

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2024

Ing. Martin ŠTĚPÁNEK

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P0715D270024 Teorie a stavba strojů

DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkum navrhování komponent vozidel s využitím nových
materiálů a technologií

Autor:

Ing. Martin ŠTĚPÁNEK

Školitel:

doc. Ing. Miloslav KEPKA, CSc.

Akademický rok 2023/2024

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám k hodnocení a obhajobě disertační práci zpracovanou na Katedře konstruování strojů Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci na téma:

Výzkum navrhování komponent vozidel s využitím nových materiálů a technologií

vypracoval samostatně, pod vedením a odborným dohledem školitele s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v soupisu bibliografických citací, který je součástí těchto tezí disertační práce.

V Plzni dne: 28. 2. 2024

.....
Ing. Martin Štěpánek

Vyjádření k SZŘ ZČU čl. 98, odst. 3:

Předložená disertační práce vznikla v rámci dílčích úkolů projektů: FW01010462 Výpočtová a experimentální podpora 3D tisku kovových komponent technologií DMLS a vystavených v provozu víceosému únavovému zatěžování; SGS-2022-009 Komplexní podpora konstruování technických zařízení V., FW01010362 Aplikace aditivní technologie kovového tisku ve stavbě kolejových vozidel ZČU v Plzni. Student je stoprocentním autorem těchto dílčích úkolů.

Upozornění

Podle zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR), § 17, a zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., je využití a společenské uplatnění výsledků této práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně technických poznatků, nebo jakékoli nakládání s nimi možné pouze na základě smlouvy se souhlasem autora, autorů citovaných prací a Západočeské univerzity v Plzni.

PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl vyjádřit své hluboké poděkování doc. Ing. Miloslavu Kepkovi, CSc., mému školiteli, za jeho odborné vedení, trpělivost a neocenitelné rady, které mi byly poskytnuty během zpracování mé disertační práce. Jeho vedení bylo pro mě nejen odborným průvodcem, ale také zdrojem inspirace a motivace v průběhu celého výzkumného procesu. Upřímné poděkování patří také mému kolegovi Ing. Františku Sedláčkovi, PhD., který mi poskytl potřebnou podporu a rady při zpracování výpočtové části mé práce.

Dále bych rád vyjádřil své upřímné poděkování Regionálnímu technologickému institutu. Bez jeho existence by má disertační práce nemohla dosáhnout své současné podoby. Tato platforma byla klíčová nejen pro mé výzkumné aktivity, ale také pro rozvoj mé akademické a profesní kariéry.

Nesmím opomenout poděkovat také kolegům ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě. Moje odborná stáž na tamější Strojní fakultě a účast na společném projektu mi umožnily získat cenné znalosti a zkušenosti, které byly pro můj výzkum nezbytné. Spolupráce byla nejen obohacující, ale také velmi přátelská.

Rád bych využil tuto možnost k poděkování své rodině, především manželce Marii, která mě plně podporovala, abych mohl tuto práci úspěšně dokončit.

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

Rok odevzdání: 2024

| | | |
|-----------------------------|---|--------------------------|
| Autor | <i>Příjmení (včetně titulů)</i> Ing. Štěpánek | <i>Jméno</i> Martin |
| Studijní program | P0715D270024 Teorie a stavba strojů | |
| Vedoucí práce | <i>Příjmení (včetně titulů)</i> doc. Ing. Kepka, CSc. | <i>Jméno</i> Miloslav |
| Pracoviště vedoucího | Katedra konstruování strojů | |
| Název práce | Výzkum navrhování komponent vozidel s využitím nových materiálů a technologií | |

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | | | |
|---------------|-----|--|---------------------|----|--|----------------|----|
| Celkem | 119 | | Textová část | 95 | | Přílohy | 24 |
|---------------|-----|--|---------------------|----|--|----------------|----|

| | |
|--|---|
| Stručný popis zaměření, téma, cíl, poznatky a přínosy | <p>Výzkum byl zaměřen na aditivní výrobu kovových součástí, které jsou namáhány cyklickým zatěžováním a jejichž porucha může být způsobena tzv. multiaxiální únavou.</p> <p>Výsledkem realizovaného výzkumu je vhodná kombinace možností topologické optimalizace s potenciálem kovového tisku.</p> <p>Kombinace numerických výpočtů a vhodně navržených experimentů je praktickým přínosem k zhodnocení spolehlivosti několika existujících metod pro výpočet životnosti při multiaxiální vysokocyklové únavě.</p> |
| Klíčová slova | kovová aditivní výroba; topologická optimalizace; víceosé zatěžování; multiaxiální vysokocyklová únava; predikce únavové životnosti |

SUMMARY OF DISSERTATION WORK

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

Submitted: 2024

| | | |
|--------------------------|---|-------------------------|
| Author | <i>Surname (including of Degrees)</i> Ing. Štěpánek | <i>Name</i> Martin |
| Study Programmes | P0715D270025 Theory and Construction of Machines | |
| Supervisor | <i>Surname (including of Degrees)</i> doc. Ing. Kepka, CSc. | <i>Name</i> Miloslav |
| Department | Department of machine design | |
| Title of the Work | Research into the design of vehicle components using new materials and technologies | |

Number of pages

| | | | | | |
|--------------|-----|---------------------|----|-------------------|----|
| Total | 119 | Part of Text | 95 | Attachment | 24 |
|--------------|-----|---------------------|----|-------------------|----|

| | |
|--|--|
| Brief Description of the Theme, Findings and Benefits | <p>The research is focused on the additive manufacturing of metal components stressed by cyclic loading, the failure of which can be caused by so-called multiaxial fatigue.</p> <p>The result of the conducted research is a suitable combination of topological optimization possibilities with the potential of metal printing.</p> <p>The combination of numerical calculations and appropriately designed experiments is of practical benefit to evaluating the reliability of several existing methods for calculating life under multiaxial high-cycle fatigue.</p> |
| Key Words | metal additive manufacturing; topological optimization; multiaxial loading; multiaxial high cycle fatigue; fatigue life prediction. |

1 Obsah

| | |
|--|--------|
| Seznam obrázků..... | - 3 - |
| Seznam tabulek..... | - 6 - |
| Nomenklatura..... | - 7 - |
| Glosář..... | - 9 - |
| Úvod..... | - 10 - |
| 1 Cíle disertační práce..... | - 12 - |
| 2 Současný stav v oblasti normalizace aditivních technologií | - 13 - |
| 2.1 Normalizace v oboru aditivních technologií | - 13 - |
| Význam norem aditivní výroby je přitom nesporný v těchto oblastech: | - 14 - |
| 2.1.1 Organizace zabývající se tvorbou standardů | - 15 - |
| 2.1.2 Standardization Roadmap for Additive Manufacturing | - 15 - |
| 2.1.3 Shrnutí | - 19 - |
| 3 Přednosti aditivních technologií, vymezení hlavních faktorů ovlivňujících životnost AM vyráběných součástí..... | - 20 - |
| 3.1 Posouzení multiaxiální únavy | - 23 - |
| 3.2 Validace metod pro posouzení únavové životnosti..... | - 25 - |
| 3.2.1 Základní vztahy pro jednoosou únavu..... | - 25 - |
| 3.2.2 Hypotézy únavového poškození..... | - 25 - |
| 3.2.3 Experimentální validace metod pro posouzení únavové životnosti aditivně vyrobených součástí - 27 - | - 27 - |
| 4 Případové studie | - 33 - |
| 4.1 Soustava těhlice a náboje vozu formule student | - 34 - |
| 4.1.1 Definice optimalizované geometrie | - 34 - |
| 4.1.2 Příprava výpočtového modelu těhlice a náboje..... | - 37 - |
| 4.1.3 Strukturální analýza soustavy komponent těhlice a náboje formule SAE..... | - 41 - |
| 4.1.4 Strukturální analýza současného provedení těhlice..... | - 43 - |
| 4.1.5 Topologická optimalizace ANSYS..... | - 47 - |
| 4.1.6 Úprava návrhu po topologické optimalizaci..... | - 54 - |
| 4.1.7 Nezávislá verifikační analýza | - 57 - |
| 4.1.8 Predikce životnosti těhlice a náboje vystavené víceosému namáhání | - 67 - |
| 4.2 Topologická optimalizace konzoly podjezdové zábrany..... | - 68 - |
| 4.2.1 Definice optimalizované geometrie | - 69 - |
| 4.2.2 Příprava výpočtového modelu konzoly podjezdové zábrany..... | - 71 - |
| 4.2.3 Strukturální analýza konzoly podjezdové zábrany | - 73 - |
| 4.2.4 Strukturální analýza současného provedení konzoly podjezdové zábrany..... | - 74 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 4.2.5 | Topologická optimalizace konzoly podjezdové zábrany | - 78 - |
| 4.2.6 | Úprava návrhu po topologické optimalizaci..... | - 80 - |
| 4.2.7 | Nezávislá verifikační analýza | - 80 - |
| 4.2.8 | Predikce životnosti konzoly podjezdové zábrany vystavené víceosému namáhání . | - 85 - |
| 5 | Závěr | - 87 - |
| 5.1.1 | Seznam prací doktoranda publikovaných (přijatých k publikaci) vztahujících se k tématu disertace. | - 89 - |
| 6 | Citovaná literatura | - 92 - |

Seznam obrázků

| | |
|--|--------|
| Obrázek 1 Pohled do řezu aditivně vyrobeného raketového motoru [2] | - 10 - |
| Obrázek 2 Rozložení trhu pro technologie metal powder bed fusion [4] | - 13 - |
| Obrázek 3 MiCloud.AMTM: Integrovaný vícestupňový ICME přístup pro kvalifikaci kovového AM používající Microstructure informatics [2] | - 14 - |
| Obrázek 4 Struktura norem pro aditivní technologie uznaná ASTM F42 a TC261 [5] | - 16 - |
| Obrázek 5 Rozptyl výsledků únavy z rozsáhlých studií AM Ti-6Al-4 [12] | - 21 - |
| Obrázek 6 Mění se lokální vlastnosti tištěných dílů vedou k lokálním únavovým vlastnostem [12] | - 21 - |
| Obrázek 7 Proces AM způsobuje proměnné lokální vlastnosti dílu, jakými je proměnná drsnost povrchu [16]..... | - 22 - |
| Obrázek 8 Rozdělení kmitavých procesů s ohledem na potřeby únavové životnosti [19]..... | - 24 - |
| Obrázek 9 Dělení víceosého namáhání z pohledu fázového posunutí [20] | - 24 - |
| Obrázek 10 Posuzované geometrie zkušebních těles | - 28 - |
| Obrázek 11 Zařízení EOS M290 a schematické znázornění směru tisku zkušebních vzorků pro únavové zkoušky | - 28 - |
| Obrázek 12 Axiálně-torzní elektrohydraulický zkušební stroj MTS Bionix 370.02. | - 29 - |
| Obrázek 13 Zatěžovací cesta: | - 29 - |
| Obrázek 14 Zatěžovací cesta: | - 30 - |
| Obrázek 15 Ukázka grafů srovnávajících predikovanou a experimentálně naměřenou únavovou životnost..... | - 30 - |
| Obrázek 16 Diagram procesu návrhu komponenty s využitím nástrojů topologické optimalizace.. | - 33 - |
| Obrázek 17 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | - 34 - |
| Obrázek 18 Sestava nápravy studentské formule..... | - 35 - |
| Obrázek 19 Obálky optimalizačního prostoru a stávajícího řešení těhlice | - 35 - |
| Obrázek 20 Náhrada 3D modelu komponent nápravy 1D modelem pro kinematickou analýzu | - 36 - |
| Obrázek 21 Obálky poloh komponent nápravy při pohybu mezi krajními polohami | - 37 - |
| Obrázek 22 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | - 37 - |
| Obrázek 23 Vstupní geometrie..... | - 38 - |
| Obrázek 24 Izolované oblasti z geometrie těhlice | - 38 - |
| Obrázek 25 Izolované oblasti z geometrie | - 39 - |
| Obrázek 26 Popis náhrady ramen nápravy ve výpočetním modelu | - 40 - |
| Obrázek 27 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | - 41 - |
| Obrázek 28 G-G diagram z telemetrie vozu | - 42 - |
| Obrázek 29 Smluvní a skuteční tahový diagram materiálu EN AW-7075 T6..... | - 44 - |
| Obrázek 30 FEM model současného řešení sestavy těhlice..... | - 45 - |

| | |
|---|------|
| Obrázek 31 Velikosti posunutí současného řešení pro nejkritičtější případy zatížení (kombinované brzdění a zatáčení) [mm] | 45 - |
| Obrázek 32 Napětí (Von-Mises) v současném řešení pro nejkritičtější případy zatížení (kombinace brzdění a zatáčení) [MPa] | 46 - |
| Obrázek 33 Rozložení redukované napětí pro stávající řešení náboje..... | 46 - |
| Obrázek 34 Deformace stávající řešení náboje při kritickém zatížení | 47 - |
| Obrázek 35 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | 47 - |
| Obrázek 36 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. poddajnosti | 50 - |
| Obrázek 37 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. napětí | 51 - |
| Obrázek 38 Optimalizovaná geometrie Level-set based optimalizace s cílem min. poddajnosti | 52 - |
| Obrázek 39 Pseudo-řešení TO Level-set based s cílem minimalizovat napětí | 53 - |
| Obrázek 40 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | 54 - |
| Obrázek 41 Problematické napojení optimalizované a neoptimalizované oblasti geometrie | 56 - |
| Obrázek 42 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | 57 - |
| Obrázek 43 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh těhlice DBP | 58 - |
| Obrázek 44 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh náboje DBP..... | 59 - |
| Obrázek 45 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh těhlice DBN..... | 59 - |
| Obrázek 46 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh náboje DBN | 60 - |
| Obrázek 47 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh těhlice LSBP | 60 - |
| Obrázek 48 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh náboje LSBP..... | 61 - |
| Obrázek 49 Deformace těhlice návrh DBP | 62 - |
| Obrázek 50 Deformace náboje návrh DBP..... | 62 - |
| Obrázek 51 Deformace těhlice návrh DBN..... | 63 - |
| Obrázek 52 Deformace náboje návrh DBN | 63 - |
| Obrázek 53 Deformace těhlice návrh LSBP | 64 - |
| Obrázek 54 Deformace náboje návrh LSBP | 64 - |
| Obrázek 55 Grafické srovnání změny hmotnosti optimalizovaných návrhů..... | 66 - |
| Obrázek 56 Grafické srovnání změny maximálního napětí optimalizovaných návrhů | 66 - |
| Obrázek 57 Grafické srovnání změny deformace optimalizovaných návrhů..... | 66 - |
| Obrázek 58 Predikovaná životnost navržených komponent – hodnoty RL..... | 68 - |
| Obrázek 59 Umístění podjezdové zábrany na vozidle | 69 - |
| Obrázek 60 Původní konzola podjezdové zábrany..... | 70 - |
| Obrázek 61 Optimalizační prostor konzoly podjezdové zábrany | 70 - |
| Obrázek 62 Vstupní geometrie..... | 71 - |
| Obrázek 63 umístění 1-D prvků pro definici zátěžných stavů | 72 - |

| | |
|--|--------|
| Obrázek 64 Materiálové složení oceli EOS 316L | - 72 - |
| Obrázek 65 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | - 73 - |
| Obrázek 66 Definice okrajových podmínek..... | - 74 - |
| Obrázek 67 FEM model současného řešení konzoly | - 75 - |
| Obrázek 68 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu | - 78 - |
| Obrázek 69 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. napětí | - 79 - |
| Obrázek 70 Upravená geometrie optimalizované konzoly podjezdové zábrany..... | - 80 - |
| Obrázek 71 Grafické srovnání změny maximálních napětí | - 85 - |
| Obrázek 72 Grafické srovnání změny deformací optimalizovaného návrhu | - 85 - |
| Obrázek 73 Parametrická predikce životnosti pro zatížení -z | - 86 - |
| Obrázek 74 Parametrická predikce životnosti pro zatížení +z | - 86 - |
| Obrázek 75 Optimalizovaná část nápravy automobilu vyrobená přímo z výsledku TO [40] | ix |
| Obrázek 76 Návrh části raketového motoru zjednodušující montáž a redukující hmotnost [8] | x |
| Obrázek 77 Řez odlehčeným aditivně vyrobeným pístem s chladicími kanály [41]..... | xi |
| Obrázek 78 Basquinova křivka životnosti pro čistý tah/tlak | xiv |
| Obrázek 79 Basquinova křivka životnosti pro čistý krut..... | xiv |
| Obrázek 80 Basquinova křivka životnosti pro střídavé zatížení tah/tlak (316L) | xvii |
| Obrázek 81 Basquinova křivka životnosti pro míjivé zatížení cyklickým tahem (316L) | xvii |
| Obrázek 82 Basquinova křivka životnosti pro čistý krut (316L) | xviii |

Seznam tabulek

| | |
|---|--------|
| Tabulka 1 Kvalitativní souhrn kritérií hodnocení únavové životnosti vzorků vyrobených pomocí AM..... | - 31 - |
| Tabulka 2 Srovnání efektivity využití zástavbového prostoru..... | - 35 - |
| Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg pro aditivně vyrobená zkušební tělesa | - 40 - |
| Tabulka 4 Hodnoty zatížení pro zkoumané zátěžné stavy | - 42 - |
| Tabulka 5 Definice okrajových podmínek výpočtového modelu | - 43 - |
| Tabulka 6 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW-7075 T6..... | - 43 - |
| Tabulka 7 Parametry nastavení topologické optimalizace (Desity-based, minimalizace poddajnosti)..... | - 49 - |
| Tabulka 8 Parametry nastavení topologické optimalizace (Desity-based, minimalizace napětí) | - 50 - |
| Tabulka 9 Parametry nastavení topologické optimalizace (Levet-set based, minimalizace poddajnosti)..... | - 52 - |
| Tabulka 10 Přehled použitého značení návrhových variant | - 58 - |
| Tabulka 11 Souhrn zkoumaných vlastností optimalizovaných návrhů těhlice a náboje..... | - 65 - |
| Tabulka 12 Matice hodnocení těhlice | - 67 - |
| Tabulka 13 Matice hodnocení náboje | - 67 - |
| Tabulka 14 Výsledky predikce životnosti..... | - 68 - |
| Tabulka 15 Mechanické vlastnosti materiálu 316L pro aditivně vyrobená zkušební tělesa | - 72 - |
| Tabulka 16 Hodnoty zatížení pro zkoumané zátěžné stavy | - 73 - |
| Tabulka 17 Mechanické vlastnosti materiálu G24Mn6+QT2 | - 74 - |
| Tabulka 18 Výsledky struk. analýzy současného provedení konzoly | - 78 - |
| Tabulka 19 Parametry nastavení topologické optimalizace (Desity-based, minimalizace napětí) ... | - 79 - |
| Tabulka 20 Výsledky nezávislé verifikační analýzy optimalizovaného návrhu konzoly | - 83 - |
| Tabulka 21 Souhrn zkoumaných vlastností optimalizované konzoly podjezdové zábrany..... | - 84 - |
| Tabulka 22 Výsledky predikce životnosti..... | - 85 - |
| Tabulka 23 Počet vydaných norem pro AM dle jednotlivých organizací | i |
| Tabulka 24 Chemické složení oceli EOS Maraging Steel MS1 | xii |
| Tabulka 25 Mechanické vlastnosti vzorků tištěných ve směru X | xii |
| Tabulka 26 Výsledky experimentálních zkoušek únavy | xiii |
| Tabulka 27 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro čistý tah/tlak | xiv |
| Tabulka 28 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro čistý krut..... | xv |
| Tabulka 29 Souhrnný přehled výsledků experimentálních zkoušek únavy (316L)..... | xvi |

Nomenklatura

| | |
|-------------|--|
| <i>1D</i> | jednorozměrný prvek |
| <i>3D</i> | trojrozměrný (prostorový) prvek |
| <i>AM</i> | aditivní technologie (additive manufacturing) |
| <i>ASME</i> | American Society of Mechanical Engineers |
| <i>ASTM</i> | American Society for Testing and Materials |
| <i>b</i> | exponent únavové pevnosti |
| <i>c</i> | exponent únavové tažnosti |
| <i>CAD</i> | computer aided design |
| <i>ČSN</i> | Česká technická norma |
| <i>DMLS</i> | direct metal laser sintering |
| <i>E</i> | Youngův modul pružnosti v tahu |
| F_x | síla ve směru osy x |
| F_y | síla ve směru osy y |
| F_z | síla ve směru osy z |
| <i>FEM</i> | finite element method |
| g_x | zrychlení ve směru osy x |
| g_y | zrychlení ve směru osy y |
| g_z | zrychlení ve směru osy z |
| g_{-z} | zrychlení v opačném směru osy z |
| <i>HIP</i> | hot isostatic pressing |
| <i>ISO</i> | International Organization for Standardization |
| k_{fin} | Findleho materiálový parametr |
| <i>LPBF</i> | Laser Powder Bed Fusion |
| M_y | točivý moment okolo osy y |
| <i>MPC</i> | multi-point constraints |
| N_f | počet cyklů do lomu |
| <i>PBF</i> | Powder Bed Fusion |
| <i>PDF</i> | Portable Document Format |
| <i>PRC</i> | Product Representation Compact |

| | |
|-------------------------|---|
| <i>PSDO</i> | Partner Standards Developing Organization |
| <i>R</i> | asymetrie cyklického zatížení |
| <i>R_e</i> | mez kluzu |
| <i>R_m</i> | mez pevnosti |
| <i>R_{p0.2}</i> | smluvní mez kluzu |
| <i>RTI</i> | Regionální technologický institut |
| <i>SAE</i> | Society of Automotive Engineers |
| <i>SOD</i> | Standards Development Organization |
| <i>STEP</i> | Standard for the Exchange of Product Data |
| <i>STU</i> | Slovenská technická univerzita |
| <i>TC</i> | Technical Committee |
| <i>t_{cmd}</i> | McDiarmidův parametr pro šíření trhliny podél volného povrchu |
| <i>TO</i> | topologická optimalizace |
| <i>VaV</i> | výzkum a vývoj |
| <i>VDI</i> | Verein Deutscher Ingenieure |
| ε | poměrná deformace |
| ε_{ae} | amplituda pružné deformace |
| ε'_f | součinitel únavové tažnosti |
| ν | Poissonovo číslo |
| ρ | měrná hmotnost |
| σ_a | amplituda napětí |
| σ_{c-1} | mez únavy pro střídavé tahové/tlakové zatížení |
| σ'_f | koeficient únavové pevnosti pro zatížení tah/tlak |
| $\sigma_{n,max}$ | maximální normálové napětí |
| σ_h | hydrostatický tlak |
| τ_{c-1} | mez únavy pro torzní zatížení |
| $\tau_{cr,a}$ | amplituda smykového napětí působící v kritické rovině |
| τ_{f^*} | modifikovaný koeficient pevnosti |
| τ'_f | koeficient únavové pevnosti pro torzní zatížení |
| <i>ML</i> | strojové učení (machine learning) |

