. otevření dveří řidiče nebo odemčení vozidla. Dále pak musí systém zajistit potřebný tlak a průtok paliva jak při volnoběžných otáčkách motoru, tak i při konstantní jízdě a akceleraci vozidla. Aby byl dosažen optimální výkon motoru a jeho nízké emise v širokém spektru provozních podmínek, je potřeba zajistit návrh vyhovující mnoha požadavkům. [4]

Palivová soustava představuje propojení mezi palivovou nádrží a samotným spalovacím motorem pomocí potrubí – nejčastěji z plastu, pryže nebo ocelových bezešvých trubek. U dnešních automobilů se vyskytují dva typy systému dopravy paliva – se zpětným vedením od motoru a bez zpětného vedení od motoru. Zjednodušená schémata těchto typů společně s dalšími komponenty pro benzínové aplikace jsou zobrazena níže. [4; 5]



Obr. 2 Schéma palivové soustavy se zpětným tokem [5]

Nevýhodou systému se zpětným vedením (viz Obr. 2) jsou vyšší emise než u systému bez zpětného vedení (viz Obr. 3). To je zapříčiněno ohříváním přebytečného paliva v oblasti motoru, které se vrací zpět do nádrže. Systém bez zpětného vedení se oproti prvnímu typu odlišuje absencí regulátoru tlaku. Ke vstřikovací palivové liště je připojen na místo regulátoru tlaku tlakový senzor, který dává impuls řídící jednotce, a ta změnou otáček čerpadla zajišťuje požadovaný tlak a průtok. Nevýhodou tohoto typu systému je riziko vzniku špiček tlaku a bublin v potrubí. [5]



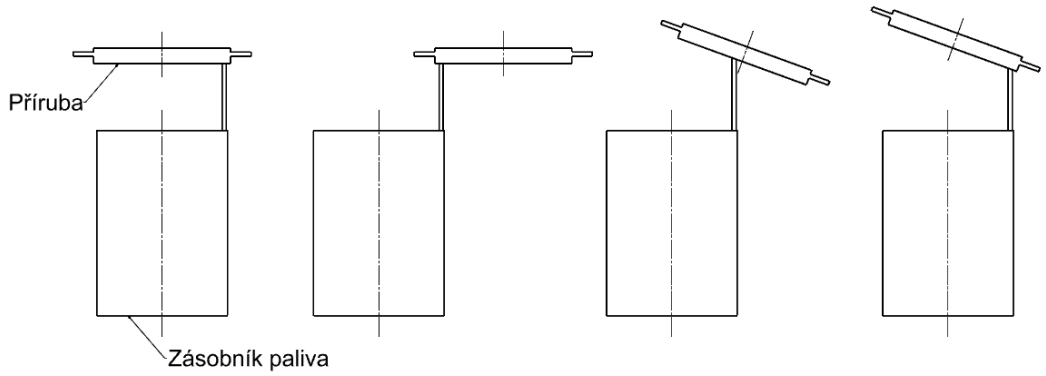
Obr. 3 Schéma palivové soustavy bez zpětného toku [5]

Následující podkapitoly jsou věnovány nejdůležitějším prvkům palivového systému, které ovlivňují čerpací palivový modul.

3.1 Palivová nádrž

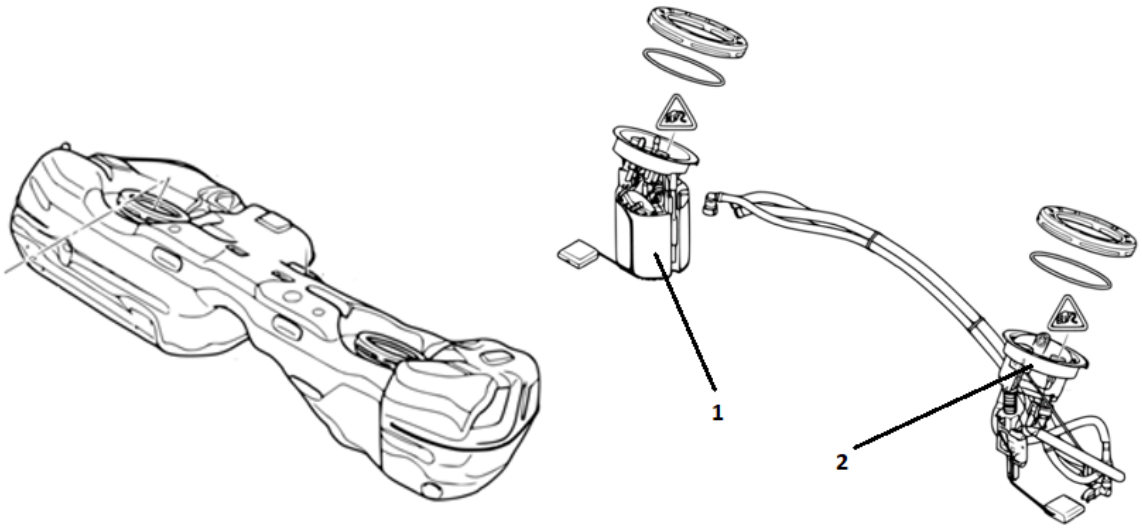
Nejčastěji se palivová nádrž u osobních automobilů s motorem v přední části umisťuje dozadu pod sedačky a podlahu. Hlavní funkcí nádrže není jen uchovávání paliva pro pohonné hmoty, ale musí také zajistit bezpečnost, ochranu proti únikům a optimální využití dostupného prostoru ve vozidle. Návrh těchto palivových nádrží tak zahrnuje pečlivý výběr materiálů a inovativní technologie zpracování s ohledem na ekologii, bezpečnost a účinnost provozu. Klasické svařované plechové nádrže s protikorozní ochranou jsou stále běžné v některých aplikacích, např. u plug-in hybridních vozidel. Proto, aby se u větších nádržích zabránilo přelévání paliva při jízdě automobilu, využívá se příček a vlnolamů umístěných uvnitř nádrže. Pro moderní klasické osobní vozy se však využívají lehčí a levnější antistatické plastové jednokomorové nádrže, které mohou být lépe tvarovány a optimalizovány na konkrétní design automobilu. Další výhodou plastových nádrží je snížení podílu závad, jako jsou např. koroze nebo selhání svarů a lemů, které pak zapříčiňují netěsnost nádrže. [4]

V automobilech se využívá mnoho konceptů vzájemné polohy palivového čerpacího modulu a palivové nádrže. Osa dolní válcovité části palivového modulu (zásobníku paliva) je vždy kolmá ke dnu palivové nádrže – z důvodu nepřetržitého zajištění dostatečné výšky hladiny paliva uvnitř zásobníku, a to vzhledem k případné nízké hladině paliva v nádrži. To však nemusí platit pro polohu příruby modulu při zohlednění požadavků zákazníka na rozměry a tvar nádrže. Nejčastěji se ale vyskytuje uspořádání, kde dosedací plocha příruby je rovnoběžná se dnem nádrže a zároveň jsou osy příruby a zásobníku paliva kolineární. Tato a další možné používané varianty vzájemných poloh příruby a zásobníku, které jsou ovlivněné tvarem nádrže, jsou zobrazeny na Obr. 4. [6]



Obr. 4 Vzájemné uspořádání příruby a zásobníku paliva

V některých případech se lze setkat i se složitějším tvarem palivové nádrže. V rámci požadavků zákazníka nádrž zpravidla vyplňuje, co možná nejvíce, jinak konstrukčně nevyužité zadní prostory v dolní části karosérie. Pro příklad lze uvést složitější tvary nádrží pro automobily se zadním náhonem kol, kde dno nádrže musí být vytvarováno tak, aby nedošlo např. ke kolizi s kardanovým hřídelem. Tyto nádrže mohou mít tvar viz Obr. 5. Na pravé straně tohoto obrázku se vyskytuje soustava dvou čerpacích palivových modulů, které se vkládají do nádrže v levé části tohoto obrázku. [6]

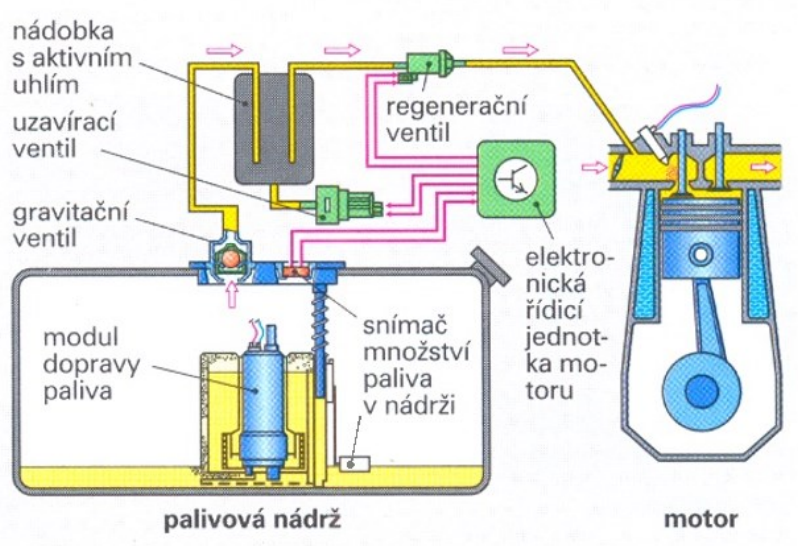


Obr. 5 Palivová nádrž s modulem pro hatchback BMW 118d E87 [7; 8]

Z přiloženého obrázku je zřejmé, že při nízké hladině paliva v nádrži by nemohlo docházet k samovolnému přelévání paliva k palivovému čerpadlu. Proto se zde používá soustava dvou palivových modulů, přičemž pouze jeden modul má palivové čerpadlo (aktivní část palivové nádrže; viz číslo 1) a druhý má pouze trysku (pasivní část palivové nádrže; viz číslo 2), která přepravuje palivo k aktivní části palivové nádrže. Na Obr. 5 si lze také všimnout, že se jedná o případ uspořádání příruby a zásobníku popsaný výše, kdy příruba není rovnoběžná se dnem palivové nádrže.

3.2 Nádobka s aktivním uhlím

Vlivem tepla z okolí, zejména v letních měsících, tepla působícího od motoru a v případě plug-in hybridních vozidel i od baterie dochází k zahřívání oblasti nádrže. Z toho důvodu nastává zvýšená tvorba par z paliva přímo v nádrži, a tím vznikají uhlovodíkové emise. Maximální hodnotu unikajících emisí do atmosféry stanovují zákonná omezení, jako je např. mezinárodní norma UN R154. Proto se pro eliminaci těchto škodlivých látek integruje do palivové soustavy nádobka s aktivním uhlím. Ta má za úkol, díky své poréznosti, dočasně zachycovat uhlovodíkové páry, které unikají z palivové nádrže do nádobky. Z nádobky pak hadičkou dále uhlovodíky proudí skrze regenerační ventil do sacího potrubí spalovacího motoru, ve kterém dochází ke smíšení paliva se vzduchem o předepsaném ideálním stechiometrickém poměru 1:14,7. Popsaný systém odvětrávání je zobrazen na Obr. 6. [4]

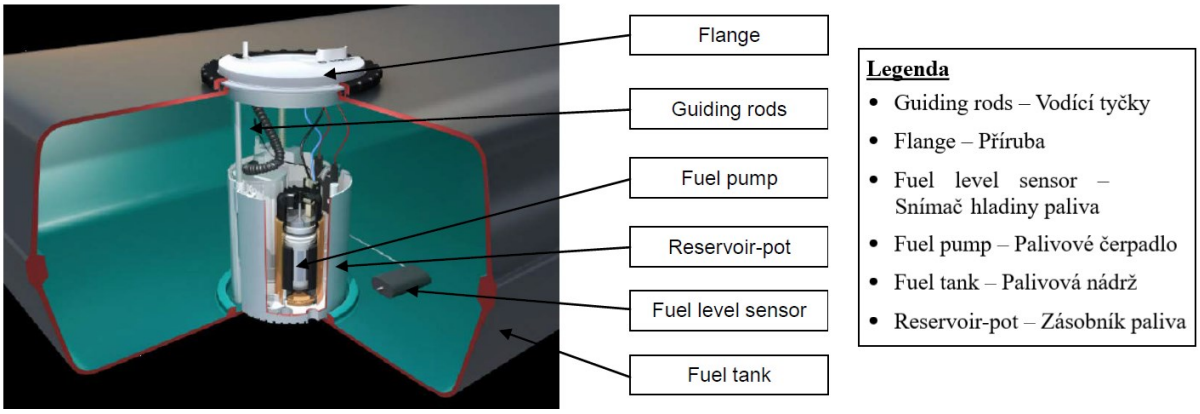


Obr. 6 Schéma principu odvětrávání soustavy [4]

3.3 Nádržový čerpací palivový modul

Čerpací palivový modul neboli v anglickém jazyce Fuel Supply Module (ve zkratce FSM), který je zobrazen na Obr. 7, je zásadním komponentem pro zajištění spolehlivého toku paliva z nádrže do motoru vozidla. Současné moduly se převážně skládají ze zásobníku paliva, vodících tyček, příruby, snímače hladiny paliva v nádrži, elektrického palivového čerpadla, v některých případech regulátoru paliva a dvou filtrů, které mají za úkol vyčistit palivo od nečistot. Pro zaručení dlouhodobé životnosti musí být všechny tyto komponenty vhodně dimenzovány. Pokud dojde k selhání u jedné z komponent, musí být vyměněn zpravidla celý modul. V případě selhání snímače hladiny paliva však někteří výrobci nabízejí také možnost výměny jen této komponenty. [9; 10; 12]

Emisní normy jsou dnes zásadním kritériem pro schválení výroby a následné použití nového spalovacího motoru (vozidla) na konkrétních trzích ve světě. Proto je čerpací palivový modul jedním z důležitých prvků, které musí zajistit správné dávkování paliva (tlak, průtok), jež přispívá k dokonalému spalování a tím dodržení emisních limitů, jak již bylo zmíněno v odstavcích výše. Tyto limity, podle posledních emisních norem po celém světě, nezahrnují pouze nežádoucí látky ve výfukových spalinách, ale také průnik uhlovodíků skrze materiály, ve kterých je palivo uzavřeno. V této diplomové práci se především jedná o průnik skrz navrhovanou přírubu čerpacího palivového modulu a utěsnění mezi přírubou a palivovou nádrží. [11]



Obr. 7 Čerpací palivový modul v nádrži [12]

Snímač hladiny paliva

Další funkcí nádržového čerpacího palivového modulu je kontinuální snímání hladiny paliva v nádrži automobilu. Tato informace je v současných vozidlech zpracovávána řídící jednotkou a poskytuje řidiči informaci o dojezdu vozidla. Tento prvek, který je součástí modulu, se nazývá snímač hladiny paliva, anglicky Fuel Level Sensor (ve zkratce FLS). Snímač hladiny paliva na Obr. 8 se skládá z drátu, na který je z jedné strany připojen jezdec potenciometru pohybující se na odporové desce, a z druhé strany je připevněn plovoucí díl z materiálu o velmi malé hustotě. Je nutné zmínit, že pohyb plovoucího dílu snímače paliva je velmi dynamický a je způsoben pohybem automobilu a následným permanentním přeléváním paliva v nádrži. [13]

Obr. 8 Používaný snímač hladiny paliva v čerpacích modulech [13]

Příruba

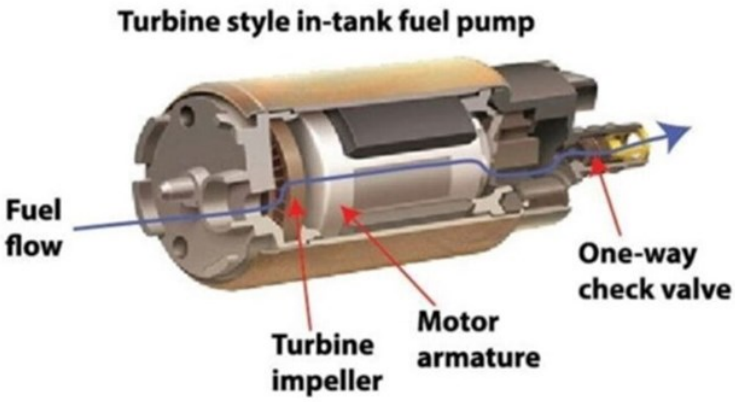
Zejména touto komponentou se tato diplomová práce zabývá, a to z hlediska jejího designového návrhu na základě požadavků zadavatele.

Z hlediska bezpečnosti se jedná o nejdůležitější prvek čerpacího palivového modulu v nádrži. Nejen že obsahuje důležité hydraulické porty potřebné pro správné proudění paliva k motoru a elektrické piny pro napájení pumpy a snímače hladiny paliva, ale v případě neočekávaného převrácení automobilu musí zabránit samovolnému vytékání paliva ven z nádrže. Příruba musí být v okamžiku nárazu velmi odolná a musí v každé situaci zachovat těsnost k nádrži v každém bodě po jejím obvodu. Proti úniku paliva skrz hydraulické porty se implementuje do modulu zpětný bezpečnostní ventil. [10; 12]

Palivové čerpadlo

Součástí dnešního čerpacího palivového modulu ponořeného v palivu (in-tank) je elektrické lopatkové čerpadlo, které je srdcem proudění paliva skrz palivový filtr ke vstřikovacímu systému. Toto uspořádání umožňuje snížení hluku a vibrací nesoucí se do kabiny řidiče, menší nároky na prostor a lepší chlazení. U dřívějších konceptů palivové soustavy bylo běžné, že se palivové čerpadlo a filtr nevyskytovaly uvnitř palivové nádrže (in-line). Pracovní tlak nejnovějších čerpadel se s ohledem na typ paliva pohybuje v rozmezí 3 až 7 barů s průtokovou rychlostí až 250 l/h, přičemž jsou tyto hodnoty řízeny jednotkou vozidla na základě jeho aktuálního jízdního zatížení. Příklady výrobců palivových čerpadel a modulů jsou Continental, Pierburg, Vemo, Bosch, Valeo a VDO. [4; 9]

Činnost čerpadla je znázorněna na Obr. 9, kde je palivo nasáváno sacím otvorem na spodní straně pomocí lopatkového kola (čerpadla). Toto oběžné kolo je poháněno elektromotorem. Zařízení je dále doplněno odplyňovacím kanálem, kterým jsou odváděny případné bublinky. Proto, aby byl po odpojení elektromotoru zachován tlak v soustavě, umisťuje se na víko zpětný ventil, který také předchází vniku bublinek. Otvorem na víku je dále kapalina vytlačována potrubím k motoru. [11]



Legenda:
- Fuel flow – Průtok paliva
- Motor armature – Armatura motoru
- One-way check valve – Jednosměrný zpětný ventil
- Turbine impeller – Oběžné kolo turbíny
- Turbine style in-tank fuel pump – Turbínové čerpadlo v nádrži

Obr. 9 Hlavní části palivového čerpadla [14]

4 Používané materiály pro příruby palivových čerpacích modulů

Vlivem současného rychle se rozvíjejícího průmyslu, zejména toho automobilového, hraje klíčovou roli neustálé hledání inovativních řešení. Ta nám umožní dosáhnout vyšší spolehlivosti, snížení nákladů a zajištění bezpečného provozu, který je šetrnější k životnímu prostředí. Jedním z klíčových bodů, který ovlivňuje kvalitu a výkon automobilů, je důkladná studie a správná volba materiálů pro jednotlivé součásti.

V této kapitole jsou prozkoumány klíčové faktory, které ovlivňují volbu vhodných materiálů pro výrobu přírub nádržových čerpacích palivových modulů. Jsou zde zmíněny jak tradiční, tak i moderní materiály, které se v průběhu let osvědčily, se zaměřením na jejich vlastnosti, výhody a nevýhody. V neposlední řadě je také důležité zkoumat vliv prostředí, v němž se výrobky nacházejí, a to s ohledem na životnost a odolnost použitých materiálů. V případě palivových nádrží se jedná o uhlovodíkové pohonné kapaliny. U vozidel s plug-in hybridním pohonem je navíc potřeba zohlednit zvýšené tlakové požadavky v palivové nádrži.

Cílem této kapitoly je tedy uvést obecný přehled o materiálech, které byly a jsou využívány pro výrobu přírub, a uvést do souvislosti faktory, které ovlivňují jejich správnou volbu pro danou aplikaci. Těmito faktory mohou být konkrétní požadavky na aplikaci, finanční omezení, chemické a tepelné odolnosti s ohledem na odlišné chemické složení pohonných hmot v různých oblastech světa aj. Je zapotřebí také zmínit, že volbu materiálu často stanovuje i sám zákazník.

Níže jsou uvedeny některé z běžně používaných materiálů pro tuto aplikaci:

Uhlíková ocel

Výrobky z uhlíkové oceli byly vhodné pro mnoho standardních aplikací v automobilovém průmyslu. Slitina železa a uhlíku byla dříve často používána i pro výrobu přírub díky své pevnosti, odolnosti vůči opotřebení a ve své době relativně nízkým nákladům. Pro samotnou výrobu příruby byla používána uhlíková ocel ve formě plechového polotovaru, na který byly navařeny či přinýtovány další připojovací komponenty, viz Obr. 10. [6]

Obr. 10 Příruba z uhlíkové oceli [15]

Hlavním důvodem používání tohoto materiálu pro výrobu přírub do nedávné doby byla jeho odolnost vůči vysokým teplotám, které se vyskytují na určitých trzích ve světě. Příkladem mohou být uvedeny pouštní oblasti v Severní Americe a Asii. Pro zajímavost lze uvést, že v těchto oblastech byla do nedávna využívána nádrž z oceli. A to z důvodu, že společně s kovovou přírubou zajišťovaly stabilní systém uchování paliva v nádrži automobilu a zamezení evaporace paliva do atmosféry. [6]

Jejich nevýhodou však byla velká hmotnost a častá reaktivnost s agresivními pohonnými látkami a vlhkostí. Aby se předcházelo možnému narušení povrchové struktury materiálu, bylo použito lakování jako povrchová úprava finální příruby. I když ochranné povlaky přírub byly převážně barevné, technologie lakování nabízela i čiré povlaky. [6]

Z důvodu zvyšujících se nároků na snižování nákladů a hmotnosti, optimalizaci a zrychlení výrobních procesů byl však tento materiál později nahrazen jinou, levnější alternativou. Jak v případě přírub, tak i u dalších komponent v automobilovém průmyslu se začaly používat pro výrobu termoplasty. Díky vývoji technologických procesů již dnes dokážeme vyrobit termoplast, který je chemicky i tepelně odolný i vůči vysokým teplotám na specifických trzích, jak již bylo zmíněno v odstavcích výše.

Nerezová ocel

Nerezová ocel je známá svou vysokou odolností proti korozi, což je důležité pro aplikace, kde jsou součásti vystaveny agresivním pohonným látkám. Proto byl tento materiál používán pro experimentální či speciální (agresivní) palivové kapaliny, např. na ethanolové nebo dieselové bázi. Její nevýhodou ale byla vysoká pořizovací cena a obtížná tvárnost plechového polotovaru a jeho svařitelnost. Proto její použití v této aplikaci skončilo ještě dříve než u uhlíkové oceli. [6]

Obr. 11 Příruba z nerezové oceli [16]

Termoplasty

V dnešní době se jedná se o hojně využívaný konstrukční materiál, a to nejen v automobilovém průmyslu. Tento polymerní materiál je druh plastu, který mění svou strukturu v závislosti na zahřátí a následném ochlazení. To znamená, že materiál se po nahřátí stane plastickým a po ochlazení pevným. Toho je docíleno díky elektrostatickým přitažlivým silám (Van der Waalsovy síly) a jejich vzájemným ovlivňováním. Při zahřátí jejich působení slábne a termoplast se tak stává tvárným. Při větším zahřívání může materiál přecházet až do kapalné fáze. Po ochlazení se termoplast stává opět pevným. Tento proces tavení, reformování a ochlazování se může znovu a znovu opakovat. To umožňuje recyklaci tohoto materiálu, což je v dnešní době důležitá vlastnost v ochraně životního prostředí. [17]

Mezi nejpoužívanější termoplasty u aplikace přírub se řadí polyamid (PA), polyoxymethylen kopolymer (POM-C) a polyftalamid (PPA). Další vhodnou alternativou může být polyketon (PK), který je nejen více mechanicky i chemicky odolnější, ale hlavně disponuje nižší hmotností než nejvyužívanější POM-C (cca o 10 %). [17]

Termoplast tak nahrazuje kovové i nekovové materiály díky svým vlastnostem, kterým je především nižší cena, lepší tvárnost, vyšší chemická odolnost a nižší hmotnost. Důležité je ale zohlednit tepelnou stabilitu a mechanické vlastnosti. Nespornou výhodou jsou i elektrické izolační vlastnosti, které jsou u příruby využity u elektrických kontaktů zastříknutých v přírubě. [17]

Obr. 12 Příruba z termoplastu [18]

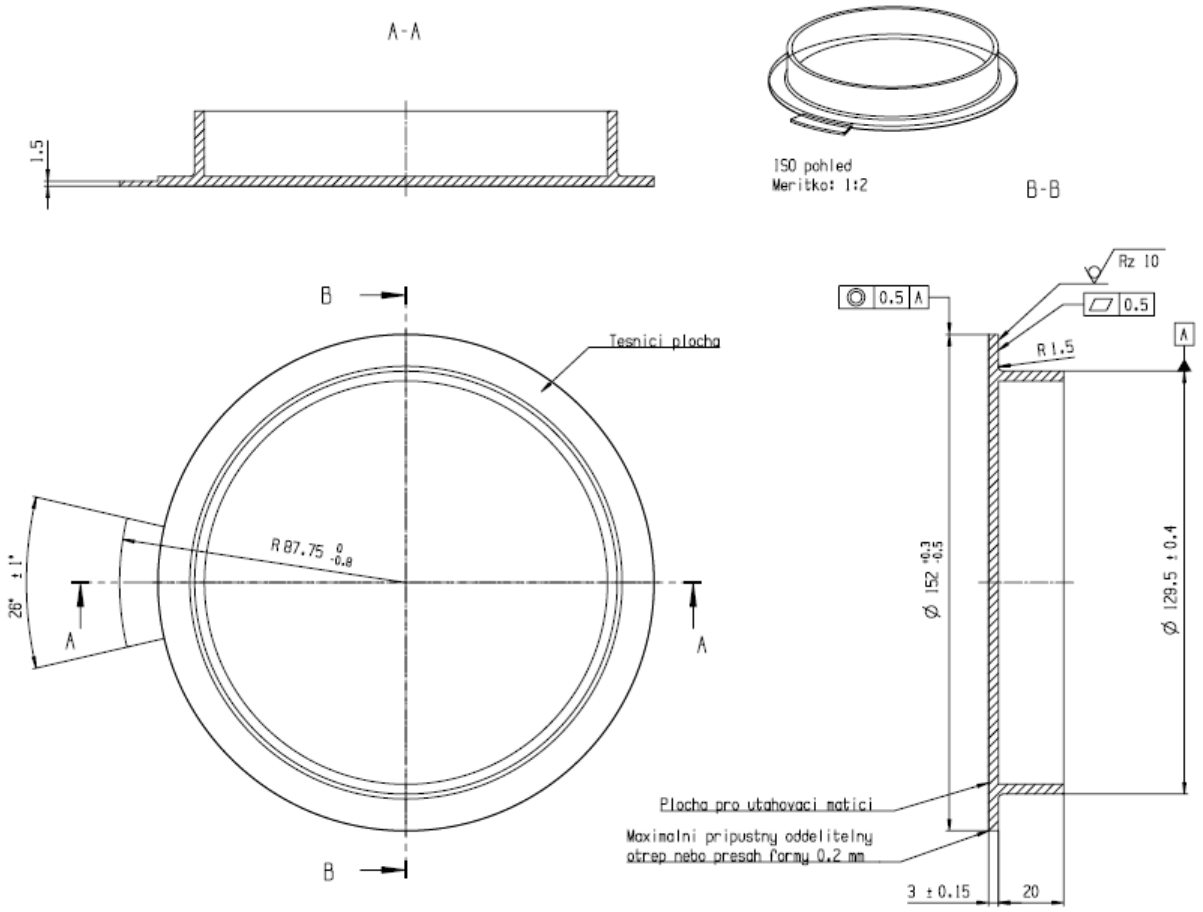
5 Specifikace požadavků na technický systém

S postupným zpřísňováním emisních limitů v automobilovém průmyslu je třeba zavést opatření zabraňující úniku škodlivých látek z palivové nádrže osobního automobilu do ovzduší. Úkolem této diplomové práce je vytvořit dle požadavků zadavatele návrh příruby čerpacího palivového modulu, která slouží pro uzavření a utěsnění nádrže. Dle zadání se jedná o přírubu pro aplikace plug-in hybridních osobních automobilů. To znamená, že u této příruby musí být kladen větší důraz na pevnost.