Glosář

| | |
|---|--|
| Aditivní technologie | výrobní technologie využívající vrstvení materiálu k tvorbě trojrozměrných objektů |
| As-built | komponenta ve stavu tak jak byla vyrobena bez následného zpracování |
| Basquinova křivka | křivka popisující únavovou životnost ve vztahu k elastické složce deformace |
| Machine Learning | strojové učení |
| Multiaxiální¹ vysokocyklová únava | schopnost tělesa odolávat časově proměnnému prostorovému namáhání po více než 10^4 cyklu |
| Manson-Coffinova křivka | křivka popisující nízkocyklovou únavu ve vztahu k plastické složce deformace |
| Manufacturing Constraints | parametry topologické optimalizace korigující výsledný tvar ve vztahu k zamýšlené technologii výroby |
| Následné zpracování | technologické zpracování, které může následovat po výrobě (tisku) komponenty |
| Poissonovo číslo | převrácená hodnota Poissonovy konstanty |
| Topologická optimalizace | výpočtová metoda pro zajištění optimálního využití materiálu v dané konstrukci pro dosažení požadovaných vlastností |
| Víceosá napjatost | o víceosé napjatosti hovoříme v případě, že v tenzoru vyšetřovaného bodu konstrukce se nachází více než jedna nenulová komponenta normálového napětí |
| Životnost | vlastnost (schopnost) výrobku plnit požadované funkce do hraničního stavu určeného technickými podmínkami [1] |

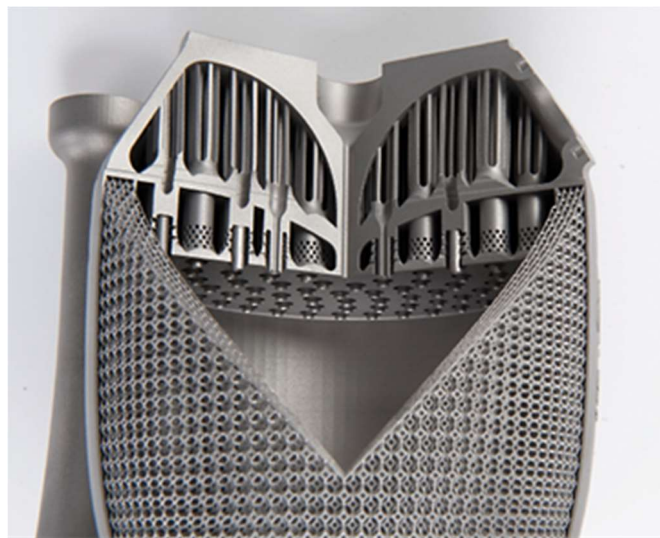
¹„Multiaxiální“ má v této práci plně ekvivalentní význam se slovem „víceosá“

Úvod

Rostoucí tlak na snižování emisí vozidel, tedy i spotřebu pohonných hmot, nástup elektromobility a současně se rozšiřující technické vybavení zvyšující bezpečnost a komfort cestujících, staví před konstruktéry vozidel nové výzvy. Prakticky bezpodmínečně je požadována optimalizace jednotlivých částí s cílem zvýšení funkčních vlastností těchto komponent.

Při návrhu jsou proto často využívány nástroje strukturálních optimalizací, které umožní zvyšování tuhosti, pevnosti nebo vlastních frekvencí a v neposlední řadě snižování hmotnosti těchto dílů při dosažení požadované vysoké provozní spolehlivosti. Topologická optimalizace (*TO*) je typem strukturální optimalizace používaným již desítky let, kterému se v současné době dostává zvýšené pozornosti, díky rozvoji aditivních technologií. Přestože nastavení *TO* umožňuje definování různých druhů tzv. výrobních omezení, které ovlivňují a korigují tvar optimalizované geometrie s ohledem na uvažovanou technologii výroby, není možné tyto návrhy z důvodu složitého organického tvaru výsledné geometrie v drtivé většině případů vyrobit jinou technologií bez dalších úprav. Z tohoto důvodu tedy byla *TO* používána konstruktéry spíše jako nástroj, který jim pomáhá získat představu o vhodné konstrukci navrhované komponenty s ohledem na požadavky, které jsou na ni kladeny.

Technologický progres v oblasti aditivních technologií (*AM*), které se rozvíjejí stále rostoucím tempem, umožňuje výrobu velmi složitých součástí, které tak mohou být jen s malými úpravami produkovány přímo na základě výsledků *TO*. Schopnost *AM* produkovat komplexní tvary se také s výhodou využívá pro spojování sestav v jeden složitý díl, jak ukazuje ve svém návrhu například společnost CellCore, která navrhla část raketového motoru vyrobený jako monolit inconelové slitiny, čímž odpadá část montáže a zároveň dochází k úspoře hmotnosti Obrázek 1.



Obrázek 1 Pohled do řezu aditivně vyrobeného raketového motoru [2]

Výzkum aditivně vyráběných komponent a studium jejich vlastností vyžaduje komplexní strojní i softwarové vybavení. Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni nabízí jedinečné prostředí pro realizaci výzkumných a vývojových aktivit v oblasti aditivních technologií, pokročilých simulací a testování konečných vlastností tvarově a materiálově optimalizovaných komponent. Vysoká vědecko-výzkumná atraktivita a aktuálnost tohoto tématu v kombinaci s velmi dobrým zázemím je jedním z hlavních důvodů zaměření této práce.

Výzkumné centrum *RTI* (Regionální technologický institut) disponuje veškerým potřebným vybavením, zejména:

- a. EOS M290 – 3D tiskárna pro kovový tisk z materiálů MS1, nerezové oceli 316L, speciální slitiny Inconel 718;
- b. software Siemens NX a ANSYS pro modelování a pokročilé výpočetní simulace;
- c. zkušebna provozní pevnosti a únavové životnosti vybavená elektrohydraulickým systémem INOVA pro únavové zkoušky materiálů i komponent;
- d. mechanická zkušebna vybavená zkušebním stroji společnosti Zwick/Roell .

Disertační práce vznikala v kontextu mého přímého zapojení do aktivit výzkumného centra *RTI* a řešení řady projektů zabývajících se zkoumáním vlastností 3D tištěných a topologicky optimalizovaných dílů z různých průmyslových oborů. Díky výzkumným projektům jsem získal velmi cenné poznatky a dispozici byla data z týmového výzkumu vlivu procesních parametrů tisku a tepelného zpracování na mechanické vlastnosti tištěných vzorků. Zmínit je vhodné především tyto projekty:

- 2017-2019 3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie *DMLS*. FV30149.
- 2017-2019 Systematický aplikovaný výzkum materiálových vlastností martenzitické oceli W-NR. 1.2709 vyrobené 3D tiskem technologií *DMLS* s uplatněním výsledků výzkumu v praxi. TJ01000161.
- 2019-2022 Výzkum aditivních technologií pro budoucí uplatnění ve strojírenské praxi – *RTI* plus. CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0010040.
- 2021-2023 Výpočtová a experimentální podpora 3D-tisku kovových komponent technologií *DMLS* a vystavených v provozu víceosému únavovému zatěžování. FW01010462.

Úzká spolupráce se Slovenskou technickou univerzitou v Bratislavě a tříměsíční stáží na Strojní fakultě v Ústavu aplikované mechaniky a mechatroniky umožnila do práce zintegrovat i problematiku multiaxiální únavy, především aplikace nejčastěji používaných hypotéz pro hodnocení víceosé únavy (Findley, MCDiarmid, Dang-Vag) a hypotézy Margetin-Durka-Chmelko, která byla navržena pracovníky tamního ústavu.

Na základě uvedených projektů a zmíněných praktických aktivit, které zahrnovaly mj. spoluúčast při realizaci únavových zkoušek tištěných vzorků zatěžovaných současně normálovým a smykovým napětím (tah/tlak-krut), byla vybudována dostatečně široká výchozí základna experimentálních výsledků a praktických poznatků o chování aditivně vyráběných dílů.

1 Cíle disertační práce

Obecné téma doktorského studia bylo definováno jako „*Výzkum navrhování komponent vozidel s využitím nových materiálů a technologií*“. Konkrétní obsah disertační práce, který vyplynul z průběžného studia a cíleného zužování tématu byl posléze formulován jako „*Příspěvek k navrhování složitě namáhaných komponent vozidel s využitím topologické optimalizace a kovového tisku*“.

Pro samotnou disertační práci byly vytyčeny tři nosné dílčí cíle:

1. Shrnutí současného stavu normalizace v oblasti kovového tisku.
2. Výpočtově-experimentální validace několika alternativních hypotéz kumulace únavového poškození při multiaxiální únavě tištěných kovových dílů (s omezením na harmonické proporcionální zatížení).
3. Numerické simulace, topologická optimalizace a remodeling aditivně vyráběných dílů (se závěrečným posouzením jejich únavové životnosti).

Úvodem jsou shrnuty poznatky z průběžně probíhající rešerše v dynamicky se vyvíjející oblasti normalizace AM.

Ověření a demonstrace získaných teoretických i praktických poznatků z realizace aktivit 2) a 3) proběhlo formou reálných případových studií. V práci jsou zdokumentovány dvě případové studie optimalizace tištěných komponent vystavených víceosému harmonickému proporcionálnímu zatížení. Jejich únavová životnost je posouzena vhodnou hypotézou kumulace únavového poškození.

Do budoucna se uvažuje také o posuzování únavy pomocí strojového učení, v tomto případě je ovšem podmínkou získání přístupu ke cloudové aplikaci, která byla „objevena“ v rámci rešerše dostupných metod a přístupů.

Předkládaná práce tak na konkrétních příkladech prezentuje vhodný postup (metodiku) pro navrhování a posuzování multiaxiálně zatěžovaných komponent vozidel, vyráběných technologií kovového tisku.

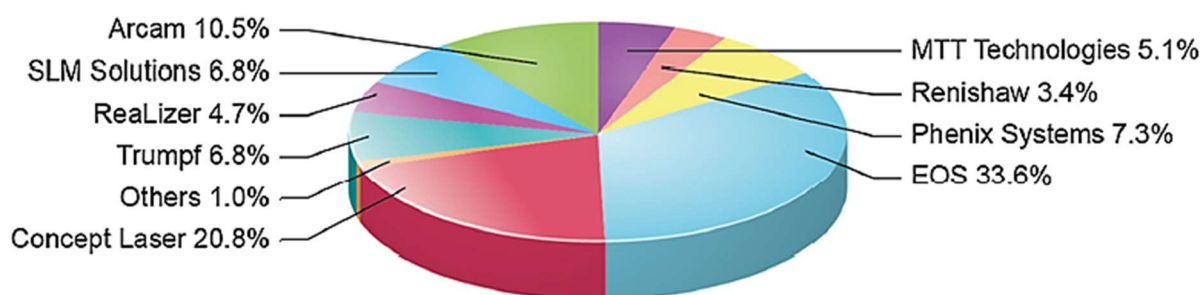
Poznámka)

Na základě dostupných experimentálních zjištění, zejména porovnání mechanických vlastností, byla již v první polovině studia posuzována vhodnost disponibilních materiálů pro zaměření práce (licencí RTI na kovové prášky). Poměrně podrobně byly na únavu testovány např. vzorky vytištěné z oceli MS1. V disertační práci je uvažováno využití nerezové oceli 316L, u které se očekávalo, že bude mít z hlediska odolnosti proti únavovému zatěžování vyšší potenciál než ocel MS1 a také materiál AlSi10Mg, který je vzhledem ke své hmotnosti často používán pro komponenty v automobilovém průmyslu apod.

2 Současný stav v oblasti normalizace aditivních technologií

2.1 Normalizace v oboru aditivních technologií

Aditivní technologie výroby (AM) je prudce rostoucí způsob výroby, mající velký potenciál využitelnosti napříč širokým spektrem průmyslových odvětví. Nové technologie umožňují výrobu dílů k okamžitému použití, či vyžadující jen malé množství dokončovacích operací. Také rozmanitost ve velikosti tištěných dílů, jejich materiálu a způsobu spojování do potřebné geometrie se každým rokem rozšiřuje. Demonstruje to i růst prodeje AM produktů a služeb, který v roce 2015 dosahoval celosvětově US\$3.7 miliard a v roce 2019 již US\$6.5 miliard [3]. Lídrem v technologii tisku kovových materiálů „metal powder bed fusion“ jsou Spojené státy, které již k roku 2016 vlastnily 38 % světově instalovaných zařízení, kdy na Obrázek 2 je vidět rozložení trhu mezi jednotlivé výrobce.

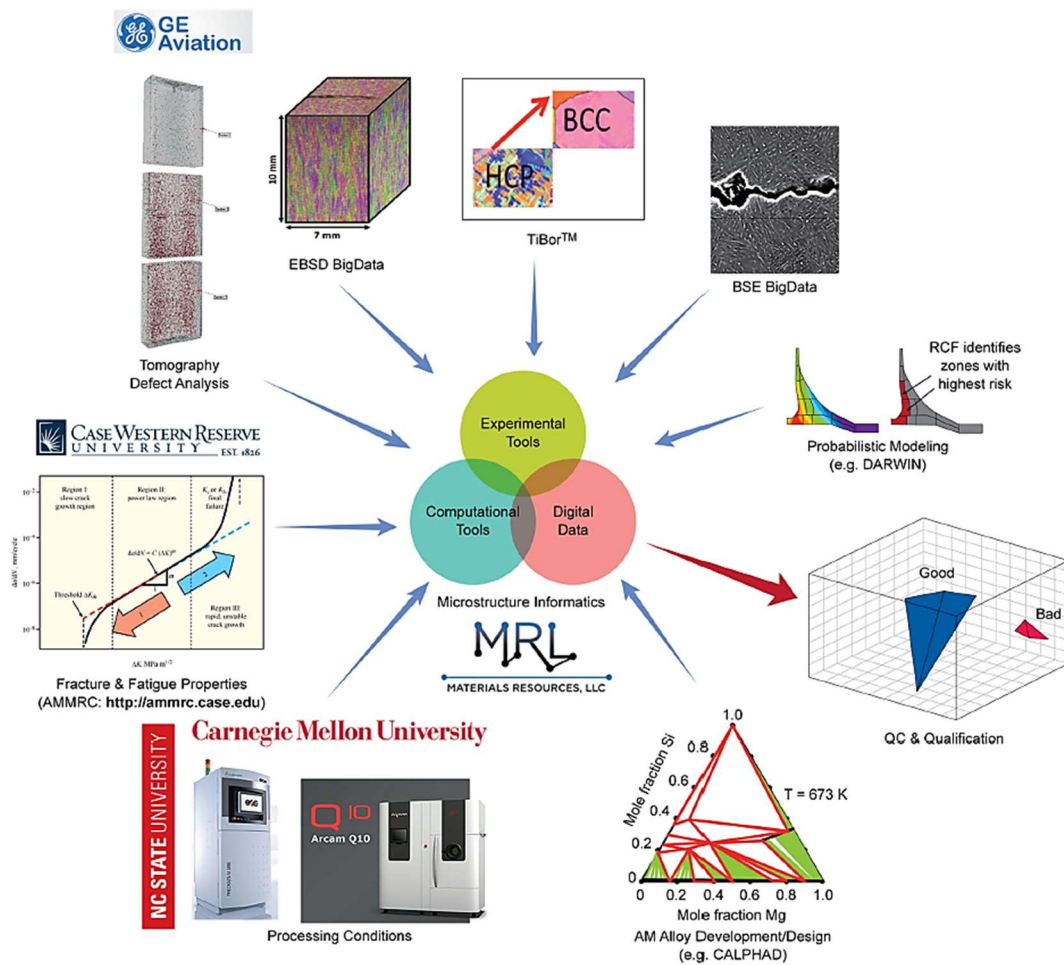


Obrázek 2 Rozložení trhu pro technologie metal powder bed fusion [4]

Přestože jsou AM využívány pro vývoj nových produktů a jsou součástí velkého množství výzkumu, kolísání v kvalitě, mechanických vlastnostech, přítomnost defektů, drsnost povrchu a zbytkové pnutí brání jejich použití v pokročilých a kritických aplikacích.

K dosažení požadovaných mechanických vlastností, které jsou závislé na orientaci dílu během výroby (např. vysokocyklová únava, houževnatost), musíme být nejprve schopni identifikovat defekty vznikající během procesu, heterogenitu prostorové mikrostruktury, a až poté může být řízen výrobní proces AM. Dojde tak k usnadnění, minimalizaci nebo odstranění různých nákladných technologií následného zpracování (např. tepelného zpracování, HIP apod.). Tisk kovových součástí zatím není široce rozšířenou alternativou výroby také pro svou potřebu energeticky náročných a nákladných procesů kvalifikace a ověření každé jednotlivé kovové součásti.

Přehled zabývající se kvalifikací materiálů [4] navrhuje použití Integral Computational Materials Engineering (ICME) na platformě MiCloud.AM (Obrázek 3), který poskytuje předběžné výsledky k porozumění mikrostruktury (tj. morfologie a krystalografie), defektů a zdrojů jejich vzniku. To vše je ovlivněno nastavením a řízením procesních parametrů tisku. Zkoumání vazeb mezi těmito proměnnými a geometrií taveniny (melt pool) je nutné k odstranění/minimalizaci defektů a dosažení požadovaných vlastností. Toho lze dosáhnout použitím ověřené, výše zmíněné platformy pro rychlou kvalifikaci práškového kovového tisku.



Obrázek 3 MiCloud.AMTM: Integrovaný vícestupňový ICME přístup pro kvalifikaci kovového AM používající Microstructure informatics [2]

Společnosti již běžně používají AM pro výrobu prototypových dílů. Nasazení AM do výroby v průmyslovém měřítku brání absence norem a standardů, o které by se výrobci mohli spolehlivě opřít.

Význam norem aditivní výroby je přitom nesporný v těchto oblastech:

- specifikace požadavků;
- návody pro komunikaci, názvosloví;
- dokumentování nejlepších poznatků praxe;
- definování zkušebních metod a protokolů;
- dokumentování technických dat;
- postupy schvalování nových technologií.

Vývoj norem probíhá v různých etapách procesu AM od obecných standardů platných napříč různými technologiemi AM až po úzce zaměřené normy, plané pro konkrétní aplikaci či materiál. Největší vývoj a výzkum probíhá v oblasti AM kovů, která má největší potenciál pro produkci konstrukčních dílů.

2.1.1 Organizace zabývající se tvorbou standardů

Za účelem tvorby norem pro *AM* vytvořila americká *ASTM International* v roce 2009 výbor *ASTM F42*, který se touto problematikou zabývá. V roce 2011 podobně také evropské *ISO* vytvořilo oddělení *ISO/TC 261*, řešící tvorbu norem pro *AM*. Tyto dvě společnosti podepsali v roce 2013 dohodu *PSDO* o společné tvorbě mezinárodních norem pro *AM*. Tento strategický krok vedl k efektivnímu využití specialistů i strojů potřebných k výzkumu v oblasti standardizace.

Doposud bylo společně publikováno okolo 99 norem a dalších více jak 27 je nyní ve procesu schvalování. Normy zahrnují obecné standardy pro *AM*, normy pro vstupní materiály, pro dokončené díly a normy pro specifické aplikace.

Mezery v normalizaci

Přesto, že se *ASTM* a *ISO* intenzivně zabývá návrhem nových norem, společenství Additive Manufacturing Standardization Collaborative (*AMSC*) vytvořilo dokument Standardization Roadmap for Additive Manufacturing, který vyhodnotil oblasti a potřeby s nejvyšší prioritou, aby tak bylo možné zaměřit úsilí normalizačních společností efektivněji.

ASTM AM Center of Excellence

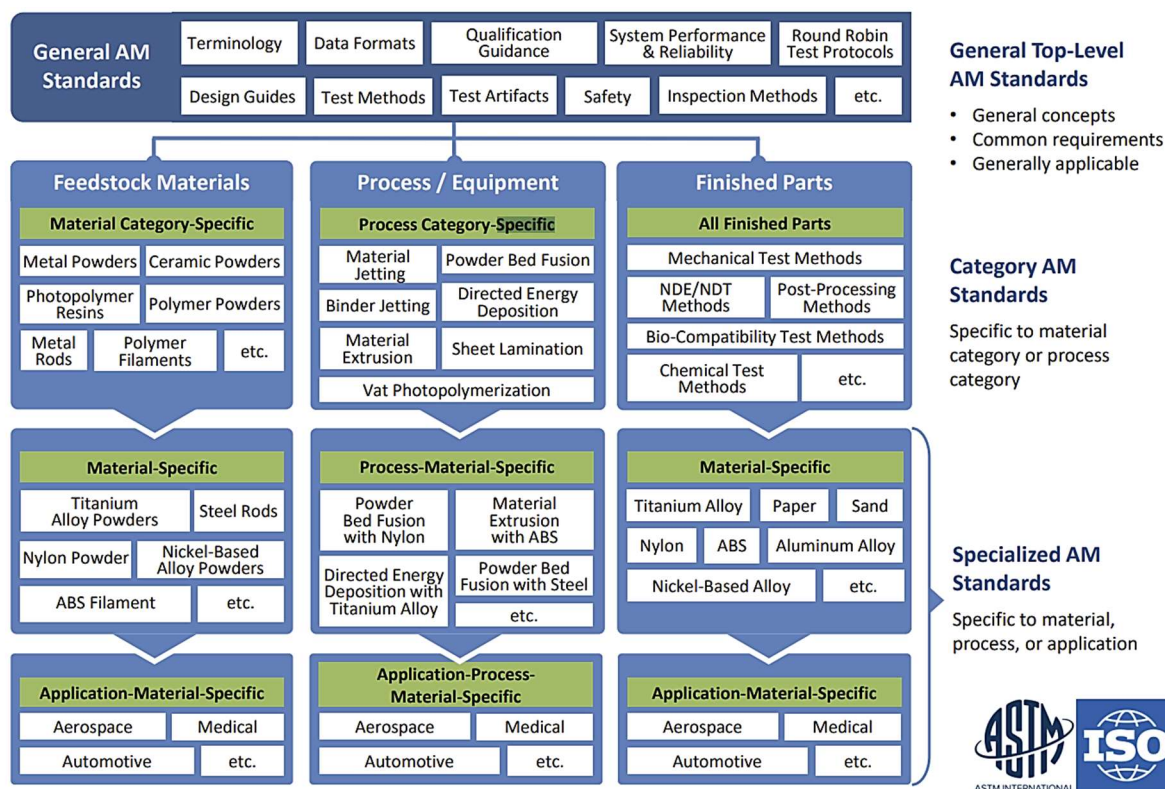
ASTM AM Center of Excellence (AM CoE) vzniklo jako reakce na identifikaci mezer v normativech. Normalizace obecně trvá léta, ale průmysl si nemůže dovolit čekat tak dlouho na použití *AM*, které už je na úrovni aplikovatelné ve výrobě. *AM CoE* iniciuje *VaV* projekty v úzké návaznosti na mezery v normativech a je první společností vytvářející normy, která urychluje vývoj norem podporou výzkumu. Doposud se uskutečnila dvě kola výzev, do kterých se zapojily přední odborné společnosti po celém světě.

National Institute of Standards and Technology (NIST)

Úkolem *NIST* je identifikovat a řešit v konsenzu prioritní potřeby. Provádět vědecký výzkum zaměřený s cílem vytvořit technický základ pro normy a působit v normalizačních výborech, koordinovat, komunikovat a usnadňovat vývoj norem *AM* [5].

2.1.2 Standardization Roadmap for Additive Manufacturing

1. V současné době (2024) je v platnosti třetí verze tohoto dokumentu, která v normalizaci odhalila 141 mezer a rozdělila ji do pěti kategorií:
2. Design;
3. Procesy a materiály (vstupní materiál, řízení procesu tisku, následné zpracování a konečné materiálové vlastnosti);
4. Hodnocení způsobilosti a certifikace;
5. Nedestruktivní hodnocení;
6. Údržba.



Obrázek 4 Struktura norem pro aditivní technologie uznává ASTM F42 a TC261 [5]

Jednotlivé mezery v normalizaci byly ohodnoceny dle potřeby času na jejich dosažení, nutnosti z hlediska bezpečnosti a vlivu na návazné úkoly, velikosti přínosu a návratnosti. Na základě celkového skóre byly úkony rozřazeny dle priority na vysoce důležité, středně důležité a s nízkou prioritou.

V této práci nejsou popsány všechny nedostatky a doporučení, ale je zaměřena na oblast *Design* s vysokou či střední prioritou.

Design Guides

Tato norma by měla usnadnit rozhodování jak konstruktérům, tak i výrobcům. Vyzdvihnout výhody a možnosti *AM* a informovat o jejich omezeních. Design Guides by měl pomoci konstruktérům uzpůsobit konstrukci s ohledem na výrobní možnosti, požadavky a také zvážit faktory jako spolehlivost, náklady, doprava a rizika [6].

General Guides for AM

DE1 – podpora při rozhodování: Aditivní výroba vs. konvenční (uzavřeno)

V této době neexistuje norma, která by uživateli pomohla porozumět výhodám/nevýhodám *AM* ve srovnání s konvenčními metodami výroby a poskytla rozhodovací kritéria pro vyhodnocení.

V současnosti nejsou vyvíjeny a ani není naplánován vznik těchto norem. Jsou dostupné komerční nástroje, např. Independent Evaluation of Additive Manufacturing RAPID Additive Manufacturing Platform (*RAMP*).

DE2 – podpora při rozhodování: Aditivní procesy (uzavřeno)

Tyto normy by popisovaly výhody/nevýhody a silné/slabé stránky různých druhů *AM* a pomohly by zvolit aditivní technologii vhodnou pro konkrétní aplikaci. V roce 2017 byla publikována norma *ISO/ASTM 52910-17, Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing*.

Process-Specific Guides for AM

ASTM a *ISO* plánují společně pokračovat ve vývoji směrnic v rámci dohodnutého schématu (Obrázek 4). Jsou vyvíjeny a částečně už byly publikovány normy pro oba typy práškových technologií tisku (*PBF*), tj. kovových (*ISO/ASTM 52911-1:2019*) i polymerních prášků (*ISO/ASTM 52911-2:2019*). Tyto normy jsou koncepčně podobné německé normě *VDI 3405*.

DE3 – průvodce pro konstrukci v návaznosti na specifika výrobního procesu (střední priorita)

Zatím neexistuje norma, která by plnohodnotně pokrývala konstrukční specifika pro technologii tisku. *ASTM F42* a *ISO/TC 261* identifikovali 7 druhů procesu tisku a zatím pouze 1 (*PFB*) je podpořen základním doporučením pro konstrukci tištěných dílů.

Design Guides for Specific Applications

Očekává se, že *ASTM F42* a *ISO* bude pracovat i na vzniku směrnic pro specializované aplikace dle dohodnutého schématu (Obrázek 4). Tyto normy budou rozšiřovat obecná doporučení pro *AM*, v oblastech leteckého, medicínského a automobilového průmyslu, případně dalších.

DE4 – Design Guides for Specific Applications (vysoká priorita)

Lídři v jednotlivých odvětvích již nyní mají téměř vypracované postupy procesu *AM* pro návrh a výrobu daných konstrukcí. Tyto osvědčené postupy by měly být zaznamenány a použity k tvorbě normy. Je ale možné, že právě z důvodu velmi úzkého zaměření jednotlivých odvětví, bude tvorba směrnic v kompetenci členům těchto odvětví. V této době *ASME* pracuje na normě pro zařízení pro udržování tlaku.

Machine Customizable/Adaptive Guides for AM

Výrobci tiskáren, jak pro hobby, tak pro profesionální produkci, začali vyvíjet průvodce pomáhající uživateli při rozhodování se a plánování procesu výroby. Tento průvodce je specifikován zvláště pro každou tiskárnu, byť stejného výrobce a zohledňuje její konkrétní omezení. Díky tomu může uživatel mnohem lépe navrhnout a připravit model k výrobě.

DE5 – Support for Customizable Guidelines (zrušeno)

Výroba stejné součásti na tiskárnách různých výrobců, nebo i na různých modelech tiskáren stejného výrobce, má často jiný výsledek. Tato norma by měla rozšiřovat obecné pokyny pro konstrukci a proces *AM* tak, aby uživatel mohl lépe pochopit a zohlednit omezení konkrétního zařízení, na kterém je díl vyráběn. Měl by být vytvořen mechanismus, který využívá již dnes existující benchmark a umožňuje konstruktérům lépe porozumět na jedné straně svobodě a na druhé straně omezení v geometrii navrhovaných součástí [6].

DE6 – Software-encodable/Machine-readable Guidelines (zrušeno)

Kromě návrhových směrnic byly zahájeny doplňkové aktivity v rámci *ASTM Committee F42 Additive Manufacturing Technologies* na podporu vývoje standardizovaných konstrukčních pravidel. Pokyny, které jsou ve vývoji, do značné míry spoléhají na grafiku/výkresy a popisy prostřednictvím přirozeného jazyka, což často zanechává subjektivní interpretace. *ASTM WK54856, New Guide for Principles of Design Rules in AM*, ve vývoji v *ASTM F42*, si klade za cíl poskytnout explicitní konstrukce, ze kterých lze vyvinout a upravit explicitní pravidla návrhu. Tyto konstrukce také poskytnou strojově interpretovatelný jazyk, který bude podporovat softwarovou implementaci. Standard měl očekávané datum vydání koncem roku 2018/začátkem roku 2019. *AMSC Roadmap* doporučuje standardizaci jazyku, který mohou interpretovat jak lidé, tak stroje, aby bylo možné návrh pro *AM* zjednodušit a komunikovat napříč platformami a do návrhového softwaru bylo možné zakódovat omezení.

Design tools

V procesu návrhu konstrukce se běžně používá široká škála nástrojů, podporujících využití možností AM, které tradiční výrobní procesy neposkytují. Některé z nových výzev a požadavků kladených AM na konstrukční nástroje, které v tradiční výrobě neexistovaly, jsou popsány níže.

A Machine Input and Capability Report

Protože různé AM procesy mají různé požadavky na konstrukci, výrobní požadavky a výrobní možnosti (např. úhly převislých ploch, minimální tloušťka stěn, minimální průměr otvoru atd.), je často náročné určit, zda je návrh pro daný AM proces proveditelný. V ideálním případě by byly standardizovány strojní vstupy (např. dráhy nástroje, procesní parametry, rychlost atd.) a schopnosti potřebné pro návrhové nástroje k posouzení proveditelnosti.

DE8 Machine Input and Capability Report (střední priorita)

Norma pro podporu konstrukčních nástrojů reportujících vstupní parametry a data do AM zařízení. Vstup by byl hodnocen z hlediska požadavků konkrétního stroje a jeho schopností. Ohlášena by byla proveditelnost, optimalizace výrobního řešení a identifikace AM zařízení schopného vyhovět požadovanému stupi.

Je doporučeno vyvinout standard pro podávání zpráv o strojových vstupech, jako jsou parametry tisku, stopa laseru atd., a schopnosti stroje, jako je rozměrová přesnost, kvalita povrchu, vlastnosti materiálu, geometrická omezení (požadavky na úhel převislých ploch), velikost, pórovitost atd. Tyto zprávy by byly používané softwarem k provedení následujícího [6]:

1. Topologické optimalizace;
2. Optimalizace výrobního procesu;
3. Identifikace vhodného výrobního zařízení;
4. Simulace výroby;
5. Generování lattice struktury.

Nové mezery v normativech odhalené oproti druhé verzi Road Map

DE29 Best Practices for Design for Anti-counterfeiting (střední priorita)

Proti padělání mohou být zavedeny konstrukční metody, jako jsou nespojitosti, znaky, a dokonce i dutiny. Dalším řešením obav z padělání může být, např. vložení jiných materiálů nebo změna vnitřní struktury jako skrytého označení. Sladění detekce prvků proti padělání s širším testováním kvality zachycuje skutečnost, že padělaný AM díl je nekvalitní. Existují normy pro detekci atd., avšak pro záměrné umístění nespojitostí v dílu vyrobeném pomocí AM jsou zapotřebí normy pro design.

DE30 STEP Based 3D PDF (vysoká priorita)

PDF je běžným prostředkem pro prohlížení 3D dílů a anotací, ale současné možnosti jsou omezeny souborem PRC. Geometrie a specifikace AM mohou být složité a PRC je nezvládá dobře. Tím vzniká potřeba specifikace pro soubor pdf založený na souboru STEP, který zvládne tyto geometrické složitosti, na rozdíl od souboru PRC ve specifikaci ISO.

DE31 Feature-based Support for STEP (vysoká priorita)

Je třeba aktualizovat STEP - 242 tak, aby zahrnoval informace založené na prvcích, které jsou parametrické, aby se lépe zachovala geometrie při vývoji s charakteristikami specifickými pro AM (generativní konstrukce, lattice struktury).

2.1.3 Shrnutí

Certifikační orgány, např. Federal Aviation Administration (*FAA*), U.S. Food and Drug Administration (*FDA*), National Aeronautics and Space Administration (*NASA*) ve svých postupech obvykle odkazují na veřejně dostupné normy. Vývoj standardů v USA probíhá na základě dobrovolné účasti a konsensu. Společnosti a agentury se musí zapojit, aby mohly ovlivnit priority a obsah norem. Rostoucí počet *SDO* zabývajících se normami pro *AM* způsobuje zvýšení rizika duplicitně prováděné činnosti a překrývajícího se obsahu, vznik nekonzistentnosti až rozporu. Protichůdné normy vytvářejí nejednoznačnost a zmatek.

AM průmysl má příležitost se této výzvě vyvarovat. Je důležité vyvinout a integrovat soudržnou ucelenou sadu norem pro *AM*, bez rozporů a překrývání se s jinými normami. Řídit a aktualizovat obecný plán (roadmap) vývoje norem s organizační strukturou. Používat a stavět nové normy pro *AM* na základě stávajících a v případě nutnosti je modifikovat. *SDO* by měly pracovat společně na vývoji norem dle stanoveného plánu. Výsledné normy by měly být použitelné a akceptovatelné pro budoucí uživatele všech kategorií, začátečníky i experty. *SDO* by měly mít jasně definovaný rozsah působnosti pro každý výbor. Používat běžnou terminologii, pokud je to možné. Je důležité vytvořit organizační a technická spojení mezi výbory pro komunikaci, koordinaci a spolupráci. Zvážit, jak jsou standardy jednotlivých *SDO* v souladu s organizační strukturou norem *AM* navrženou *ASTM/ISO* a jak ji používají.

Ke dni 2.2.2024 byl vypracován přehled vydaných norem vztahujících se k tématu disertační práce, viz PŘÍLOHA č.1. Školící pracoviště a jeho výzkumné týmy tak mají k dispozici souhrnnou aktuální informaci o stavu normalizace v oboru aditivních technologií. V tom lze spatřit hlavní přínos splnění tohoto dílčího cíle disertační práce.

3 Přednosti aditivních technologií, vymezení hlavních faktorů ovlivňujících životnost AM vyráběných součástí

AM nabízí designérům a inženýrům téměř neomezenou svobodu, což jim umožňuje vyrábět „téměř bez úprav“ to, co vzejde z topologické optimalizace. Příklad optimalizované části nápravy, viz PŘÍLOHA č.2.

Často diskutovanou výhodou je také příležitost spojování více komponent sestavy v jeden tištěný díl, čímž lze snížit požadavky na montáž a zároveň částečně redukovat hmotnost. Hodnocení, zdali je výhodné dané komponenty spojit, je velmi závislé na schopnostech dostupné aditivní technologie a požadavcích na konkrétní díl [7, 8]. Názorný příklad takového zjednodušení je uveden v přílohách, viz PŘÍLOHA č.3.

Při návrhu odlehčených dílů nabízí AM využití lattice struktur, které jsou vyrobitelné pouze určitým druhem lití nebo právě aditivní technologií. Jejich vlastnosti jsou závislé na geometrii buněk, které tvoří lattice strukturu a dodávají jí přibližně izotropické, nebo anizotropické vlastnosti. Jejich možné využití ukazuje PŘÍLOHA č.4, kde byla lattice struktura použita k odlehčení pístu spalovacího motoru.

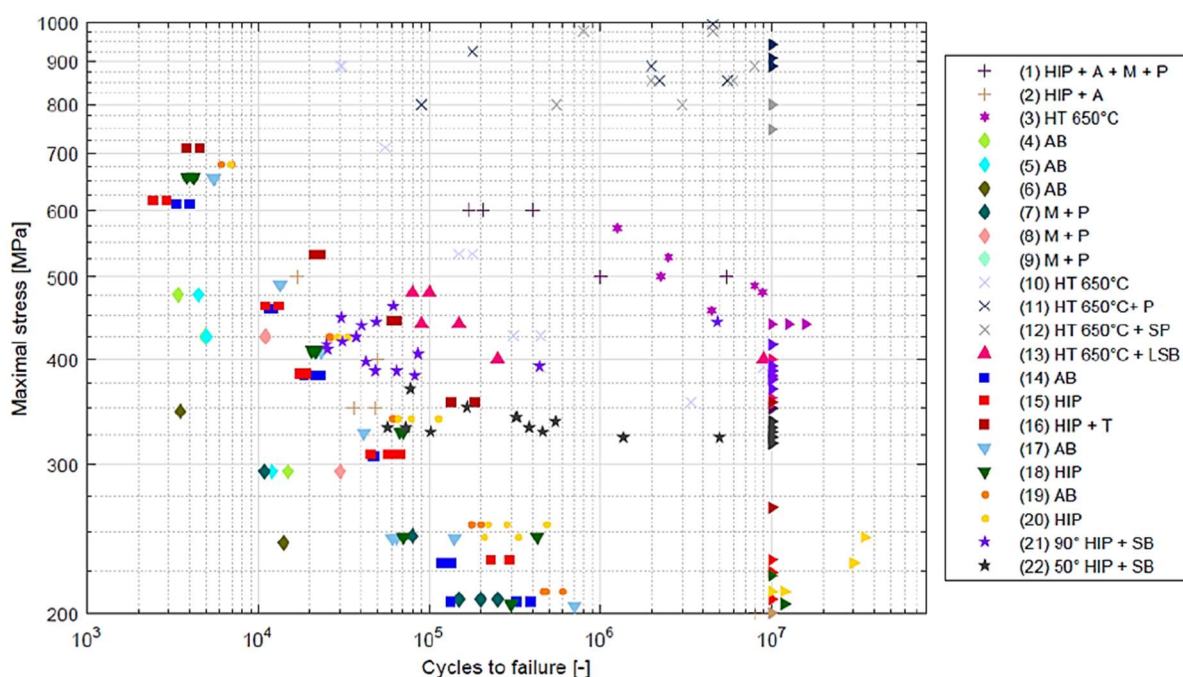
Nabízí se velká flexibilita výroby, co do tvaru i místa, kde může být díl vyráběn. To jsou obrovské benefity AM, které jsou však doprovázeny množstvím otázek, které je nutné zodpovědět. Např.: jsou aditivně vyráběné produkty dostatečně odolné proti působícímu cyklickému zatížení a bezpečné? To je důležitá otázka, protože únavová životnost patří mezi klíčové požadavky napříč průmyslovými odvětvími a aplikacemi.

Většina komponent vozidel je v reálných podmínkách vystavena cyklickému zatížení, a proto jsou citlivé na únavové selhání. Osobní a nákladní automobily jsou neustále vystaveny zatížení, které vyvolává hnací ústrojí, jízda po nerovnostech vozovky, jízdní manévry. Aditivně vyráběné normalizované součásti, stejně tak i celé komponenty, je proto nutno intenzivně testovat na selhání pod cyklickým zatížením. Bez dostatečného pokroku v této oblasti se využití AM nikdy plně nerozšíří [9]. Přitom analýzy únavy vzešly ze studií kovů, což je oblast, která byla studována od 19. století. Nyní víme, že většina ostatních materiálů má své specifické mechanismy selhání související s únavou. Toto se týká kompozitních struktur, výrobků z plastů a keramiky, ale bez pochyb i komponent vyrobených technologií AM [10].

Se zavedenými materiály, jako jsou kovy, a dokonce i kompozity, mají výrobci již bohaté zkušenosti. Vědí, které simulační metody a nástroje použít, aby správně začlenili analýzu únavy do svých inženýrských procesů [11]. U AM je to však jiné.

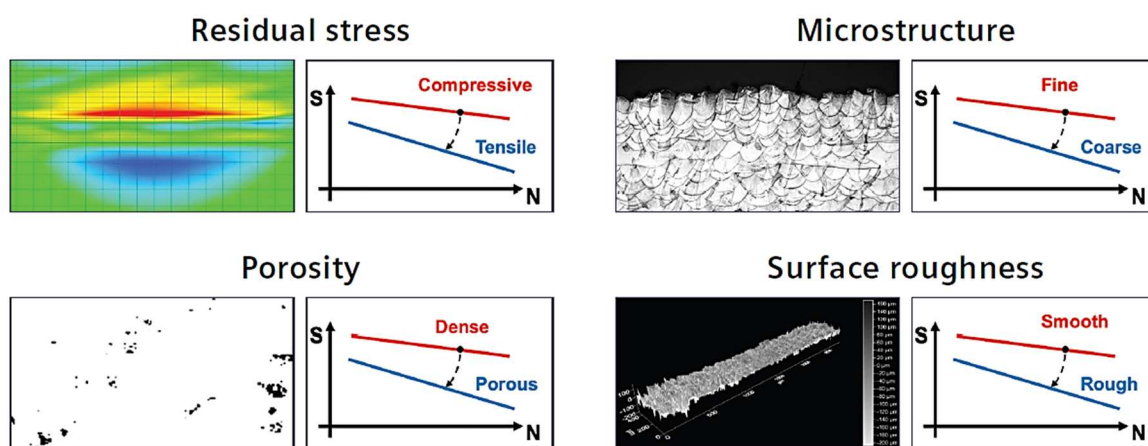
V úvodu byly vyzdvihnuty přednosti a zdůrazněn potenciál AM. Realita je taková, že u provozně zatížených komponent kritických z hlediska bezpečnosti, se dnes výrobci stále zdráhají tuto technologii použít. Jedním z hlavních důvodů je, že nemají plně zvládnutou problematiku jejich únavové pevnosti a životnosti.

Vědecká komunita si uvědomuje nedostatek měření únavových vlastností AM materiálů a mnoho výzkumných center se věnuje tomuto testování. Přestože jsou vzorky vyráběny na shodném stroji, a ze shodného druhu materiálu, výsledky nejsou vždy porovnatelné. Studie, provedené na Katolické univerzitě v Leuvenu, porovnávala výsledky únavových testů materiálu Ti6Al4. Obrázek 5 názorně ukazuje, proč se výrobci obávají nasazení AM do produkce kritických dílů. Z výsledků je patrné, že životnost součásti při napětí například 420 MPa, může být v intervalu $5 \cdot 10^3$ až více než 10^7 .



Obrázek 5 Rozptyl výsledků únavy z rozsáhlých studií AM Ti-6Al-4 [12]

Je již známo, že životnost tištěných kovových dílů neovlivňuje pouze použitá technologie tisku a základní materiál, ale také následné tepelné zpracování a v neposlední řadě nastavení procesních parametrů, kterými jsou např. výkon laseru, strategie skenování laseru, rychlost pohybu laseru apod. Procesní parametry mají zásadní vliv na hustotu výsledného materiálu, tvorbu porozity, mikrostrukturu, zbytkové napětí a drsnost povrchu. Tyto vlastnosti jsou však v případě AM lokálního charakteru (Obrázek 6), což takřka znemožňuje použití dosavadních přístupů hodnocení životnosti, které jen těžko mohou zahrnout všechny kombinace výše zmíněných lokálních vlastností [12].