Jak již bylo zmíněno, oproti běžným osobním automobilům se spalovacím motorem se v nádržích plug-in hybridů vyskytuje provozní přetlak až 35 [kPa]. Tento údaj je další požadavek zákazníka. Přetlak se v nádrži vyskytuje především proto, že nádrž plug-in hybridních vozidel musí být hermeticky uzavřena. To proto, aby se zpomalilo stárnutí paliva v nádrži při nečinnosti spalovacího motoru po delší dobu a nezanášela se tak ve velké míře nádobka s aktivním uhlím. [6]

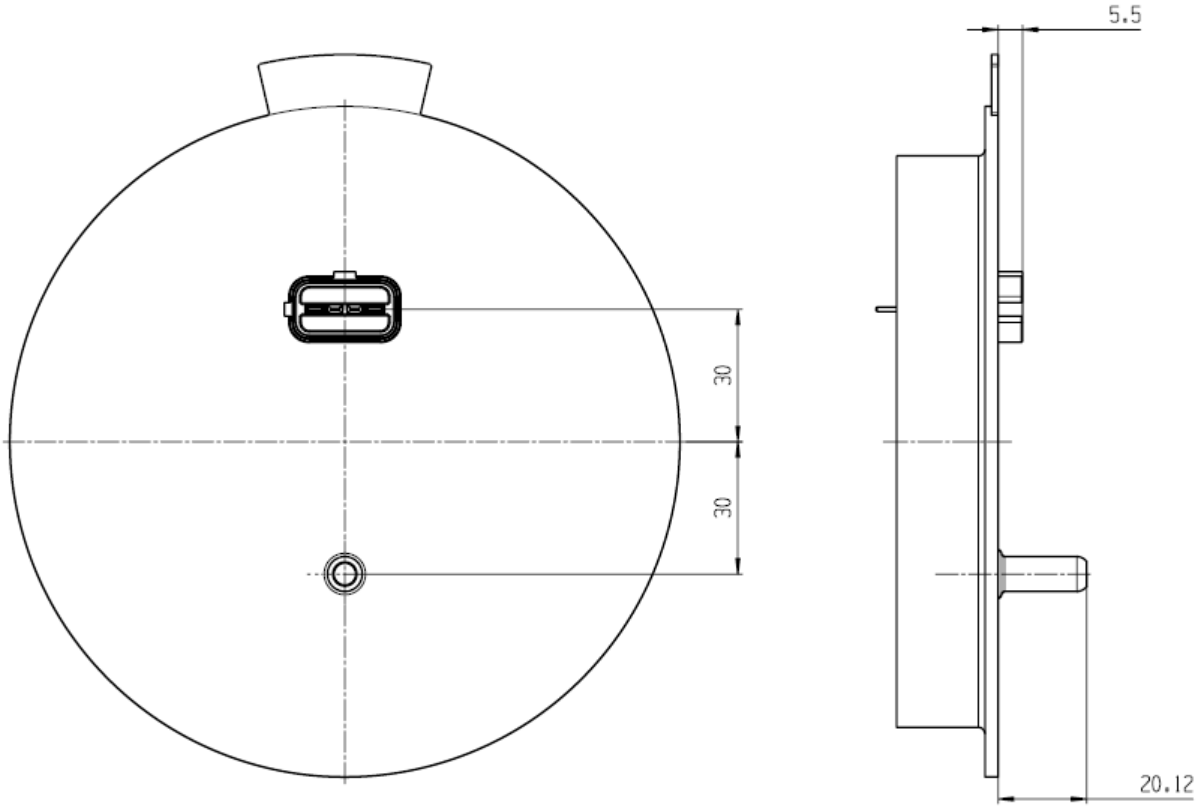
Zákazníkem jsou definované tyto základní parametry a požadavky pro návrh příruby:

- Zástavbová výška celého modulu je 268 [mm].
- Váha zásobníku paliva s vnitřními komponenty je 0,65 [kg].
- Průměr otvoru nádrže pro vložení modulu je 132 [mm] a výška hrdla nádrže je 20 [mm].
- Těsnící plocha příruby je tvořena mezikružím (viz Obr. 13).



Obr. 13 Definování těsnící plochy příruby [6]

— Poloha elektrického a hydraulického konektoru na horní straně příruby viz Obr. 14.



Obr. 14 Poloha požadovaných zákaznických konektorů [6]

— Tvar hydraulického konektoru na horní straně příruby 5/16“ dle normy SAE J2044 ve vertikální poloze (norma je poskytnuta k nahlížení zadavatelem práce).

— Tvar elektrického konektoru na horní straně příruby je určen specifickým zákaznickým požadavkem. Zadavatelem práce jsou proto poskytnuty podklady pro zakomponování konektoru do navrhované příruby, které podléhají know-how a nelze je zveřejnit.

— Tvar hydraulického konektoru na spodní straně příruby je opět určen specifickým zákaznickým požadavkem. Zadavatelem práce jsou proto poskytnuty podklady pro zakomponování konektoru do navrhované příruby, které podléhají know-how a nelze je zveřejnit.

— Tvar elektrického konektoru na spodní straně příruby (pro palivovou pumpu a senzor hladiny paliva) je také určen specifickým zákaznickým požadavkem. Zadavatelem práce jsou proto poskytnuty podklady pro zakomponování konektoru do navrhované příruby, které podléhají know-how a nelze je zveřejnit.

— Je zapotřebí provést návrh materiálu příruby.

— Příruba musí i při prudkém zrychlení či zpomalení o hodnotě 50 [g] zachovat těsnost systému, tzn. nesmí dojít k porušení hlavní stěny příruby. Inicializace tvorby trhliny musí vznikat v místech dostatečně vzdálených od hlavní stěny příruby s minimálním bezpečnostním faktorem k = 1,5 [-].

— Příruba musí vyhovovat tlakovým a teplotním podmínkám v nádrži i požadavkům na životnost, viz Tab. 1.

Tab. 1 Provozní parametry uvnitř nádrže [6]

Tlak [bar]	Teplota [°C]	Čas [h]
-0,15	-20	10000
-0,15	0	30000
0,2	30	65000
0,35	40	25000
0,35	60	2000

— Příruba musí být dostatečně odolná vůči náhodným vibracím. Parametry těchto vibrací jsou zadány v Tab. 2. Doba trvání vibrací ve horizontálních směrech pootočených o 90 [°] je 24 hodin.

Tab. 2 Rozsah parametrů pro zatížení příruby náhodnými vibracemi [6]

Horizontální směr	
10 [Hz]	9,6800 [(m/s²)²/Hz]
300 [Hz]	0,3260 [(m/s²)²/Hz]
1000 [Hz]	0,0296 [(m/s²)²/Hz]

— Je zapotřebí provést návrh pouzdra opěrné a vodící tyčky pro maximální lisovací sílu 600 N a minimální vytahovací sílu 400 N. Specifikace tyček je dodána zadavatelem.

6 Vlastní řešení technického systému

6.1 Inženýrsko-manažerská specifikace

Vyjasnění zadání proběhlo na základě obecných informací z internetu a konkrétních údajů dodaných zadavatelem práce. Dále byl proveden průzkum trhu, na který dodávají tento typ produktu různí výrobci, např. Valeo, Continental, Denso, Delphi, Bosch, Pierburg atd. Každý tento výrobce dodává příruby, které jsou součástí celku čerpacího palivového modulu, o různých tvarech a materiálech (viz kapitola č. 4 – Používané materiály pro příruby palivových čerpacích modulů). Nicméně některé parametry jsou vázané normami nebo zákaznickými požadavky, a tudíž se příruby v zásadě mezi konkurenty výrazně neliší.

Nejzajímavějším dohledaným patentem je patent č. US2012234414A1 zaregistrovaný pod výrobcem DENSO INTERNATIONAL AMERICA INC. Vlastník patentu jménem Powell Patric vyvinul přírubu pro čerpací palivový modul, která má na spodní straně drážky umožňující rychlou změnu polohy pouzder pro zalisování tyček. Výhodou tohoto konstrukčního řešení je unifikování příruby pro více typů modulů. [19]

Zdrojem inspirací pro návrh jednotlivých konkurenceschopných variant s různými tvarovými modifikacemi byly také některé příruby (viz Obr. 15–17) od různých výrobců poskytnutých zadavatelem diplomové práce.

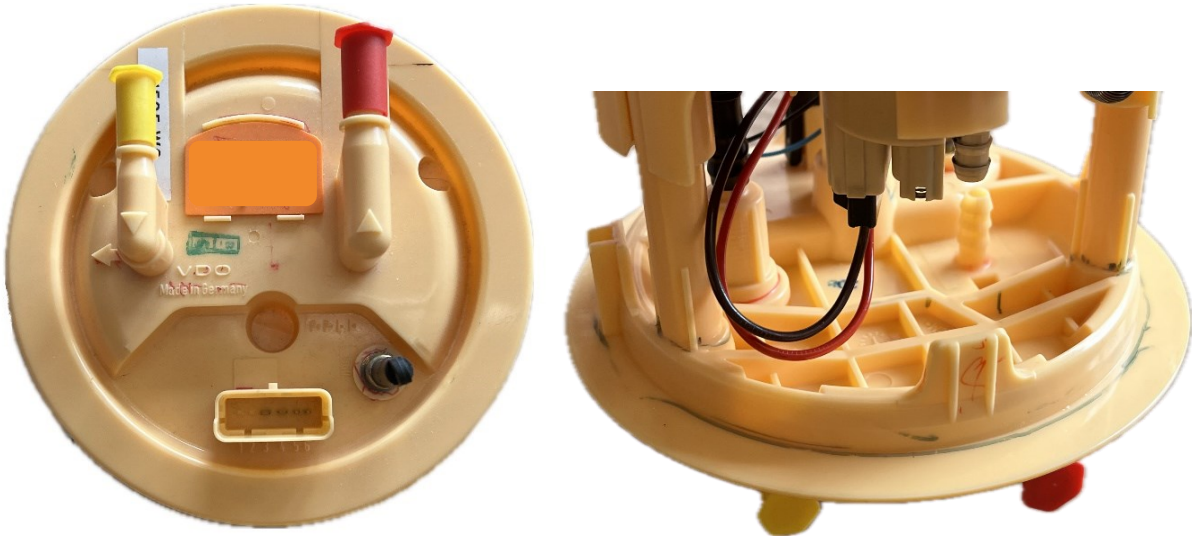
Prvním vzorem je příruba pro plug-in hybridní automobil VW Golf 7 (Obr. 15) od automobilové společnosti Delphi Technologies, která působila jako nezávislá společnost na trhu od roku 2017 do roku 2020. Na spodní straně hlavní stěny této příruby zvolil výrobce částečné vyztužení pomocí obdélníkové mřížky. Pouzdra jsou pro zalisování tyček poměrně krátká a jsou zpevněna čtyřmi žebry. Tento výrobek je zvolen jako výchozí technický systém TS0.

Obr. 15 Konkurenční příruba od výrobce Delphi – TS0 [6]

Druhým vzorem, který je zobrazen na Obr. 16, je příruba pro neznámý osobní automobil od mezinárodního výrobce Denso. Jedná se o jednoho z nejvýznamnějších evropských dodavatelů v oblasti automotive. Tato příruba je zajímavá svým paprskovým žebrováním na své spodní straně. U pouzder, do kterých se lisují tyčky, se nachází osm vyztužujících žeber. Další zajímavostí je, že se na přírubě nachází celkem čtyři tato pouzdra, která umožňují unifikovat přírubu pro více typů modulů. Tato příruba je zvolena jako konkurenční technický systém TSA.

Obr. 16 Konkurenční příruba od výrobce Denso – TSA [6]

Poslední inspirací je příruba na Obr.17, která je vyrobená od německé značky VDO společnosti Continental. Žebrování na spodní straně příruby je spíše obdélníkové. Její největší zvláštností jsou tyčky, které propojují přírubu se zbytkem palivového modulu. Tato tyčka není nijak zalisovaná ani svařená, ale je vystříknutá společně s celou přírubou. I když by se dalo říci, že se jedná o nejnovější koncepci, která má určitě spoustu výhod, zadáním této diplomové práce je navrhnout pouzdro pro konkrétní tyčku z konstrukční oceli.



Obr. 17 Konkurenční příruba od výrobce VDO [6]

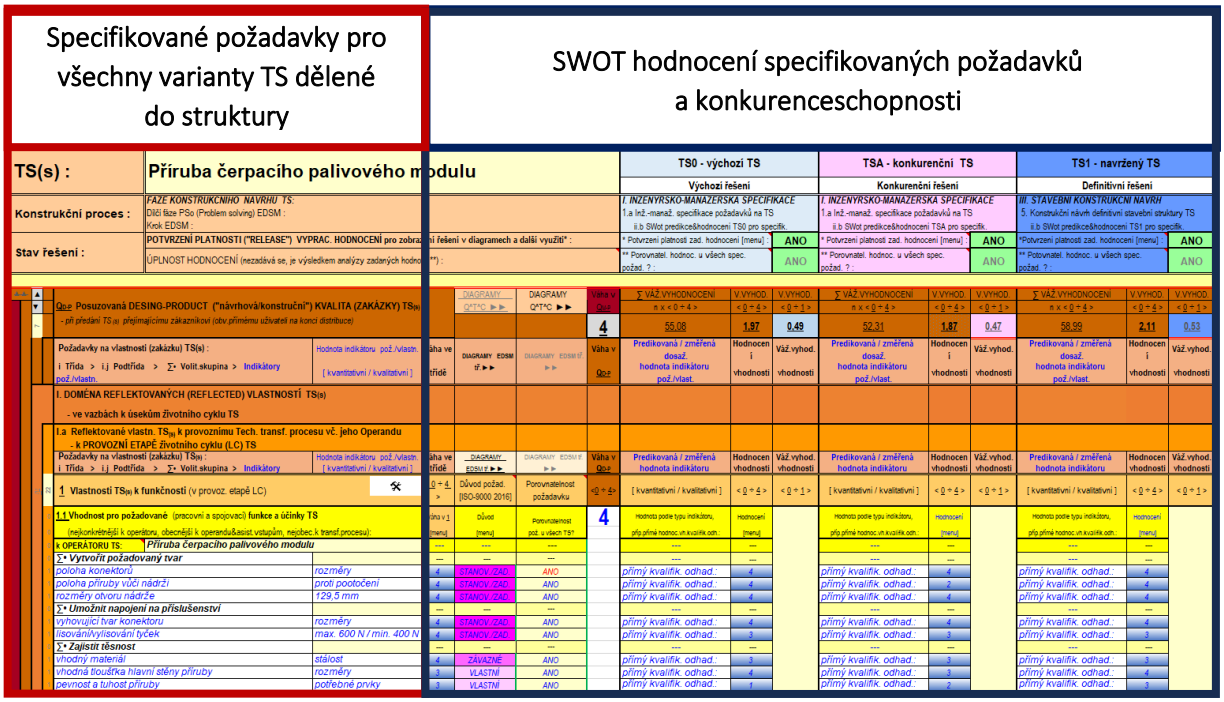
V rámci inženýrsko-manažerské specifikace požadavků na technický systém (TS) je vytvořen s využitím SW RS&EV [Hosnedl&al 2022] požadavkový list pro celý životní cyklus, ve kterém je nejdříve hodnocen dle vlastností výchozí technický systém (TS0) a konkurenční technický systém (TSA). Po definitivním zvolení jedné z vlastně navržených variant TS (příruby) je provedeno SWOT hodnocení i pro finální návrh příruby (TS1).

Vlastnosti se v požadavkovém listě dělí do dvou domén (reflektované a vkonstruované vlastnosti), které se dále skládají z dalších dílčích podskupin konkrétních vlastností. Ohodnocení probíhá pomocí stupnice váhy od 0 do 4. Na základě výsledků ohodnocení jednotlivých konkurenceschopných alternativ je následně získána ta nejoptimálnější.

Pro specifikaci požadavků transformačního systému platí, že:

- **Operandem** je příruba čerpacího palivového modulu.
- **Operátorem** je tlak par, únik paliva a emisí.
- **Transformačním procesem** je utěsnění, připojení příslušenství, vedení paliva.

Na Obr. 18 je zobrazena část listu, ve kterém jsou specifikovány požadované vlastnosti na levé straně a na pravé straně je SWOT hodnocení výchozího (TS0), konkurenčního (TSA) a konstrukčního definitivního technického systému (TS1).

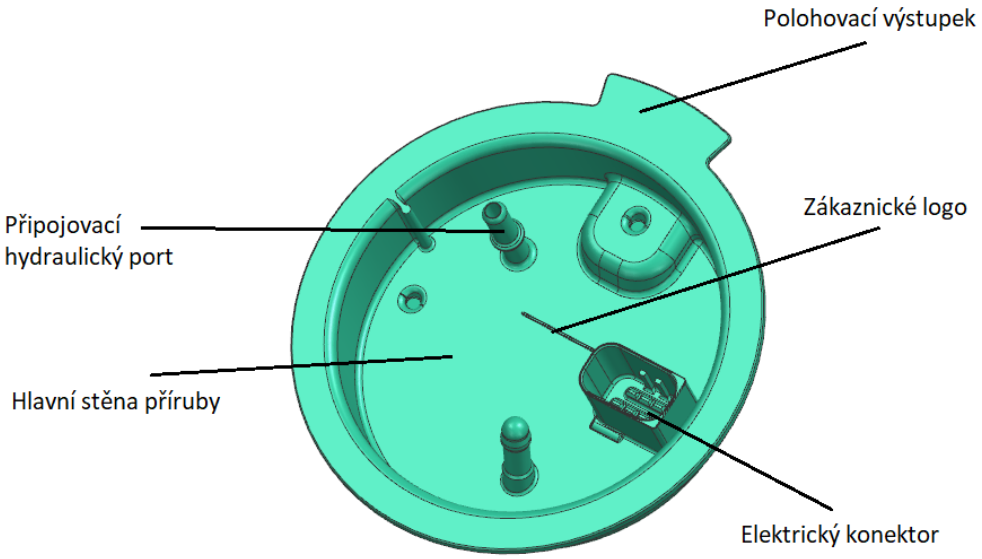


Obr. 18 Způsob definování požadovaných vlastností a SWOT hodnocení TS

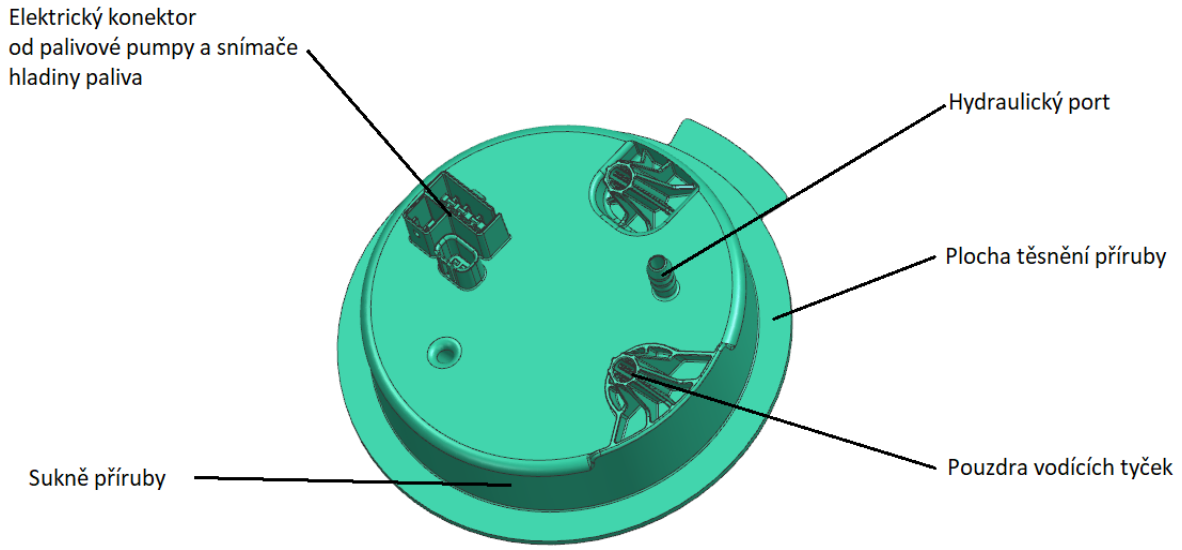
Hodnocení jednotlivých variant TS je provedeno kvalifikovaným odhadem bez dalšího odůvodňování, viz Příloha A. Součástí ohodnocení je i grafické porovnání mezi jednotlivými variantami.

Předtím než bude proveden návrh jednotlivých alternativ TS, je vhodné provést rozbor jednotlivých konstrukčních prvků, které by se měly vyskytovat na navrhované přírubě. Každý tento konstrukční prvek plní určitou funkci a zároveň je v provozních podmínkách zatěžován vnějšími a vnitřními silami. Tento přehled je zhotoven v Tab. 3 na následující straně. Na základě této tabulky je následně jednodušší predikovat, kde by mohly vznikat místa s vyšší koncentrací napětí, a tím tak i inicializovat místa poškození materiálu.

Pro úplnost pochopení uvedené tabulky je níže prezentován zjednodušený popis blíže nespecifikované příruby, viz Obr. 19 a 20. Spodní strana příruby na Obr. 20 neobsahuje držák na kabely. Tento konstrukční prvek je uveden až ve vlastním konstrukčním návrhu.



Obr. 19 Popis horní strany příruby [6]



Obr. 20 Popis spodní strany příruby [6]

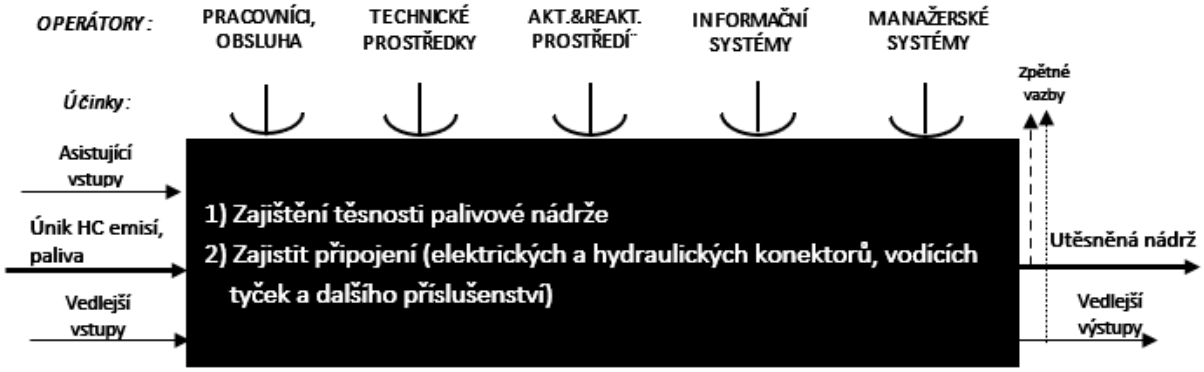
Tab. 3 Popis funkcí a systémových zatížení každého konstrukčního prvku navrhované příruby

Stanovení funkcí											
Technický systém	Příruba čerpacího palivového modulu										
Funkce technického systému	1) Zajistit těsnost palivové nádrže (zajistit těsnost proti výparům paliva - HC emise) 2) Zajistit připojení (elektrických a hydraulických konektorů, vodících tyček a dalšího příslušenství)										
Konstrukční celky	Horní strana příruby				Dolní strana příruby						
Konstrukční prvky	Hlavní stěna příruby	Polohovací výstupek	Připojovací hydraulický port	Elektický konektor	Hlavní stěna příruby	Plocha těsnění příruby	Sukně příruby	Pouzdra vodících tyček	Hydraulický port	Elektrický konektor od palivové pumpy a snímače hladiny paliva	Držák na kabely
Funkce konstrukčního prvku	Zajištění těsnosti palivové nádrže	Zajištění polohy modulu uvnitř hrdla nádrže	Zajištění připojení externího palivového vedení	Přenos elektrického signálu	Zajištění těsnosti palivové nádrže	1) Zajištění polohy modulu v nádrži 2) Zajištění těsnosti proti výparům (HC emise)	Zajištění polohy modulu uvnitř hrdla nádrže	1) Zajištění uchycení tyček k přírubě 2) Zajištění požadovaného lomu v konkrétním místě v případě nárazu vozidla	Zajištění připojení vedení od palivové pumpy	Přenos elektrického signálu	Zajišťuje správné umístění a uspořádání kabelové sady
Systémové zatížení											
Tlak a teplota paliva transportovaného pumpou k motoru	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-
Tlak výparů paliva v nádrži (max. 350 mbar)	X	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X
Teplota okolí (dlouhodobá)	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Teplotní šok	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Chemické prostředí (palivo)	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Chemické prostředí (oleje, kyselé deště, posypová sůl)	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
UV záření	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Vliv okolních nečistot od vozovky	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Vibrace vozidla a modulu	X	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X
Zatížení způsobené spojením konstrukčního prvku k jiné konstrukční součásti	X	-	X	-	-	-	X	X	X	-	-
Poznámka: • Elektrický kabel je brán jako poddajný materiál • Má systémové zatížení vliv na funkci prvku/součásti? → "X" - ano; "-" - ne											

6.2 Koncepční konstrukční návrh

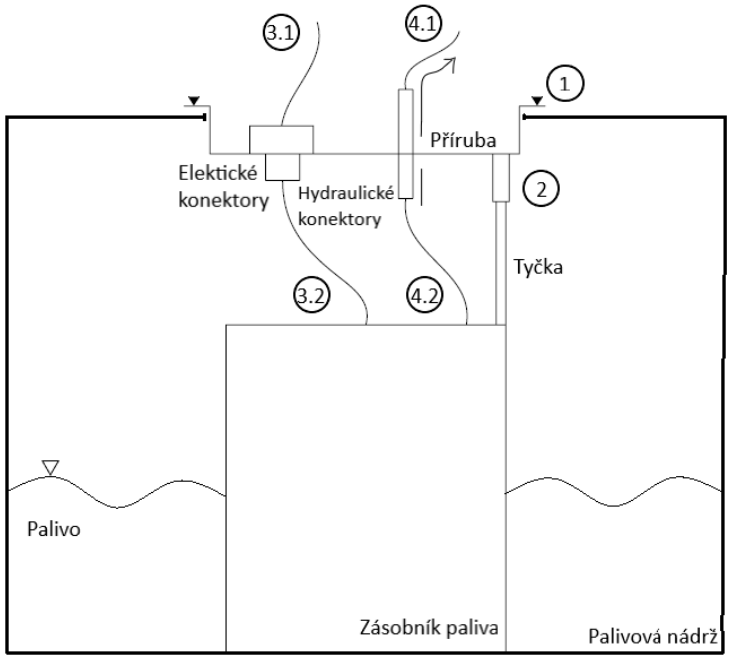
6.2.1 Technický transformační proces

Pro soubor vzájemně propojených činností, které přeměňují vstupy na požadované výstupy, je na Obr. 21 sestrojena černá skříňka tohoto technického transformačního procesu. Jako vstupující člen do procesu byl označen únik emisí a paliva ven z nádrže automobilu. Tomuto problému je zapotřebí zamezit, proto požadovaným výstupem transformačního procesu je označení utěsnění nádrže. Hlavním účelem navrhovaného TS musí být tedy jak zajištění těsnosti palivové nádrže, tak i zajištění připojení různých konektorů potřebných pro zajištění přepravy paliva k spalovacímu motoru. Vedlejšími vstupy pro transformační proces mohou být negativní vlivy na výrobek, jako jsou např. prach, UV záření a chemické prostředí. Jako vedlejší výstup může být označen nárůst tlaku uvnitř nádrže.



Obr. 21 Černá skříňka technického transformačního procesu provozu [20]

Pro lepší pochopení navrhovaného technického systému je zpracována i orgánová struktura sestavy (viz Obr. 22) s jednotlivými funkcemi konstrukčních prvků na technickém systému – přírubě.

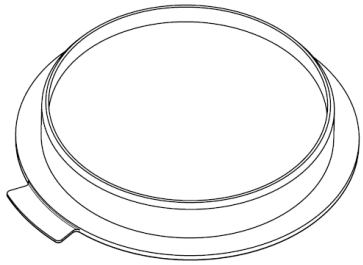


Legenda:
1 – ukotvení příruby k nádrži
2 – zalisovaná tyčka v přírubě zajišťující vzájemnou polohu mezi zásobníkem a přírubou
3.1, 3.2 – přenos elektrického signálu
4.1, 4.2 – vedení paliva ke spalovacímu motoru

Obr. 22 Orgánová struktura TS

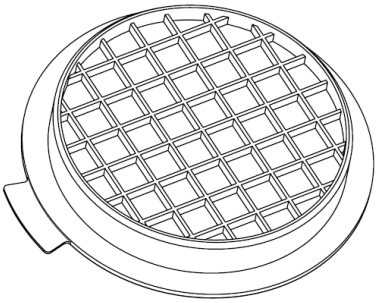
6.2.2 Návrh jednotlivých variant designu

Na základě rešerše trhu a dalších získaných poznatků jsou vytvořeny tři designové varianty příruby. První variantou na Obr. 23 je příruba bez vyztužujících žeber. Tento design je používaný převážně pro aplikace klasických spalovacích motorů. Přesto ale je s touto variantou dále pracováno, neboť se tato varianta jeví jako nejlevnější volba. Zda je tato varianta vhodná pro aplikaci řešenou v této diplomové práci, je ověřeno v kapitole – 6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur.



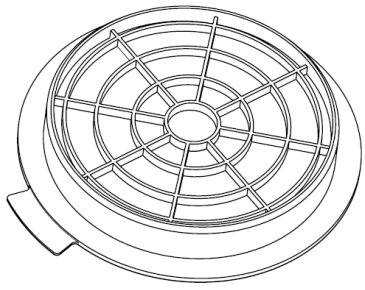
Obr. 23 Designová varianta bez žeber

S nástupem plug-in hybridních vozidel na trhu se z důvodu přetlaků v nádrži začaly příruby vyztužovat žebry. Proto jsou provedeny další dva návrhy příruby. První z nich je vyztužena žebry tvořící čtyřúhelníkový tvar, viz. Obr. 24. Tento způsob žebrování je vyobrazen i na konkurenční přírubě TS0 na Obr. 15.



Obr. 24 Designová varianta s obdélníkovými žebry

Druhou navrženou variantou vyztužení je příruba vyztužená kombinací kruhových a paprskovitých žeber, viz Obr. 25.



Obr. 25 Designová varianta s kruhovými/paprskovitými žebry

Přímým kvalifikovaným odhadem je předpokládáno, že varianta na Obr. 25 bude lépe odolávat spojitému zatížení způsobeného přetlakem v palivové nádrži. Rozhodujícím kritériem pro zvolení nejvhodnějšího tvaru jsou však výsledky provedených ověřujících numerických výpočtů v kapitole – 6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur.

6.2.3 Výběr materiálu

Při výběru správného materiálu navrhované součásti se vychází z požadovaných vlastností:

- Rozmezí teplot – -20 až 60 [°C];
- Rozmezí tlaku je – -0,15 až 0,35 [bar];
- Požadovaná životnost je 15 let;
- Splnění limitů evaporativních emisí dle normy UN R154 [21];
- Dobrá tvarová stálost;
- Odolnost vůči chemikáliím a UV záření;
- Vysoká mechanická pevnost a tuhost;
- Dobrá rázová houževnatost;
- Dobrá vyrobitelnost.

S ohledem na ekonomické, výrobní, spolehlivostní, legislativní požadavky a požadavky vypsané výše je zvolena skupina konstrukčních materiálů termoplastů, ze kterých jsou vybrány tři vhodné podskupiny – POM, PA a PPA.

POM

Polyoxymethylen, také známý jako polyacetal, je konstrukční semikrystalický polymer, který se běžně používá v automobilovém průmyslu. Vyznačuje se svou velmi nízkou nasákavostí vlhkosti, vysokou pevností, odolností vůči palivům a tvarovou stálostí, a to i při provozních teplotách -40 až 100°C. Nevýhodou je ale jeho nízká odolnost vůči kyselinám, které způsobují v plastu korozi, a nízká odolnost vůči UV záření. Ta se projevuje ztrátou barvy nebo degradací materiálu. Tento problém se dá ale eliminovat přidáním různých stabilizačních složek do směsi materiálu. Pro tuto podskupinu je zvolen zástupce POM-C Hostaform® C 13021 (alternativa TS **a**). [22]

PA

Polyamid, též známý jako nylon, je také konstrukční semikrystalický polymer. Představuje optimální kombinaci mechanických, chemických a ekonomických vlastností. Vzhledem k větší schopnosti pohlcovat vlhkost materiálu je pro tuto podskupinu zvolen zástupce PA66 Ultramid A3WG7 (alternativa TS **b**) od výrobce BASF, který ale musí být dále vyztužen skelnými vlákny pro udržení tvarové stálosti. To už může být ale nevýhodou při zpracovávání materiálu. [23]

PPA

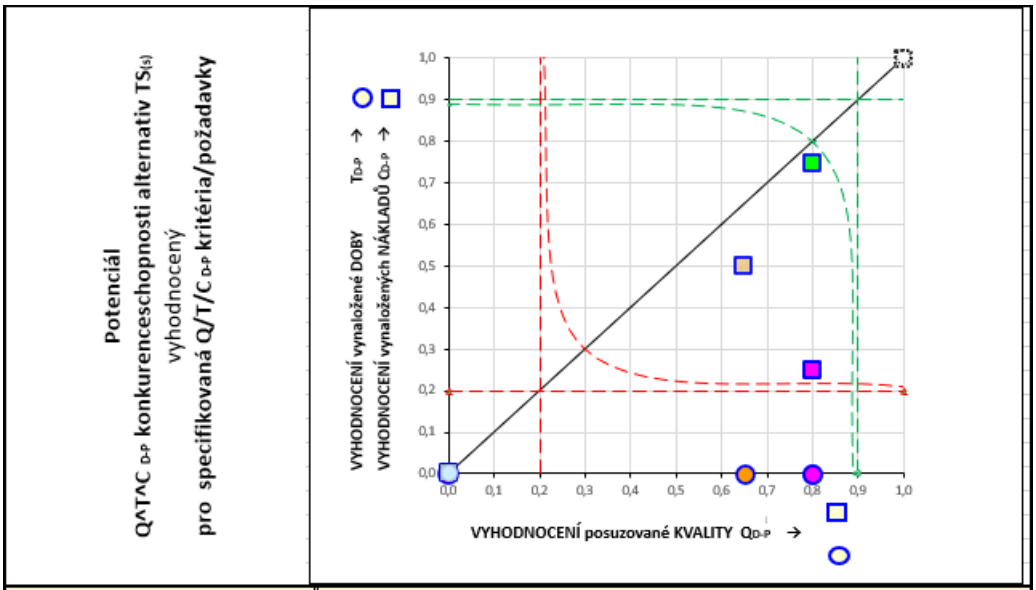
Jedná se o materiál na bázi polyftalamidových poloaromatických polyamidů, který má ze všech tří vybraných materiálů největší pevnost a tuhost v širokém rozsahu teplot, chemikálií a vlhkosti. Svou vyšší odolností vůči chemikáliím je odolný i vůči naftě. Proto se tento materiál používá převážně pro dieselové aplikace. Nevýhodou tohoto materiálu je ale jeho cena, která je hlavně ovlivněná výrobními náklady kvůli vysokým zpracovatelským teplotám a tlaku. Pro tuto podskupinu je zvolen zástupce Zytel® HTN51G35HSL (alternativa TS **c**). [24]

Konkrétní výhody a nevýhody vybraných materiálů jsou shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4 Porovnání vlastností navržených materiálů [22; 23; 24]

Materiál	Výhody	Nevýhody
POM-C Hostaform® C 13021	Odolnost vůči palivům	UV odolnost
	Rázová houževnatost	Odolnost vůči hořícímu dieselu
	Creep	Zpracovatelnost
	-	Odolnost vůči silným kyselinám
PA Ultramid A3WG7	Výborná odolnost vůči palivům	Nasákavost
	Rázová houževnatost	Měknutí materiálu při vyšších teplotách
	Creep	-
PPA Zytel® HTN51G35HSL	Odolnost vůči palivům	Zpracovatelnost
	Výborná tvarová stálost	Cena
	Odolnost vůči kyselinám	-

Na základě těchto vlastností je provedeno i SWOT ohodnocení jednotlivých materiálů s využitím podpory SW RS&EV [Hosnedl&al 2022], viz Obr. 26. Vyhodnocovací tabulka konkrétních vlastností je součástí Přílohy B.



◄◄ Zpět List PROCESSES | ◄◄ SPECIFIKACE kritérií, HODNOCENÍ vhodnosti a VYHODNOCENÍ Q/T/C vhodnosti

EDSM třída Q/T/C požadavků na metavlastnosti (zakázky) TS :		QD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" posuzovaná KVALITA org. str. TS(s)	TD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" vynaložená DOBA org. str. TS(s)	CD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" vynaložené NÁKLADY org. str. TS(s)
Životní etapa (LCst) TS :		Všechny, obvykle jen provoz	Všechny, obvykle k distribuci	Všechny, obvykle k distribuci
Váha kriterií / požadavků < 0 ÷ 4 > :		4	4	4
Výsledky vážení SWOT vyhodnocení < 0 ÷ 1 >	Org. strukt. výchozího TS0*	0,00	0,00	0,00
	Alternativa org.strukt. TS a	0,80	0,00	0,75
	Alternativa org.strukt. TS b	0,65	0,00	0,50
	Alternativa org.strukt. TS c	0,80	0,00	0,25
	Alternativa org.strukt. TS d	0,00	0,00	0,00
	Org. strukt. ideálního TSi	1,00	1,00	1,00

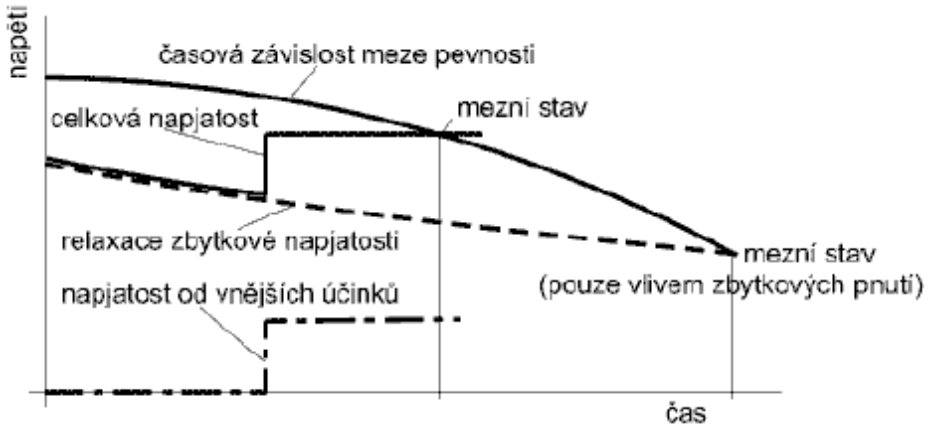
Obr. 26 Výsledky konkurenceschopnosti vybraných materiálů

V souladu se zobrazenými výsledky výše je zvolen vítězný konstrukční materiál pro TS **a** – POM-C Hostaform® C 13021 od výrobce Celanese. Jeho materiálový list je součástí Přílohy C.

6.3 Návrh hrubé stavební struktury příruby

U samotného návrhu tvaru a rozměrů pevného funkčního výrobku z termoplastu je důležité si uvědomit i další parametry, jako jsou např. možnosti materiálu, technologie výroby, ergonomická, ekonomická a bezpečnostní hlediska. Všechny tyto parametry musí spolu zajistit minimální požadovanou životnost výrobku. V automobilovém průmyslu je kladen požadavek projektované životnosti na minimálně 15 let. [17]

Jelikož je výrobek zatěžován současně řadou vnějších vlivů, které ovlivňují jeho celkovou životnost, je vždy zapotřebí již hotový výrobek na konci vývojové fáze vhodně a dostatečně otestovat v testovacích laboratořích dle zátěžových stavů specifikovaných zákazníkem. Je důležité ověřit, že během životnosti nedojde k žádnému z hlavních typů poruch, tedy k meznímu stavu výrobku (lomu, tečení, deformace aj.). Proto je sestrojován diagram, viz Obr. 27., zobrazující podmínky spolehlivosti, které jsou ovlivněny časem. Na obrázku je vidět, že právě vyrobený výrobek je zprvu ovlivňován zpracovatelským primárním napětím, které s časem relaxuje. Dále je výrobek po dobu své životnosti ovlivňován sekundárním – mechanickým – napětím vlivem vnějších sil, které superponuje se zbytkovým primárním napětím. Mezní stavy reprezentují hranici pevnosti součásti, která časem klesá vlivem degradace materiálu. [17]



Obr. 27 Diagram podmínek spolehlivosti [17]

Pro první návrhy základních rozměrů příruby za pomoci analytických výpočtů je považován zvolený materiál za izotropní, tzn. má stejné vlastnosti ve všech směrech. V praxi se však termoplast chová jako anizotropní materiál, tzn. má odlišné vlastnosti v různých směrech, a tyto vlastnosti jsou pak zvažovány až při přesnějších numerických výpočtech navrhovaného modelu (viz kapitola – 6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur), kde jsou zohledněna nejzásadnější vnější zatížení na přírubu.

6.3.1 Návrh tloušťky příruby [26; 27; 28]

Pro navrhovanou přírubu čerpacího palivového modulu je zvolen materiál POM-C Hostaform® C 13021 vyráběný firmou Celanese. Jeho vlastnosti potřebné pro výpočet, jsou vypsány v Tab. 5. Tyto hodnoty vycházejí z materiálového listu a z údajů poskytnutých zadavatelem práce.

Tab. 5 Vlastnosti materiálu Hostaform® C 13021 [6; 22]

Zvolený materiál		Hostaform POM-C	
Modul pružnosti v tahu	E	2920	[MPa]
Modul pružnosti ve smyku	G	1043	[MPa]
Poissonova konstanta	ν	0,4	[-]
Koeficient lineární teplotní roztažnosti	γ	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$[m \cdot m^{-1} \cdot C^{-1}]$
Hustota	ρ	1410	$[kg \cdot m^{-3}]$
Mez pevnosti v kluzu	σ_k	65	[MPa]

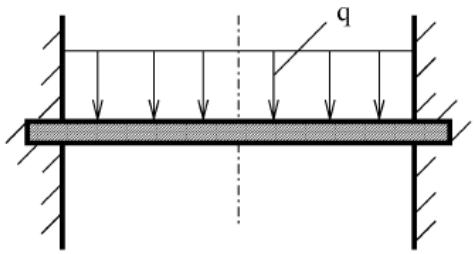
Pro zjištění tloušťky pláště plastového výrobku je zvolen koeficient bezpečnosti k = 3 [-]. Proto je dovolené napětí příruby σ_D vypočteno pomocí vztahu:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{65}{3} \cong 21{,}667\ [MPa]. \tag{1}$$

Při prvotním návrhu tloušťky hlavní stěny příruby je důležité si nejdříve uvědomit, o který výpočtový model se jedná. Ve chvíli, kdy výrobek plní svou funkci, je spojen s palivovou nádrží vozidla za pomocí černé matice, viz Obr. 28. Ta zamezuje pohybu a pootočení příruby ve všech směrech a osách.

Obr. 28 Příruba spojená s nádrží [25]

Z tohoto důvodu je pro návrh tloušťky zvolen výpočtový model rotačně symetrické tenkostěnné kruhové desky, která je vetknutá na vnějším okraji a zatížená rovnoměrným spojitým zatížením q. Schéma tohoto případu lze vidět na Obr. 29. Spojité zatížení působící na povrch příruby je způsobeno přetlakem par paliva uvnitř palivové nádrže. Příruba je samozřejmě současně ovlivňována dalšími typy zatížení. Pro prvotní zjištění stálé tloušťky kruhové desky ale postačí tato statická úloha. Pro další ověřování a případné korekce rozměrů je později využita numerická metoda výpočtů.

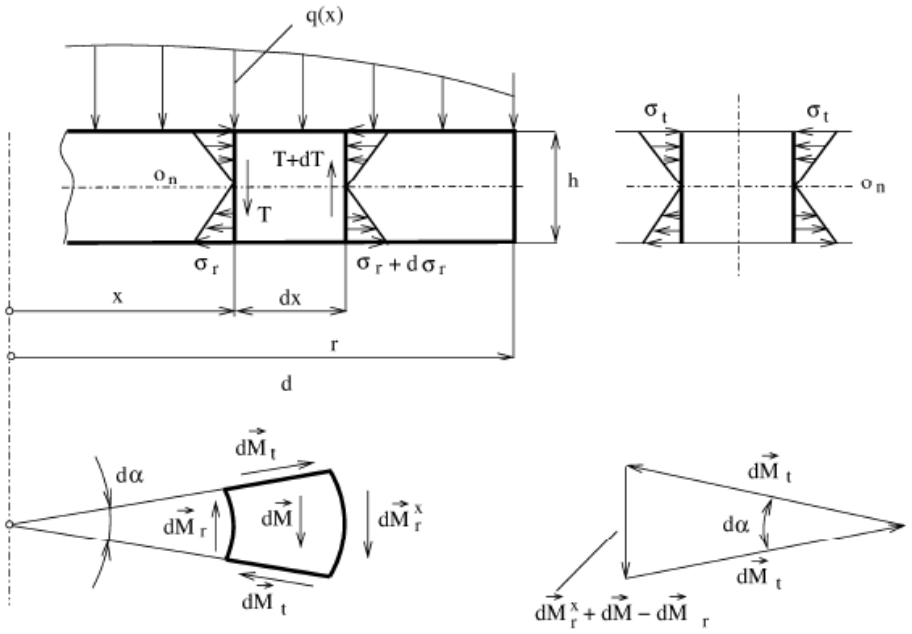


Obr. 29 Kruhová deska vetknutá po svém vnějším obvodu a zatížená spojitým zatížením [26]

Pro případ prvotního návrhu tloušťky kruhové desky je brána v úvahu platnost Hookova zákona. Další podmínky a předpoklady pro toto řešení jsou:

- Konstantní tloušťka příruby *h* je v porovnání s jejím poloměrem *r* podstatně menší (*h << r*).
- Tloušťka *h* je natolik malá, že nemusí být zohledňován vznik osových napětí σ_o a smykových napětí τ.
- Zatížení působící na přírubu a uložení příruby je rotačně symetrické.
- Střední plocha příruby je považována za neutrální vrstvu, která se vlivem deformace od ohybu radiálně neposune a její body se posouvají jen vertikálně.
- Neutrální rovinná vrstva se vlivem deformace změní ve vrchlík a každý jeho element je namáhán dvěma vnitřními ohybovými momenty ve dvou kolmých rovinách.

Povedeme-li dva osové řezy přírubou o svírajícím úhlu *dα* a dva řezy o poloměru *r1 = x* a *r2 = x + dx*, dostaneme na Obr. 30 element, na kterém vzniká ve výšce *h* vlivem ohybového momentu dM_r radiální napětí σ_r (na vnitřní straně) a vlivem ohybového momentu dM_r^x vzniká radiální napětí $\sigma_r + d\sigma_r$ (na vnější straně). Dále pak v řezech o svírajícím úhlu dα vznikají tečná napětí σ_t vlivem ohybového momentu dM_t.

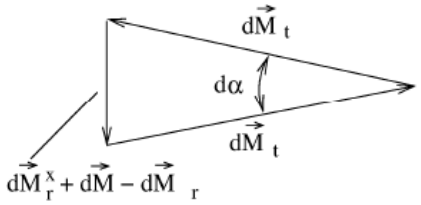


Obr. 30 Element kruhové desky zatížený ohybovými momenty [26]

Na elementu dále vznikají posouvající síly *T* a *T+dT*, které jsou způsobeny celkovým příčným zatížením *Q(x)* působícím na obecném obvodu kružnice. Dvojice těchto posouvajících sil pak na elementu vyvolávají moment *dM*.

Pro vyjádření základní rovnice kruhové desky je ještě zapotřebí dle Obr. 31 provést podmínku rovnováhy elementu, která má tvar:

$$dM_t d\alpha = dM_r{}^x + dM - dM_r\,. \tag{2}$$



Obr. 31 Podmínka rovnováhy elementu příruby [26]

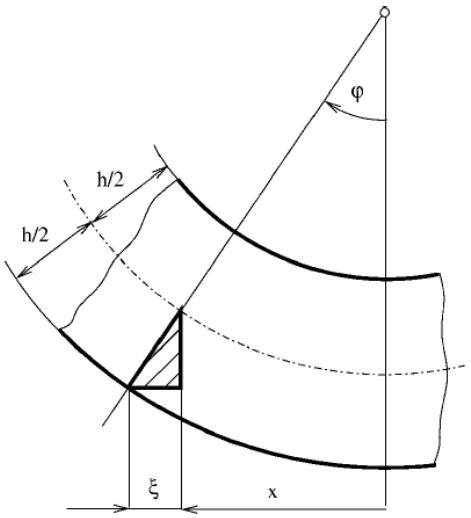
Po rozepsání vztahů jednotlivých ohybových momentů elementu, následných úpravách a vynechání malých veličin vyšších řádů je získána rovnice podmínky rovnováhy elementu kruhové desky:

$$\frac{d}{dx}(\sigma_r \cdot x) - \sigma_t = -\frac{6 \cdot Q(x)}{2\pi \cdot h^2} \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r \rangle. \tag{3}$$

Z Obr. 32 je dále zřejmé, že pro namáhanou přírubu čerpacího palivového modulu platí:

$$\xi = \frac{h}{2} \cdot \varphi, \tag{4}$$

kde φ je úhel natočení a ξ je posunutí příruby.



Obr. 32 Závislost mezi úhlem natočení a posuvem [26]

Dále potřebujeme pro vyjádření základní rovnice kruhové desky vztahy tečného napětí σ_t a radiálního napětí σ_r již ve tvaru:

$$\sigma_t = \frac{E^x \cdot h}{2} \cdot \left(\frac{\varphi}{x} + \nu \cdot \varphi'\right) \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r\rangle, \tag{5}$$

$$\sigma_r = \frac{E^x \cdot h}{2} \cdot \left(\varphi' + \nu \cdot \frac{\varphi}{x}\right) \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r\rangle, \tag{6}$$

kde ν je Poissonova konstanta a E^x je zpevněný modul pružnosti v tahu ve tvaru:

$$E^x = \frac{E}{1-\nu^2}. \tag{7}$$

Pokud na navrhovanou přírubu působí spojité zatížení způsobené přetlakem v nádrži, lze celkové příčné zatížení $Q(x)$ vyjádřit jako:

$$Q(x) = \pi \cdot x^2 \cdot q \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r\rangle. \tag{8}$$

Po dosazení rovnic (5), (6), (7) a (8) do (3) je získána **základní diferenciální rovnice kruhových desek** druhého řádu ve tvaru:

$$x \cdot \varphi'' + \varphi' - \frac{\varphi}{x} = -\frac{6 \cdot q \cdot x^2}{E^x \cdot h^3} \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r\rangle, \tag{9}$$

kde se řešení skládá z homogenní části $\varphi_H(x)$ a partikulární části $\varphi_P(x)$ a postupnými úpravami lze získat tvar úplného integrálu rovnice (9):

$$\varphi(x) = C_1 \cdot x - \frac{C_2}{x} - \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \cdot x^3 \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r\rangle, \tag{10}$$

kde C_1 a C_2 jsou integrační konstanty dále určené pomocí okrajových podmínek:

- V místě poloměru příruby $x = 0$ [mm] je úhel natočení $\varphi = 0$ [°]. Po dosazení této okrajové podmínky do vztahu (10) získáme hodnotu integrační konstanty $C_2 = 0$ [-].
- V místě poloměru příruby $x = r$ [mm] je úhel natočení $\varphi = 0$ [°]. Po dosazení této okrajové podmínky do vztahu (10) získáme hodnotu integrační konstanty C_1:

$$C_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \cdot r^2. \tag{11}$$

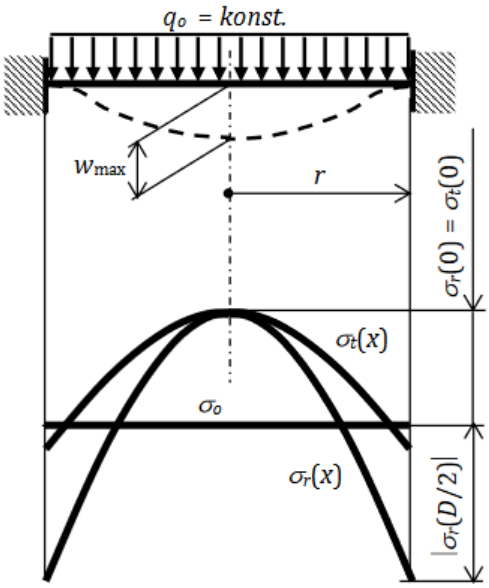
Po dosazení konstant C_1 a C_2 je následně získán konkrétní vztah pro úhel natočení φ:

$$\varphi(x) = \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \cdot (r^2 \cdot x - x^3) \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r \rangle. \tag{12}$$

Když je posléze vyjádřený vztah (12) dosazen do vztahu (5) a (6), je získán úplný vztah radiálního a tečného napětí příruby σ_r a σ_t:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3}{8} \cdot \frac{q}{h^2} \cdot [(1+\nu) \cdot r^2 - (3+\nu) \cdot x^2] \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r \rangle, \\ \sigma_t &= \frac{3}{8} \cdot \frac{q}{h^2} \cdot [(1+\nu) \cdot r^2 - (1+3\nu) \cdot x^2] \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r \rangle. \end{aligned} \tag{13}$$

Grafické zobrazení předpokládaných průběhů těchto napětí je na Obr. 33.



Obr. 33 Předpokládaný průběh radiálního a tečného napětí příruby [28]

Jelikož se v přírubě vyskytuje rovinná napjatost, je pro určení minimální tloušťky příruby h_{min} dále vycházeno z pevnostní hypotézy σ_{max}. Pro samotný výpočet je použit vztah (13), kde je na první pohled maximální složkou σ_{max} radiální napětí σ_r. Po úpravě rovnice radiálního napětí σ_r a dosazení hodnot spojitého zatížení q = 0,035 [MPa], dovoleného napětí σ_D = 21,667 [MPa], Poissonovy konstanty ν = 0,4 [-] a poloměru $r = x$ = 64,750 [mm], kde se nachází maximální absolutní hodnota radiálního napětí σ_r na přírubě, je získána minimální tloušťka příruby h_{min} při konstantní teplotě prostředí t_p = 23 [°C]:

$$\begin{aligned} h_{min} &= \sqrt{\left|\frac{3}{8} \cdot \frac{q}{\sigma_D} \cdot [(1+\nu) \cdot r^2 - (3+\nu) \cdot x^2]\right|} = \\ &= \sqrt{\left|\frac{3}{8} \cdot \frac{0{,}035}{21{,}667} \cdot [(1+0{,}4) \cdot 64{,}750^2 - (3+0{,}4) \cdot 64{,}750^2]\right|} \cong 2{,}254 \text{ [mm]}. \end{aligned} \tag{14}$$

Pro ověření je ještě proveden výpočet minimální tloušťky příruby h_{min} při nejkritičtější teplotě pro materiál t_p = 80 [°C], kde je dle materiálového listu dovolené napětí σ_D = 13 [MPa] s ohledem na bezpečnostní koeficient k = 3 [-]:

$$h_{min} = \sqrt{\left|\frac{3}{8}\cdot\frac{0{,}035}{13}\cdot[(1+0{,}4)\cdot 64{,}750^2-(3+0{,}4)\cdot 64{,}750^2]\right|} \cong 2{,}910\ [\text{mm}]. \tag{15}$$

Tloušťka příruby h je tedy zvolena na hodnotu h = 3 [mm]. Jelikož se ale ve skutečnosti jedná o anizotropický materiál, který je současně namáhán dalšími vnějšími vlivy, jako jsou např. náhlý náraz vozidla, vibrace, creep a UV záření aj., bude nejspíše zapotřebí přírubu dále vyztužit. Doplnění vyztužujících žeber je ověřeno MKP analýzou v kapitole – 6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur.

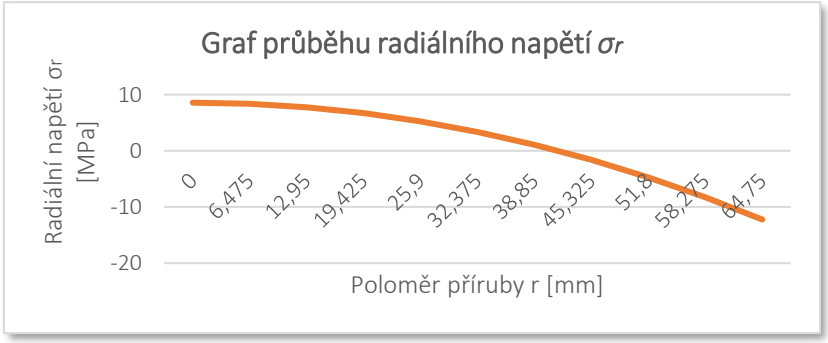
Pro ověření hodnoty maximálního napětí σ_{max} příruby o zvolené tloušťce h je opět použit vztah (13) pro radiální napětí σ_r. Výpočet je proveden pro x = 0 [mm] a analogicky by se postupovalo až do hodnoty x = 64,75 [mm]:

$$\sigma_{r_{r=0}} = \frac{3}{8}\cdot\frac{0{,}035}{3^2}\cdot[(1+0{,}4)\cdot 64{,}750^2-(3+0{,}4)\cdot 0^2] \cong 8{,}560\ [\text{MPa}]. \tag{16}$$

Vypočtené hodnoty radiálních napětí σ_r příruby při teplotě t_p = 23 [°C] jsou vypsány v Tab. 6, podle které je vytvořen graf radiálních napětí v závislosti na poloměru příruby, viz Obr. 34.