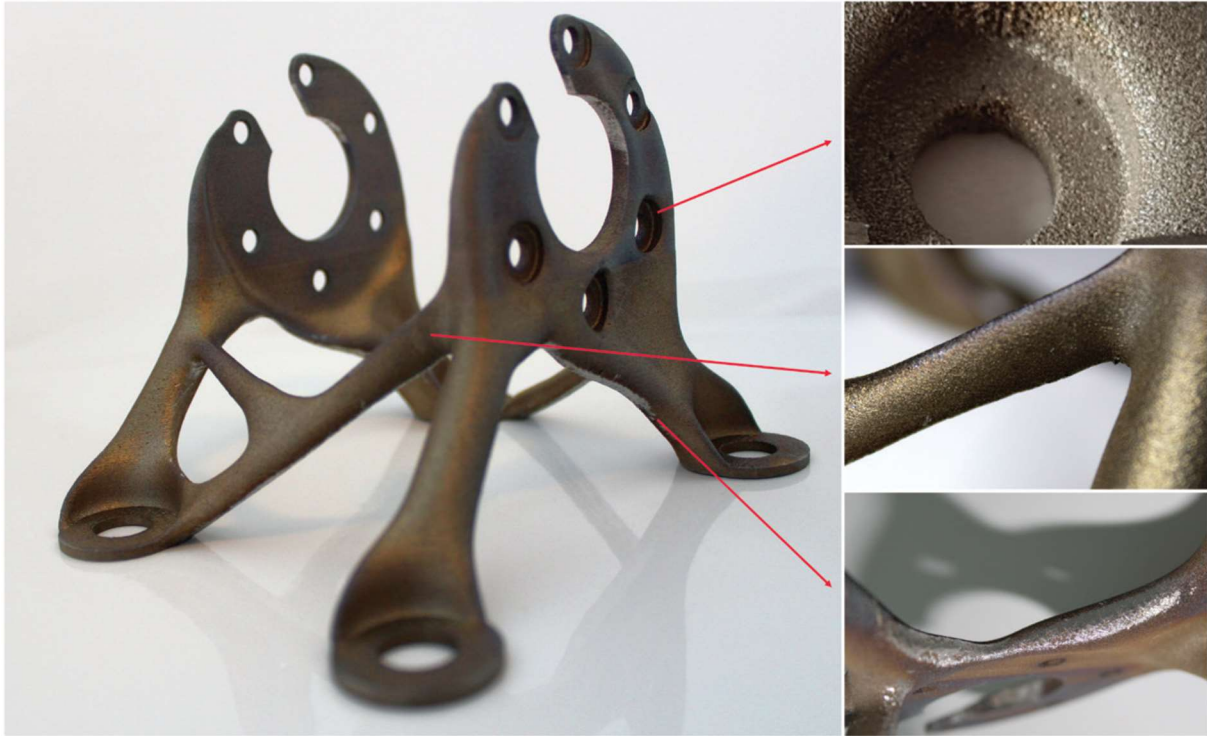


Obrázek 6 Měnící se lokální vlastnosti tištěných dílů vedou k lokálním únavovým vlastnostem [12]

Skutečnost, že se tyto změny dějí lokálně, ale mají dopad na systémové úrovni, samozřejmě komplikuje nastavení simulačního procesu. Je nezbytná víceúrovňová simulační technika, která zachycuje informace o jednotlivých faktorech ovlivňujících únavu a následně využít k předpovědi chování na makroúrovni. Pokud toho lze dosáhnout, lze návrh optimalizovat pro únavovou životnost [13, 14].

Aby bylo možné zajistit, že tištěné díly budou vysoce kvalitní a bezpečné pro použití, je nutné během návrhu simulovat a optimalizovat jejich životnost, ale to vyžaduje speciální technologii. Životnost

konstrukce do značné míry závisí na lokálních vlastnostech (heterogenní struktuře), např. proměnlivé kvalitě povrchu, která vzniká během procesu tisku, viz Obrázek 7. Jejich cílené uvažování během návrhu může vést k dosažení mnohem uspokojivějších výsledků. Například změnou orientace součásti během tisku lze zajistit, že z pohledu únavy kritická místa („hot spots“) získají lepší lokální vlastnosti, čímž je sníženo riziko selhání. Tradiční simulační proces však tyto výrobní detaily neuvažuje [15].



Obrázek 7 Proces AM způsobuje proměnné lokální vlastnosti dílu, jakými je proměnná drsnost povrchu [16]

Profesor Nima Shamseai ve své práci dospěl k závěru, že odlišné mikrostrukturální charakteristiky AM dílů a výsledné mechanické chování jsou primárně řízeny odchylkami v tepelné historii, které jsou nakonec dány procesními a konstrukčními parametry. Pochopení korelace mezi výrobními parametry a distribucí vad způsobených výrobou je proto považováno za důležitý krok k minimalizaci a kontrole těchto materiálových anomálií v AM součástech, které v konečném důsledku zmírňují rozptyl v jejich odolnosti proti únavě [17].

V závislosti na materiálovém systému a typu výrobního procesu, může být v AM součástech významná přítomnost zbytkových napětí, což může být prospěšné, nebo škodlivé pro jejich odolnost proti únavě. Ve srovnání s AM procesy využívajícími laser jako zdroj energie se očekává, že díly vyrobené pomocí procesu na bázi elektronového paprsku budou mít nižší zbytková napětí v důsledku mnohem vyšší teploty prostředí během výroby. Ukázalo se, že mechanické a tepelné zpracování, jako je vyhřívání tiskové platformy, stejně jako případně následné obrábění, kuličkování a tepelné zpracování pro odstranění pnutí, zeslabuje zbytková napětí v tahu [17]. Tato následná zpracování však ne vždy vedou ke zlepšené únavové odolnosti AM dílů. Navíc v závislosti na orientaci dílu při tisku se mohou účinky následného zpracování na únavovou životnost lišit. Proto se doporučuje další výzkum k porozumění mechanismů, které jsou základem charakteristických účinků následného zpracování na únavovou pevnost pro AM vzorky, vyrobené v různých orientacích během tisku.

V současné době je patrný výrazný nedostatek výzkumu v oblasti velmi vysokocyklové únavy ($N_f > 10^7$) u materiálů vyráběných aditivními metodami, což zdůrazňuje naléhavou potřebu hlubšího porozumění

únavovému chování těchto materiálů v gigacyklové oblasti a vlivu konstrukčních faktorů, jako jsou velikost a geometrie komponent, drsnost povrchu a další. Pochopení mechanismu únavového poškození u AM dílů, přesun iniciace trhliny z povrchu do podpovrchových trhlin, není pro velmi vysokocyklovou únavu doposud plně realizováno [17].

Hlavní faktory ovlivňující únavu AM dílů:

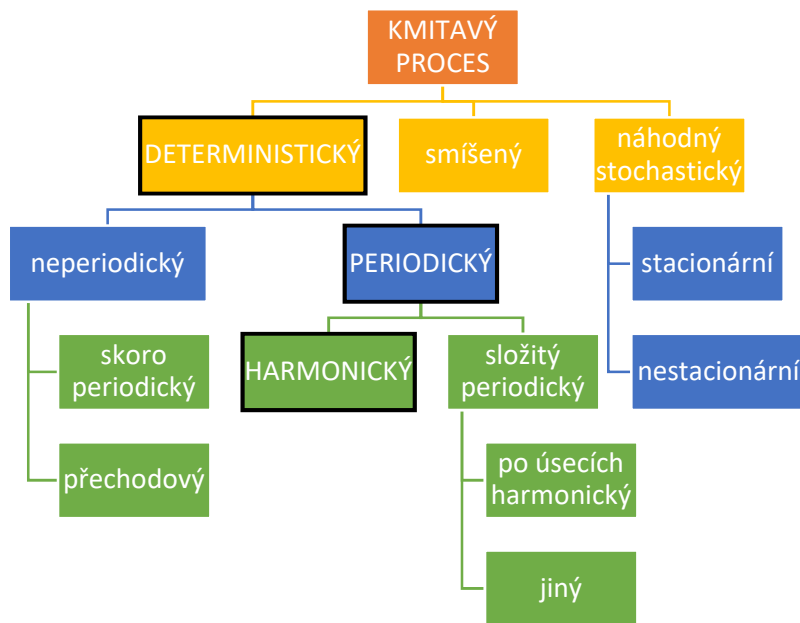
1. **Geometrie:** vliv velikosti dílu na pevnost, koncentrátoři napětí, stabilita konstrukce – toto obvykle vede k rovnoměrnému rozložení a snížení napětí v součásti;
2. **Materiál a technologie výroby:** základní materiál a jeho kvalita, procesní parametry (výkon laseru, rychlost laseru, strategie skenování apod.), tepelné zpracování, post-procesní úpravy, drsnost povrchu, vady, mikrostruktura – lokální vlastnosti;
3. **Zatížení:** jeho velikost, jednoosé/víceosé, normálové/smykové a kombinace – podobné dopady jako u konvenčně vyráběných dílů.

Projevují se zde obecné faktory – geometrie dílu, velikost dílu, použitý materiál a způsob zatížení. V případě AM je však nutné zdůraznit lokální charakter vlastností konstrukce a jejich vzájemná provázanost. Např.: geometrie součásti zde navíc ovlivňuje zbytkové pnutí, které je ovlivněno procesními parametry a následným zpracováním. Drsnost povrchu je obecně ovlivněna procesními parametry, ale také orientací dílu při tisku.

3.1 Posouzení multiaxiální únavy

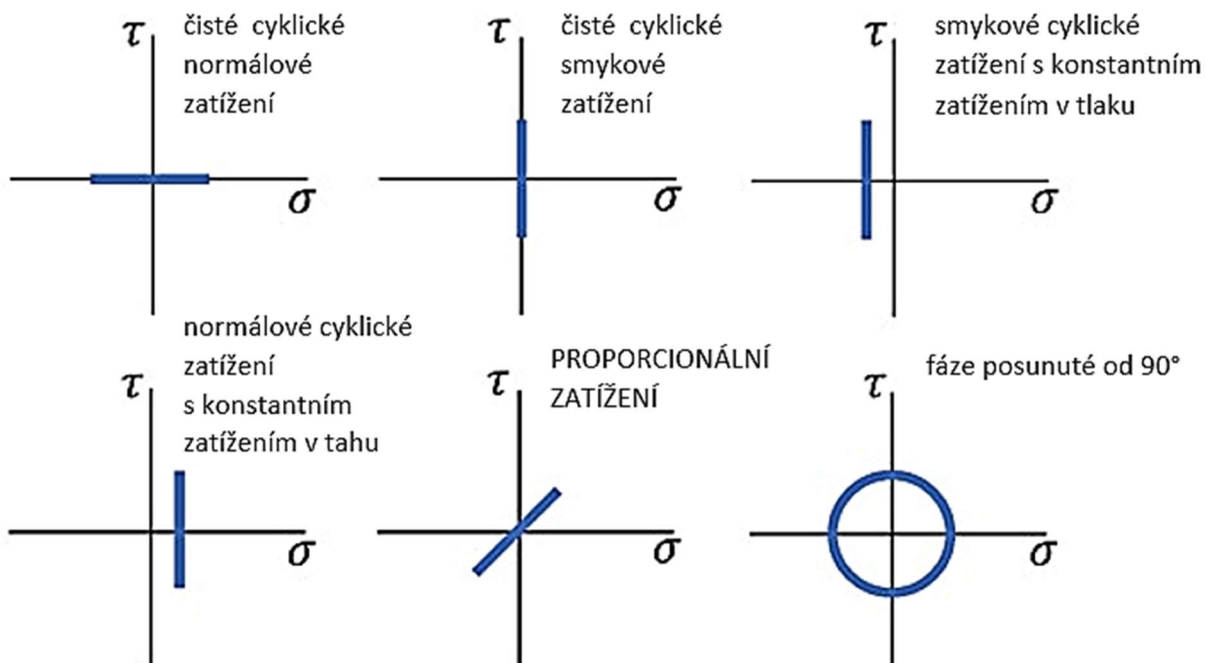
Součásti jsou v provozu velmi často zatěžovány kombinovaným namáháním. Přesto se při hodnocení jejich životnosti v případě, že je jedna ze složek dominantní a ostatní složky napětí jsou zanedbatelné, s výhodou využívá teorie pro jednoosou napjatost. Hlavním důvodem je, že ani v dnešní době neexistuje hypotéza nebo nástroj, který by spolehlivě predikoval životnost pro všechny zátěžné stavy víceosého namáhání [18]. Naopak teorie jednoosého namáhání je zkoumána od samého počátku výzkumu únavy materiálů.

Provozní zatížení má různý charakter průběhu v čase. K hodnocení provozního zatížení se tak pokaždé postupuje specifickými nástroji. Obrázek 8 zobrazuje dělení provozního zatížení z pohledu jeho časových charakteristik.



Obrázek 8 Rozdělení kmitavých procesů s ohledem na potřeby únavové životnosti [19]

Pro snazší pochopení vtaů zatížení v oblasti víceosého zatížení je na následujícím obrázku schematicky zobrazeno několik příkladů průběhu normálového a smykového namáhání.



Obrázek 9 Dělení víceosého namáhání z pohledu fázového posunutí [20]

V rámci disertační práce je posuzována únavová životnost součástí, vystavených proporcionálnímu harmonickému zatížení.

V příloze této práce jsou připojeny výsledky mechanický a únavových zkoušek materiálu MS1 (PŘÍLOHA č.5), které byly realizovány v rámci projektů RTI ve spolupráci s STU Bratislava. Výsledky zkoušek nerezové oceli EOS 316L jsou uvedeny v PŘÍLOZE č. 6.

3.2 Validace metod pro posouzení únavové životnosti

3.2.1 Základní vztahy pro jednoosou únavu

Basquinova křivka

Basquinův vztah vyjadřuje únavovou křivku v závislosti na amplitudě elastické složky deformace založené na Hookovu zákonu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2)$$

-pro čistý tah:
$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^{b\sigma} \quad (3)$$

-pro čistý krut:
$$\tau_a = \tau'_f (2N_f)^{b\tau} \quad (4)$$

Manson-Coffinova křivka

Únavová křivka je v tomto případě popsána mocninnými závislostmi pomocí rovnice vyjadřující vztah životnosti (počtu cyklů) k amplitudě plastické složky deformace:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (5)$$

Z výše uvedených vztahů je možné složit rovnici popisující amplitudu celkové deformace:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

3.2.2 Hypotézy únavového poškození

Existuje velké množství hypotéz únavového porušení zohledňujících víceosý stav zatížení. Tyto hypotézy však mají často spolehlivé výsledky pouze pro určité podmínky zatížení a určitý materiál, resp. způsob chování během únavového porušování. Pro praktické použití by bylo vhodné zvýšené úsilí při vývoji způsobu hodnocení životnosti, který je spolehlivý v širokém spektru aplikací.

V [18] byly porovnávány výsledky obecně rozšířených hypotéz, které byly zkoumány na dvou testovaných materiálech s rozdílným poměrem R_m/R_e .

Ve výše zmíněné práci byly pro hodnocení multiaxiální únavy vybrány následující hypotézy únavového poškození:

Findley

Findley definoval své kritérium jako lineární kombinaci smykového napětí a normálového napětí působícího v kritické rovině. Únavová životnost součásti se pak vypočítá na rovině s maximální hodnotou lineární kombinace napětí a lze ji vypočítat pomocí následující rovnice:

$$(\tau_{cr,a} + k_{fin} \sigma_{n,max})_{max} = \tau_f^* (2N_f) \quad (7)$$

Kde $\tau_{cr,a}$ je amplituda smykového napětí působící v rovině, $\sigma_{n,max}$ je maximální normálové napětí působící v rovině během cyklického zatížení. τ_f^* je modifikovaný koeficient pevnosti vypočtený dle následujícího vztahu:

$$\tau_f^* = \tau_f' \sqrt{1 + k_{fin}^2} \quad (8)$$

k_{fin} je Findleyho materiálový parametr popisující materiálové vlastnosti získané z únavových testů při dvou různých podmínkách. Za plně střídavého normálového zatížení a za střídavého krutu, může být koeficient spočten z rovnice:

$$\frac{\sigma_{c-1}}{\tau_{c-1}} = \frac{2}{1 + \frac{k_{fin}}{\sqrt{1+k_{fi}^2}}} \quad (9)$$

Dang Van

Kritérium Dang Van bylo původně navrženo pro predikci životnosti pod komplexním zatížením. Jeho přístup je založen na lineární kombinaci smykového napětí a hydrostatického tlaku v mikroskopické oblasti. Pokud je toto kritérium použito pro predikci únavové životnosti, může být zapsáno ve tvaru:

$$\tau_a + a\sigma_h = \tau_f (2N_f)^{b\tau} \quad (10)$$

$$a = 3 \left(\frac{\sigma_{c-1}}{\tau_{c-1}} - \frac{1}{2} \right) \quad (11)$$

Carpinteri a Spagnoli

Toto kritérium počítá ekvivalentní napětí v kritické rovině ve formě nelineární kombinace smykového napětí a amplitudy normálového napětí působících na kritickou rovinu během zatěžovacího cyklu. Kritická rovina je definována mezemi únavy získanými při plně střídavém normálovém napětí a plně obráceném smykovém zatížení. Ekvivalentní amplituda napětí je poté porovnána s příslušnou křivkou únavy (v našem případě Basquinovou rovnicí). Platí následující rovnice:

$$\sqrt{\sigma_{n-max}^2 + \left(\frac{\sigma_{c-1}}{\tau_{c-1}}\right) \tau_a^2} = \sigma_f (2N_f)^{b\sigma} \quad (12)$$

$$\delta = 45^\circ \frac{3}{2} \left(1 - \left(\frac{\tau_{c-1}}{\sigma_{c-1}} \right)^2 \right) \quad (13)$$

Kde δ je úhel definující orientaci kritické roviny.

McDiarmid

Dalším rozšířeným kritériem je kritérium navržené McDiarmidem. Podobně jako Findly navrhl McDiarmid kritérium ve formě lineární kombinace amplitudy smykového napětí a maximálního normálového napětí působícího ve stejné rovině. Hlavním rozdílem je definice kritické roviny.

Na rozdíl od Findleyho McDiarmid navrhuje, že kritickou rovinou je rovina s maximální amplitudou smykového napětí. Podobně jako u předchozích kritérií se pro odhad konečné únavové životnosti porovnává amplituda McDiarmidova ekvivalentního smykového napětí s Basquinovou rovnicí pro smykové napětí:

$$\tau_a = \tau_f (2N_f)^{b_\tau} \quad (14)$$

$$\tau_{cr,a} + \frac{t_{cmd}}{2\sigma_u} \sigma_{n,max} = \tau'_f (2N_f)^{b_\tau} \quad (15)$$

McDiarmidův parametr t_{cmd} byl spočítán pro případ trhliny šířící se podél volného povrchu. Protože bylo šíření pozorováno na vzorcích zatížených multiaxiálním zatížením a čistým krutem, byl tento parametr vypočten z meze únavy pro čisté torzní zatížení.

Margetin-Durka-Chmelko

Kritérium využívá nelineární kombinaci amplitudy smykového napětí a maximální hodnoty normálového napětí působící na kritickou rovinu. Podobně jako u McDiarmidova kritéria je kritická rovina definována jako rovina s maximální amplitudou smykového napětí. Koeficient hodnoty normálového napětí je založen na parametrech Basquinových rovnic čistého krutu a čistého tahu/tlaku:

$$\sqrt{\left(\left(\frac{2\tau'_f}{\sigma'_f} \right)^2 \left(\frac{2\sigma_{n,max}}{\sigma'_f} \right)^{\frac{2(b_\tau - b_\sigma)}{b_\sigma}} - 1 \right) \sigma_{n,max}^2 + \tau_{cr,a}^2} = \tau'_f (2N_f)^{b_\tau} \quad (16)$$

Z výsledků predikce životnosti uvedených hypotéz, zkoumaných v [18] na netištěných ocelích, je zřetelně patrný vliv poměru smykového a normálového napětí na únavové chování konkrétního materiálu, resp. na predikovanou životnost.

3.2.3 Experimentální validace metod pro posouzení únavové životnosti aditivně vyrobených součástí

Pro určení vhodné metody hodnocení životnosti komponent vyrobených aditivními technologiemi byly vytvořeny testovací vzorky, které byly následně podrobeny únavovým zkouškám za různých zatěžovacích režimů: tah/tlak, krut a jejich kombinace. Testovány byly ve stavu „as-built“, což znamená, že neprocházely žádnými dodatečnými povrchovými úpravami. Tento postup umožnil lepší simulaci vlastností, které se od reálných komponent očekávají. Experimentálně zjištěná únavová životnost těchto vzorků při kombinovaném zatěžování v tahu/tlaku a krutu byla porovnána s životností, která byla vypočtena na základě vybraných teoretických modelů. Na základě těchto výsledků byla pro další fáze vývoje na úrovni komponent vybrána nejvhodnější metoda hodnocení jejich životnosti.

Experimentální část byla realizována za podpory projektu s označením FW01010462 a názvem "Výpočetní a experimentální podpora 3D tisku kovových součástí vyrobených technologií DMLS a vystavených víceosému únavovému zatížení". Projekt finančně podpořila Technologická agentura České republiky.

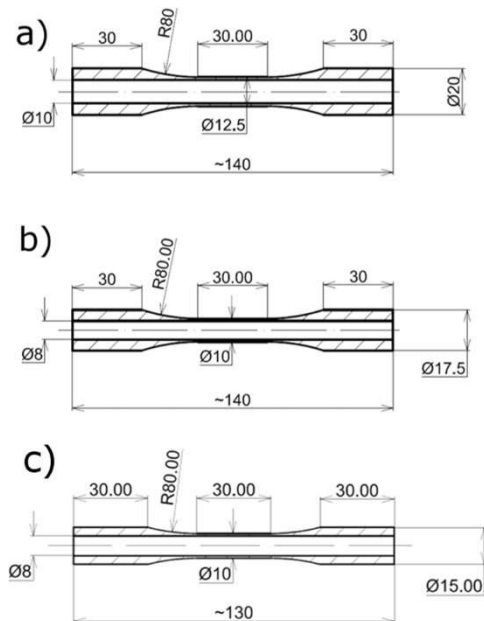
Testované materiály

V první polovině řešení projektu byly zkušební vzorky vytištěny z materiálu EOS Maraging Steel MS1, W-č. 1.2709 podle evropské klasifikace, X3NiCoMoTi 18-9-5 podle DIN.

V druhé polovině řešení projektu byly vytištěny zkušební vzorky z materiálu EOS nerezová ocel 316L, W-Nr. 1.4404 podle evropské klasifikace, X2CrNiMo 17-12-2 podle DIN.

Zkušební vzorky

Vhodný tvar zkušebních vzorků byl ověřen experimentálně. Ze tří předběžně testovaných variant byla nakonec vybrána jako hlavní varianta s geometrií podle obr. 1a.