Tab. 6 Vypočtené hodnoty radiálních napětí v závislosti na poloměru

Poloměr v bodě x [mm]	Radiální napětí σ_r [MPa]
0	8,560
6,475	8,352
12,950	7,728
19,425	6,689
25,900	5,234
32,375	3,363
38,850	1,076
45,325	-1,626
51,800	-4,745
58,275	-8,279
64,750	-12,228



Obr. 34 Graf průběhu radiálního napětí na přírubě v závislosti na poloměru

Maximální hodnota napětí příruby σ_{max} je tedy:

$$\sigma_{max} = \\ = max\left\{\left\|\begin{matrix}\sigma_{r_{r=0}}, \sigma_{r_{r=6,475}}, \sigma_{r_{r=12,950}}, \sigma_{r_{r=19,425}}, \sigma_{r_{r=25,900}}, \sigma_{r_{r=32,375}}, \sigma_{r_{r=38,850}}, \\ \sigma_{r_{r=45,325}}, \sigma_{r_{r=51,800}}, \sigma_{r_{r=58,275}}, \sigma_{r_{r=64,750}}\end{matrix}\right\|\right\} = \\ \cong 12{,}228\ [\mathrm{MPa}]. \tag{17}$$

To znamená, že navržená tloušťka příruby *h* vyhovuje podmínce:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_D. \tag{18}$$

Bezpečností součinitel materiálu *k* má pak hodnoty při teplotách prostředí t_p = 23 [°C] a t_p = 80 [°C] po ověření:

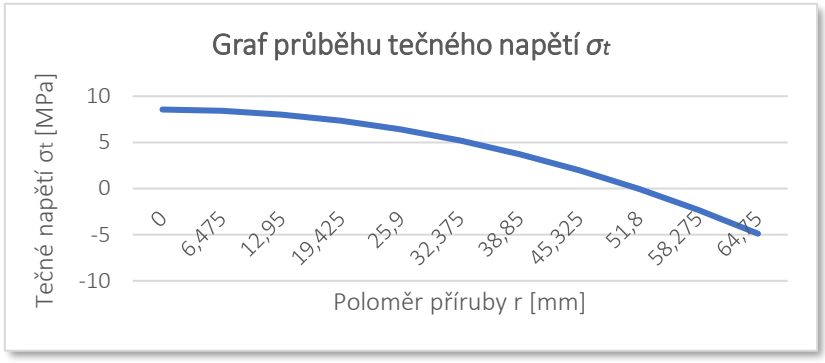
$$k_{23} = \frac{\sigma_{D23}}{\sigma_{max}} = \frac{65}{12{,}228} \cong 5{,}32\ [-], \\ k_{80} = \frac{\sigma_{D80}}{\sigma_{max}} = \frac{39}{12{,}228} \cong 3{,}19\ [-]. \tag{19}$$

Pro úplnost jsou hodnoty vypočtených tečných napětí σ_t při teplotě prostředí t_p = 23 [°C] získány pomocí vztahu (13) a jsou zapsány do Tab. 7, podle které je vytvořen graf tečných napětí v závislosti na poloměru příruby, viz Obr. 35. Výpočet je názorně proveden pro *x* = 0 [mm] a analogicky by byl prováděn výpočet až do hodnoty *x* = 64,75 [mm]:

$$\sigma_{t_{r=0}} = \frac{3}{8} \cdot \frac{0{,}035}{3^2} \cdot [(1+0{,}4) \cdot 64{,}750^2 - (1+3 \cdot 0{,}4) \cdot 0^2] \cong 8{,}560\ [\mathrm{MPa}]. \tag{20}$$

Tab. 7 Vypočtené hodnoty tečných napětí v závislosti na poloměru

Poloměr v bodě x [mm]	Tečné napětí σ_t [MPa]
0	8,560
6,475	8,425
12,950	8,022
19,425	7,349
25,900	6,408
32,375	5,197
38,850	3,717
45,325	1,969
51,800	-0,049
58,275	-2,336
64,750	-4,891



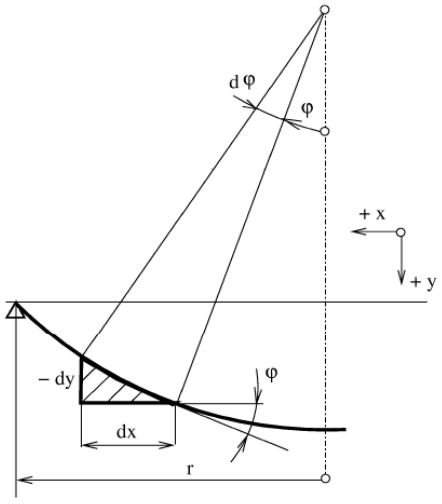
Obr. 35 Graf průběhu tečného napětí na přírubě v závislosti na poloměru

Pro stanovení průhybu elementu příruby *dy* ve směru *y* je vycházeno ze vztahu odvozeného z Obr. 36:

$$dy = -\varphi \cdot dx, \tag{21}$$

který po integraci vyjadřuje výsledný průhyb příruby *y*:

$$\begin{aligned} y &= K - \int \varphi \cdot dx = K - \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \int (r^2 \cdot x - x^3) dx = \\ &= K - \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot x^2}{2} - \frac{x^4}{4} \right) \qquad \text{pro } x \in \langle 0; r \rangle. \end{aligned} \tag{22}$$



Obr. 36 Průhyb příruby způsobený od spojitého zatížení [26]

Pomocí okrajových podmínek (*x* = *r* a *y* = 0) je dále možné stanovit konstantu *K*:

$$0 = K - \frac{3}{4} \cdot \frac{q}{E^x \cdot h^3} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right). \tag{23}$$

Z toho vyplývá, že integrační konstanta K je dána vztahem:

$$K = \frac{3}{16} \cdot \frac{q \cdot r^4}{E^x \cdot h^3}. \tag{24}$$

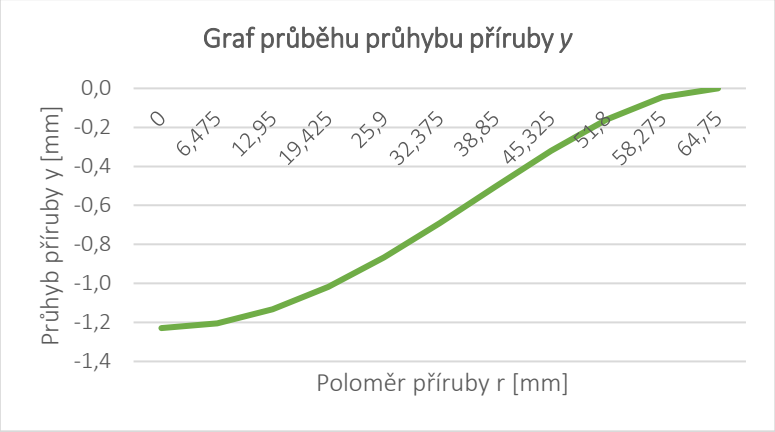
Po dosazení vztahu (24) do rovnice (22) je získána hodnota maximálního průhybu příruby y_{max} v bodě $x = 0$:

$$y_{max} = \frac{3}{16} \cdot \frac{q \cdot r^4}{E^x \cdot h^3} \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2\right]^2 = \frac{3}{16} \cdot \frac{0{,}035 \cdot 64{,}750^4}{\frac{2920}{1-0{,}4^2} \cdot 3^3} \cdot 1^2 \cong 1{,}229\ [\text{mm}]. \tag{25}$$

Pro hodnoty průhybu *y* v ostatních bodech příruby je vytvořena Tab. 8., podle které je vytvořen graf průběhu průhybu příruby *y* v závislosti na poloměru *r*, viz Obr. 37.

Tab. 8 Vypočtené hodnoty průběhu průhybu příruby v závislosti na poloměru

Poloměr v bodě x [mm]	Průhyb y [mm]
0	-1,229
6,475	-1,205
12,950	-1,133
19,425	-1,018
25,900	-0,867
32,375	-0,691
38,850	-0,503
45,325	-0,320
51,800	-0,159
58,275	-0,044
64,750	0

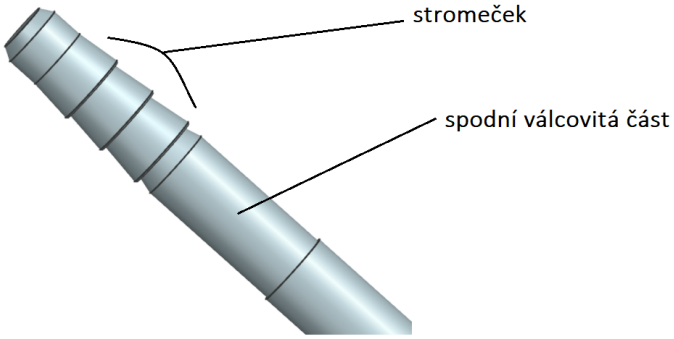


Obr. 37 Graf průběhu průhybu příruby v závislosti na poloměru

Veškeré výpočty v této podkapitole jsou dále ověřeny pomocí sady strojírenských výpočtů MITCalc, viz Příloha D.

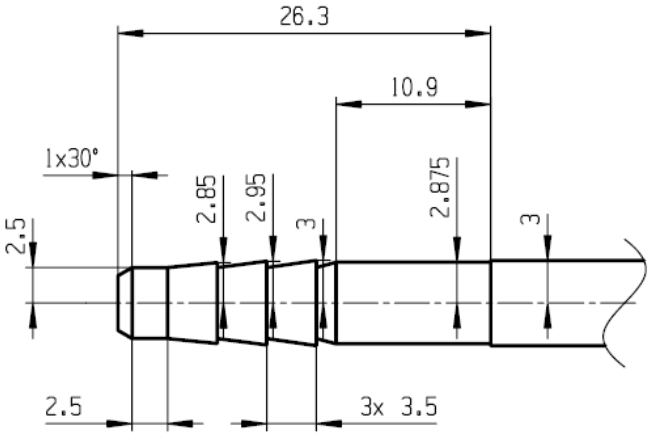
6.3.2 Návrh pouzder pro tyčky [30]

Na základě požadavku zadavatele je dále proveden návrh dvou stejných pouzder na přírubě pro zalisování dvou stejných tyček, které mají zadaný tvar konce pro zalisování dle Obr. 38. Tyto tyčky slouží jako prvek pro zachování vzájemné polohy mezi hrncem a přírubou. Pro přesnější popis se část tyčky pro zalisování skládá ze spodní válcovité části a tzv. stromečku, který je tvořen třemi kuželi o stejné délce.



Obr. 38 Tvar konce tyčky pro zalisování [6]

Z postupné rešerše přírub od různých výrobců vyplývá, že se vnější poloměr pouzdra r_{vnej} pohybuje v rozmezí 4,75–6,25 [mm]. Zadané rozměry tyčky, pro kterou je pouzdro navrhováno, jsou zobrazeny na Obr. 39. Celková výška pouzdra je dána délkou spodní válcovité části tyčky, délkou stromečku a doporučenou výškou dorazového žebra na dně pouzdra, viz kapitola – 6.2.3 Návrh žebrování příruby.



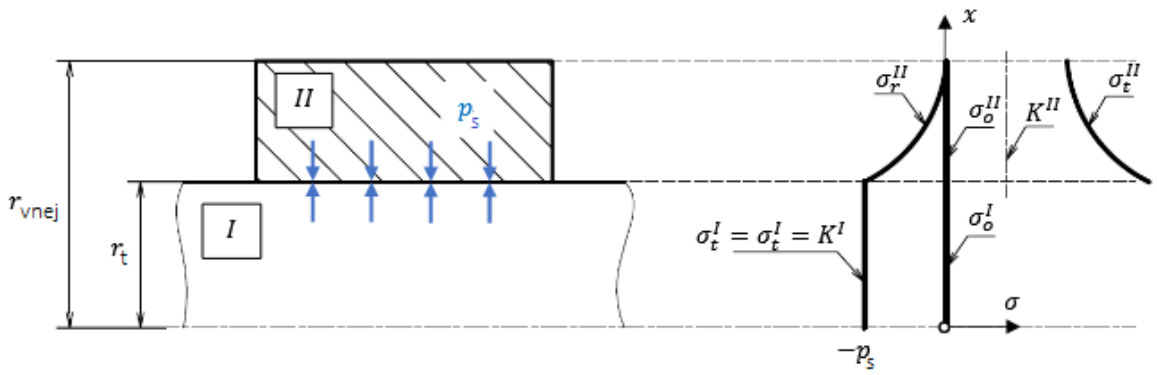
Obr. 39 Skica tyčky pro zalisování [6]

U prvotního návrhu pouzdra musí být zároveň zohledněn požadavek zadavatele na maximální lisovací sílu tyček do pouzdra F_L = 600 [N] a na minimální sílu pro vylisování F_V = 400 [N]. Vzhledem ke komplikovanému tvaru tyčky (stromečku) je pro zjednodušení prvotního analytického výpočtu potřebného přesahu tlakového spoje zvažována jen spodní válcovitá část pod stromečkem. Výpočet je proveden za pomoci vytvořené kalkulačky v tabulkovém procesoru Microsoft Excel (použité vzorce viz níže), ve kterém je postupným dosazováním a upravováním vypočten přesah potřebný pro zalisování. Na základě výsledků je zjištěno, že kromě spodní válcovité části tyčky mají přesah také dva ze tří kuželů, které jsou součástí stromečku, a tudíž také ovlivňují velikost lisovací a vylisovací síly.

Tyčka je vyrobena z automatové oceli ČSN EN 10087-01 (ekvivalent 11SMnPb30). Pouzdro pro tyčku je navrhováno z POM-C Hostaform® C 13021, stejně jako zbytek příruby. Koeficient tření plastu ve styku s ocelí za sucha pro POM je μ = 0,21 [-]. [29]

Pro prvotní orientační stanovení rozměrů pouzdra je opět polymer považován za izotropní materiál. Je ale dobré si uvědomit, že zejména u semikrystalických látek dochází k relaxaci napětí. Z tohoto důvodu se využívá stromečku na tyčce. Pod zoubky, které tvoří jednotlivé kužele, má plastový materiál následně po čase možnost se částečně vrátit do svého původního rozměru. Jelikož už v tuto chvíli bude ale přesah menší než před zalisováním, je pravděpodobné, že potřebná síla pro vylisování bude menší než pro zalisování. Proto je ale stanovena podmínka minimální požadované síly pro vylisování F_v. Tyto podmínky pro lisovací a vylisovací sílu jsou ověřeny simulací v kapitole 6.4.

Jako výpočtový model je zvolen případ pro lisování plného hřídele do tlustostěnné otevřené nádoby, u kterého je předpoklad platnosti Hookova zákona a symetrického zatížení. Na Obr. 40 je zobrazen obecný průběh napětí spodní válcovité části. Z tohoto obrázku lze usoudit, že v pouzdru i v tyčce jsou osová napětí nulová.



Obr. 40 Průběh napětí v nalisovaném spoji jednoho ze zobecněných válečků [30]

Dále je z Obr. 40 zřejmé, že pro radiální napětí σ_r^I a tečné napětí σ_t^I na hřídeli platí:

$$\sigma_t{}^I(x) = \sigma_r{}^I(x) = K^I = -p_s \qquad \text{pro } x \in \langle 0;\ r_t \rangle, \tag{26}$$

kde K^I je zavedená konstanta, p_s je tlak ve spoji.

Radiální napětí σ_r^{II} a tečné napětí σ_t^{II} na pouzdře pro tento uvažovaný výpočtový model jsou dány vztahy:

$$\begin{aligned} \sigma_r{}^{II} &= K^{II} - \frac{C^{II}}{x^2} = \frac{p_s \cdot {r_t}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} - p_s \cdot \frac{{r_t}^2 \cdot {r_{vnej}}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} \cdot \frac{1}{x^2} && \text{pro } x \in \langle r_t;\ r_{vnej} \rangle, \\ \sigma_t{}^{II} &= K^{II} + \frac{C^{II}}{x^2} = \frac{p_s \cdot {r_t}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} + p_s \cdot \frac{{r_t}^2 \cdot {r_{vnej}}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} \cdot \frac{1}{x^2} && \text{pro } x \in \langle r_t;\ r_{vnej} \rangle, \end{aligned} \tag{27}$$

kde K^{II} a C^{II} jsou zavedené konstanty, r_t je poloměr spodní válcovité části, r_{vnej} je vnější poloměr pouzdra pro tyčky.

Jak již bylo zmíněno výše, pro hrubý výpočet je sestrojena pomocná kalkulačka v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, která postupuje dle vztahů níže.

Pro stanovení lisovací síly F_L je použit zjednodušený vzorec:

$$F_L = \mu \cdot F_n = \mu \cdot p_s \cdot S = \mu \cdot p_s \cdot 2\pi \cdot (l_1 \cdot r_1 + l_2 \cdot r_2 + l_t \cdot r_t), \tag{28}$$

kde F_L = 600 [N] je potřebná maximální síla pro zalisování; μ = 0,21 [-] je součinitel tření při lisování; l_1 = 0,8 [mm] je délka plochy zoubku prostředního kužele zasahujícího do stěny pouzdra; l_2 = 1,05 [mm] je délka plochy zoubku největšího kužele zasahujícího do stěny pouzdra; l_t = 10,9 [mm] je délka spodní válcovité části; r_1 = 2,95 [mm], r_2 = 3 [mm] a r_t = 2,875 [mm] jsou jednotlivé poloměry zasahujících částí tyčky do pouzdra, dle Obr. 39.

Po úpravě vztahu (28) a dosazení jednotlivých veličin je hodnota maximálního tlaku p_{max}:

$$\begin{aligned} p_{max} = p_s &= \frac{F_L}{2\pi \cdot \mu \cdot (l_1 \cdot r_1 + l_2 \cdot r_2 + l_t \cdot r_t)} = \\ &= \frac{600}{2\pi \cdot 0{,}21 \cdot (0{,}800 \cdot 2{,}950 + 1{,}050 \cdot 3 + 10{,}900 \cdot 2{,}875)} \cong \\ &\cong 12{,}341 \text{ [MPa]}. \end{aligned} \tag{29}$$

Přesah uložení pro spodní válcovitou část Δr_t je za pomocí vztahů (26) a (27) dán rovnicí:

$$\Delta r_t = r_t \cdot p_{max} \cdot \left(\frac{1 - \nu_t}{E_t} + \frac{\frac{{r_{vnej}}^2 + {r_t}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} + \nu_p}{E_p} \right), \tag{30}$$

u které postupným dosazením již dopočtených veličin, Youngova modulu tyčky E_t = 190 [GPa] a vybraného POM materiálu pouzdra E_p = 2920 [MPa], Poissonovy konstanty tyčky ν_t = 0,29 [-] a pouzdra ν_p = 0,4 [-], zvoleného vnějšího poloměru pouzdra r_{vnej} = 5,5 [mm] je získána hodnota přesahu Δr_t:

$$\Delta r_t = 2{,}875 \cdot 12{,}341 \cdot \left(\frac{1 - 0{,}29}{190000} + \frac{\frac{5{,}5^2 + 2{,}875^2}{5{,}5^2 - 2{,}875^2} + 0{,}4}{2920} \right) \cong 0{,}026 \text{ [mm]}. \tag{31}$$

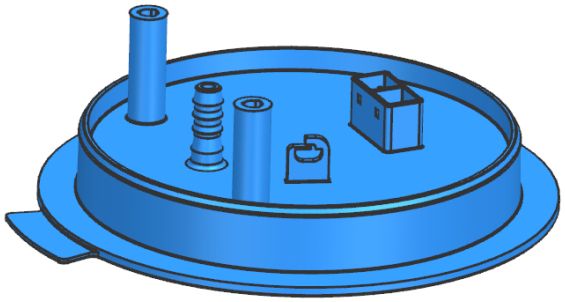
Pro ověření pevnosti pouzdra v oblasti spodní válcovité části tyčky je využita pevnostní kontrola dle Mohrovy hypotézy:

$$\sigma_{red} = \sigma_t(r_t) - \sigma_r(r_t) = p_{max} \cdot \left(\frac{{r_{vnej}}^2 + {r_t}^2}{{r_{vnej}}^2 - {r_t}^2} + 1 \right) \leq \sigma_D, \tag{32}$$

kde σ_D = 65 [MPa] je dovolené napětí v pouzdru a po dosazení všech výše vyjádřených hodnot vychází redukované napětí v pouzdru σ_{red} = 33,962 [MPa], což vyhovuje.

6.3.3 Návrh žebrování příruby

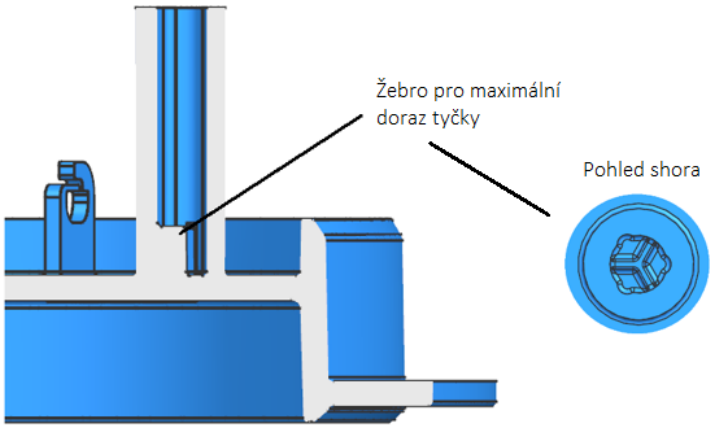
V předchozích podkapitolách jsou provedeny hrubé návrhy tloušťky stěn. Jelikož není ale příruba zatěžována jen statickým zatížením, ale i náhodným dynamickým zatížením, je zapotřebí určité části příruby vhodně zpevnit. Zvýšení pevnosti a tuhosti dílu nelze docílit větší tloušťkou materiálu, neboť by mohlo dojít k tvorbě tzv. lunkrů (vakuových dutin) uvnitř materiálu a zvýšilo by se tím tak riziko tvorby praskliny a tím i netěsnosti celého systému. Vlivem dynamického chování přetlaku, teplot a dalších faktorů ovlivňujících přírubu, které způsobují pomalou plastickou deformaci materiálu (tzv. creep), je zpracovávána kromě první navrhované varianty příruby bez žeber také další konstrukční varianta, a to příruba s vyztužujícími žebry. Varianty jsou mezi sebou porovnány pomocí MKP analýzy v kapitole 6.4. Z Obr. 41 je zřejmé, že je zapotřebí také vhodně vyztužit žebry obě pouzdra ve styku s hlavním pláštěm příruby.



Obr. 41 Konstrukční návrh příruby kompletně bez vyztužujících žeber

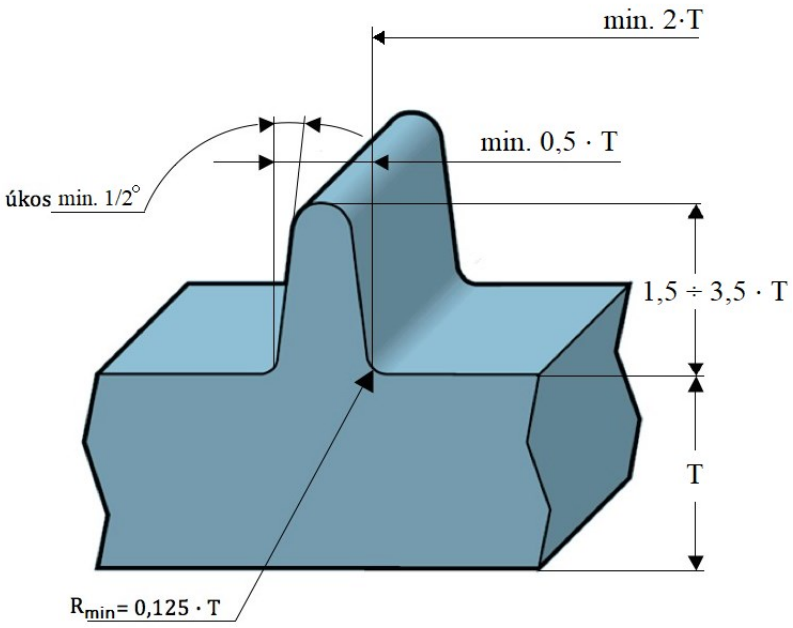
To proto, aby nedošlo ke snadnému prasknutí pouzdra při ohybu způsobeným např. rozjezdem či nárazem vozidla při nízké rychlosti. Samotné žebrování pouzdra pro tyčky je navrženo dle zásad konstruování žebrování plastů.

Když už by ale k samotnému prasknutí pouzdra mělo dojít, je důležité, aby prasklina neprostoupila do hlavní stěny příruby. I když se tato diplomová práce lomovou mechanikou nezabývá, je vhodné zavést takové opatření, aby toto riziko bylo co nejvíce minimalizováno. Z tohoto důvodu je uvnitř pouzdra pro tyčku doplněn prvek (viz Obr. 42), který udržuje tyčku v dostatečné vzdálenosti od hlavní stěny příruby, popř. i od případných vyztužujících žeber hlavní stěny. Když by totiž mělo dojít k lomu pouzdra, tyčka alespoň nebude přímo zasahovat do hlavní stěny či žebrování hlavní stěny příruby.



Obr. 42 Řez žebrem uvnitř pouzdra pro tyčku

Pro efektivní návrh obecného žebrování je nutné správně zvolit takové parametry počtu, výšky, tloušťky, umístění, technologie výroby apod., aby nedocházelo k různým vadám při plnění formy či chlazení taveniny, např. k propadlinám. Proto jsou zavedeny doporučené rozměry žebra (viz Obr. 43), aby se těmto vadám zamezilo. [31]



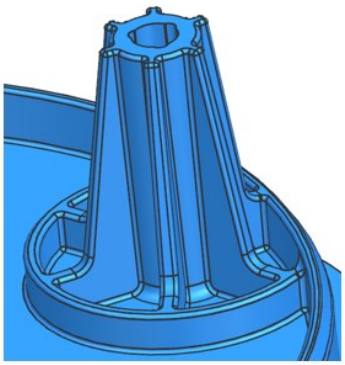
Obr. 43 Základní doporučované rozměry žebra [31]

Žebrování pouzder pro zalisování tyček

Na základě doporučovaných rozměrů je proveden prvotní návrh pro vyztužení pouzder pro tyčky se šesti žebry, který je zobrazen na Obr. 44. Navržená vyztužující žebra na vnější stěně pouzdra mají tyto hlavní parametry:

- Tloušťka kruhového žebra – 1,8 [mm];
- Výška kruhového žebra od hlavní stěny – 5 [mm];
- Tloušťka žeber navazujících od hlavní stěny na pouzdro – 2,2 [mm];
- Úkos každého žebra od hlavní stěny pro odformování – 0,5 [°];
- Úkos žeber na pouzdru od osy pouzdra:
  - Všechna žebra napojující se na kruhové žebro – 10 [°],
  - Žebro napojující se na vnější lem příruby – 6,5 [°];
- Rádius mezi žebry a hlavní stěnou, popř. stěnou pouzdra pro tyčky – 0,5 [mm].

Navržené rozměry je zapotřebí ověřit pomocí MKP analýzy. Definitivní rozměry jsou také uvedeny ve výrobním výkresu, který je umístěný ve volně vložených přílohách.



Obr. 44 Vyztužení pouzdra pro zalisování tyčky

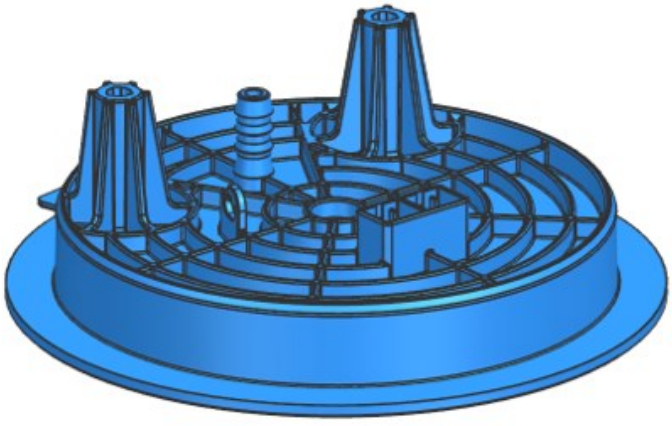
Výška žebra pro doraz tyčky uvnitř pouzdra na Obr. 42 vychází taktéž z doporučované výšky pro ztužující žebra na hlavní stěně dle zásad konstruování žeber pro semikrystalické materiály, viz Obr. 43. Jelikož ale tento doraz má za úkol udržovat tyčku v dostatečné vzdálenosti od hlavní stěny i jejího případného žebrování, musí být jeho výška zvětšena alespoň o 1 [mm] než je vyztužující žebrování. Proto je hodnota výšky tohoto dorazu zvolena – 6 [mm].

Žebrování hlavní stěny příruby

Jelikož je příruba vystavována dynamickým zatěžovacím podmínkám jako jsou hlavně změny přetlaku uvnitř nádrže a teplot spolu s agresivitou paliva apod., je zapotřebí zvážit i další konstrukční variantu příruby doplněnou o zpevňovací žebra na hlavní stěně. Dle doporučovaných rozměrů žebrování z Obr. 43 jsou zvoleny hlavní parametry:

- Tloušťka žeber – 1,5 [mm];
- Výška zpevňovacích žeber – 5 [mm];
- Rozestup mezi žebry – 8 [mm];
- Odformovací úkos – 0,5 [°];
- Rádius mezi žebry a hlavní stěnou – 0,5 [mm];
- Rádius mezi žebry a vnějším lemem příruby – 1,5 [mm].

Náhled žebrování příruby je součástí Obr. 45.

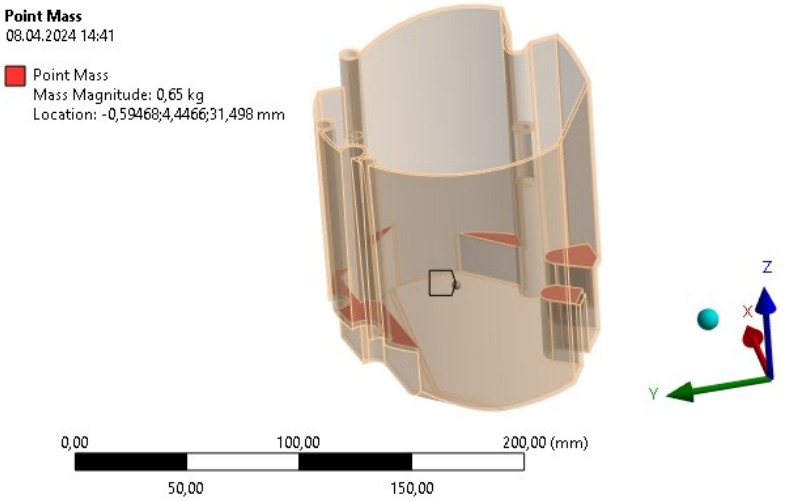


Obr. 45 Žebrování hlavní stěny příruby

6.4 Numerické ověření rozměrů hrubých stavebních struktur

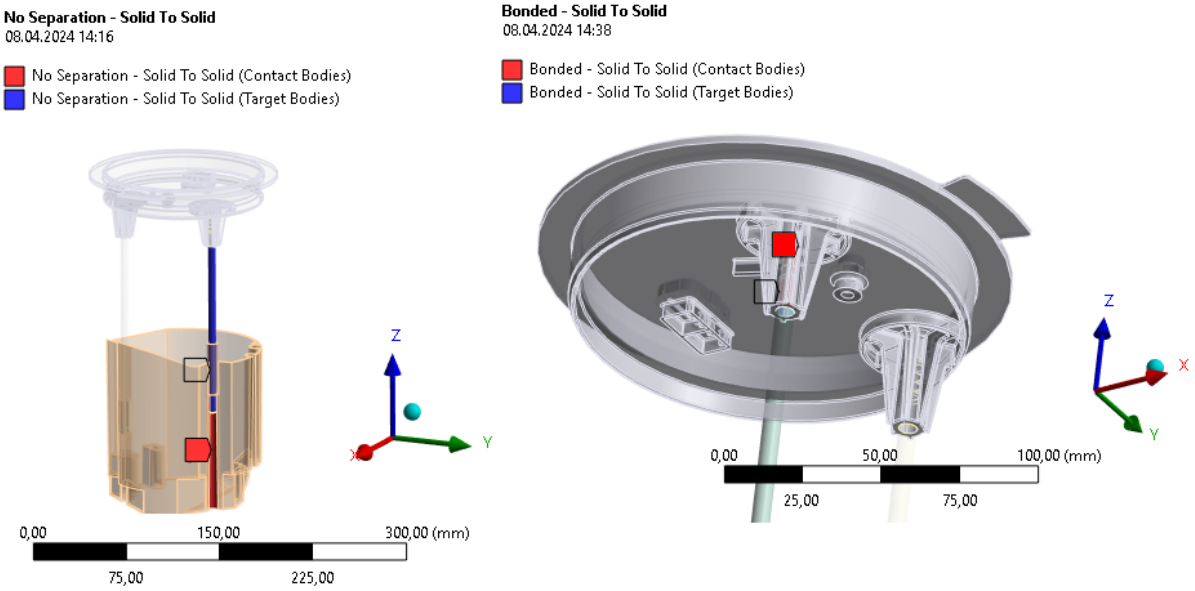
Pro ověření pevnosti a životnosti navržených designů přírub je provedena MKP analýza za použití softwaru ANSYS Workbench 2023 R2. Jednotlivé analýzy jsou provedeny na základě požadavků zákazníka, viz kapitola – 5 Specifikace požadavků na technický systém.

Pro následující numericky řešené úlohy je vytvořen zjednodušený model čerpacího palivové modulu, který se skládá z navrhované příruby, dvou tyček a zásobníku paliva. Uvnitř zásobníku paliva je navíc dodefinován hmotný bod o váze 0,65 [kg], který simuluje další vnitřní komponenty modulu včetně palivové pumpy a který se opírá o červené plochy znázorněné na Obr. 46.



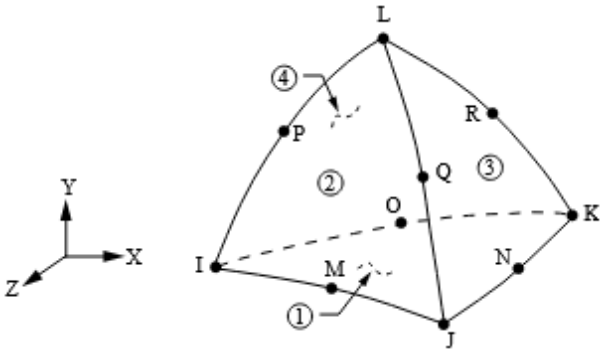
Obr. 46 Definování hmotného bodu uvnitř zásobníku paliva

Zjednodušený model je sestaven pomocí dvou typů kontaktů, viz Obr. 47. První kontakt typu „No Separation“ mezi tyčkou a zásobníkem paliva zajišťuje posuv tyčky v určeném místě na zásobníku paliva ve směru *z*. Druhý kontakt typu „Bonded“ mezi tyčkou a vnitřkem poudra příruby zajišťuje fixaci tyčky.



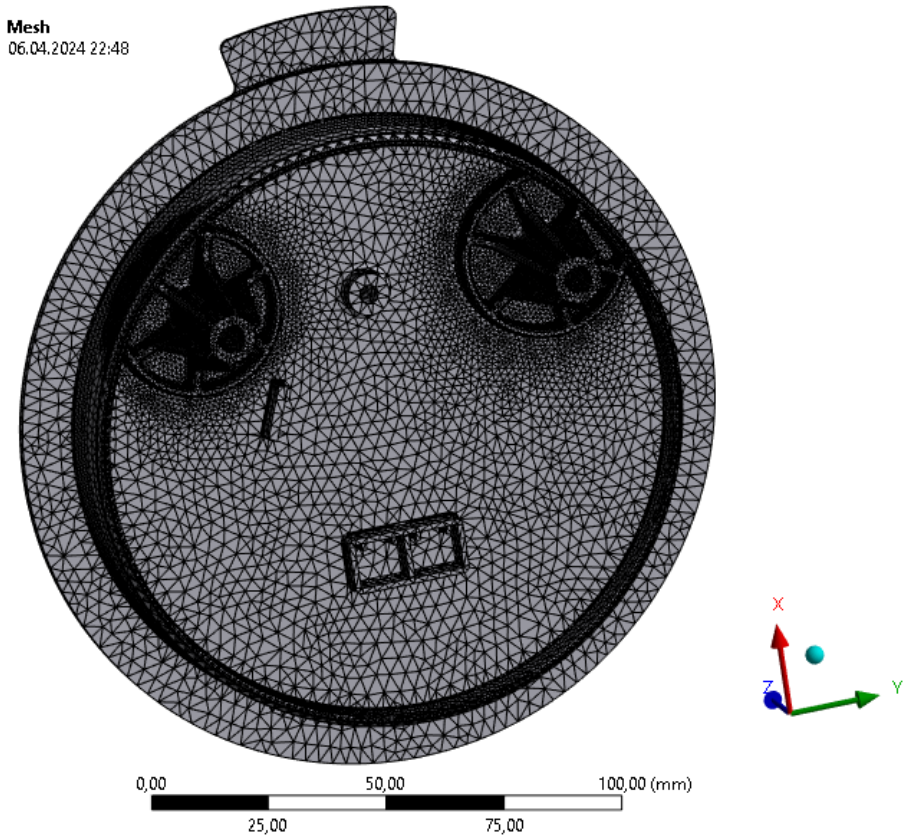
Obr. 47 Kontakt typu No Separation a Bonded

Následně je provedena diskretizace modelu za pomocí elementu typu SOLID187, který je zobrazen na Obr. 48. Jedná se o desetiuzlový trojrozměrný prvek vyššího řádu a každý jeho uzel má tři stupně volnosti (posunutí v uzlových směrech x, y a z). Tento element má zároveň schopnosti plasticity, velkého průhybu, creepu atd. [32]



Obr. 48 Geometrie elementu typu SOLID187 [32]

Velikost elementu na většině příruby je nastavena na 1,5 [mm], jen v oblasti pouzder pro nalisování tyčky je z důvodu získání větší přesnosti výsledků nastavena velikost elementu na 1 [mm], viz Obr. 49. Pro tyčky je zvolena velikost elementu 1,5 [mm] a pro zásobník 3 [mm].



Obr. 49 Diskretizace příruby

Dalším nezbytným krokem přípravy pro ověřující analýzy je nastavení okrajových podmínek. V reálném stavu je čerpací palivový modul zafixován v palivové nádrži pomocí příruby a speciální matice. Kontaktem spodní plochy příruby a hrdla nádrže dochází k utěsnění prostředí v palivové nádrži. Těsnící ploše na přírubě jsou proto odebrány všechny stupně volnosti pomocí podmínky „Fixed support“. Na spodní straně zásobníku paliva je použita podmínka „Frictionless Support“ z důvodu fixace modulu ve svislém směru. Podmínka zároveň umožňuje pohyb spodní strany zásobníku v rovině bez tření. Nastavení okrajových podmínek je znázorněno na Obr. 50.

Obr. 50 Nastavení okrajových podmínek

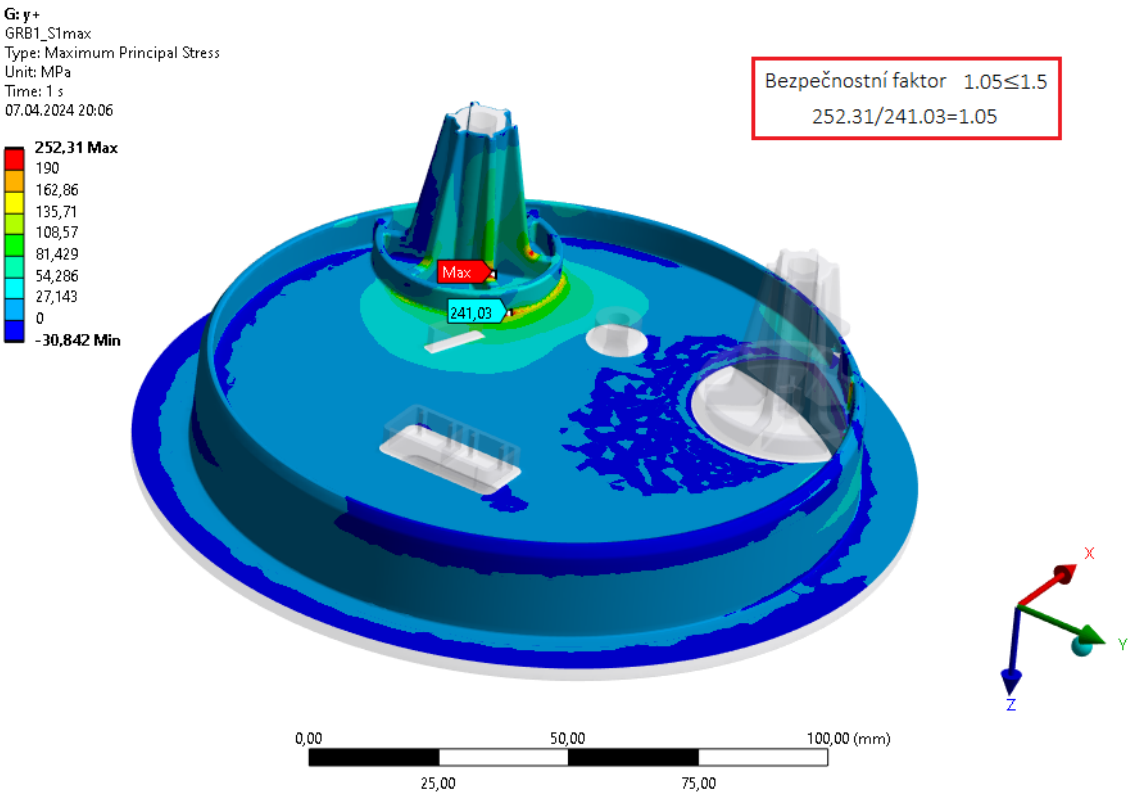
6.4.1 Dynamické zatížení prudkým zrychlením modulu

Jedním ze specifikovaných požadavků zadavatele na TS je, že příruba musí při zrychlení 50 [g] zachovat svou těsnost. To znamená, že příruba musí na své hlavní stěně zůstat neporušená, např. při nárazu automobilu do bariéry. Proto je v prvním kroku provedena numerická analýza, která indukuje robustnost designu s ohledem na dynamické zatížení.

Pro ověření robustnosti designu je provedena simulace dynamického zatížení za pomoci zrychlení celého modulu v osmi směrech po 45 [°]. Pro předpoklad řízené inicializace tvorby trhliny na správném místě v oblasti pouzdra, musí být splněna empirická podmínka – velikost maximálního napětí v požadovaném místě tvorby trhliny musí být z bezpečnostních důvodů alespoň o jeden a půl násobku větší než napětí vyskytující se na hlavní stěně příruby nebo v její blízkosti. [6]

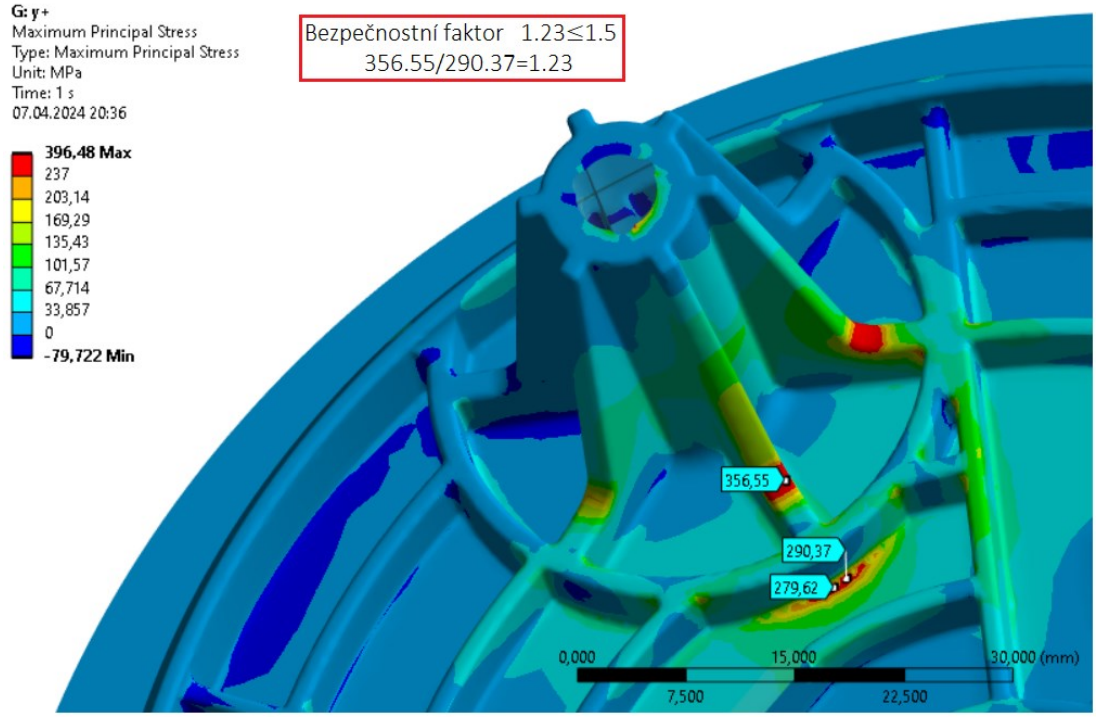
Jako první je ověřen design příruby bez vyztužujících žeber. Po ověření bezpečnostního faktoru je zjištěno, že podmínka u tohoto designu není splněna. Výsledky simulace jsou zobrazeny na Obr. 51. Výsledkem analýzy je tedy nevyhovující příruba při zrychlení systému v kladném směru *y*.

S přírubou bez vyztužujících žeber není již dále pracováno.



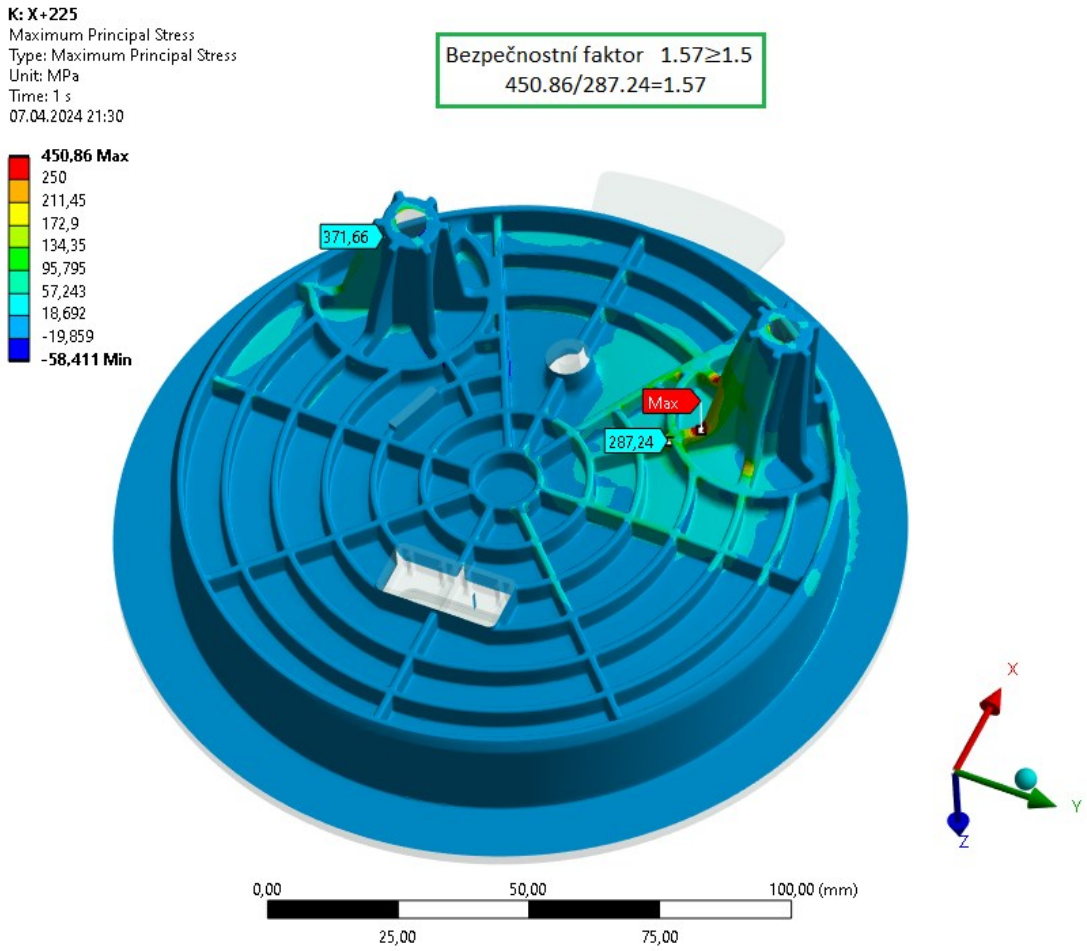
Obr. 51 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na první alternativě příruby

V dalším kroku je tedy provedeno ověření bezpečnosti na dalším alternativním designu příruby – s vyztužujícími žebry. Jak je ale vidět na Obr. 52, tato další alternativa tuto podmínku také neplní.



Obr. 52 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na druhé alternativě příruby

Na základě výsledku simulace musí být tedy provedeny další konstrukční úpravy. První úpravou je přidání dalšího vyztužujícího žebra v místě druhé největší koncentrace napětí. Druhou úpravou je zvětšení rádiusu mezi hlavní stěnou příruby a vnější stranou kruhového žebra o 1 [mm]. Tato úprava zároveň dbá na zásady správného konstrukčního řešení vyztužujících žeber. Výsledky třetí ověřující analýzy upravené příruby už jsou ve všech směrech vyhovující. Výsledek s nejmenším bezpečnostním faktorem na přírubě v záporném směru *y*, avšak vyhovujícím, je zobrazen na Obr. 53. Tato vyhovující příruba je proto ověřována i v následujících ověřovacích simulacích.

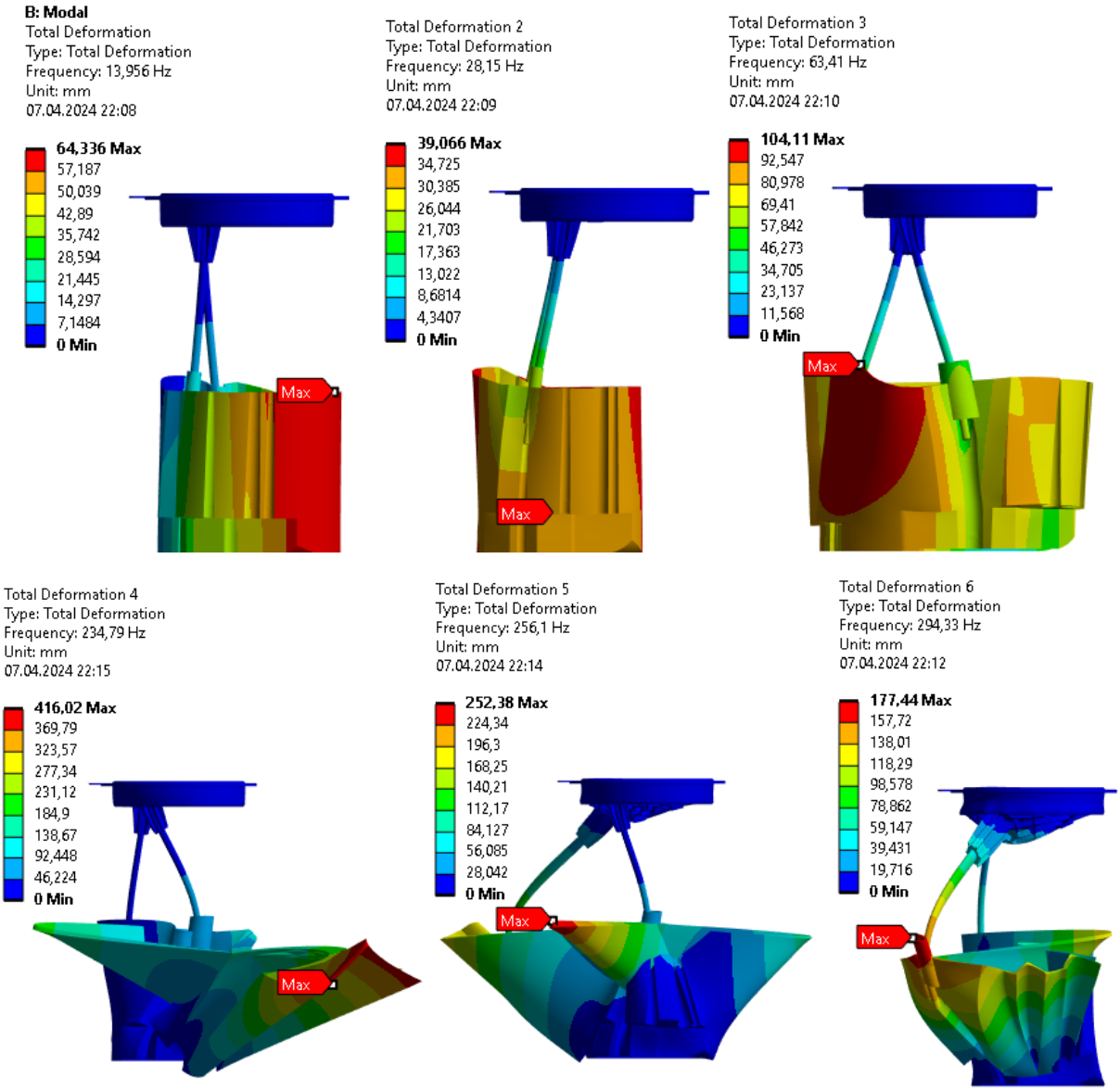


Obr. 53 Ověření místa inicializace tvorby trhliny na třetí alternativě příruby

6.4.2 Náhodné vibrace

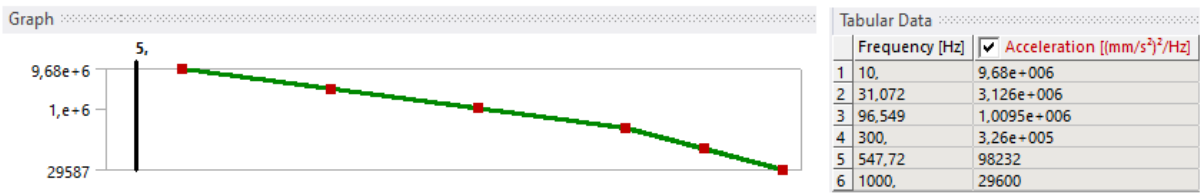
Dříve než bude proveden ověřující numerický výpočet náhodných vibrací, je zapotřebí zjistit vlastní frekvence a tvary celého čerpacího palivového modulu za pomocí modální analýzy. Na modulu je hledáno maximálně deset vlastních tvarů a frekvencí v rozmezí 1–300 [Hz]. Zároveň je dobré si uvědomit, že materiál sám o sobě v určité míře tlumí vibrace z okolí. Proto je pro přírubu a zásobník paliva nastaveno tlumení 5 % a pro tyčky 0,01 %.

Výsledky modální analýzy pro celkem šest nalezených vlastních tvarů jsou zobrazeny na Obr. 54 na následující straně.



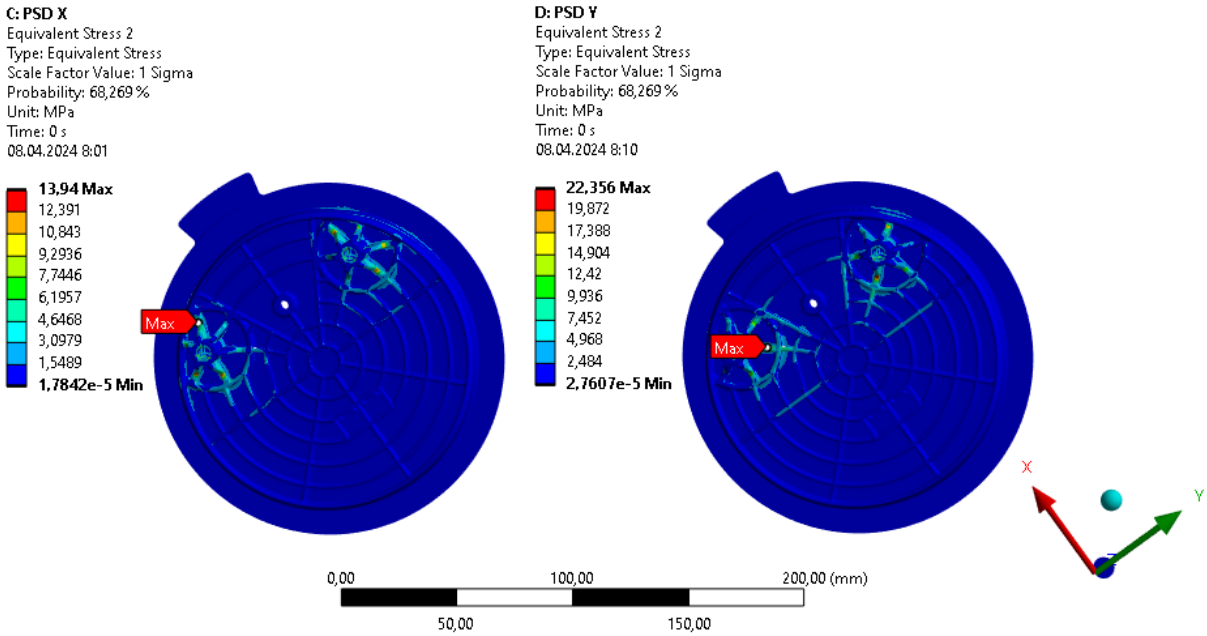
Obr. 54 Nalezení vlastních frekvencí a tvarů

V tuto chvíli už je možné provést samotné ověření systému na náhodné vibrace, které mají představovat jízdu vozidla po nekvalitní vozovce a které jsou na přírubu přenášeny skrze těsnící plochu v místě hrdla nádrže. Hodnoty náhodných vibrací jsou pro jednotlivé směry definovány zadavatelem v kapitole – 5 Specifikace požadavků na technický systém. Do softwaru ANSYS jsou hodnoty náhodných vibrací zadány pomocí bodů tvořících graf, viz Obr. 55.



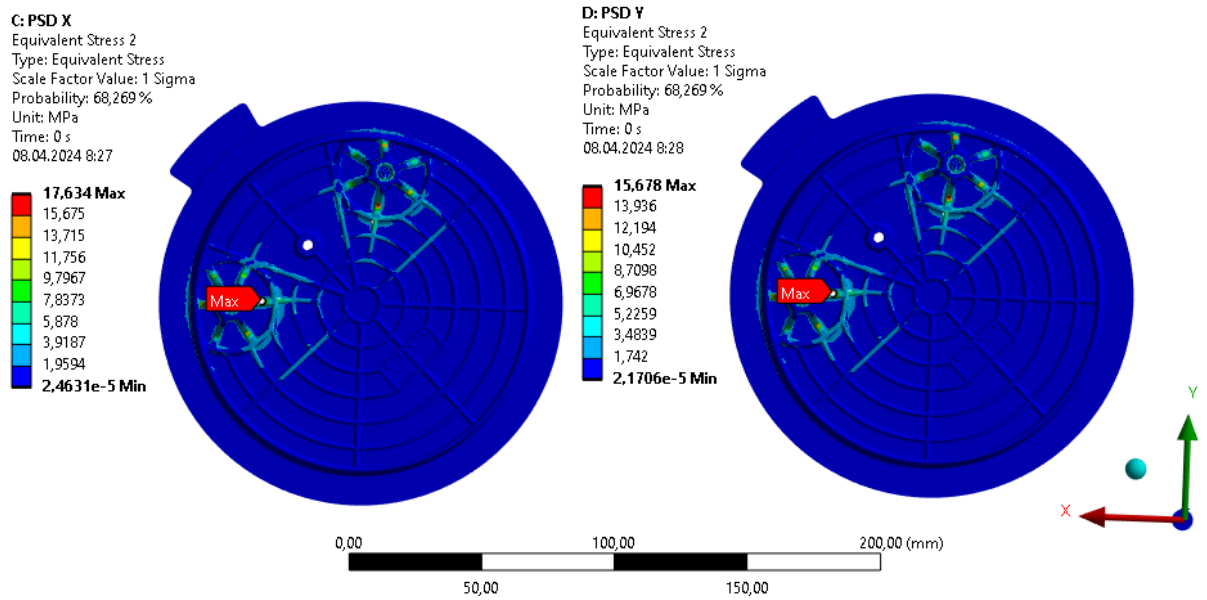
Obr. 55 Hodnoty náhodných vibrací

Dle zkušeností zadavatele se zároveň musí na přírubě vyskytovat maximální ekvivalentní napětí 23 [MPa]. Jedná se o experimentálně zjištěný limit stanovený Wöhlerovou křivkou. Zjištěná výsledná napětí na přírubě ve směrech *x* a *y* jsou zobrazena na Obr. 56, kde je také pro orientaci zobrazen souřadný systém. Na přírubě se nachází maximální ekvivalentní napětí 22,356 [MPa] ve směru *y,* a tudíž je požadovaná podmínka splněna.



Obr. 56 Výsledky analýzy náhodných vibrací ve směru x a y

Pro větší jistotu, že příruba vyhovuje, je souřadnicový systém ještě jednou pootočen o 45 [°] a je znovu provedena analýza náhodných vibrací.



Obr. 57 Ověřující analýza náhodných vibrací v pootočeném systému o 45°

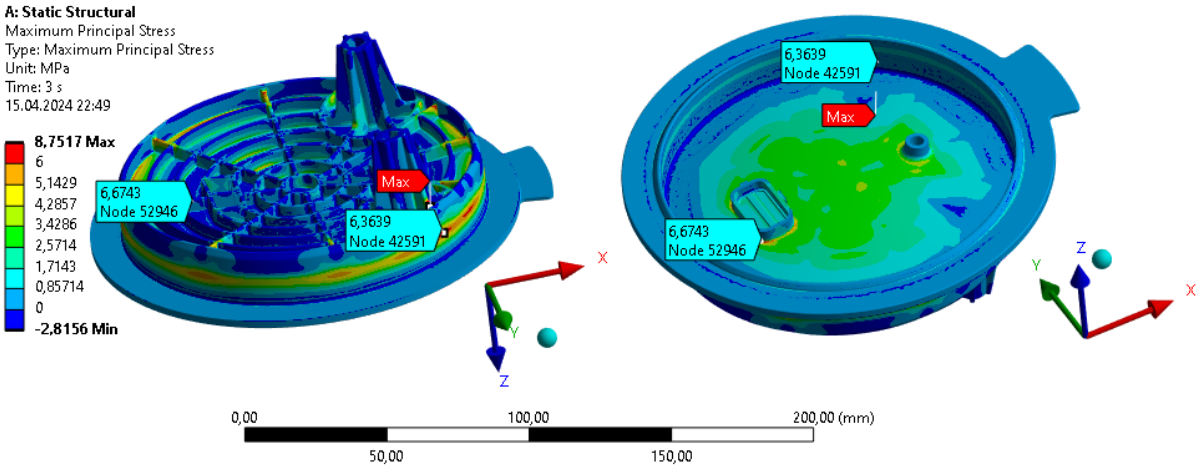
Ve všech případech jsou maximální ekvivalentní napětí menší než 23 [MPa].