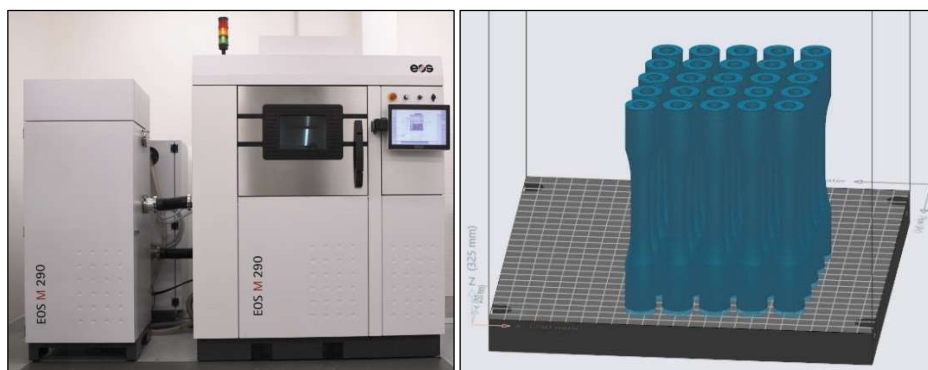
Obrázek 10 Posuzované geometrie zkušebních těles

Výroba (tisk) zkušebních těles

Vzorky byly vytištěny na zařízení EOS M290, viz obrázek 11, které pracuje na principu DMLS (Direct Metal Laser Sintering).

Pro tisk zkušebních vzorků byly vybrány výchozí přednastavené optimalizované parametry sady "EOS_DirectPart".

Vzorky byly vytištěny ve směru osy Z pomocí keramického nanášecího pravitka. Hlavním důvodem pro volbu této orientace byl požadavek na testování vzorků bez následného obrábění.



Obrázek 11 Zařízení EOS M290 a schematické znázornění směru tisku zkušebních vzorků pro únavové zkoušky

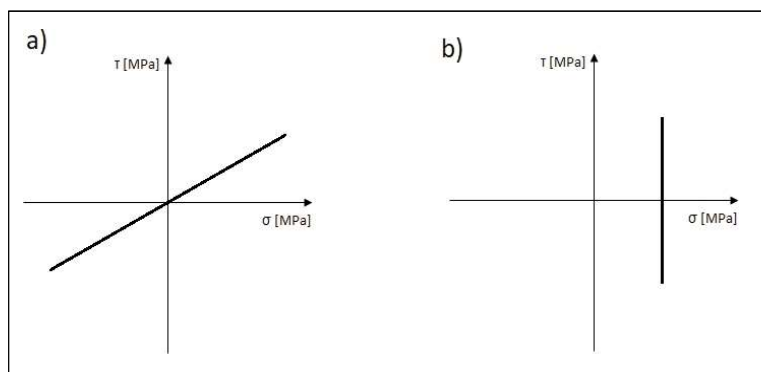
Únavové zkoušky

Únavové zkoušky byly provedeny na elektrohydraulickém zkušebním stroji MTS Bionix 370.02 Axial/Torsional, viz obrázek 12.



Obrázek 12 Axiálně-torzní elektrohydraulický zkušební stroj MTS Bionix 370.02.

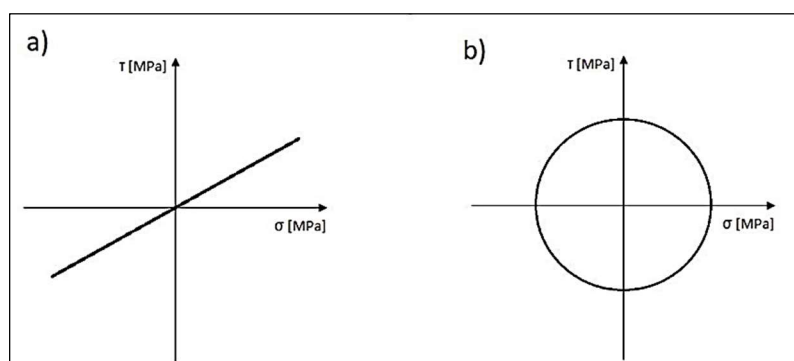
Cyklické zkoušky byly provedeny se vzorky vytištěnými z oceli MS1 se střídavým zatěžovacím cyklem. Vzorky s geometrií podle obrázku 10a byly zkoušeny v krutu s řízeným momentovým zatěžovacím režimem. Pouze část vzorků s geometrií podle obrázku 10c byla zkoušena v silově řízeném tahovém a tlakovém zatěžovacím režimu. Část vzorků byla testována v režimu kombinovaného namáhání tahem/tlakem a kroučícím momentem. Pro kombinované zatěžování byly testovány dva způsoby zatěžování: proporcionální zatěžování se střídavým cyklem, viz obrázek 13a, a neproporcionální zatěžování s konstantní hodnotou normálového zatížení, viz obrázek 13b.



Obrázek 13 Zatěžovací cesta:

a) proporcionální zatížení, b) neproporcionální zatížení s konstantní hodnotou normálového napětí

Vzorky oceli 316L byly testovány v pěti režimech zatížení. Při střídavém čistém tahu/tlaku, procházejícím tahu a kroucení, při režimu zatěžování řízenou silou, resp. řízeným kroučícím momentem. Zbývající vzorky byly testovány v režimu kombinovaného namáhání tahem/tlakem a krutem. Při kombinovaném zatěžování byly testovány dva způsoby zatěžování: proporcionální zatěžování se střídavým cyklem, viz obrázek 14a, a neproporcionální zatěžování s fázovým posunem kroučícího momentu a axiální síly o úhel $\pi/2$, viz obrázek 14b.



Obrázek 14 Zatěžovací cesta:

a) proporcionální zatížení, b) neproporcionální zatížení s fázovým posunem točivého momentu a axiální síly

Pro uvedené materiály (nástrojová ocel MS1 a nerezová ocel 316L) byly vyrobeny a testovány relativně reprezentativní sady zkušebních vzorků s využitím dostupných výrobních a zkušebních zařízení. Byly dodrženy zvolené procesní parametry tisku. Zkušební program poskytl dostatek reprezentativních experimentálních dat pro ověření kritérií zahrnutých do výpočtů únavové životnosti při víceosém zatížení. Naměřená data a výsledky experimentů jsou uvedeny v přílohách, viz PŘÍLOHA č.5 a PŘÍLOHA č.6.

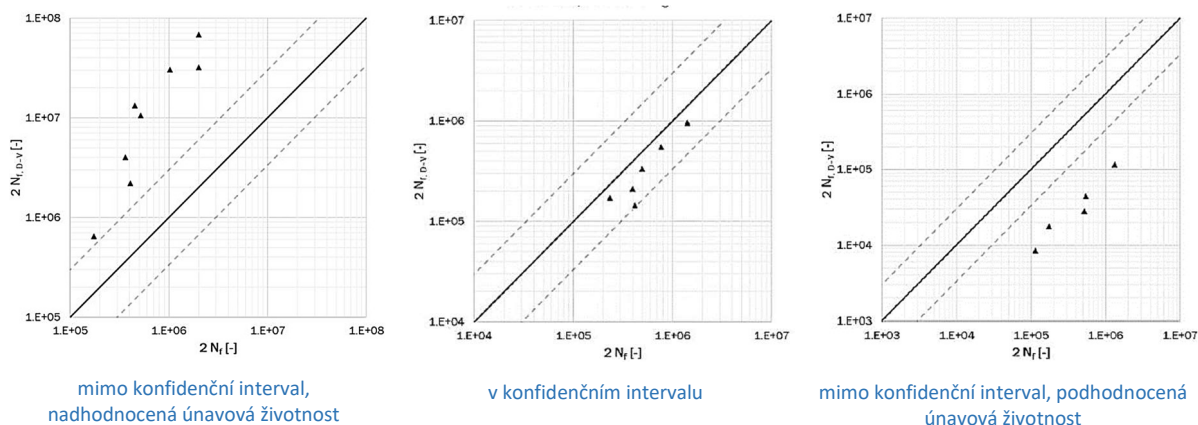
Výpočet únavové životnosti

Na základě vybraných (často používaných) víceosých kritérií byly provedeny parametrické výpočty únavové životnosti při víceosém zatížení a porovnány s experimentálně zjištěnými hodnotami.

Pro výpočty podle jednotlivých víceosých kritérií byly použity únavové křivky stanovené pro jednoosé zatížení, které jsou popsány rovnicemi (3) a (4).

Byly posouzeny 4 hypotézy hodnocení víceosé únavy, většinou založených na přístupu kritické roviny. Posuzované hypotézy Findley, Carpinteri-Spagnoli, Dang-Van a M-D-C jsou výše popsány rovnicemi (7-16). Jedná se o stejná kritéria, která Chmelko a Margetin (2020), ověřili na dvou standardních (netisknutých) ocelích s různými elasticko-plastickými vlastnostmi [18].

Pro každé vybrané víceosé kritérium byly vypočtené a experimentálně naměřené hodnoty vyneseny do srovnávacího grafu.



mimo konfidenční interval,
 nadhodnocená únavová životnost

v konfidenčním intervalu

mimo konfidenční interval, podhodnocená
 únavová životnost

Obrázek 15 Ukázka grafů srovnávajících predikovanou a experimentálně naměřenou únavovou životnost

- Absolutní shoda výpočtu a experimentu znamená, že vyneseny bod leží na diagonále grafu.
- Bod nad úhlopříčkou znamená, že výpočet předpovídá vyšší únavovou životnost než experiment.
- Bod pod úhlopříčkou znamená opak, výpočet předpovídá kratší únavovou životnost, než jaké bylo dosaženo experimentálně.

Výsledky srovnání predikované únavové životnosti pomocí vybraných hypotéz s experimentálními hodnotami, jsou hruty v následující přehledové tabulce, která konstruktérovi poskytují rychlou orientaci při volbě vhodného kritéria pro konkrétní aplikaci.

| | Proporcionální zatížení | | Neporcionální zatížení | | | |
|---------------------|---------------------------|------|------------------------|------|--------------------------|------------------------|
| | σ a τ ve fázi | | τ zpožděné od 90° | | $\sigma = \text{konst.}$ | $\tau = \text{konst.}$ |
| Materiál | MS1 | 316L | MS1 | 316L | MS1 | MS1 |
| Findley | ! | ✓ ↓ | ! | ✗ ↓ | ! | ! |
| Carpinteri-Spagnoli | ✗ ↑ | ✓ | ! | ! | ! | ! |
| Dang-Van | ✗ ↑ | ✓ ↓ | ✗ ↑ | ✗ ↓ | ✓ ↑ | ✓ ↑ |
| M-D-C | ✓ ↓ | ✓ ↓ | ✓ * | ✗ ↓ | ✗ ↓ | ✗ ↓ |

✓ v tolerančním pásmu

↑ nadhodnocená únavová životnost

↓ podhodnocená únavová životnost

✗ mimo toleranční pásmo

! není možné hodnotit

* potřeba další měření

Tabulka 1 Kvalitativní souhrn kritérií hodnocení únavové životnosti vzorků vyrobených pomocí AM

Zavedení strojového učení pro predikci únavových vlastností

To, jak si materiál vede z hlediska únavy, vždy závisí na kombinaci všech lokálních faktorů. Tradičně jsou samostatně (odděleně) charakterizovány v sadách únavových zkoušek. Ale v případě LPBF není snadné oddělit vliv těchto jednotlivých faktorů (pokud by to bylo vůbec možné). Jako příklad si představme drsnost povrchu. Ta záleží především na úhlu plochy vůči platformě v tisku. Chceme-li zkoumat jeho vliv, můžeme vytisknout vzorky v různých orientacích při tisku a poté je otestovat. Ale vzhledem k technologii layer-by-layer ovlivníme také mikrostrukturu základního materiálu a nahromaděné zbytkové pnutí. V důsledku toho nemůžeme vyhodnotit izolovaný vliv drsnosti povrchu. Podobné složitosti se objevují, když chceme studovat další faktory ovlivňující únavu. Kromě tohoto stroje LPBF od různých výrobců, s různým nastavením procesu také pravděpodobně produkují materiál s různými vlastnostmi, a to i při použití stejného základního materiálu, jak již bylo popsáno v kapitole 3.

Jednou z cest vyřešení tohoto problému je využití strojového učení ke generování materiálového modelu. Machine Learning (*ML*) může odhalit skryté vztahy mezi různými faktory ovlivňujícími únavu. Výsledek toho lze pak použít k přesnější predikci únavových vlastností pro jakoukoli danou kombinaci parametrů [21, 22]. *ML* vytvoří model pro únavu, jehož pomocí je možné predikovat SN křivku, která odpovídá jakékoli kombinaci podmínek procesu *LPBF* na základě Gaussova procesního přístupu [23]. Pro trénování modelu *ML* byla navržena a provedena speciální testovací kampaň v rámci projektu M3- FATAM pro různé podmínky tisku a následného zpracování. Toto řešení podporuje vytváření smysluplných predikcí na základě dostupných testovacích dat. Klíčovými výhodami je, že může pracovat s relativně omezenými soubory dat, a že nevyžaduje předem definovat předpoklady o tom, jak různé lokální vlastnosti ovlivňují únavovou životnost [16].

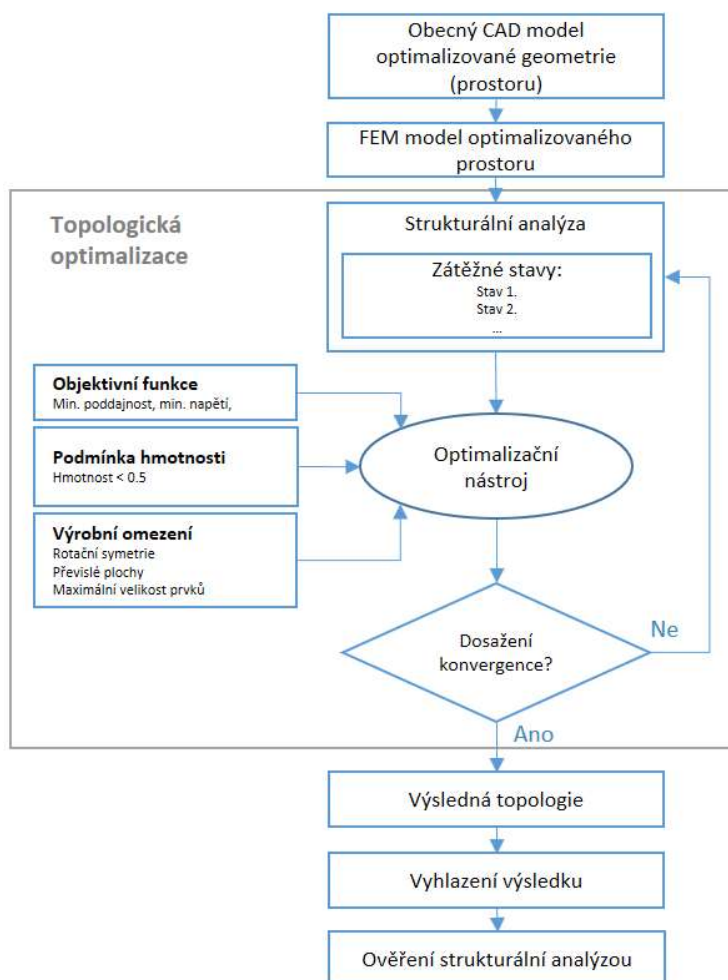
Tento nástroj vyvíjený společností Siemens by měl umožnit vytvořit digitální dvojče tištěného produktu v jeho konstrukčním prostředí, včetně tepelného zatížení. V důsledku toho bude možno optimalizovat jak design, tak výrobní proces, a nakonec dosáhnout spolehlivého produktu vyrobeného technologií *AM*.

Tento nástroj nebyl v této práci prakticky použit, protože se nepodařilo získat licenci. Výzkumné centrum *RTI* se ale hodlá tomuto směru výzkumu do budoucna věnovat.

4 Případové studie

Případové studie demonstrují přístupy k návrhu komponent, které jsou vystaveny multiaxiálním zatěžovacím podmínkám. Hlavním nástrojem použitým pro jejich návrh je topologická optimalizace, což je proces umožňující efektivně přepracovat a optimalizovat geometrii komponent. Cílem tohoto procesu bylo dosáhnout snížení hmotnosti ve srovnání s původním designem, přičemž je zároveň brána v úvahu kompatibilita s aditivními výrobními technologiemi, které by bylo možné použít pro realizaci těchto optimalizovaných komponent v praxi. Řešeny byly následující dvě komponenty: těhlice a náboje pro vůz studentské formule a konzoly podjezdové zábrany tramvaje.

Na obrázku 16 je zobrazeno schéma, na kterém je vidět přehled jednotlivých kroků postupu optimalizace.



Obrázek 16 Diagram procesu návrhu komponenty s využitím nástrojů topologické optimalizace

Jednotlivé kroky procesu návrhu jsou podrobně sepsány v dalším textu specificky pro každou z vybraných komponent.

4.1 Soustava těhlice a náboje vozu formule student

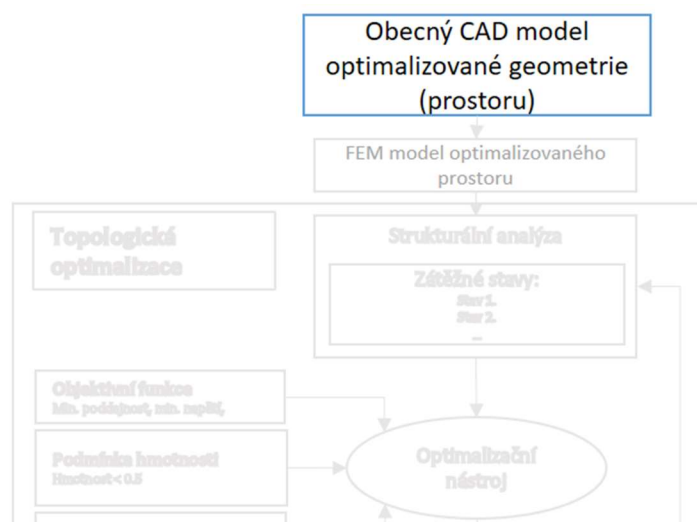
Popisována je sestava dvou komponent, které budou navrhovány v jedné společné optimalizaci.

Návrh používá vstupní data, která byla získána a navazují na předešlý návrh samostatně optimalizované těhlice studentské formule.

Důraz je kladen na návrh postupu, který systematicky povede konstruktéra procesem návrhu komponenty určené aditivní výrobu s minimem pomocných kroků, které přímo nepřispívají k dosažení požadovaného návrhu.

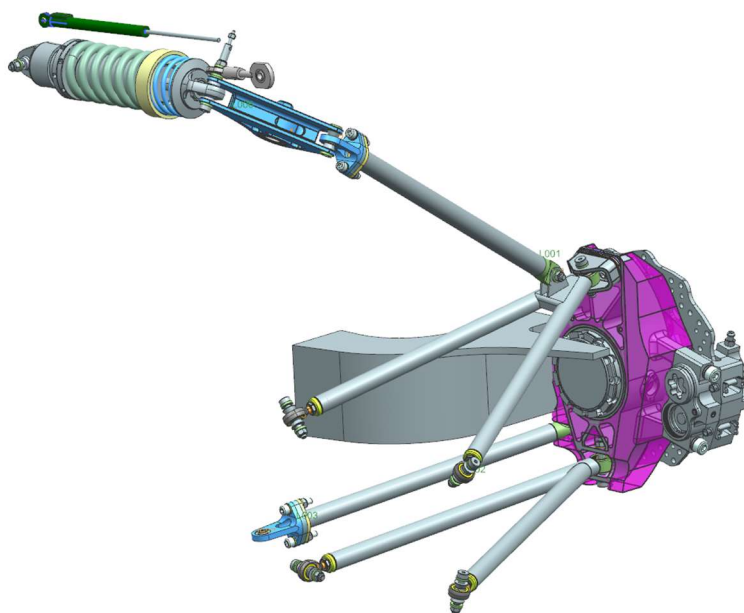
4.1.1 Definice optimalizovaného geometrie

Prvním fází návrhu, spočívá v definici geometrie pro optimalizace viz. obrázek níže.



Obrázek 17 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Geometrie pro topologickou optimalizaci je stanovena s maximálními možnými rozměry vzhledem k zástavbovému prostoru. Geometrie také respektuje připojovací prvky pro připojení ramen nápravy, ložisek, brzdového kotouče aj. Obrázek 18 zobrazuje pravou přední nápravu formule student. Náprava sestává z dvojice ramen, tyče řízení a tlačné tyče přenášející výkyvy kola přes pákový mechanismus na pružinu a tlumič. Na samotnou těhlici je namontován brzdový třmen náboj s brzdovým kotoučem a difuzor usměrňující proud vzduchu na brzdový kotouč. Barevně je zvýrazněná geometrie překrývá stávající těhlici a je tak možné porovnat nárůst objemu vstupní geometrie pro *TO*.