6.4.3 Namáhání teplotou a tlakem

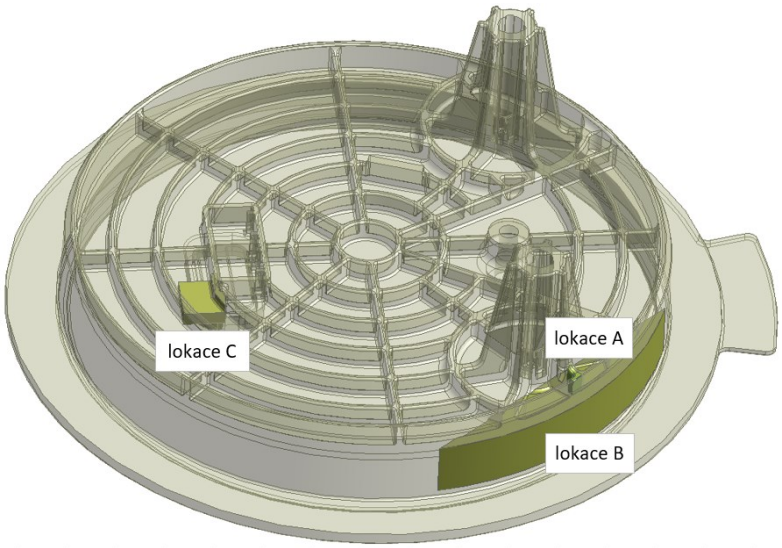
Jak již bylo v diplomové práci několikrát zmíněno, jedno z dalších hlavních namáhání ovlivňujících správnou funkci příruby v provozních podmínkách, je tzv. creep. Navrhovaný TS tak musí splňovat požadavky zadavatele uvedené v Tab. 1 v kapitole 5 – Specifikace požadavků na technický systém.

Jelikož cílem této simulace je zjistit oblasti nejkritičtějších napětí na navrhované přírubě a ty náležitě vyhodnotit s ohledem na životnost dílu, musí se nejprve definovat jemnější síť po celém tělese příruby pomocí téhož elementu SOLID187 o velikosti 1 [mm]. Příruba je opět fixována na těsnící ploše, viz Obr. 20.

Pro indikaci jednotlivých míst, ve kterých dochází k největší koncentraci napětí vlivem tlaku v nádrži, je proveden numerický výpočet pomocí funkce „Static Structural“. Tato výpočetní úloha je rozdělena do tří kroků reprezentujících tlakové hladiny zatěžující přírubu – -0,15 [bar]; 0,2 [bar]; 0,35 [bar]. Výsledkem analýzy je zjištění lokace tří nejproblémovějších míst za pomocí prvního hlavního napětí v době, kdy na přírubu působí největší přetlak, viz Obr. 58 a 59.

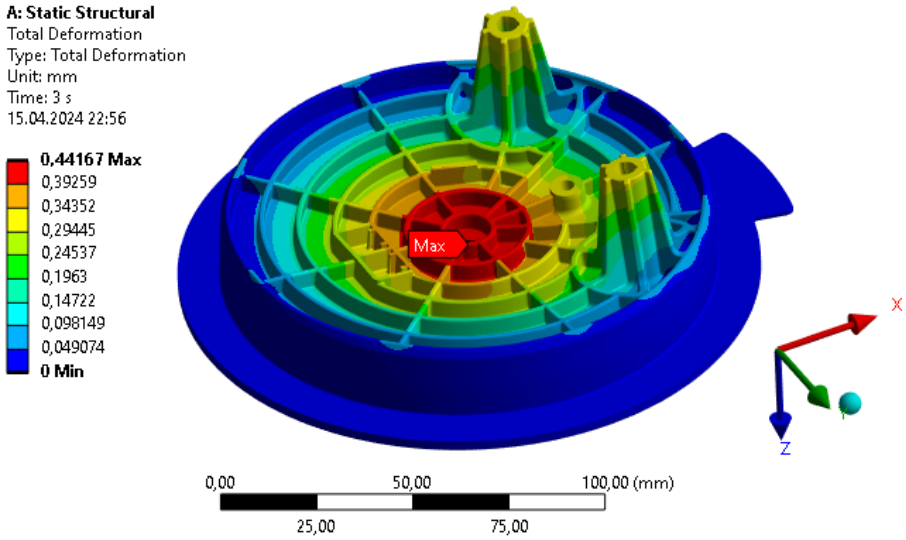


Obr. 58 Globální analýza napětí na přírubě při creepu



Obr. 59 Lokalizace největších koncentrací napětí

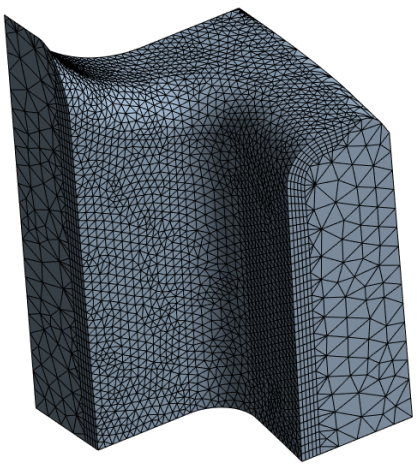
Při této numerické analýze je zároveň ověřen i maximální průhyb způsobený největším přetlakem v systému 0,35 [bar]. Po porovnání výsledků analytického výpočtu z kapitoly 6.3.1 a numerického výpočtu (viz Obr. 60) je zjištěn mezi získanými hodnotami značný rozdíl. Ten je ale způsoben tím, že je numericky ověřován až finální design doplněný o vyztužovací žebra, a proto je průhyb na přírubě menší.



Obr. 60 Maximální průhyb na přírubě

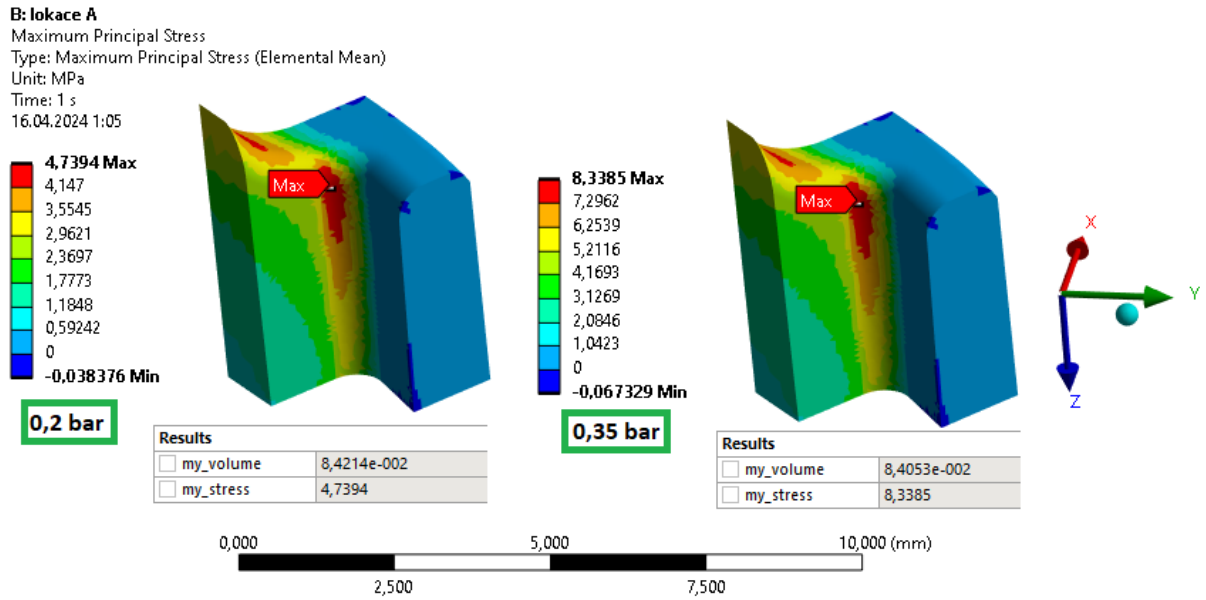
Lokace A

Pro přesnější analýzu nejrizikovějšího bodu v lokaci A je vytvořen submodel přebírající posunutí bodů v místě řezů z předchozí globální analýzy, viz Obr. 58. Tento submodel je převážně tvořen elementy o velikosti 0,2 [mm]. Jen stěna, na které se vyskytuje největší napětí, je zjemněna na elementy o velikosti 0,1 [mm], viz Obr. 61.



Obr. 61 Diskretizace submodulu A

Pro samotné ověření životnosti této lokace A namáhané creepem (zatěžovací stavy dle Tab. 1) je použita vyhodnocovací softwarová aplikace poskytnutá zadavatelem práce, která se opírá o výsledky experimentálních zkoušek materiálu při různých zatěžovacích stavech a v různých chemických prostředích. Aby bylo možné s touto aplikací pracovat, je zapotřebí pomocí softwaru ANSYS v lokaci A zjistit přesnou hodnotu prvního hlavního napětí *my_stress* [MPa] a hodnotu objemu elementů *my_volume* [m^3] v kritickém místě, ve kterém se ještě nachází alespoň 80 % maximálního napětí. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 62 pro namáhání přetlakem 0,2 [bar] a 0,35 [bar]. [6]



Obr. 62 Analýza napětí na submodelu A při hladinách přetlaku

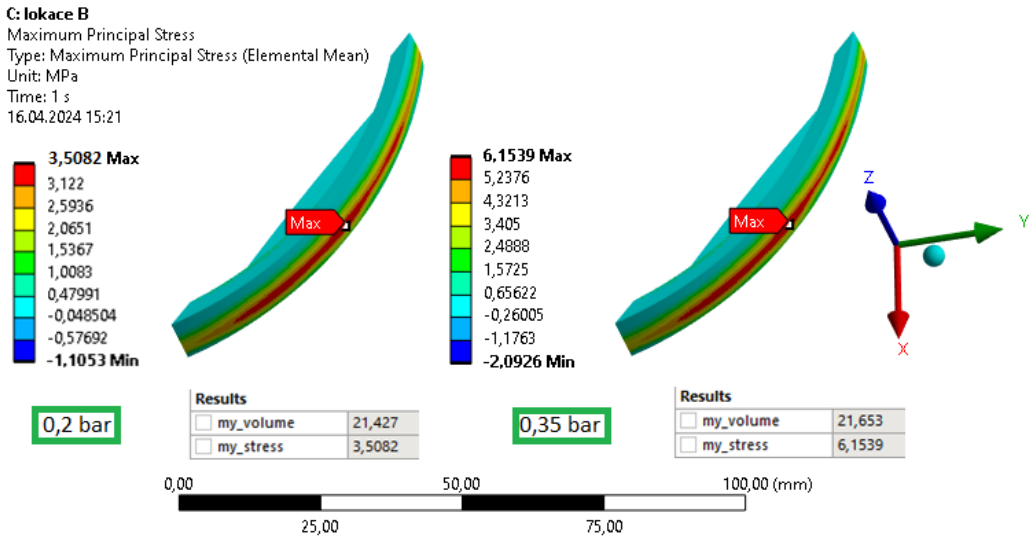
Zjištěné hodnoty maximálních napětí jsou zadány do poskytnutého softwaru a získané výsledky životnostní analýzy kritického napětí v lokaci A jsou vypsány v Tab. 9. Riziková oblast A dle životnostní analýzy vyhovuje. Výsledná získaná hodnota počtu dovoleného množství opakování simulace zatížení creepem je sice vysoká, nesmí být ale zároveň opomenuto, že je příruba zatěžována i dalšími okolními vlivy a že tvar žebrování je ovlivněn konstrukčními podmínkami pro plasty. Proto nelze rozměry zmenšit.

Tab. 9 Vyhodnocení životnosti lokace A

Vlastnost	Hodnota
Dovolené množství opakování	1200
Celkové poškození *D*	0,000836 ≤ 1
Výsledek	Vyhovuje

Lokace B

Diskretizace submodulu v lokaci B je provedena převážně za pomoci elementů o velikosti 1 [mm]. Vnější stěna je síťována menšími elementy o velikosti 0,5 [mm]. Pomocí softwaru ANSYS je opět zjištěna maximální hodnota prvního hlavního napětí *my_stress*, které se vyskytuje v lokaci B, a hodnota objemu elementů *my_volume*. Obr. 63 reprezentuje získané hodnoty, které jsou následně opět vloženy do poskytnutého softwaru. Získané výsledky životnostní analýzy jsou vepsány do Tab. 10. [6]



Obr. 63 Analýza napětí na submodelu B při hladinách přetlaku

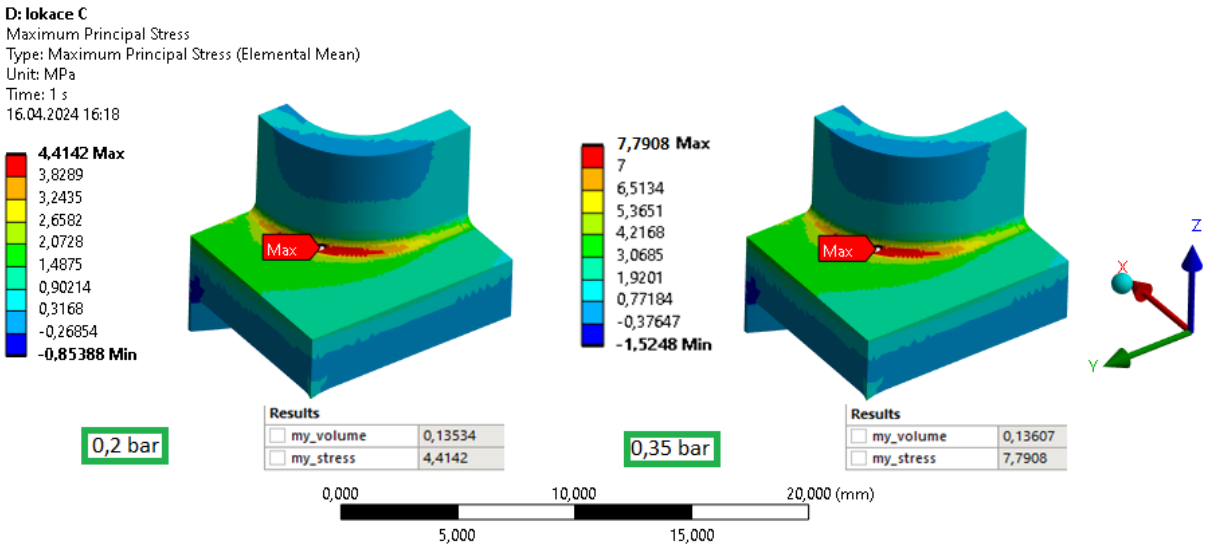
Tab. 10 Vyhodnocení životnosti lokace B

Vlastnost	Hodnota
Dovolené množství opakování	80,8
Celkové poškození *D*	0,0124 ≤ 1
Výsledek	Vyhovuje

Ze získaných hodnot lze stanovit, že toto místo B na navrhovaném designu z hlediska únavy vyhovuje.

Lokace C

V případě rizikového místa C se postupuje stejným způsobem. Submodel reprezentující lokaci C je oproti globálnímu modelu zjemněn na elementy o velikosti 0,35 [mm]. Stěna, na které se vyskytuje bod největšího hlavního napětí, je tvořena elementy o velikosti 0,2 [mm]. Získané hodnoty na Obr. 64 jsou dále zpracovány stejným způsobem, jako tomu bylo u lokací A a B. Výsledné hodnoty jsou opět vypsány v Tab. 11.



Obr. 64 Analýza napětí na submodelu C při hladinách přetlaku

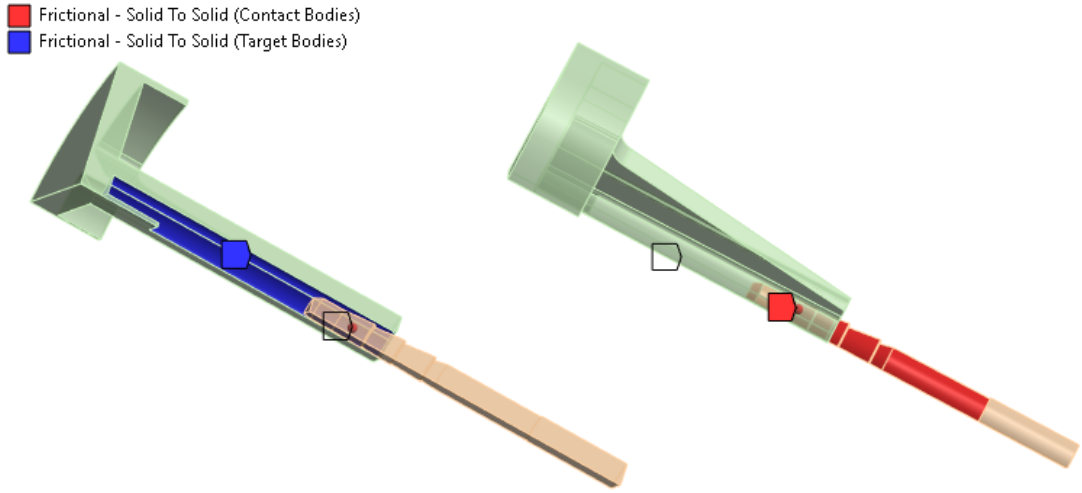
Tab. 11 Vyhodnocení životnosti lokace C

Vlastnost	Hodnota
Dovolené množství opakování	1300
Celkové poškození *D*	0,000772 ≤ 1
Výsledek	Vyhovuje

Jelikož i lokace C splňuje životnostní podmínku, závěrem této analýzy je, že celý navržený design TS vyhovuje.

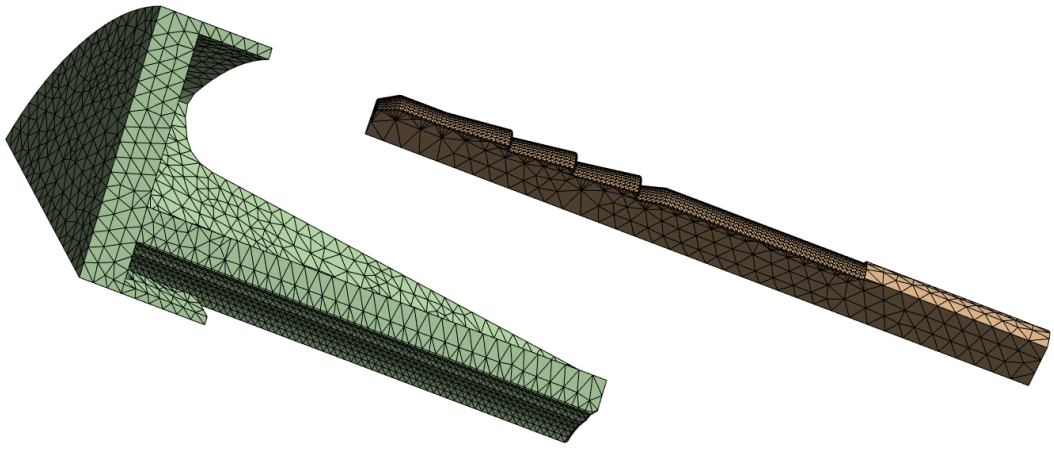
6.4.4 Síly pro nalisování a vylisování

Poslední numerický výpočet je proveden pro ověření návrhu pouzdra, které fixuje tyčku v přírubě, a pro ověření potřebné velikosti maximální lisovací a minimální vylisovací síly. Jedna šestina zjednodušeného 3D modelu postupně upraveného pouzdra a tyčky je zobrazena na Obr. 65, na kterém jsou vidět kontaktní plochy tření obou těles (pouzdra a tyčky). Dynamický součinitel tření je zvolen o velikosti 0,138 [-]. Tato hodnota vychází z experimentálních měření zadavatele.



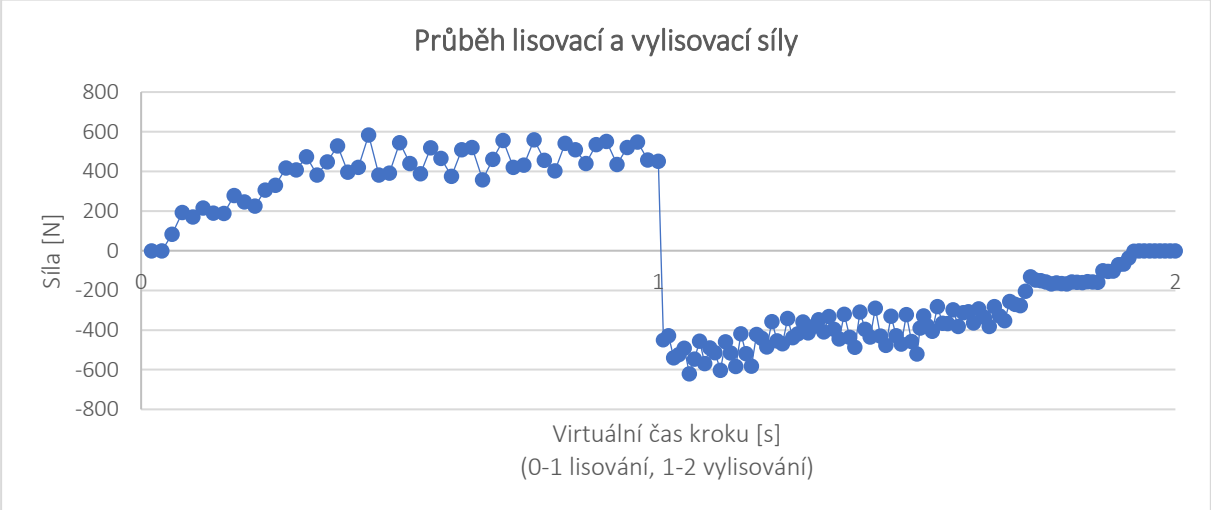
Obr. 65 Kontaktní plochy pouzdra a tyčky

Obě tělesa jsou tvořena tetraedry o velikosti 1 [mm]. Na kontaktních plochách se vyskytují ploché elementy – na pouzdře o velikosti 0,5x0,5x0,1 [mm] a na tyčce 0,25x0,25x0,1 [mm], viz Obr. 66.



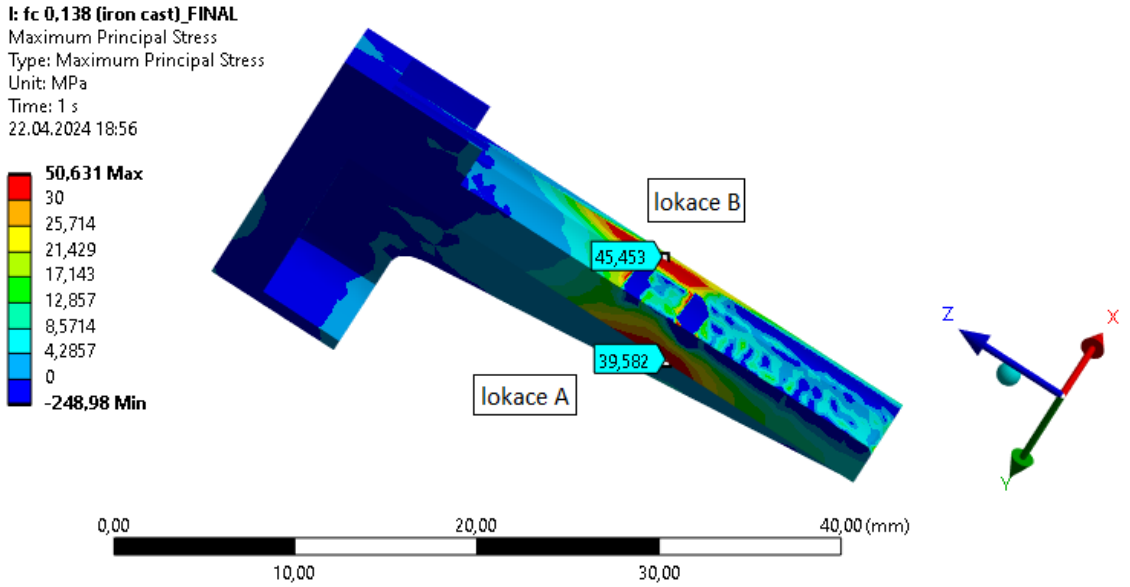
Obr. 66 Diskretizace pouzdra a tyčky

Úloha je následně rozdělena do dvou kroků – lisování a vylisování tyčky. V místech řezu jsou definovány okrajové podmínky symetrie, čímž dojde k zamezení pohybu v normálovém směru každé z těchto ploch řezu. Dále je u materiálu pouzdra dána skutečnost, že je materiál v tlaku tužší než v tahu, a to za pomoci makra implementovaného do výpočetní úlohy v prostředí ANSYS. Po spuštění výpočtu jsou zjištěny velikosti lisovací a vylisovací síly v daném časovém úseku každého kroku. Zjištěné hodnoty jsou vneseny do grafu na Obr. 67 a lze z nich zjistit, že maximální síla v průběhu lisování je o velikosti 583,6 [N] a minimální síla v počátku průběhu vylisování je o velikosti 451,4 [N]. Tím je požadavek zadavatele splněn.



Obr. 67 Graf průběhu lisovací a vylisovací síly

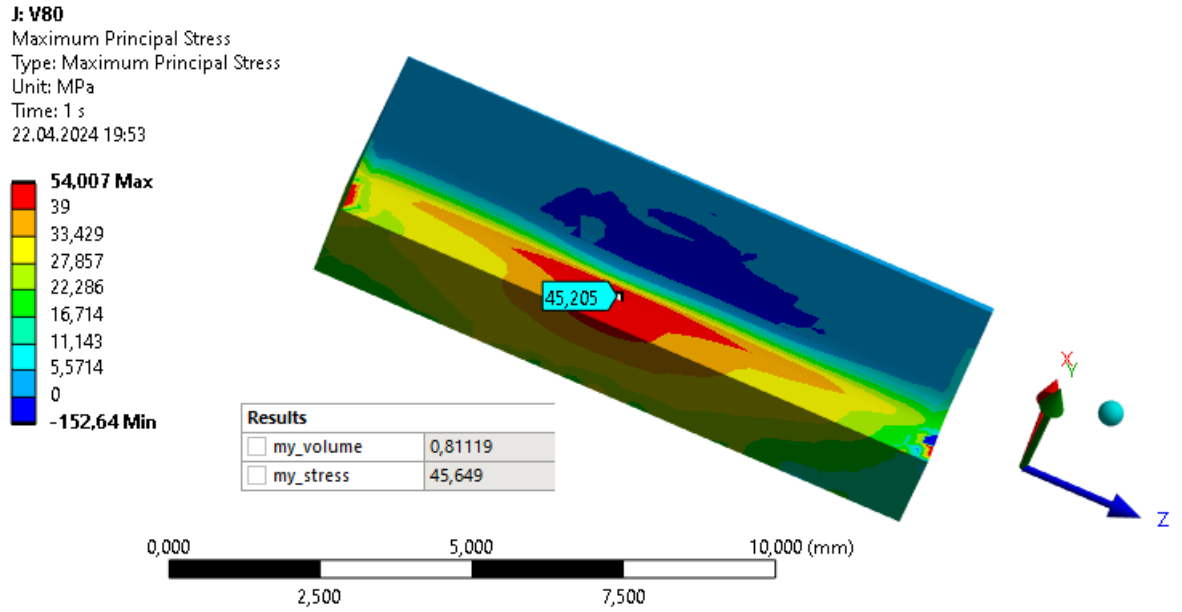
Aby bylo opět možné za pomoci softwarové aplikace poskytnuté zadavatelem ověřit minimální životnost pouzdra 15 let, je zapotřebí nejdříve zjistit velikost hlavního napětí vyskytujícího se na pouzdře po zalisování tyčky. Z vypočtené numerické úlohy na Obr. 68 jsou zjištěny dvě rizikové oblasti (lokace A a B), které je zapotřebí dále podrobněji zanalyzovat. [6]



Obr. 68 Analýza napětí na pouzdře

Lokace A

Jelikož se jedná o plochu, která není v kontaktu s jiným tělesem, je možné opět vytvořit submodel lokace A, který je náležitě zjemněn za pomoci menších elementů. Na něm je proveden rozbor objemu elementů (hodnota *my_volume* [m^3]), ve kterých se nachází alespoň 80 % maximálního napětí. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na Obr. 69. Vlivem zjemnění sítě vzrostlo hlavní napětí o 10 [N].



Obr. 69 Analýza napětí submodelu pouzdra A

Než bude analyzována životnost místa, ve kterém se nachází maximální napětí, je zkoumána relaxace napětí materiálu po dobu 15 let (≈ 132 000 [h]). Pro tuto analýzu byla od zadavatele poskytnuta další softwarová aplikace, která pracuje s relaxačními křivkami získanými z experimentů prováděných na zvoleném materiálu v testovacím benzínu RSG-E10. Ve zjednodušené Tab. 12 je vidět, jak v konkrétním čase a při vzrůstající teplotě klesá v pouzdře maximální napětí. [6]

Tab. 12 Relaxace napětí v lokaci pouzdra A

Čas [h]	Teplota [°C]	Napětí [MPa]
6,818	-20	46,591
2424,256	-20	29,943
2,045	0	40,879
7272,736	0	23,523
4,432	30	27,103
15757,568	30	15,596
1,705	40	23,301
6060,608	40	13,408
1,364	60	15,113
484,864	60	9,713

Stejným postupem, jako tomu bylo v kapitole 6.4.3, je pomocí hodnot z Tab. 12 a hodnoty *my_volume* provedena životnostní analýza rizikového napětí v lokaci A. Výsledné celkové poškození *D* tohoto místa je *D* = 0,098 [-]. Jelikož se jedná o hodnotu menší než *D* = 1 [-], lze konstatovat, že navržený design pouzdra v lokaci A vyhovuje.