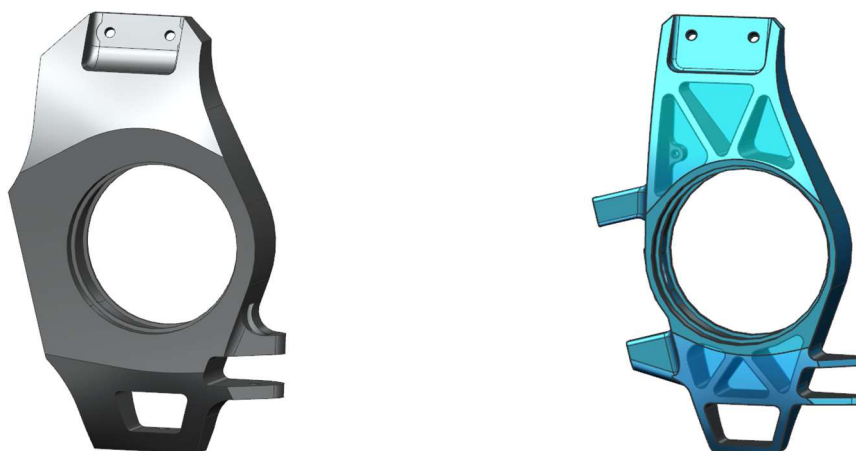


Obrázek 18 Sestava nápravy studentské formule

Srovnání efektivity využití zástavbového prostoru vyjadřuje míru efektivity využití maximálních zástavbových rozměrů, které jsou vyjádřeny pomocí objemu samotné komponenty a její obálky (obrázek 19) vtažených k objemu definovaného optimalizovaného objemu. Přehled je uveden v tabulce 2.

| Objem optimalizačního prostoru [cm ³] | Objem stávající těhlice [cm ³] | |
|---|--|--------|
| | Komponenta | Obálka |
| 565,1 | 163,2 | 301,3 |
| Efektivita využití zástavbového prostoru | 28,9 % | 53,3 % |

Tabulka 2 Srovnání efektivity využití zástavbového prostoru

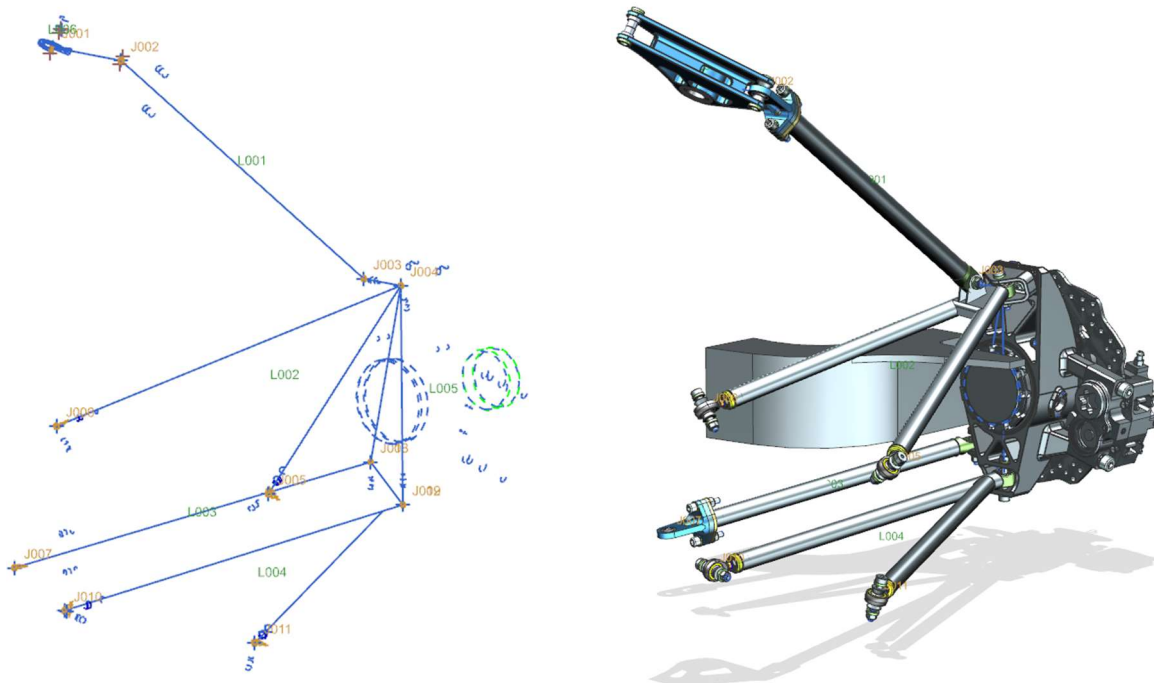


Obrázek 19 Obálky optimalizačního prostoru a stávajícího řešení těhlice

Kinematická analýza

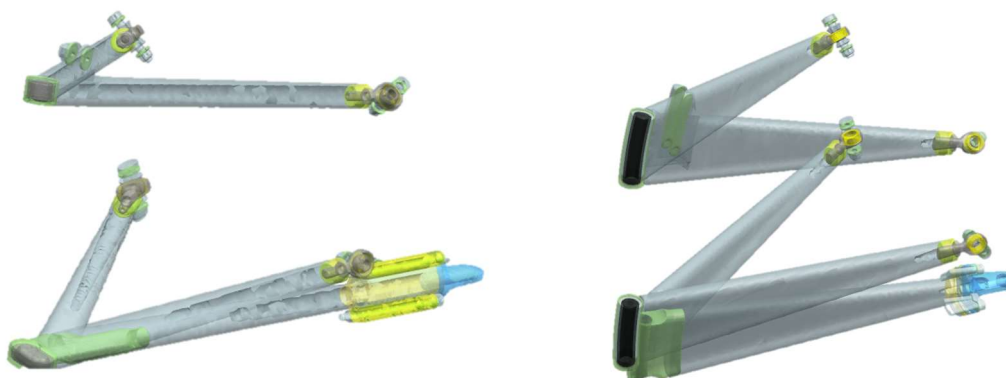
V softwaru Siemens NX byla provedena kinematická analýza, za účelem odstranění rizika kolice mezi budoucím optimalizovaným dílem a okolními komponentami nápravy. Simulován byl pohyb komponent do krajních poloh při pružení a zatáčení.

Pro výpočet mechanismu, je vhodné postupovat od zjednodušeného modelu k 3D geometrii. V první fázi simulace jsou proto ramena, „přepákování“ ang. bell crank a těhlice s nábojem nahrazeny 1D geometrií (obrázek 20). Zjednodušení urychluje výpočet a korektní sestavení mechanismu. Mezi jednotlivými komponentami reprezentovanými pomocí úseček, jsou definované kulové vazby, které odebírají 3 stupně volnosti v prostoru. Pohon pro simulaci pro pružení je definován na vazbu přepákování, která jako jediná vykonává čistě rotační pohyb a vyvoluje následně pro pružení s amplitudou 35 mm. Pohon pro natočení kola je aplikován na tyč řízení, která svým posuvem vyvoluje rotaci kola z krajních poloh, tedy natočení kola, kdy dochází téměř ke kontaktu ramena nápravy s ráfkem kola.



Obrázek 20 Náhraza 3D modelu komponent nápravy 1D modelem pro kinematickou analýzu

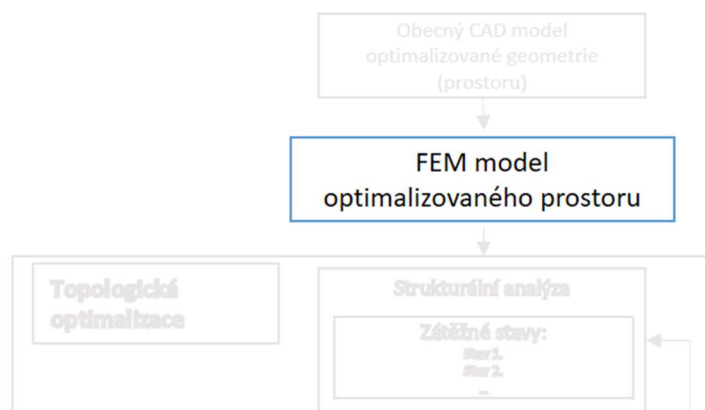
V druhé fázi, kdy je 1D model korektně nastaven, je k 1D geometrii přiřazena skutečná 3D geometrie nápravy. Z následných dvou simulací jsou získány obálky komponent, které jsou poté kontrolovány na kolizi s definovaným optimalizačním prostorem, zobrazeny, jsou na obrázku níže.



Obrázek 21 Obálky poloh komponent nápravy při pohybu mezi krajními polohami

4.1.2 Příprava výpočtového modelu těhlice a náboje

Příprava *FEM* modelu zásadně ovlivňuje kvalitu a časovou náročnost výpočtu. Diskretizace vstupní geometrie, jakožto kontinua, je nutné provádět se znalostí navazujících simulací.



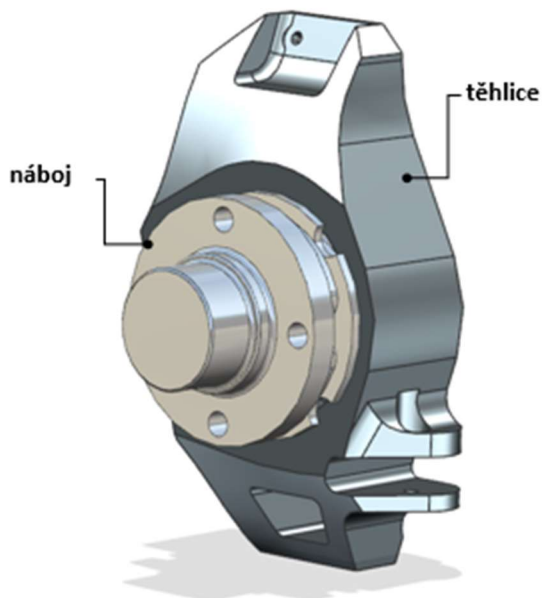
Obrázek 22 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Při využití menších elementů v metodě konečných prvků (*FEM*) dochází k detailnějšímu popisu vstupní geometrie, což může přispět k homogenizaci rozložení napětí. Avšak v regionech, kde se v modelu nacházejí kolmé hrany s teoreticky nulovým rádiem (efekt vrubu), další zmenšení elementů v těchto oblastech může vést k exponenciálnímu nárůstu napětí. V důsledku toho se topologická optimalizace soustředí na zachování materiálu v těchto kritických oblastech, na úkor oblastí s relativně nižším napětím.

Rovněž je nezbytné rozhodnout, zda bude následující simulace prováděna pomocí lineárního, nebo iterativního přístupu v rámci *FEM*. V případě lineární analýzy je možné použít jemnější síť elementů bez významného prodloužení doby výpočtu. V situaci, kdy model zahrnuje nelinearity, jako jsou definované kontakty nebo je součástí další topologické optimalizace, je nutné počítat s tím, že výpočet bude probíhat v mnoha iterativních krocích, což významně prodlouží dobu výpočtu.

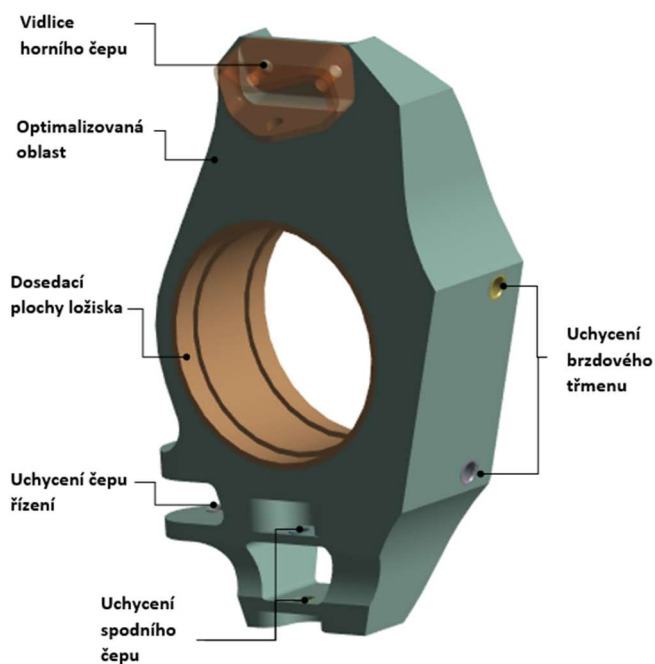
Opačný extrém je velké zjednodušení hrubou sítí. Tyto elementy mohou vést k nízkému rozlišení geometrických detailů a nedostatečnému zachycení lokálních napěťových koncentrací, což může rezultovat v generování hrubších, méně detailních optimalizačních návrhů. Tento efekt omezuje schopnost algoritmu efektivně minimalizovat hmotnost a zvýšit strukturální efektivitu, vedouc k potenciálně nadměrné koncentraci materiálu v méně zatěžovaných regionech a nedostatečnému posílení v oblastech s vysokým napěťovým zatížením. Proto je klíčové pečlivě vybírat velikost elementů

tak, aby odpovídala specifickým požadavkům daného návrhu a zajistila optimální rovnováhu mezi výpočetní efektivitou a přesností simulace.



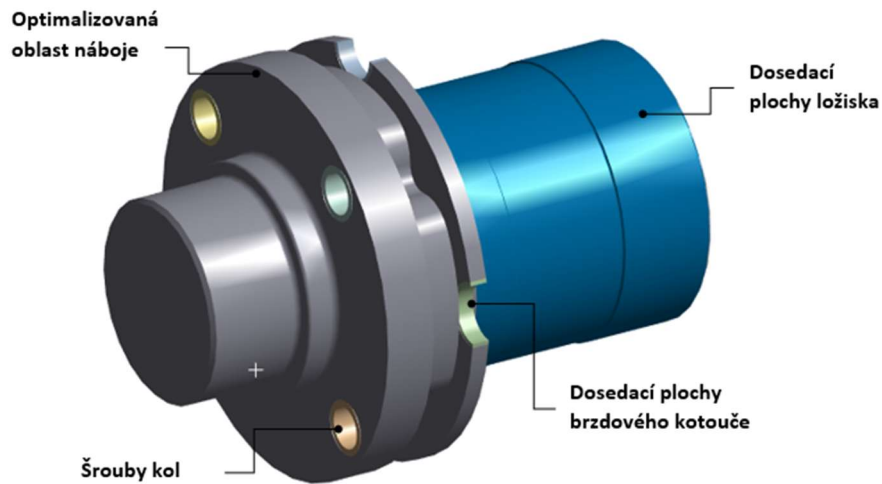
Obrázek 23 Vstupní geometrie

Simulace pomocí metody konečných prvků je realizována v programu ANSYS Mechanical 2023 R1. Před tvorbou sítě konečných prvků byly z celkové geometrie těhlice izolovány specifické oblasti, jako jsou místa pro ložiska, otvory pro montáž brzdového třmenu, dolní a horní čepy a čep řízení. Tento krok umožnil efektivnější úpravy geometrie, včetně procesů vyhlazování po topologické optimalizaci a usnadnil přípravu pro následnou verifikační analýzu. Toto odstranění specifických oblastí představuje důležitou fázi v procesu přípravy modelu, zajišťující přesnost a efektivitu následných výpočtů a analýz.



Obrázek 24 Izolované oblasti z geometrie těhlice

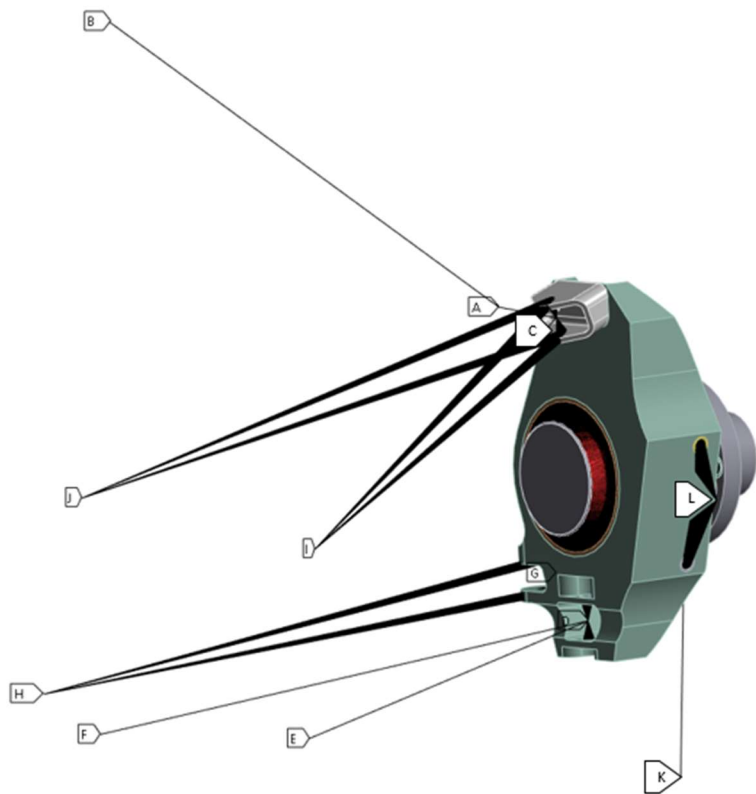
Síť těhlice a náboje je tvořena tetraedrickými elementy druhého řádu. Velikost elementů optimalizované oblasti těhlice je 2,3 mm a 1,8 mm v případě náboje. Adaptivní velikost elementů je potlačena, aby hustota sítě byla pro TO konstantní. Potlačení malých prvku geometrie nastaveno na 0,6 mm. Velikost elementů separovaných oblastí je 1 mm.



Obrázek 25 Izolované oblasti z geometrie

Ramena nápravy a jednotlivé čepy byly nahrazeny 1D prvky typu Remote points. Tyto prvky byly nastaveny jako dokonale tuhé a řízeny jako MPC . V následné strukturální analýze budou použity pro definici okrajových podmínek.

- A - tlačná tyč 2 (push rod)
- B - tlačná vzpěra 1 (push rod)
- C - horní čep
- D - spodní čep
- E - spodní rameno 1
- F - spodní rameno 2
- G - rejdrový čep
- H - tyč řízení
- I - horní rameno 1
- J - horní rameno 2
- K - kontakt kola s vozovkou
- L - brzdový třmen



Obrázek 26 Popis náhrady ramen nápravy ve výpočetním modelu

Popis zvoleného materiálu

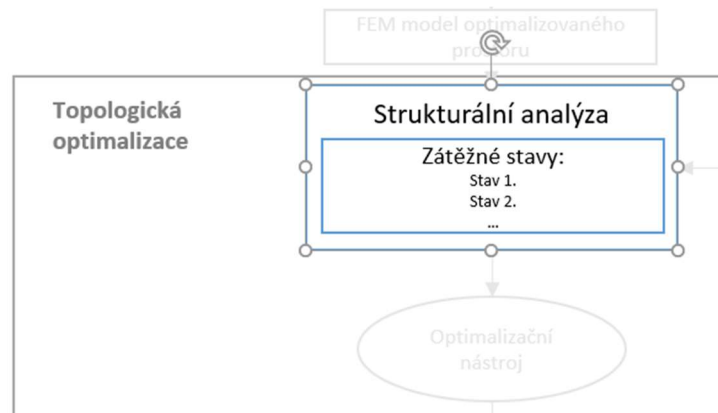
Hliníková slitina AlSi10Mg (lehký materiál pro automobilový sport a aplikace v leteckém průmyslu) od společnosti EOS byla zvolena jako materiál pro optimalizační řešení [24]. Tato slitina je široce využívaná a kombinuje nízkou hmotnost s dobrými mechanickými vlastnostmi, přičemž je přímo určena pro použití ve 3D tiskárně na principu *DMLS* od společnosti Electro Optical Systems (EOS M 290) [25]. Hlavní mechanické vlastnosti materiálu a napětově-deformační křivky pro topologickou optimalizaci a verifikační analýzu byly měřeny na zkušebních tělesech. Experimentální testování a vzorky geometrie byly provedeny v souladu se standardem ISO 6892-1:2016. Vzorky byly vytvořeny pomocí 3D tiskárny EOS M290. Pro kvazistatické tahové testy (2 mm/min) byl použit elektromechanický zkušební stroj Zwick-Roell Z250 s nosností 5 kN a frekvencí vzorkování 20 Hz. Hlavní mechanické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulce 3.

| Parametr | Hodnota |
|----------------------------|---------|
| ρ [g/m ³] | 2670 |
| E [MPa] | 70.4 |
| ν [-] | 0.29 |
| R _{p0.2} [MPa] | 247 |

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg pro aditivně vyrobená zkušební tělesa

4.1.3 Strukturální analýza soustavy komponent těhlice a náboje formule SAE

Posledním krokem před samotnou topologickou optimalizací je tvorba strukturální analýzy obrázek 27.



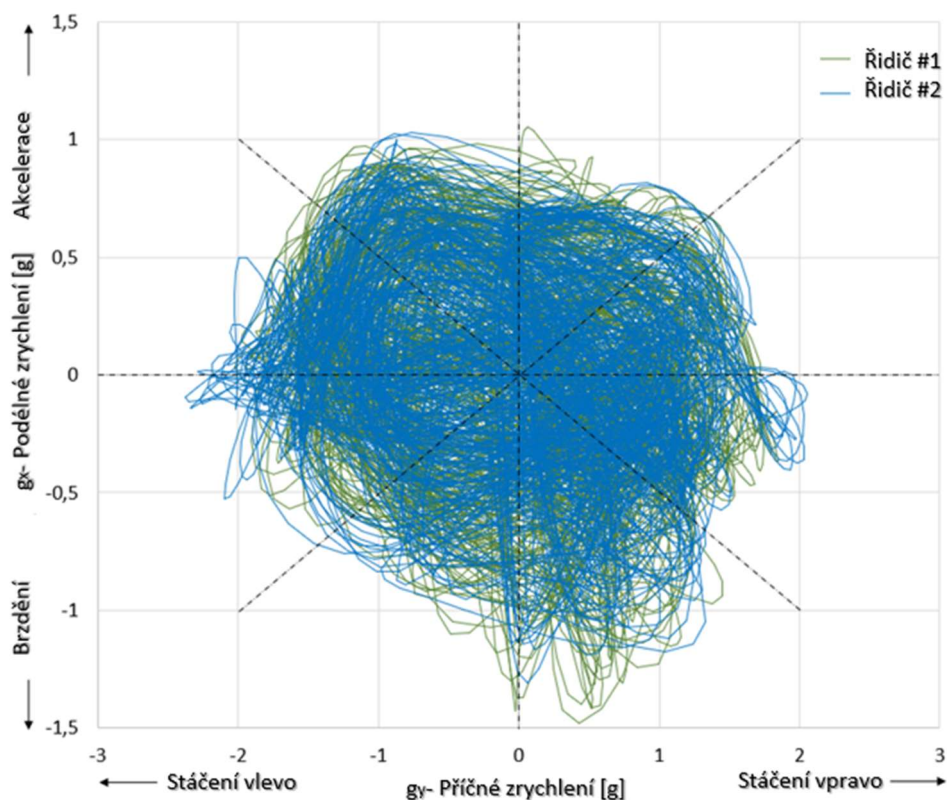
Obrázek 27 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Ta je tvořena již vytvořeným výpočtovým modelem a definováním okrajových podmínek, resp. zátěžných stavů.

Pro účely strukturální analýzy a následné topologické optimalizace byla použita kritická zatížení, která byla vyhodnocena a aplikována při návrhu současně používané těhlice studentské formule.

Kritická zatížení byla identifikována pomocí obecně známých analytických rovnic pro dynamiku jízdy [26]. Hlavní vstupní parametry byly importovány ze záznamů reálných závodních jízd získaných od dvou různých jezdců (z telemetrické jednotky současného vozidla). G-G diagram s podélným zrychlením na vertikální ose a bočním zrychlením vozidla na horizontální ose je znázorněn na obrázku 28.

Měření bylo provedeno na suché asfaltové závodní dráze s ideálním koeficientem tření [27]. Celková hmotnost vozidla (včetně řidiče) činila 282 kg.