Lokace B

Druhé rizikové napětí na pouzdře se nachází v lokaci B. Tato oblast je ale v kontaktu s tyčkou, a proto nelze vytvořit pro tento případ submodel, který by vyhodnotil pravděpodobnější hodnotu hlavního napětí. Z kvalifikovaného odhadu z předchozí analýzy, kde napětí vzrostlo o 10 [MPa], je proto zvoleno hlavní maximální napětí v lokaci B také o 10 [MPa] vyšší – na hodnotu 55 [MPa].

Následně je stejným způsobem, jako tomu bylo v lokaci A, zjištěna relaxace napětí a hodnota celkového poškození *D*. Výsledky relaxace v lokaci B jsou vypsány v Tab. 13.

Tab. 13 Relaxace napětí v lokaci pouzdra B

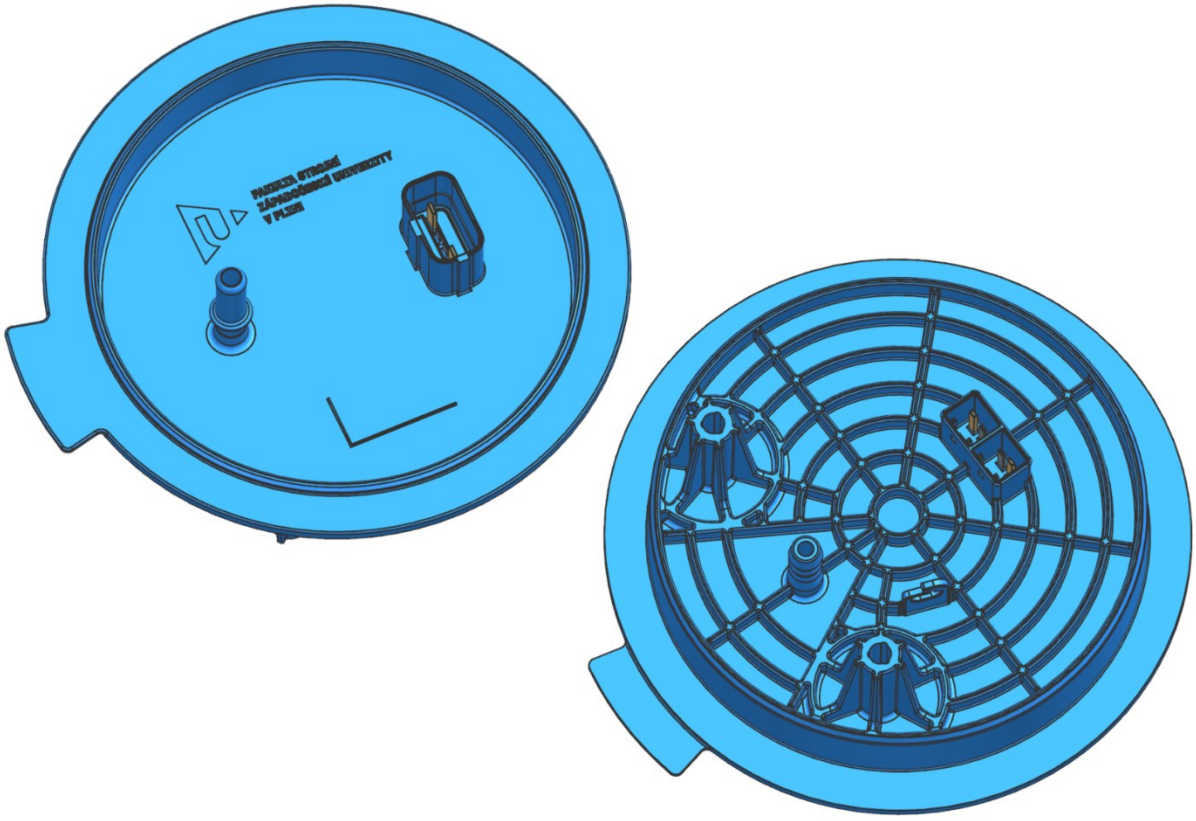
Čas [h]	Teplota [°C]	Napětí [MPa]
6,818	-20	56,944
2424,256	-20	36,597
2,045	0	49,963
7272,736	0	28,751
4,432	30	33,126
15757,568	30	19,062
1,705	40	28,479
6060,608	40	16,388
1,364	60	18,472
484,864	60	11,872

Výsledné celkové poškození *D* tohoto místa je *D* = 0,448 [-]. Jelikož se také jedná o hodnotu menší než *D* = 1 [-], lze konstatovat, že navržený design pouzdra v lokaci B vyhovuje.

6.5 Definitivní stavební struktura

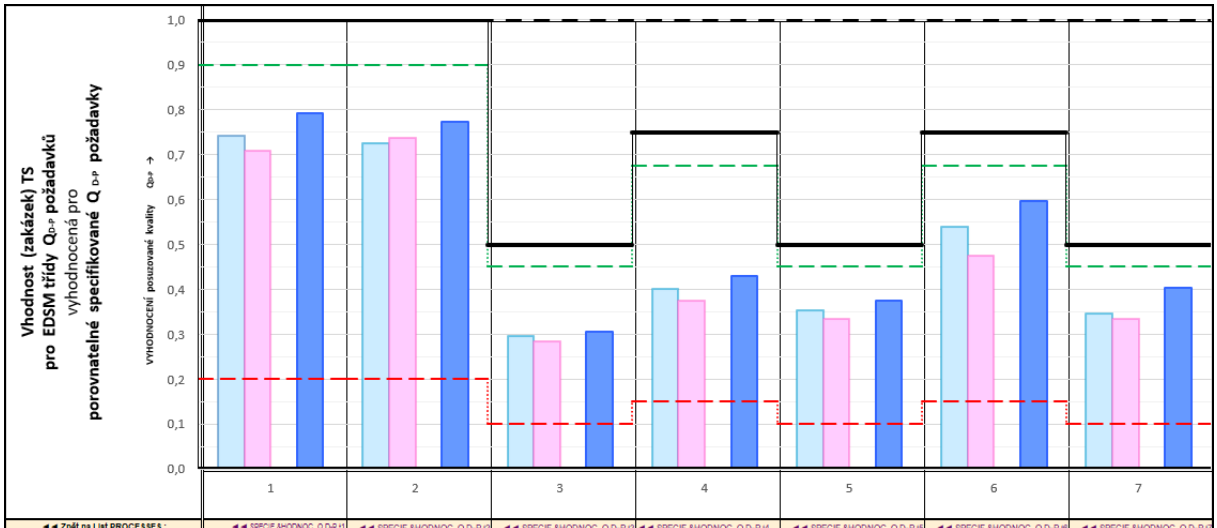
Na základě postupných numerických ověřovacích výpočtů se tak definitivní stavební strukturou navrhovaného TS stává varianta příruby s vyztužujícími žebry, viz Obr. 70. Pro přírubu je zvolen konstrukční termoplastický materiál POM-C pod označením Hostaform® C 13021. Celková hmotnost příruby je 0,147 [kg] a zároveň její průměr bez těsnící plochy je 129,5 [mm].

Pro připojení příslušenství jsou součástí horní strany příruby hydraulický port typu 5/16“ dle normy SAE J2044 a elektrický konektor, který má zadavatelem požadovaný tvar pro připojení příslušenství. Dále se na horní straně nachází výstupek pro správné nastavení polohy modulu v nádrži, logo a výstupek pro určení umístění výrobního štítku. Na spodní straně příruby se nacházejí dvě pouzdra pro zalisování tyček, jeden hydraulický port propojující vedení paliva od palivové pumpy, elektrický konektor pro napájení palivové pumpy a snímače hladiny paliva, držák kabelů zamezující jejich případné kolizi s jinou komponentou a vyztužující žebrování, které je navrhnuto dle pravidel správného konstruování plastových výrobků.



Obr. 70 Pohled na horní a spodní stranu definitivního TS

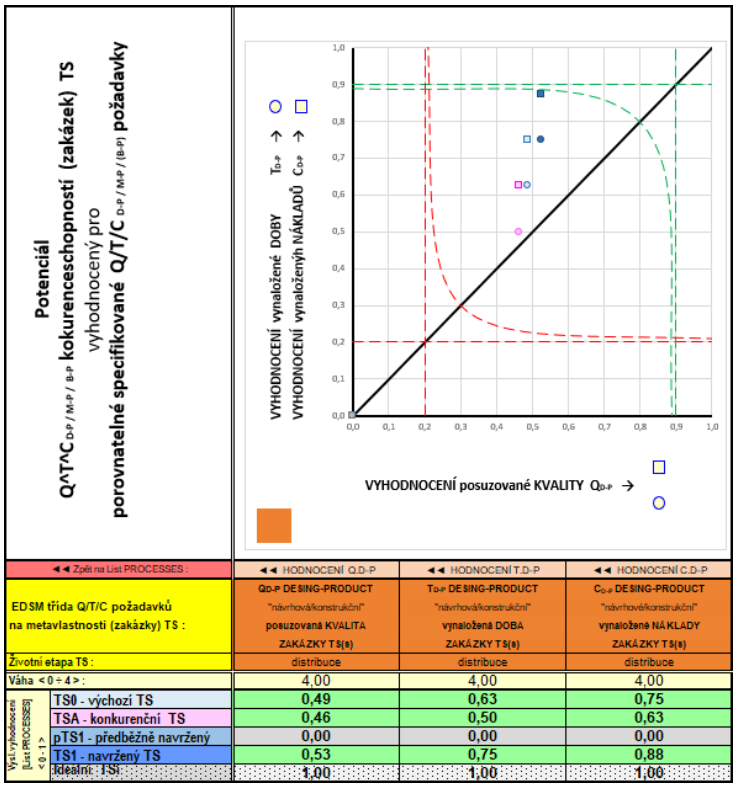
Na základě inženýrsko-manažerské specifikace v kapitole č. 5 je dokončeno SWOT ohodnocení definitivního navrženého systému s porovnáním s výchozím a konkurenčním TS. Výsledky porovnání mezi TS0, TSA a TS1 jsou zobrazeny na Obr.71. V každém sloupci se vyskytuje tlustá černá čára v horizontální poloze, která vyznačuje nejoptimálnější stav dané skupiny vlastností. Výsledky dokazují, že nejvíce vyhovujícím technickým systémem je navržený TS1.



◄◄ Zpět na List PROCESSES :		◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t1	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t2	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t3	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t4	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t5	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t6	◄◄ SPECIF.&HODNOC. Q.D-P.t7
EDSM třída QD-P požadavků na vlastnosti (zakázky) TS :		1. Vlastnosti k funkčnosti (vč. provozuschopnosti) TS(s)	2. Vlastnosti k lidem (& zvířatům, ...) HuS	3. Vlastnosti k ost. hmotným pracovním prostředkům TS	4. Vlastnosti k aktivnímu&reaktivnímu prostředí AREnv	5. Vlastnosti k „know-how“ informacím IS	6. Vlastnosti k „know-$MG“ informacím MgtS	7. Vlastnosti ke struktuře (vč.znakových&reaktivních vl.) TS(s)
Životní etapa TS :		provoz	všechny!	všechny!	všechny!	všechny!	všechny!	nepřímo všechny
Váha < 0 ÷ 4 > :		4	4	2	3	2	3	2
Výst.vyhodnocení [List PROCESSES] < 0 - 1 >	TS0 - výchozí TS	0,74	0,73	0,30	0,40	0,35	0,54	0,35
	TSA - konkurenční TS	0,71	0,74	0,28	0,38	0,33	0,47	0,33
	pTS1 - předběžně navržený	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	TS1 - navržený TS	0,79	0,77	0,31	0,43	0,38	0,60	0,40
	ideální : I-Si :	1,00	1,00	0,50	0,75	0,50	0,75	0,50

Obr. 71 SWOT ohodnocení vhodnosti výchozího, konkurenčního a definitivního TS

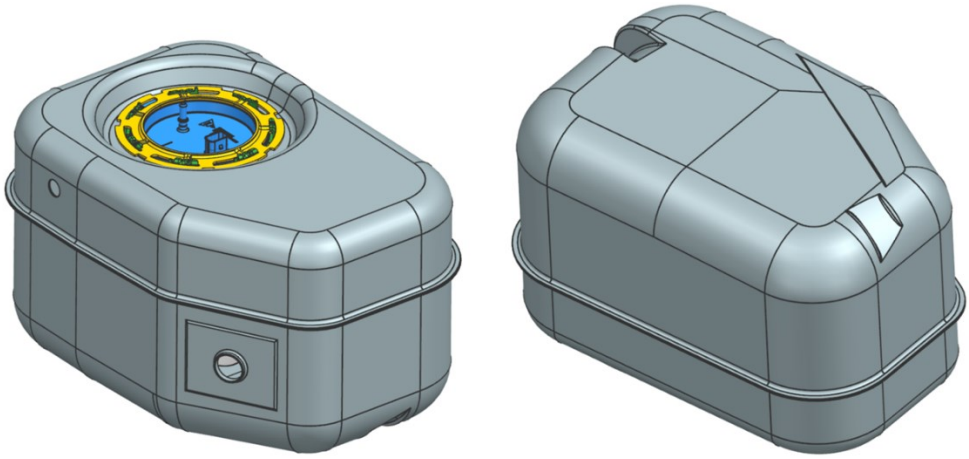
Dále je sestrojen graf potenciálu konkurenceschopnosti jednotlivých TS. Na základě předchozího vyhodnocení je z Obr. 72 vidět, že navržený TS1 je z hlediska posuzované kvality, vynaložené doby a vynaložených nákladů nejvýhodnější.



◄◄ Zpět na List PROCESSES :		◄◄ HODNOCENÍ Q.D-P	◄◄ HODNOCENÍ T.D-P	◄◄ HODNOCENÍ C.D-P
EDSM třída Q/T/C požadavků na metavlastnosti (zakázky) TS :		QD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" posuzovaná KVALITA ZÁKAZKY TS(s)	TD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" vynaložená DOBA ZÁKAZKY TS(s)	CD-P DESING-PRODUCT "návrhová/konstrukční" vynaložené NÁKLADY ZÁKAZKY TS(s)
Životní etapa TS :		distribuce	distribuce	distribuce
Váha < 0 ÷ 4 > :		4,00	4,00	4,00
Výst.vyhodnocení [List PROCESSES] < 0 - 1 >	TS0 - výchozí TS	0,49	0,63	0,75
	TSA - konkurenční TS	0,46	0,50	0,63
	pTS1 - předběžně navržený	0,00	0,00	0,00
	TS1 - navržený TS	0,53	0,75	0,88
	ideální : I-Si :	1,00	1,00	1,00

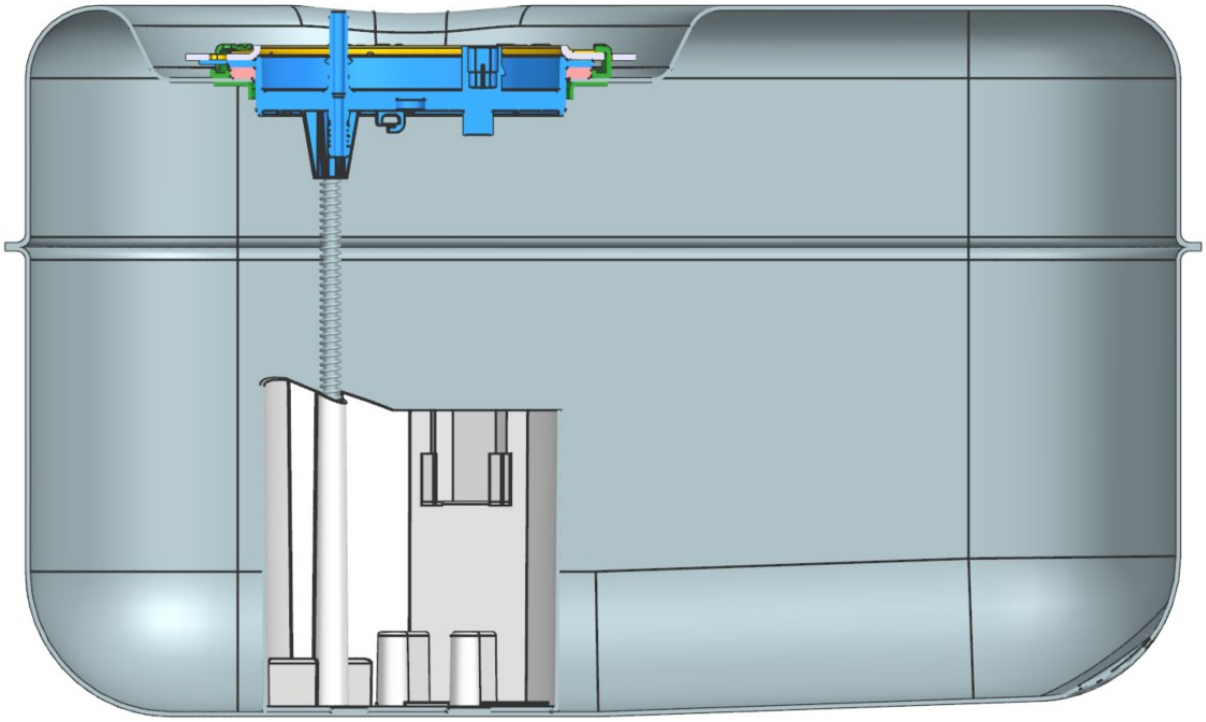
Obr. 72 Potenciál konkurenceschopnosti výchozího, konkurenčního a definitivního TS

Příruba je spolu s hrubou stavbou dolní části palivového modulu (s tyčkami a zásobníkem paliva) dále vložena do nádrže, ve které je zafixována pomocí speciální matice (žlutá komponenta) a jejího zámkového protikusu (zelená komponenta), který je bodově přivařen k nádrži. Sestava je zobrazena na Obr. 73 a 74.



Obr. 73 Pohledy na sestavu nádrže s příslušenstvím

Na Obr. 74 je zobrazen řez touto sestavou. Pod těsnící plochou příruby se nachází pryžové těsnění (růžová komponenta). Na jedné z tyček je navíc nasazena pružina, která zajistí neustálý kontakt zásobníku paliva (světle šedá komponenta) s dnem nádrže při tzv. dýchání nádrže.



Obr. 74 Řez hrubou stavbou čerpacího palivového modulu umístěného v nádrži

Pro definitivní návrh příruby je vytvořen výrobní výkres, jehož některé části byly vyvinuty zadavatelem a jejich zveřejnění tak není žádoucí. Proto některé oblasti v tomto výkresu nejsou opatřeny kótami.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat problematiku přírub čerpacího palivového modulu u plug-in hybridních osobních automobilů a následně navrhnout tento specifický komponent, který plní funkci uzavření a utěsnění palivové nádrže a zároveň zajišťuje spolehlivý přísun paliva do spalovacího prostoru. Tohoto cíle bylo dosaženo prostřednictvím důkladné rešerše trhu, provedením inženýrsko-manažerské specifikace požadovaných vlastností, následného návrhu, SWOT hodnocení a numerického ověření různých alternativních konstrukčních řešení, aby bylo ověřeno, že navržená příruba splňuje veškeré požadavky na kvalitu a bezpečnost v souladu s relevantními normami. S ohledem na správnou funkčnost dílu a dodržování důležitých norem byl proveden i pečlivý výběr materiálu.

První část diplomové práce se věnuje teoretickému úvodu řešené problematiky. Zde je vysvětleno, proč dochází na našem trhu k začleňování plug-in hybridních vozidel do provozu. Dále je v této části proveden rozbor současných palivových systémů osobních vozidel se zaměřením na benzínové aplikace, kde jsou popsány hlavní funkce jednotlivých komponent. V poslední fázi teoretické části je provedena rešerše používaných materiálů pro výrobu navrhované příruby.

Druhá část diplomové práce se zabývá praktickou částí. Zde je na základě specifikovaných požadavků provedena inženýrsko-manažerská specifikace a rozbor výchozího, konkurenčního a definitivního navrženého technického systému. Pro požadovaný technický systém jsou navrhnuty celkem tři konstrukční alternativy, které jsou náležitě pomocí metody SWOT ohodnoceny. Dalším důležitým krokem, kterým se tato práce zabývá je zvolení správného konstrukčního materiálu. Pro navrhovanou přírubu byl zvolen semikrystalický termoplast Hostaform® C 13021. Následně je s ohledem na materiálové vlastnosti proveden analytický výpočet minimální potřebné tloušťky hlavní stěny příruby a potřebného přesahu pouzdra pro vyhovující lisovací a vylisovací síly tyčky. S ohledem na zásady navrhování plastových výrobků je proveden i návrh vyztužujících žeber.

V závěru praktické části jsou provedeny numerické ověřující výpočty navrženého designu. Pomocí softwaru ANSYS je provedena pevnostní analýza místa inicializace vzniku trhliny na komponentě. Dále je pomocí modální analýzy zjištěno šest vlastních frekvencí a tvarů, které jsou potřebné pro ověření, zda příruba odolá během své požadované minimální životnosti náhodným vibracím způsobeným dynamickou jízdou po vozovce. Následně je provedena za pomoci softwaru ANSYS a softwarových aplikací poskytnuté zadavatelem diplomové práce, jež vychází z výsledků experimentálních zkoušek plastových materiálů, životnostní analýza s ohledem na zatížení příruby přetlakem se změnou okolní teploty. V poslední fázi praktické části je provedeno ověření lisovací a vylisovací síly tyčky z pouzdra, kde navržený design s ohledem na postupnou relaxaci napětí v materiálu způsobuje dokonce vyšší vylisovací sílu, než je lisovací. Všechny požadavky na navrhovaný technický systém jsou na základě numerických ověřovacích výpočtů splněny.

Výsledkem práce je provedení definitivního konkurenceschopného konstrukčního návrhu příruby čerpacího palivového modulu, která vyhovuje specifikovaným požadavkům zadavatele práce a potřebným normám. Pro úplnou kontrolu, že příruba vyhovuje všem provozním podmínkám, by bylo nutné provést další numerické analýzy definitivního designu a uskutečnit rozsáhlé dlouhodobé testy prováděné v testovacích laboratořích, které mohou odhalit další potenciální kritická místa.

Reference

[1] SINGH, Himanshu, A. AMBIKAPATHY, K. LOGAVANI, G. ARUN PRASAD a Saravanan THANGAVEL. Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). In: *Electric Vehicles* [online]. Springer, 2021, s. 53-72 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/347161983_Plug-In_Hybrid_Electric_Vehicles_PHEVs

[2] JÁNSKÝ, Martin. Hybridy, plug-in hybridy, elektromobily: Pomůžeme vám vyznat se v moderních pohonech. *Garáž.cz* [online]. 2019 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://www.garaz.cz/clanek/pomuzeme-vam-vyznat-se-v-modernich-pohonech-21002303

[3] Electric cars and plug-in hybrids explained. *BMW* [online]. 2019 [cit. 2023-11-21]. Dostupné z: https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html

[4] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-85920-76-X.

[5] Automotive Fuel Systems. In: *ASE Certification Practice Tests* [online]. 2024 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: https://www.freeasestudyguides.com/engine-fuel-systems.html

[6] *Podkladový materiál poskytnutý zadavatelem diplomové práce.*

[7] Palivová nádrž/montážní díly: BMW 118d E87 5-dveřový Evropa. In: *BMWfans.info* [online]. 2004 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: http://cz.bmwfans.info/parts-catalog/E87/Europe/118d-M47N2/L-N/jun2004/browse/fuel_supply/fuel_tank_mounting_parts/

[8] Paliv. filtr/čerp./snímač výšky hladiny: BMW 118d E87 5-dveřový Evropa. In: *BMWfans.info* [online]. 2004 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: http://cz.bmwfans.info/parts-catalog/E87/Europe/118d-M47N2/L-N/jun2004/browse/fuel_supply/fuel_filter_pump_fuel_level_sensor

[9] Fuel Pumps. *Valeo Service* [online]. 2024 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: https://www.valeoservice.com/en-com/passenger-car/engine-management-systems/fuel-pumps

[10] Fuel Pump. In: *My-cardictionary.com* [PDF]. 2024 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.my-cardictionary.com/engine/fuel-pump.pdf

[11] Fuel-supply module. In: *BOSCH* [online]. 2024 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/pumps/fuel-supply-module/

[12] Solving Crash Problems of the Fuel Supply Modules in the Fuel tank. In: DOBEŠ, Martin a Jiří NAVRÁTIL. *DYNAlook* [PDF]. 2015 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.dynalook.com/conferences/10th-european-ls-dyna-conference/7%20Simulation%20VI%20-%20Cracks/04-Dobes-Navratil-RobertBosch-P.pdf

[13] HAIKL, Petr. *Ověření funkce bezkontaktního snímače hladiny paliva v palivové nádrži*. Diplomová práce. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Pedagogická fakulta. 2013.

[14] Turbine style in-tank fuel pump. In: *Besters Grupp* [online]. 2018 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://bestmoobel.ee/?s=electrical-fuel-pump-flash-sales-1693594998-qq-dnY6rzha

[15] 2007-2012 Hyundai Elantra 2.0L-L4 Fuel Pump Assembly 31110-2H000 E8819M FE0351-11B1. In: *China Fuel Pump Assembly manufacturer* [online]. 2024 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://www.fuelpump-assembly.com/sale-11527086-2007-2012-hyundai-elantra-2-0l-l4-fuel-pump-assembly-31110-2h000-e8819m-fe0351-11b1.html

[16] FUEL PUMP MODULE ASSEMBLY. In: *Carter Fuel Systems and Water Pumps* [online]. 2024 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://carterengineered.com/fuel-pump-module-assembly-p76595m

[17] SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. 6. aktual. vydání. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7.

[18] Delphi Fuel Pump Module Assemblies FG1317-11B1. In: *Summit Racing* [online]. 2024 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://www.summitracing.com/parts/dfp-fg1317

[19] DENSO CORP (JP) a DENSO INT AMERICA INC (US). *FUEL PUMP MODULE INCLUDING A FLANGE GROOVE ROD ATTACHMENT*. Patrick POWELL (vynálezce). Přihl.: 18.03.2011. Uděl.: 20.09.2012. Patentový spis US 2012/234414 A1 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/046827492/publication/US2012234414A1?q=US2012234414A1

[20] HOSNEDL, S., J. DVOŘÁK a M. KOPECKÝ. *Konstrukční a designérský návrh nemocničního lůžka pro intenzivní péči* [online]. Plzeň: ZČU, FST, KKS, 2022 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~hosnedl/d_BP&DP/DP_EDSM/B0_SaP_Souhrnna.zprava_CASE.EX&Priklady/B0b_SaP_EID_(SP-EDD)_DP-EDB_NemLuzko/

[21] UN Regulation No 154: Uniform provisions concerning the approval of light duty passenger and commercial vehicles with regards to criteria emissions, emissions of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range (WLTP). In: *European Union* [online]. 2021 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ba57cc2b-4e7c-11ec-91ac-01aa75ed71a1/language-en

[22] HOSTAFORM® C 13021. *CAMPUS®* [online]. 2023 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/HOSTAFORM%C2%AE+C+13021/Celanese/163/98f13975

[23] Ultramid® A3WG7. *CAMPUS®* [online]. 2024 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Ultramid%C2%AE+A3WG7/BASF/20/b15bfe33

[24] Zytel® HTN51G35HSL NC010. CAMPUS® [online]. 2023 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Zytel%C2%AE+HTN51G35HSL+NC010/Celanese/163/f3d52506

[25] Tech with Jeff: How to Build a RestoMod Fuel Delivery System. *Street Muscle* [online]. 2018 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.streetmusclemag.com/tech-stories/tech-with-jeff-how-to-build-a-restomod-fuel-delivery-system/

[26] LAŠ, Vladislav. *Výukové materiály z předmětu Pružnost a pevnost 2* [přednášky]. Plzeň: ZČU, FAV, KME, 2023.

[27] ŘEZNÍČEK, Jan. *PRUŽNOST A PEVNOST II KOMENTOVANÉ PŘEDNÁŠKY* [PDF]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2009 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/~simunale/PP_II_600(2).pdf

[28] ŘEZNÍČKOVÁ, Jitka. *PRUŽNOST A PEVNOST V BÁJEČNÉM SVĚTĚ JULESE VERNEA* [PDF]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2017 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70068/MU-BP-2017-Reznickova-Jitka-priloha-Priloha_BP_2017_Reznickova_Jitka.pdf?sequence=4&isAllowed=y

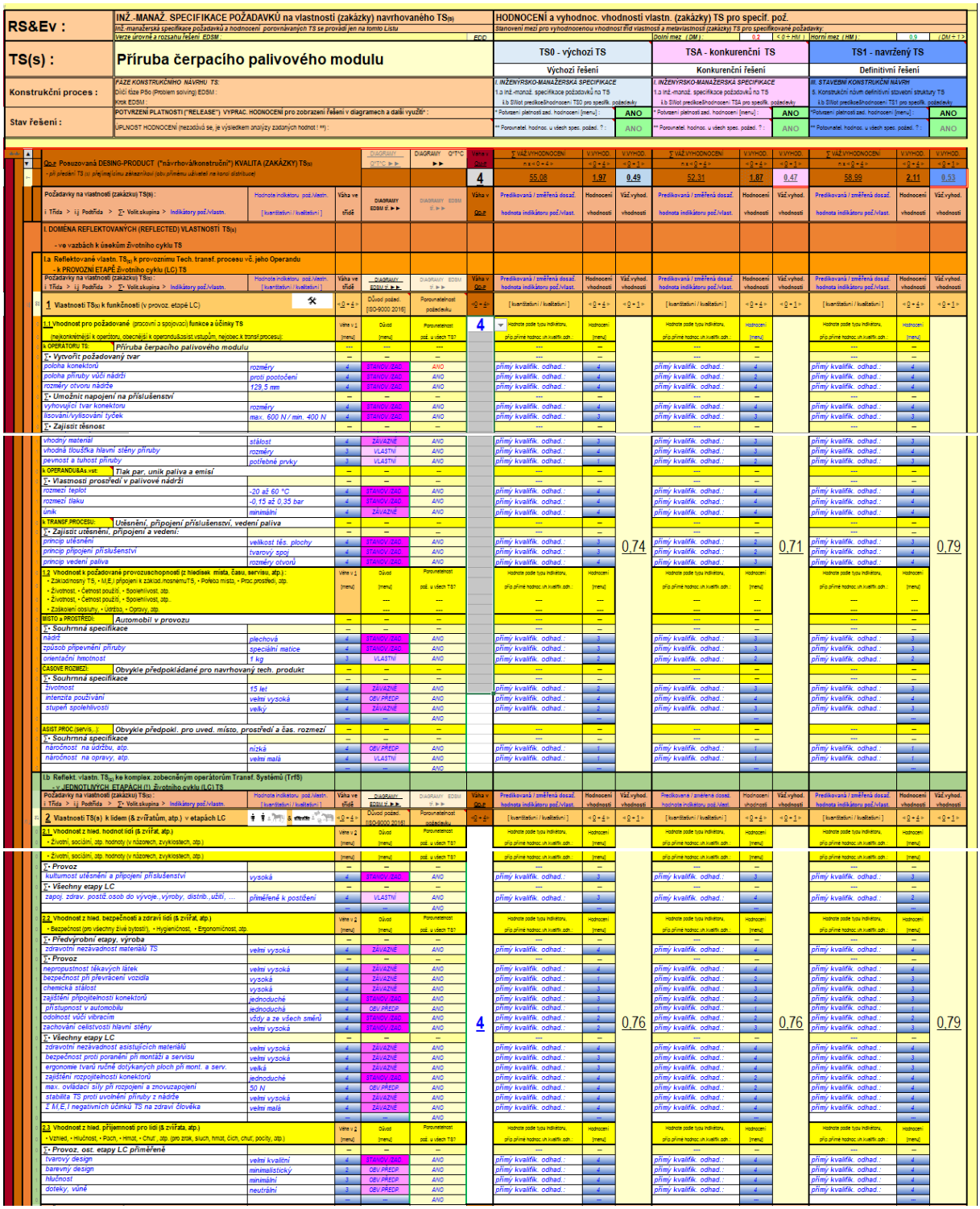
[29] Třecí vlastnosti polymerů. *Publi knihovna* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/12.html

[30] SHCHANKIN, Yan. *Analýza mechanických vlastností nalisovaného spoje při zatížení spoje osovými silami*. Bakalářská práce. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. 2017.

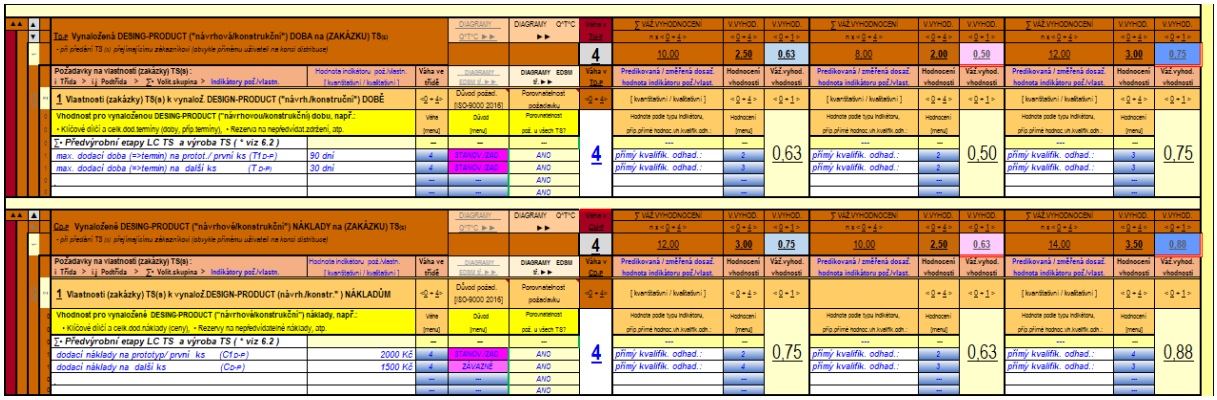
[31] Základní principy konstrukce plastových dílů. *Publi knihovna* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://publi.cz/books/179/10.html

[32] SOLID187. *Department of Applied Mechanics* [online]. 2022 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html

Příloha A Inženýrsko-manažerská specifikace požadavků na TS



Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s) : i Třída > i.j Podtřída > ∑• Volit.skupina > Indikátory pož./vlastn.	Hodnota indikátoru pož./vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	Váha v Op-P	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti
3 Vlastnosti TS(s) k ost. hmot.prac.prostř. v etapách LC		<0÷4>	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>
3.1 Vhodnost z hled. dostupných hmotných pracovních prostředků • Kompatibilita s dostup. a spolupracujícími hmot.prac.prostředky (tj. "technologičnost"), atp.		Váha v 3 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Předvýrobní etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
náročnost na dostupné TS & Tg	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Výroba*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
náročnost na vyrobení a montáž	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
náročnost na kontrolu kvality výroby a testování	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
druh výroby	*sériová*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Distribuce*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
skladovací prostor	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
manipulace při dopravě a instalaci	*jednoduché TS*	4	STANOV./ZAD.	ANO	2	*přímý kvalifik. odhad.:*	3	0,59	*přímý kvalifik. odhad.:*	2	0,57	*přímý kvalifik. odhad.:*	3	0,61
dopravní prostředky	*bez omezení*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Likvidace*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
demontovatelnost	*jednoduchá*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
separovatelnost materiálů	*jednoduchá*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1	
recyklovatelnost materiálů	*vysoká*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1	
		---	---	ANO			---			---			---	
3.2 Vhodnost z hled. potřeb nových hmotných pracovních prostředků • Optimální náročnost na nové hmot. proc. prostředky (dostupnost, nenákladnost, atp.), atp.		Váha v 3 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Dosažená hodnota (příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.)	Hodn.vhodn. [menu]		Dosažená hodnota (příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.)	Hodn.vhodn. [menu]		Dosažená hodnota (příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.)	Hodn.vhodn. [menu]	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
náročnost na nové TS & Tg (vč.kooperací)	*žádná*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
		---	---	ANO			---			---			---	
Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s) : i Třída > i.j Podtřída > ∑• Volit.skupina > Indikátory pož./vlastn.	Hodnota indikátoru pož./vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	Váha v Op-P	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti
4 Vlastnosti TS(s) k pracovním&přírodním&vesmírným prostředím v et. LC		<0÷4>	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>
4.1 Vhodnost z hled. působících pracovních& přírodních&vesmírných prostředí • Odolnost k materiálovým&energetickým účinkům prostředí, atp.		Váha v 4 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
odolnost proti vlivům pracovního prostředí	*vysoká*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
odolnost proti korozi	*vysoká*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
		---	---	ANO			---			---			---	
4.2 Vhodnost z hled. působení na pracovní& přírodní&vesmírná prostředí • Ekologičnost mater.&energetických vstupů, • Ekologičnost mater.&energet. výstupů, atp..		Váha v 4 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?	3	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	0,54	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	0,50	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	0,57
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
ekologičnost použitých materiálů a procesů	*výhradně*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1	
ekologičnost použitých asistujících materiálů a procesů	*velmi vysoká*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	1	
potřeba materiálů a energií	*minimální*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
ekologičnost výstupních materiálů a energií	*výhradně*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
množství odpadových materiálů a energií	*minimální*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
		---	---	ANO			---			---			---	
Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s) : i Třída > i.j Podtřída > ∑• Volit.skupina > Indikátory pož./vlastn.	Hodnota indikátoru pož./vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	Váha v Op-P	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / skutečná dosažená hodnota	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / skutečná dosažená hodnota	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti
5 Vlastn. TS(s) k „know-how" inf. ("odb. technologičnost") v et.LC		<0÷4>	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>
5.1 Vhodnost z hled. ustálených "know-how" odborných informací • Kompatibilita s dostupnými "know-how" informacemi, znalostmi, zkušenostmi, atp.		Váha v 5 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
legislativa, závazné předpisy, vč. bezp. norem	*dodržení bez výjimek*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
		---	---	ANO			---			---			---	
5.2 Vhodnost z hled. proměnlivých "know-how" odborných informací • Optim. náročnost na vyvolané "know-how" informace, znalosti, zkušenosti, atp.		Váha v 5 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Výroba*		—	—	—		---	—		---	—		—	—	
výrobní a montážní dokumentace	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO	2	*přímý kvalifik. odhad.:*	3	0,71	*přímý kvalifik. odhad.:*	2	0,67	*přímý kvalifik. odhad.:*	3	0,75
∑• *Provoz*		—	—	—		---	—		---	—		—	—	
návody k obsluze, údržbě a opravám	*standardní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
potřeba (za)školení ...	*vyloučeno*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		—	—		---	—	
dokumentace ...	*žádná*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
potřeba (za)školení ...	*nejvýše servisní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
		---	---	ANO			---			---			---	
Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s) : i Třída > i.j Podtřída > ∑• Volit.skupina > Indikátory pož./vlastn.	Hodnota indikátoru pož./vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	Váha v Op-P	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti
6 Vlastn. TS(s) k „know-SMQ" inf. ("manaž.technologičn.") v et.LC		<0÷4>	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>
6.1 Vhodnost z hled. ustálených "know-SMQ" manažerských informací • Kompatibilita s dostupnými "know-SMQ" inf., znalostmi, zkuš., atp. zejm. produktovými, tržními, atp.		Váha v 6 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
legislativa, závazné předpisy	*dodržení bez výjimek*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
patentová a licenční práva	*dodržení bez výjimek*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
ČSN EN 60601 Bezpečnost produktů	*dodržení bez výjimek*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
		---	---	ANO			---			---			---	
6.2 Vhodnost z hled. proměnlivých "know-SMQ" manažerských informací • Optim.náróč na vyvol. "know-SMQ" inf., znal., zkuš., atp., zejm. produktové (Q), termín (T), a nákl.(C)		Váha v 6 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.:	Hodnocení [menu]	
∑• *Všechny etapy LC*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
celkový počet TS	*500 000 ks*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
∑• *Předvýrobní etapy*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
doba (=> termín) na předvýr. etapy prototypu/prvého TS	*1,5 roku*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
celk.náklady na předvýr. etapy prototypu / prvého TS	*10 000 000 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
celk. rozpočt. náklady na předvýr. etapy dalšího TS	*1 500 000 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Výroba*		—	—	—	3	---	—	0,72	---	—	0,63	---	—	0,79
doba (=> termín) na výrobu prototypu / prvého TS	*5 dní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
celk.náklady na výrobu prototypu / prvého TS	*500 000 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
celk. rozpočtené nákl. na výrobu 1 ks TS	*24 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Distribuce*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
doba (=> termín) na dodání prototypu/prvého TS	*20 dní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
doba (=> termín) na dodání dalšího 1 ks TS	*10 dní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
prodejní cena (konkurenční produkt cca ... Kč)	*cca 26 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2	
∑• *Provoz*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
náklady na provoz TS	*velmi malé*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
náklady na údržbu a opravy TS	*velmi malé*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
∑• *Likvidace*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
- doba na likvidaci 1 TS	*1 den*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
- náklady na likvidaci 1 ks TS	*4 Kč*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
		---	---	ANO			---			---			---	
II. DOMÉNA VKONSTRUOVANÝCH (EMBEDDED) VLASTNOSTÍ TS(s) - ke všem částem životního cyklu TS														
Požadavky na vlastnosti (zakázku) TS(s) : i Třída > i.j Podtřída > ∑• Volit.skupina > Indikátory pož./vlastn.	Hodnota indikátoru pož./vlastn. [kvantitativní / kvalitativní]	Váha ve třídě	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	DIAGRAMY EDSM tř. ►►	Váha v Op-P	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti	Predikovaná / změřená dosaž. hodnota indikátoru pož./vlast.	Hodnocení vhodnosti	Váž.vyhod. vhodnosti
7 Vlastnosti TS(s) k jeho struktuře		<0÷4>	Důvod požad. [ISO-9000 2016]	Porovnatelnost požadavku	<0÷4>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>	[kvantitativní / kvalitativní]	<0÷4>	<0÷1>
7.1 Vhodnost z hled. požadovaných reaktivních („obecných") vlastností TS: Mechanické I.: Makro/mikropovrchové, Makro/mikroobjemové, atp. Mechanické II. Pevnostní, Deformační, Dynamické, Tribologické, atp. Tepelné, Chemické, Akustické, Optické, Elektrické, Nukleární, Chemicko-mechanické, Technologické, "Botanické", "Biologické", "Zoologické", atp.		Váha v 7 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — —	Hodnocení [menu] — — —		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — —	Hodnocení [menu] — — —		Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — —	Hodnocení [menu] — — —	
∑• *Souhrnná specifikace*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
pevnost při creepu	*bezp. k mezi kluzu : sk=3*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
pevnost při vibracích	*max. 23 MPa*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
teplotní stálost	*-20 až 60 °C*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
tlaková stálost	*-0,16 až 0,36 bar*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	4	
7.2 Vhodnost z hled. požadovaných architekturních vlastností • Stavební struktura: •Prvky (•tvary, •rozměry, •materiály, •způs.výroby, •stavy povrchu, •odchylky od jm.stavů), •Uspořádání (ve všech předpokl. konstr. stavech !) • Orgánová struktura: •Prvky, •Uspořádání • Funkční struktura: •Prvky, •Uspořádání • Prázdná struktura (černá skříňka): •Znakové vlastnosti TS		Váha v 7 [menu]	Důvod [menu]	Porovnatelnost pož. u všech TS?	2	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — — —	Hodnocení [menu] — — — —	0,69	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — — —	Hodnocení [menu] — — — —	0,67	Hodnota podle typu indikátoru, příp.přímé hodnoc.vh.kvalif.odh.: — — — —	Hodnocení [menu] — — — —	0,81
∑• *Souhrnná specifikace*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
konstrukční provedení spojovacích částí	*podle norem*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	1		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
povrchová úprava funkčních ploch	*velmi kvalitní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
povrchová úprava nefunkčních ploch	*kvalitní*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
		---	---	ANO			---			---			---	
7.3 Vhodnost z hled.požadovaných znakových vlastností („charakteristik"): Pracovní (funkční) znaky TS • Pracovní princip, • Pracovní způsob, , atp.. Technologické (transformační) znaky TS • Tg princip & způsob, • Princip & způsob provozního technického transform.procesu, atp. Obecné konstrukční (mech., tepelné, chemické, atp.) znaky TS • Povrch, • Objem, • Hmotnost, • Poloha těžiště, atp.		Váha v 7 [menu]	Důvod	Porovnatelnost pož. u všech TS?		Hodnota podle typu indikátoru, — — — — — —	Hodnocení — — — — — —		Hodnota podle typu indikátoru, — — — — — —	Hodnocení — — — — — —		Hodnota podle typu indikátoru, — — — — — —	Hodnocení — — — — — —	
∑• *Souhrnná specifikace*		—	—	—		---	—		---	—		---	—	
funkční princip - příruba	*mechanický*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	2		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
energie pro ovládání a pohon/přestavování - modul	*elektřina*	4	STANOV./ZAD.	ANO		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3		*přímý kvalifik. odhad.:*	3	
		---	---	ANO			---			---			---	



Obr. A.1 Inženýrsko-manažerská specifikace na TS

Příloha B Vyhodnocovací tabulka jednotlivých materiálů

AltEv :	SPECIFIKACE kritérií/požadavků na alternativy TS(s), HODNOCENÍ a vyhodnocení jejich vhodnosti						
TS(s) :	Materiály příruby čerpacího palivového modulu	Meze vyhodnocení vhodnosti pro řešenou úlohu :	Stanovení:	Dolní mez	0,2	Horní mez	0,9	< 0 ÷ 1 >
FÁZE NÁVRHU TS:	II. Obvykle KONCEPČNÍ KONSTRUKČNÍ NÁVRH tj. návrh Orgánové struktury TS (jinak omezení jen vhodností pro menší počet kritérií)						
Kroky řešení :	SPECIFIKACE POŽAD./KRITÉRIÍ pro hodnoc. potenc. konkurencesch.	SWOT HODNOCENÍ VHODNOSTI alternativ pro SPECIF. POŽAD./KRITÉRIA					

DIAGR. Q*T*C ►► / ◄◄ Komentář	Kritérium / požadavek - porovnatelná konkurenční vlastnost	Váha <0 ÷ 4>	Hodnocení vhodnosti <0 ÷ 4> alternativ TS					
			TS0*	a	b	c	d	TSi
Posuzovaná KVALITA Q	Odolnost vůči chemikáliím	4		3	4	4		4
	Odolnost vůči creepu	4		3	3	2		4
	Pevnost, tuhost a houževnatost	4		3	2	4		4
	Nasákavost	4		4	2	4		4
	Zpracovatelnost	4		3	2	2		4
	∑ Norm. váž. vyhodnocení vhodnosti Q <0 ÷ 1>		0,00	0,80	0,65	0,80	0,00	1,00
Vynaložená DOBA T	Celk. vynalož. doba (shodná -nehodnoceno)	4		0	0	0		4
	∑ Norm. váž. vyhodnocení vhodnosti T <0 ÷ 1>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Vynaložené NÁKLADY C	Celkové vynaložené náklady	4		3	2	1		4
	∑ Norm. váž. vyhodnocení vhodnosti C <0 ÷ 1>		0,00	0,75	0,50	0,25	0,00	1,00

Obr. B.1 Vyhodnocení specifikace požadavků jednotlivých alternativ

Příloha C Materiálový list Hostaform® C 13021

CAMPUS® Datasheet

HOSTAFORM® C 13021 - POM
Celanese

Celanese
The chemistry inside innovation™

Product Texts
Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM Molding compound ISO 29988- POM-K, M-GNR, 04-002 POM copolymer Easy flowing Injection molding type for precision molded parts and thin-walled molded parts with high rigidity, hardness and toughness; good chemical resistance to solvents, fuel and strong alkalis as well as good hydrolysis resistance; high resistance to thermal and oxidative degradation. Monomers and additives are listed in EU-Regulation (EU) 10/2011 FDA compliant according to 21 CFR 177.2470 UL-registration for all colours and a thickness more than 1.5 mm as UL 94 HB, temperature index UL 746 B electrical 110 °C, mechanical 90 °C. Burning rate ISO 3795 and FMVSS 302 < 75 mm/min for a thickness more than 1 mm. Ranges of applications: automotive engineering, precision engineering, electric and electronical industry, domestic appliances. FDA = Food and Drug Administration (USA) UL = Underwriters Laboratories (USA) FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard (USA)

Flammability @1.6mm nom. thickn.	HB	-
Flammability at thickness h (3 mm)	HB	UL recognition (h)

Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
Melt volume-flow rate, MVR	**12**	cm³/10min	ISO 1133
Temperature	**190**	°C	ISO 1133
Load	**2.16**	kg	ISO 1133
Molding shrinkage, parallel	**2.0**	%	ISO 294-4, 2577
Molding shrinkage, normal	**1.8**	%	ISO 294-4, 2577

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus	**2900**	MPa	ISO 527-1/-2
Yield stress	**65**	MPa	ISO 527-1/-2
Yield strain	**9**	%	ISO 527-1/-2
Nominal strain at break	**28**	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength, +23°C	**200**	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	**200**	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, +23°C	**6.5**	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30°C	**6**	kJ/m²	ISO 179/1eA

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10°C/min	**166**	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load, 1.80 MPa	**106**	°C	ISO 75-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	**110**	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Burning behavior at 1.5 mm nominal thickness	**HB**	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested (1.5)	**1.5**	mm	IEC 60695-11-10
Burning behavior at thickness h	**HB**	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested (h)	**3.0**	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card available	**Yes**	-	-

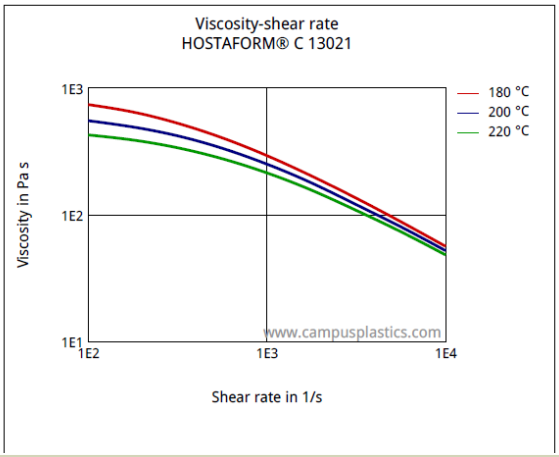
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity, 100Hz	**4**	-	IEC 62631-2-1
Relative permittivity, 1MHz	**4**	-	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 100Hz	**20**	E-4	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 1MHz	**50**	E-4	IEC 62631-2-1
Volume resistivity	**1E12**	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Surface resistivity	**1E14**	Ohm	IEC 62631-3-2
Electric strength	**35**	kV/mm	IEC 60243-1

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Water absorption	**0.65**	%	Sim. to ISO 62
Humidity absorption	**0.2**	%	Sim. to ISO 62
Density	**1410**	kg/m³	ISO 1183

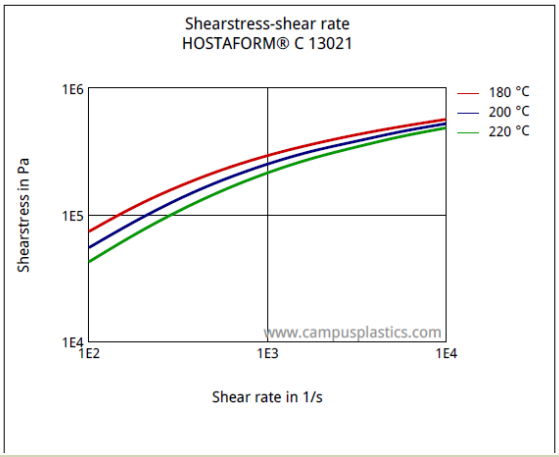
Rheological calculation properties	Value	Unit	Test Standard
Density of melt	**1200**	kg/m³	-
Thermal conductivity of melt	**0.155**	W/(m K)	-
Spec. heat capacity melt	**2210**	J/(kg K)	-
Ejection temperature	**140**	°C	-

Diagrams

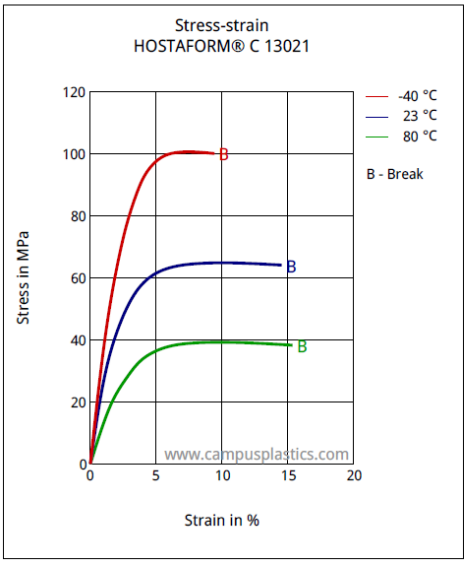
Viscosity-shear rate



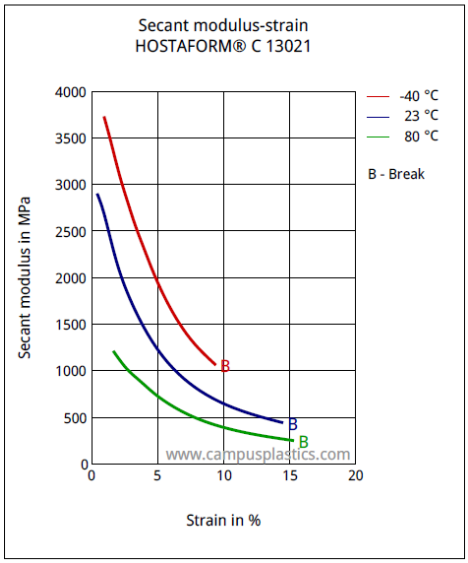
Shearstress-shear rate



Stress-strain



Secant modulus-strain



Characteristics

Processing
Injection Molding

Additives
Release agent

Delivery form
Pellets

Other text information

Injection molding
General drying is not necessary due to low moisture absorption of the resin.

In case of bad storage conditions (water contact or condensed water) the use of a recirculating air dryer (100 to 120 °C / max. 40 mm layer / 3 to 6 hours) is recommended.

Max. Water content 0,2 %
Standard injection moulding machines with three phase (15 to 25 D) plasticating screws will fit.

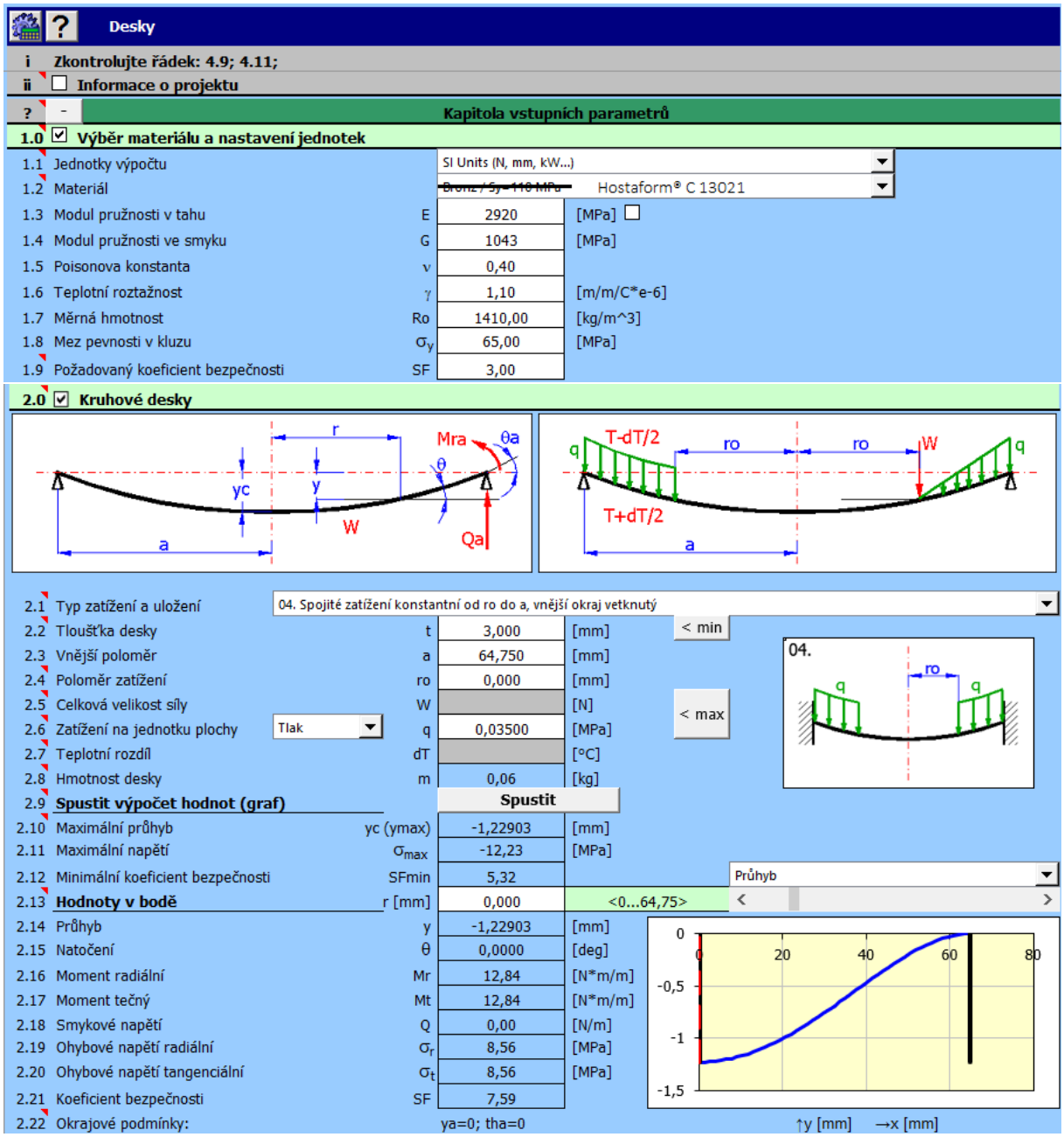
Conditioning e.g. moisturizing is not necessary.

NOTICE TO USERS: Values shown are based on testing of laboratory test specimens and represent data that fall within the standard range of properties for natural material. These values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes. Colorants or other additives may cause significant variations in data values. Properties of molded parts can be influenced by a wide variety of factors including, but not limited to, material selection, additives, part design, processing conditions and environmental exposure. Other than those products expressly identified as medical grade (including by MT® product designation or otherwise), Celanese's products are not intended for use in medical or dental implants. Regardless of any such product designation, any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the users and the manner of such use is the sole responsibility of the users, who must assure themselves that the material as subsequently processed meets the needs of their particular product or use. To the best of our knowledge, the information contained in this publication is accurate; however, we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information. The information contained in this publication should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of the materials mentioned in this publication. Moreover, there is a need to reduce human exposure to many materials to the lowest practical limits in view of possible adverse effects. To the extent that any hazards may have been mentioned in this publication, we neither suggest nor guarantee that such hazards are the only ones that exist. We recommend that persons intending to rely on any recommendation or to use any equipment, processing technique or material mentioned in this publication should satisfy themselves that they can meet all applicable safety and health standards. We strongly recommend that users seek and adhere to the manufacturer's current instructions for handling each material they use, and entrust the handling of such material to adequately trained personnel only. Please call the telephone numbers listed for additional technical information. Call Customer Services for the appropriate Materials Safety Data Sheets (MSDS) before attempting to process our products.

© 2023 Celanese or its affiliates. All rights reserved. Celanese®, registered C-ball design and all other trademarks identified herein with ®, TM, SM, unless otherwise noted, are trademarks of Celanese or its affiliates. Fortron is a registered trademark of Fortron Industries LLC. KEPITAL is a registered trademark of Korea Engineering Plastics Company, Ltd.

Obr. C.1 Materiálový list Hostaform® C 13021 [22]

Příloha D Výpočet tloušťky hlavní stěny pomocí MITCalc



Obr. D.1 Výpočet tloušťky hlavní stěny pomocí MITCalc [6]