Obrázek 28 G-G diagram z telemetrie vozu

Byly stanoveny tři hlavní podmínky zatížení: kritické zrychlení, zpomalení (brzdění) a kombinace zatáčení a brzdění. Hlavní síly při kontaktu předního kola s vozovkou jsou uvedeny v tabulce 4.

| Zátěžná stav | Bod kontaktu pneumatiky s vozovkou | | | Brzdový kotouč | Brzdový třmen |
|------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|----------------|---------------|
| | F_x [N] | F_y [N] | F_z [N] | M_y [N·m] | F_z [N] |
| Akcelerace | 51 | -82 | 674 | | |
| Brzdění | 2268 | -106.5 | 864 | 380 | 4589 |
| Kombinace brzdění a zatáčení | -3077 | 4432 | 2891 | 380 | 4589 |

Tabulka 4 Hodnoty zatížení pro zkoumané zátěžné stavy

Okrajové podmínky byly definovány na 1D prvky (remote points) reprezentujících nápravu. Přehled okrajových podmínek je shrnut v následující tabulce s odkazem na obrázek 26.

| | Posunutí [mm] | | | Rotace [°] | | |
|--------------------------------|---------------|---|---|------------|------|------|
| | x | y | z | x | y | z |
| B - Tlačná vzpěra 1 (push rod) | 0 | 0 | 0 | free | free | 0 |
| E - Spodní rameno 1 | 0 | 0 | 0 | free | free | free |
| F - Spodní rameno 2 | 0 | 0 | 0 | free | free | free |
| H - Tyč řízení | 0 | 0 | 0 | free | free | free |
| I - Horní rameno 1 | 0 | 0 | 0 | free | free | free |
| J - Horní rameno 2 | 0 | 0 | 0 | free | free | free |

Tabulka 5 Definice okrajových podmínek výpočtového modelu

4.1.4 Strukturální analýza současného provedení těhlice

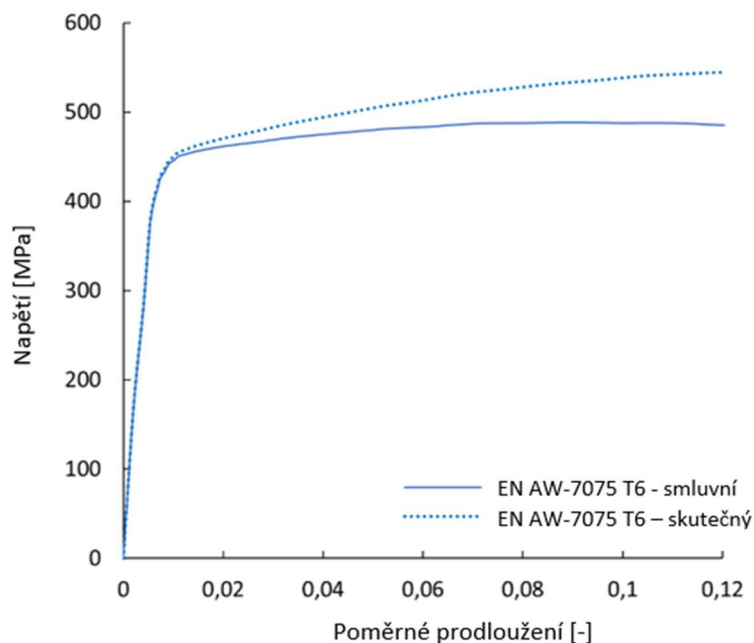
Současné provedení těhlice bylo navrženo pro technologii výroby tříosou CNC frézku z monobloku hliníkové slitiny EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5). Hmotnost současného provedení těhlice, která byla použita v celé závodní sezóně činí 0,443 kg.

Pro stanovení mechanických vlastností materiálu byla provedena experimentální měření vzorků v tahu podle normy ISO 6892-1:2016. Vzorky byly vyrobeny z desky o dostatečné tloušťce (110 mm) pro výrobu těhlice. Jednoosé tahové zkoušky byly provedeny na elektromechanickém zkušebním stroji Zwick-Roell Z250 vybaveném siloměrnou buňkou 5 kN a vzorkovací frekvencí 20 Hz. V tabulce 6 jsou uvedeny hlavní mechanické vlastnosti materiálu.

| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------|---------|
| ρ [kg/m ³] | 2810 |
| E [MPa] | 71.2 |
| ν [-] | 0.29 |
| $R_{p0.2}$ [MPa] | 373 |

Tabulka 6 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW-7075 T6

Smluvní a skuteční diagram tahové zkoušky materiálu EN AW-7075 T6 jsou zobrazeny na následujícím grafu.

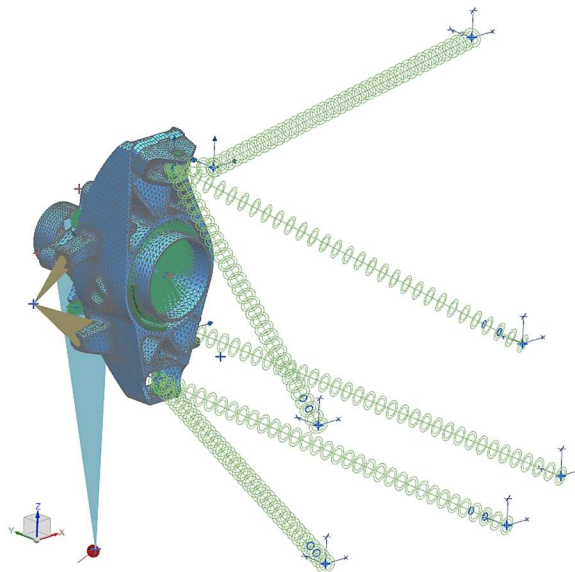


Obrázek 29 Smluvní a skuteční tahový diagram materiálu EN AW-7075 T6

Tuhosti stávající těhlice byla vyhodnocena z výsledků strukturální analýzy. Pro přípravu výpočtového modelu a samotnou simulaci byl použit software Siemens Simcenter 3D (verze 1888) a nelineární řešič NX Nastran (Sol 401 Multi-Step Nonlinear) [28].

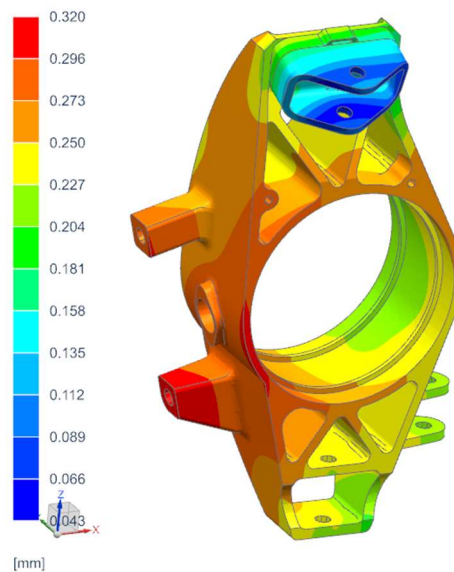
Model těhlice byl analyzován s využitím 3D sítě s tetraedrickými prvky druhého řádu (CTETRA10) o relativní velikosti 3 mm. Pro analýzu závěsů nápravy byly použity 1D sítě (prvky CBEAM). Analýza zahrnovala materiálovou nelinearitu a geometrické kontakty mezi komponentami, jako jsou ložiska, horní vidlice závěsu a další, včetně předpětí šroubů. Předpětí šroubů bylo zvoleno tak, aby odpovídalo 0,7 maximálního povoleného tahového napětí ve střední části šroubu [29].

Výpočtový model (FEM) s aplikovanými okrajovými podmínkami je prezentován na obrázku 30. Tato analýza poskytuje detailní přehled o chování komponent v rámci zadaných podmínek a umožňuje identifikovat klíčové oblasti pro optimalizaci. Výsledky této analýzy také poslouží k následnému porovnání s výsledky optimalizovaného těhlice.



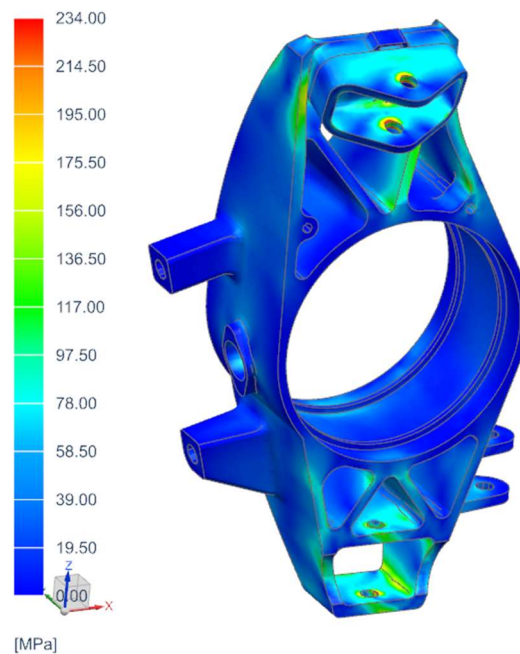
Obrázek 30 FEM model současného řešení sestavy těhlice

Z výsledků strukturální analýzy byl určen jako nejkritičtější stav kombinace brzdění a zatáčení. Obrázek níže zobrazují velikosti posunutí, kdy největší posunutí na komponentě bylo zjištěno v oblasti spodního uchycení brzdového třmenu.



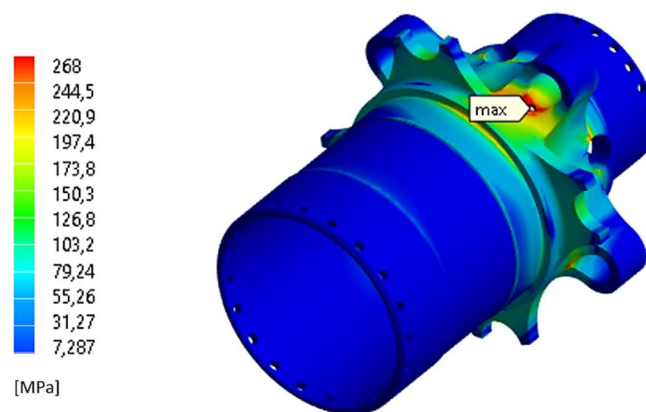
Obrázek 31 Velikosti posunutí současného řešení pro nejkritičtější případy zatížení (kombinované brzdění a zatáčení) [mm]

Maximální napětí podle Von-Misesovy teorie, dosahující hodnoty přibližně 220 MPa, bylo lokalizováno v blízkosti pravého žebra spodního ramene, což vedlo k výpočtu bezpečnostního faktoru 1,7. Obrázek 32 zobrazuje výsledky Von-Misesova napětí pro nejkritičtější zatěžovací případ.



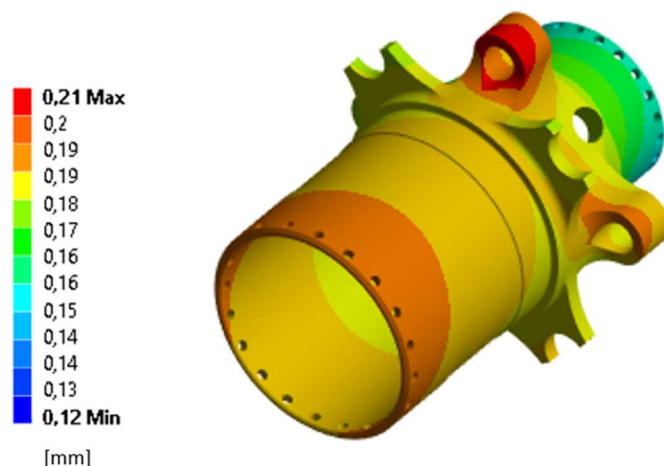
Obrázek 32 Napětí (Von-Mises) v současném řešení pro nejkritičtější případy zatížení (kombinace brzdění a zatáčení) [MPa]

Stávající řešení náboje, vykazuje maximální redukované napětí (Von-Mises) 268 MPa v oblasti za otvorem pro čep kola. Faktor bezpečnosti je tomto případě roven 1,3. Rozložení napětí je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 33 Rozložení redukované napětí pro stávající řešení náboje

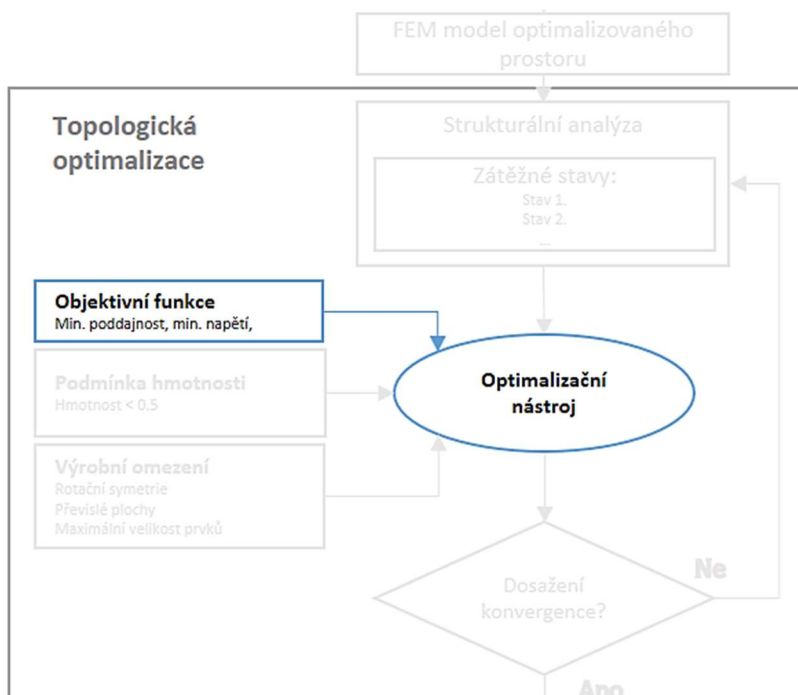
Náboj se při tomto kritickém zatížení deformuje o 0,21 mm v okolí díry čepu kola.



Obrázek 34 Deformace stávající řešení náboje při kritickém zatížení

4.1.5 Topologická optimalizace ANSYS

Topologická optimalizace je typem strukturální optimalizace využívající obecné matematické metody aplikované při návrhu struktur, součástí nebo systémů, kde cílem je najít optimální rozložení materiálu v daném prostoru pro maximální výkon za určitých omezení [30]. Tento proces se obvykle provádí pomocí iterativních algoritmů, které postupně upravují topologii návrhu tak, aby splňovaly požadavky na výkon a efektivitu [31].



Obrázek 35 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Density-based optimalizace

Tato metoda optimalizace pracuje s distribucí pseudo-hustoty materiálu v návrhovém prostoru. Hustota materiálu v každém elementu je považována za proměnnou, která se může měnit od 0 („žádný“ materiál) do 1 („plný“ materiál). Tento přístup umožňuje hladké přechody mezi

materiálem a prázdným prostorem, což je klíčové pro dosažení gradace materiálu v konečném návrhu [32].

Cílem optimalizačního algoritmu je určitou objektivní funkci (například celkovou hmotnost, nebo tuhost struktury) s danými omezeními. Obecná forma optimalizačního algoritmu může být vyjádřena takto:

$$\min_{\rho} F(x) \quad (17)$$

$$F(x) = \sum_{e=1}^N \rho_e(x) V_e \quad (18)$$

kde $F(x)$ je objektivní funkce (například hmotnost), ρ_e je pseudo-hustotě je hustota materiálu ve vztahu k vektoru návrhových proměnných x v elementu e a V_e je objem elementu.

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

kde g_i reprezentuje jednotlivá omezení aplikovaná na model a m je počet těchto omezení [33].

Level-set optimalizace

Tato metoda nabízí výhody při hledání optimálních tvarů s hladkými hranicemi a neporézními oblastmi materiálu, což ji činí vhodnou pro topologickou optimalizaci (Hidaka et al., 2014)[34]. Tato metoda využívá matematický koncept známý jako Level-set metoda, který umožňuje přirozeně zpracovávat topologické změny během šíření rozhraní, což je pro optimalizaci topologie konstrukce zásadní.

Dále byla metoda Level-set integrována s různými přístupy, jako je přístup evoluční strukturální optimalizace (ESO) a schéma pevného izotropního materiálu s penalizací (SIMP), aby se zlepšila topologická optimalizace kontinuálních struktur (Wu & Wu, 2017) [35]. Metoda byla také rozšířena o zahrnutí omezení objemu a napětí, čímž se dále rozšiřuje její použitelnost v topologické optimalizaci (Qu et al., 2017) [36].

Základem Level Set-based topologické optimalizace je následující funkce:

$$\phi(x, t) \quad (20)$$

kde x je prostorový bod a t je čas. Funkce ϕ je definována tak, že rozděluje prostor na dvě oblasti:

- Pozitivní region: kde $\phi(x, t) > 0$, materiál je zachován.
- Negativní region: kde $\phi(x, t) < 0$, oblast bez materiálu.

Rozhraní mezi materiálem a prázdnotou je definováno jako množina bodů, kde:

$$\phi(x, t) = 0 \quad (21)$$

Evoluce rozhraní je řízena Hamilton-Jacobi rovnicí:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + V|\nabla \phi| = 0 \quad (22)$$

kde V je rychlost normálového pohybu rozhraní.

V závěrečném shrnutí obou metod lze říci, že metoda density-based pracuje s distribucí materiálové hustoty v rámci optimalizované oblasti, kde materiálové vlastnosti jsou modelovány na základě stupně pseudo-hustoty každého elementu. Tento přístup umožňuje plynulou změnu mezi materiálem a prázdným prostorem, ale může vést k vzniku nejasných hranic mezi materiálovými oblastmi.

Na druhé straně, metoda Level-set využívá implicitní funkce k definování rozhraní mezi materiálem a prázdným prostorem, poskytující přesnější a čistší definici hranic [37]. Tato metoda je zvláště vhodná pro zacházení s komplexními topologickými změnami, jako je spojování a oddělování komponent, což je omezení density-based přístupu. Výsledkem je, že metoda Level-set obvykle nabízí lepší kontrolu nad geometrií optimalizované struktury, zatímco density-based metoda je často jednodušší na implementaci a výpočetně méně náročná.

Topologická optimalizace sestavy těhlice a náboje kola metodou Density-based

Pro účely této práce jsou realizovány TO využívající výše popsanou metodu Density-based. Hlavním cílem TO je v prvním případě minimalizovat poddajnost navrhované komponenty, zatímco v případě druhém je prioritou minimalizace napětí. Jako klíčové omezení pro simulace je stanovena maximální hmotnost komponent.

V průběhu výzkumu byla provedena řada simulací s různými nastaveními parametrů výpočtových modelů (FEM), přičemž byla zohledněna specifika aditivní výroby, jako jsou omezení týkající se prevence převislých ploch, minimalizace a maximalizace toků materiálu a další relevantní faktory.

V rámci této práce budou podrobně diskutovány pouze ty varianty, které podle předběžných výsledků v oblasti napětí a deformace vykazovaly slibné předpoklady pro další verifikační analýzy.

Tento přístup umožňuje zaměřit se na nejperspektivnější řešení, která poté mohou být podrobněji analyzována a verifikována s ohledem na splnění stanovených cílů a omezení.

Cílová (objektivní) funkce – minimalizace poddajnosti

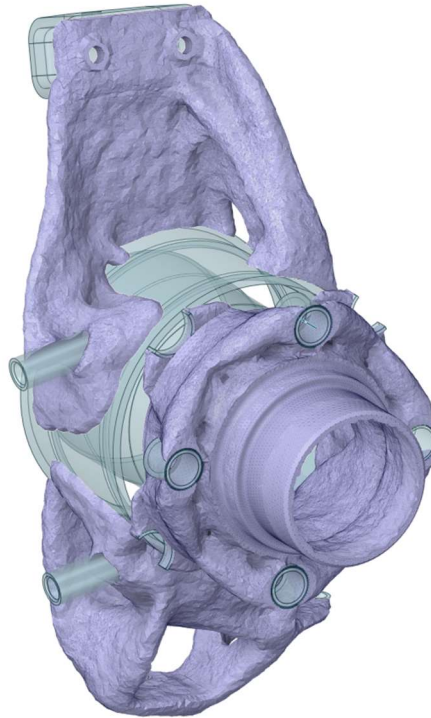
Cílem této topologické optimalizace je minimalizace poddajnosti, jinými slovy dosažení maximální tuhosti konstrukce při zadaných omezeních. Simulace ve svém výsledku zohledňuje všechny tři zátěžné stavy (akcelerace, brzdění, brzdění a zatáčení) rovnocenně, tedy s váhovým faktor 1 pro každý ze zátěžných stavů.

Nastavení analýzy je shrnuto v následující tabulce:

| | | |
|---------------------------------|------------------|---|
| Maximální počet iterací | 500 | |
| Minimální normalizovaná hustota | 0,001 | |
| Přesnost konvergence | 0,1 % | |
| Penalizační faktor | 3 | |
| Maximální hmotnost těhlice | 0,33 kg | |
| Maximální hmotnost náboje | 0,25 kg | |
| Konstrukční omezení | rotační symetrie | 4x rotační symetrie náboje okolo osy rotace |
| | velikost toků | min. 5,75 mm max. 10 mm |

Tabulka 7 Parametry nastavení topologické optimalizace (Density-based, minimalizace poddajnosti)

Výpočtový model obsahuje 1 626 200 uzlů a doba činila 19h 44m při použití 4 fyzických jader a 16 virtuálních jader s procesorem Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2687W v2 @ 3.40 Ghz. Obrázek 35 zobrazuje výslednou geometrii výše popsané topologické optimalizace doplněnou o geometrii (průhledně), která nebyla definována jako optimalizační prostor.



Obrázek 36 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. poddajnosti

Cílová (objektivní) funkce – minimalizace napětí

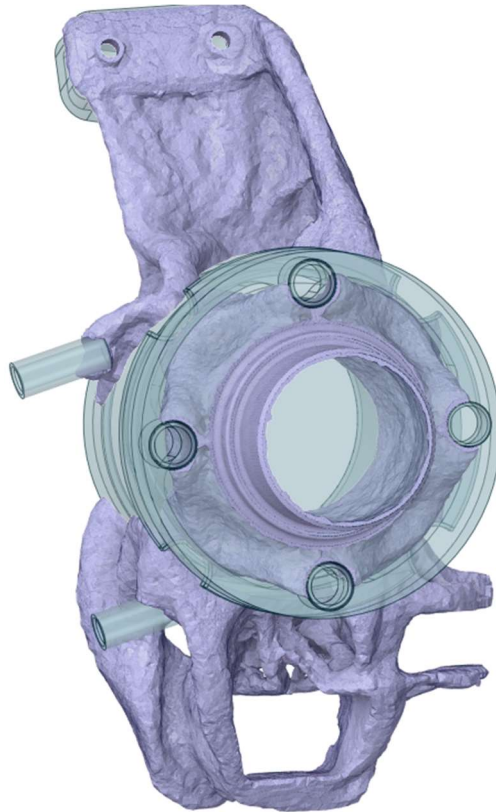
Druhá topologická optimalizace, využívající metodu Density-based, si klade za cíl snížení napětí podle von-Misesovy teorie. V této simulaci jsou zátěžnému stavu – akcelerace, brzdění, kombinace brzdění a zatáčení – přiřazeny váhové faktory v poměru 0,5/0,5/1. To znamená, že zátěžný stav brzdění a zatáčení je považován za dvakrát významnější.

Nastavení analýzy je shrnuto v následující tabulce:

| | | |
|---------------------------------|------------------|---|
| Maximální počet iterací | 500 | |
| Minimální normalizovaná hustota | 0,001 | |
| Přesnost konvergence | 0,1 % | |
| Penalizační faktor | 3 | |
| Maximální hmotnost těhlice | 0,33 kg | |
| Maximální hmotnost náboje | 0,25 kg | |
| Konstrukční omezení | rotační symetrie | 4x rotační symetrie náboje okolo osy rotace |

Tabulka 8 Parametry nastavení topologické optimalizace (Density-based, minimalizace napětí)

Model pro simulaci obsahuje 1 626 200 uzlů a k jeho řešení bylo potřeba 56 iterací. Celková doba výpočtu dosáhla 52 hodin a 56 minut, přičemž bylo využito 16 fyzických a 32 virtuálních jader procesoru Intel Xeon E5-2650 v2 s frekvencí 2.60 GHz. Na obrázku 36 je zobrazena výsledná geometrie, která vznikla z topologické optimalizace popsané výše, s tím, že jsou zde průhledně znázorněny i ty části geometrie, které nebyly součástí definovaného optimalizačního prostoru.



Obrázek 37 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. napětí

4.1.5.1.1 Topologická optimalizace sestavy těhlice a náboje kola metodou Level-set based

Podobný přístup je aplikován i při topologické optimalizaci využívající metodu založenou na Level-set based. Tato technika je výpočetně náročnější, což vedlo k výraznému prodloužení doby při generování prvních návrhů, které nedosahovaly uspokojivé konvergence. Bylo nezbytné odstranit určitá omezení spojená s velikostí materiálových toků, jež byla příčinou nedostatečné konvergence k žádanému řešení.

Nicméně, časová úspora byla zaznamenána v postprocesní fázi, tedy ve fázi vyhlazování optimalizované geometrie. Optimalizované návrhy metodou Level-set vyžadovaly mnohem méně úprav oproti geometriím získaným metodou Density-based. Toto bude podrobněji rozebráno v následující kapitole.

Cílová (objektivní) funkce – minimalizace poddajnosti

Hlavním účelem provedené topologické optimalizace je snížení poddajnosti, což v praxi znamená dosáhnout co nejvyšší tuhosti konstrukce při dodržení daných omezení. V simulaci byly zátěžné stavy – akcelerace, brzdění a kombinace brzdění se zatáčením – ohodnoceny váhovými faktory v rozložení 0,5/0,5/1. To implikuje, že stav kombinovaného brzdění a zatáčení je vnímán jako dvakrát důležitější.

Nastavení analýzy je shrnuto v následující tabulce:

| | |
|----------------------------|--|
| Maximální počet iterací | 500 |
| Přesnost konvergence | 0,1 % |
| Maximální hmotnost těhlice | 0,33 kg |
| Maximální hmotnost náboje | 0,25 kg |
| Konstrukční omezení | rotační symetrie 4x rotační symetrie náboje okolo osy rotace |

Tabulka 9 Parametry nastavení topologické optimalizace (Level-set based, minimalizace poddajnosti)

Byl použit identický výpočtový model, který obsahuje 1 626 200 uzlů, a pro jeho vyřešení bylo zapotřebí 66 iterací. Doba potřebná pro výpočet celkem činila 18 hodin a 47 minut, při použití 8 fyzických a 16 virtuálních jader procesoru Intel Xeon E5-2687W v2 s taktovací frekvencí 3.40 GHz. Obrázek 38 ukazuje optimalizovanou geometrii získanou z topologické optimalizace.



Obrázek 38 Optimalizovaná geometrie Level-set based optimalizace s cílem min. poddajnosti

Cílová (objektivní) funkce – minimalizace napětí

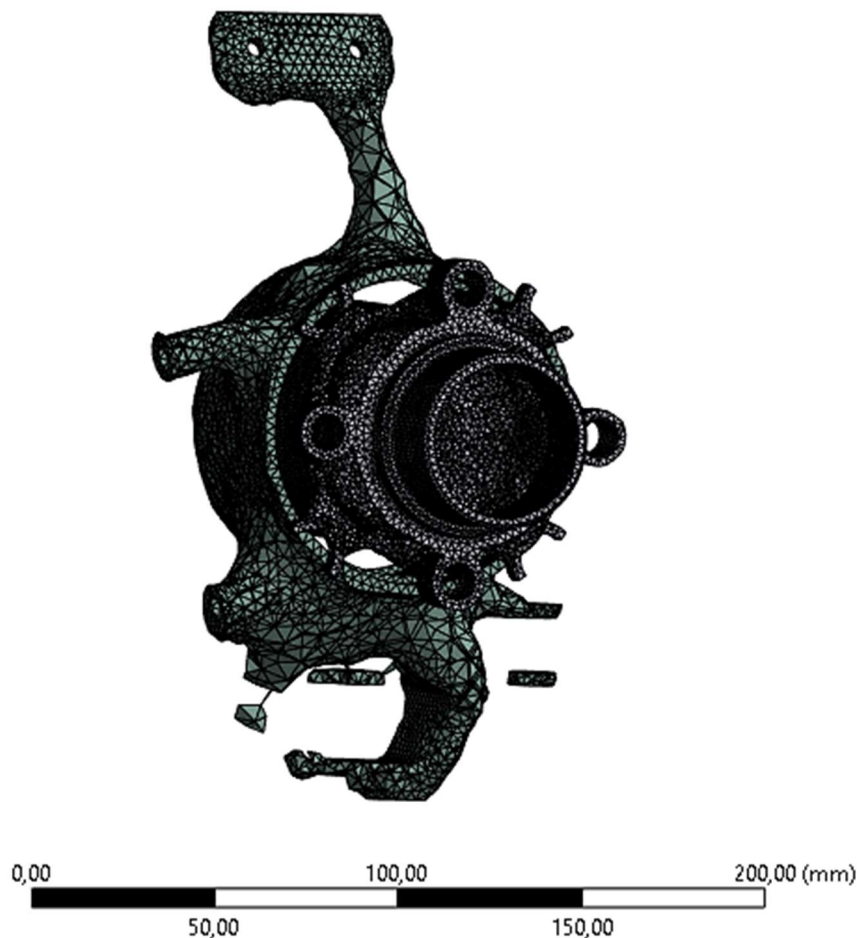
Při optimalizaci zaměřené na minimalizaci Von-Misesova napětí byly využity metody založené na Level-set based. Tato strategie topologické optimalizace se však setkala s výpočetními výzvami a nestabilitou, zejména při její kombinaci s cílovou funkcí zaměřenou na minimalizaci napětí. Abychom dosáhli konvergence výpočtu v přijatelném čase, bylo nezbytné upravit nastavení výpočtových sítě.

Software ANSYS 2023 R1 nabídl beta funkci, která umožňuje zmenšování velikosti elementů sítě během výpočtu. Tato funkce umožňuje zahájit proces s hrubější FEM, což by teoreticky mělo urychlit první iterace výpočtu. Přesto tento přístup v našem případě nevedl k uspokojivým výsledkům, neboť došlo k předčasnému odstranění materiálu z kritických částí konstrukce již v raných fázích iterací.

Přes tyto obtíže bylo dosaženo konvergence a nalezeno pseudo-řešení daného problému. Pro těhlici byla použita *FEM* sestavená z elementů druhého řádu, se základní velikostí 2,8 mm a s velikostí elementů 2,3 mm pro oblast náboje. Tento přístup snížil počet uzlů v síti o přibližně dvě třetiny ve srovnání s předchozími výpočty, čímž se počet uzlů redukoval na 595 487.

Při výpočtu byl využit procesor Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2687W v2 @ 3.40GHz, využívajících pro tuto simulaci 8 fyzických a 16 virtuálních jader. I přes výkonnou hardwarovou konfiguraci a menší výpočetní model z hlediska počtu uzlů, celková doba výpočtu dosáhla více než 105 hodin a bylo zapotřebí provést 919 iterací k dosažení pseudo-řešení.

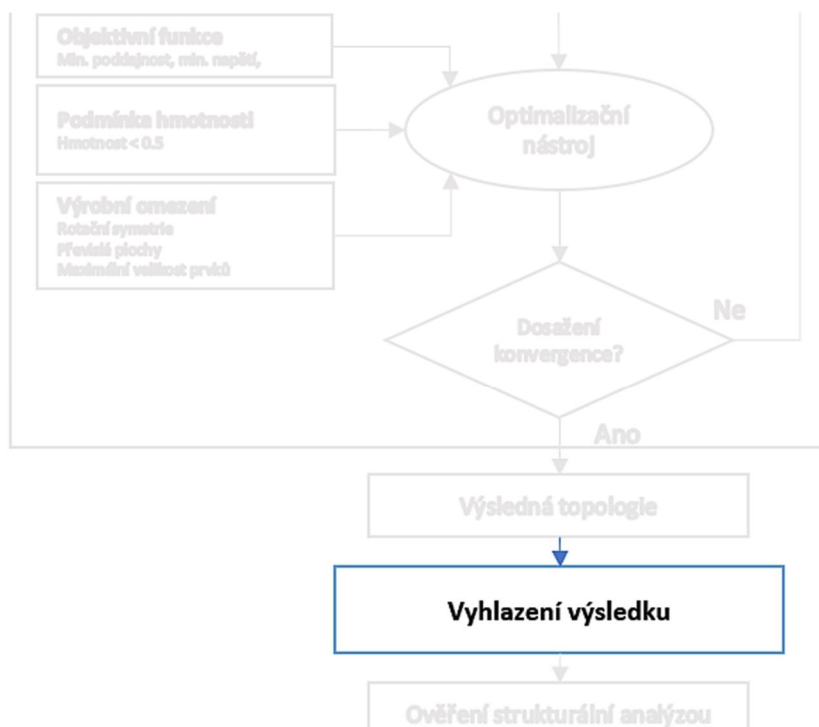
Použití termínu "pseudo-řešení" je zde záměrné, jelikož, jak je zřejmé z obrázku 38, simulace sice našla řešení splňující zadaná omezení, ale výsledná „optimalizovaná„ geometrie neodpovídá konstrukčním požadavkům. Abychom dosáhli uspokojivějšího řešení, bylo by nezbytné použít *FEM* sestavenou z menších elementů. Avšak takový přístup by nejen výrazně prodloužil čas potřebný pro výpočty, ale také by zvýšil velikost datových souborů spojených se simulací, což by mohlo přesáhnout kapacity dostupného hardwarového vybavení. Tento aspekt ukazuje na limity současných výpočetních metod a hardwaru v kontextu složitosti a detailnosti požadovaných simulací v oblasti topologické optimalizace.



Obrázek 39 Pseudo-řešení TO Level-set based s cílem minimalizovat napětí

4.1.6 Úprava návrhu po topologické optimalizaci

Po získání návrhu prostřednictvím topologické optimalizace následuje fáze úpravy výsledné geometrie. Primárním cílem této úpravy je transformace hrubého návrhu na "vyhlazenou" komponentu, která zahrnuje všechny nezbytné přípojovací prvky konstrukce a minimalizuje přítomnost ostrých vrubů a nepravidelností.



Obrázek 40 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Je klíčové, aby upravená geometrie co nejvíce odpovídala reálnému tvaru komponenty v jejím provozním stavu. Tento krok zajišťuje, že následná nezávislá verifikační analýza odráží skutečné provozní podmínky s co nejmenším zkreslením. Tento proces je nezbytný pro zajištění toho, aby návrh nejen splňoval teoretické požadavky, ale byl také prakticky proveditelný a bezpečný při skutečném použití.

Cílem celého procesu návrhu, zahrnujícího přípravu geometrie pro optimalizaci, tvorbu výpočetního modelu, samotnou optimalizaci až po závěrečnou úpravu geometrie a její nezávislou verifikaci, bylo provést všechny tyto kroky v rámci jednoho softwarového řešení. V tomto případě byl použit ANSYS 2023 R1. Tento integrovaný přístup má za cíl zajistit plynulost a efektivitu pracovního procesu, snížit možnost chyb při přenosu dat mezi různými softwarovými nástroji a zvýšit celkovou koherenci a konzistenci návrhového procesu. Použití jediného softwarového řešení umožňuje lepší kontrolu nad celým procesem od počáteční fáze až po finální verifikaci.

V počáteční fázi návrhu, která je popsána v kapitole 4.1.1, nebyly vstupní geometrie pro optimalizaci rozděleny tak, aby obsahovaly separované oblasti pro ložiska a další funkční plochy. Místo toho byl optimalizační prostor definován na úrovni nastavení topologické optimalizace, přičemž oblasti určené pro přípojovací prvky byly z optimalizačního prostoru vyjmuty. Kolem těchto funkčních ploch byla zachována definovaná tloušťka materiálu.

Tento přístup nejen zvyšuje efektivitu procesu, ale také umožňuje lepší kontrolu nad geometrií. Díky tomu je možné přesněji určit oblasti, které mají být optimalizovány, a zároveň zachovat nezbytné

strukturní prvky a připojovací plochy, které jsou kritické pro funkčnost a integritu celkového designu komponenty.

Proces úpravy geometrie v softwaru ANSYS SpaceClaim zahrnuje několik klíčových kroků, které zajišťují, že konečná geometrie bude odpovídat požadovaným specifikacím a bude připravena pro nezávislou verifikační analýzu. Tento postup lze shrnout do následujících kroků:

1. **Kontrola a oprava importované facetové geometrie z TO:** Tento krok zahrnuje důkladnou kontrolu importované geometrie, přičemž se zaměřuje na odhalení a opravu potenciálních nedostatků. Prověřují se aspekty jako jsou průniky facet (plošek), přítomnost otvorů v geometrii, správná orientace normál facet a další podobné problémy. Cílem je zajistit, že geometrie je bez chyb a připravena pro další zpracování.
2. **Opláštění geometrie pomocí funkce „Shrinkwrap“:** V tomto kroku je geometrie obalena pomocí funkce „Shrinkwrap“. Tato funkce slouží k prvnímu vyhlazení geometrie a normalizaci velikosti facet, což je důležité pro zajištění konzistence mezi geometrií a velikostí elementů použitých v následné nezávislé verifikační analýze.
3. **Vyhlazení požadovaných ploch geometrie:** Tento krok zahrnuje důkladné vyhlazení specifických ploch geometrie. Cílem je odstranit jakékoli nerovnosti nebo ostré hrany, které by mohly ovlivnit funkčnost nebo strukturní integritu komponenty.

Ve druhém kroku procesu úpravy geometrie v ANSYS SpaceClaim byly zaznamenány problémy s deformací některých částí funkčních ploch, což by mohlo negativně ovlivnit následnou verifikační analýzu. Přestože funkce Shrinkwrap nabízí možnost nastavení pro zachování ploch podle ostrých hran, opakovaně docházelo k deformacím určitých částí plochy, a to i při různém nastavení parametrů pro definici těchto ploch.

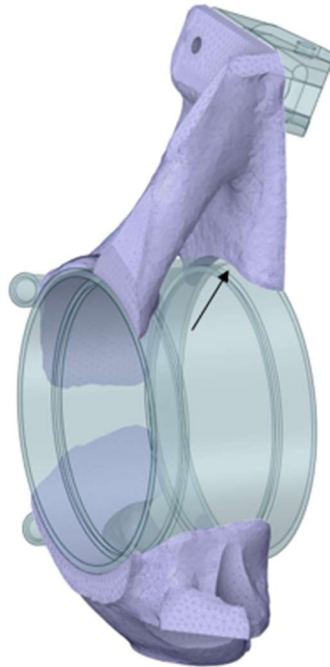
Příčina těchto deformací mohla spočívat v nedokonalé opravě facetové geometrie během prvního kroku, avšak opětovná kontrola geometrie v ANSYS SpaceClaim neodhalila žádné chyby. Pro další ověření byla geometrie exportována a podrobena nezávislé analýze v jiných softwarových nástrojích, které mohou disponovat výkonnějšími algoritmy pro analýzu facetové geometrie. Konkrétně byla geometrie kontrolována a opravována v Autodesk Netfabb Premium 2024 a GOM Inspect 2018. Během těchto inspekcí byly identifikovány a odstraněny další chyby ve facetové geometrii.

Přestože byly tyto chyby úspěšně odstraněny, po následném importu upravené geometrie zpět do ANSYS SpaceClaim se deformace funkčních ploch opakovaně objevovaly. Toto naznačuje, že problém deformací může být způsoben specifiky procesu Shrinkwrap v ANSYS SpaceClaim nebo možná komplikacemi při importu geometrie zpět do tohoto softwaru. V takovém případě by bylo nutné prozkoumat alternativní metody úpravy geometrie nebo potenciálně přehodnotit parametry a postupy používané v procesu Shrinkwrap, aby bylo možné dosáhnout požadovaných výsledků bez deformace funkčních ploch.

Vzhledem k výše zmíněným problémům s deformací funkčních ploch bylo rozhodnuto vrátit se k první fázi procesu, tedy k přípravě geometrie pro topologickou optimalizaci, jak je podrobně popsáno v kapitole 4.1.1. Tento krok ovšem s sebou přináší další výzvy.

Jednou z hlavních problémových oblastí v optimalizované geometrii jsou ostré přechody mezi optimalizovanými a neoptimalizovanými částmi geometrie, jak je vidět na obrázku 41. Tyto ostré přechody mohou v konstrukci působit negativně díky svému vrubovému účinku. To znamená, že jsou nezbytné výraznější úpravy geometrie pro vytvoření plynulých přechodových rádiusů, které by tyto ostré hrany eliminovaly a snížily tak riziko koncentrace napětí a potenciálního selhání konstrukce v těchto oblastech.

Tento proces vyžaduje pečlivé zvážení, jak zachovat funkčnost a strukturní integritu komponenty, tak i zajištění, že výsledná geometrie bude splňovat všechny návrhové a provozní požadavky. Přechodové rádiusy by měly být navrženy tak, aby efektivně snižovaly lokální napětí a zároveň neovlivňovaly klíčové vlastnosti komponenty, jako je její hmotnost nebo pevnost.



Obrázek 41 Problematické napojení optimalizované a neoptimalizované oblasti geometrie

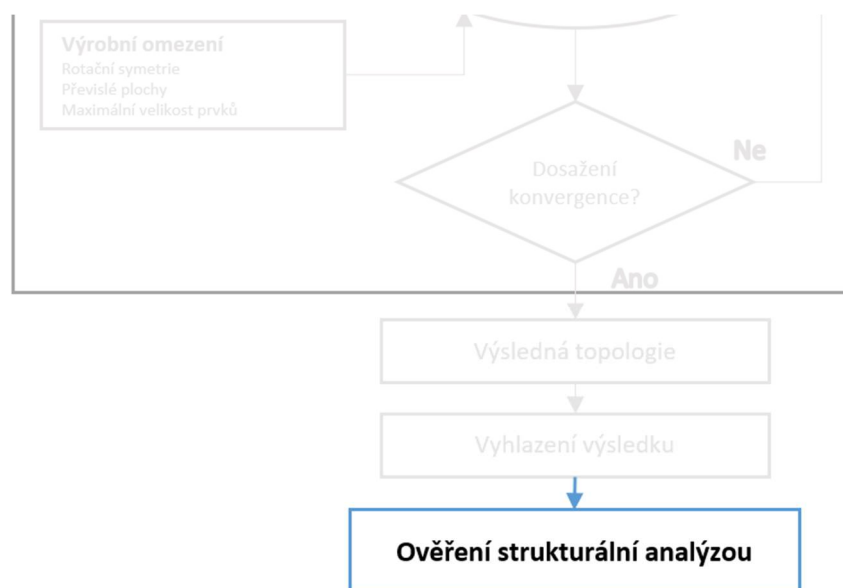
Proces tvorby přechodových rádiusů a spojení optimalizované facetové geometrie s parametrickými neoptimalizovanými částmi vyžadoval použití více softwarových nástrojů, neboť tento krok nebyl efektivně řešitelný v rámci jednoho softwarového prostředí. Celý proces lze rozdělit do následujících kroků:

1. **Export Geometrií z ANSYS:** Optimalizovaná facetová geometrie byla exportována z ANSYS ve formátu .stl, zatímco neoptimalizované části byly exportovány ve formátu .step.
2. **Kontrola a Oprava v GOM Inspection:** Provedena kontrola a oprava optimalizované geometrie v softwaru GOM Inspection 2018.
3. **Import a Spojení v Autodesk Netfabb:** Všechny části geometrie byly importovány do softwaru Autodesk Netfabb Premium 2024. Zde byly jednotlivé části spojeny do dvou samostatných komponent – těhlice a náboj.
4. **Opravy v Netfabb a GOM:** Opravy geometrie byly nejprve provedeny v Netfabb, následně byly odstraněny zbývající chyby geometrie v GOM.
5. **Úpravy v Siemens NX:** Modely byly následně importovány do Siemens NX (verze 2206), kde bylo možné komponenty efektivně vyhladit, vytvořit přechodové rádiusy a sjednotit velikosti plošek facetové geometrie.
6. **Finální Opravy a Import do ANSYS SpaceClaim:** Nakonec byl upravený model znovu opraven v GOM a importován zpět do ANSYS SpaceClaim pro další zpracování.

Tento postup ilustruje potřebu kombinace různých softwarových nástrojů pro dosažení požadované kvality a přesnosti ve složitých návrhových procesech. Každý nástroj přispěl specifickými funkcemi a schopnostmi, které byly využity k řešení konkrétních problémů a výzev spojených s integrací různých typů geometrií.

4.1.7 Nezávislá verifikační analýza

Nezbytným závěrečným krokem v procesu návrhu je nezávislá verifikační analýza po topologické optimalizaci. Topologická optimalizace je výkonný nástroj pro nalezení efektivní geometrie s ohledem na zadané zatěžovací podmínky a materiálové vlastnosti, avšak výsledky optimalizace nemusí vždy přesně odrážet reálné provozní podmínky. Verifikační analýza slouží k potvrzení, že optimalizovaná geometrie je schopna splnit všechny požadavky na pevnost, tuhost, a další funkční vlastnosti v reálném provozním prostředí. Dále, tato analýza odhaluje potenciální slabá místa a nekonzistence v geometrii, které mohou být přehlédnuty během procesu optimalizace. Především pak umožňuje identifikaci a přizpůsobení vlivu faktorů, jako jsou výrobní omezení, materiálové nehomogenity a nejistoty zatížení, které mohou významně ovlivnit skutečný výkon komponenty. Nezávislá verifikační analýza tak představuje nezbytnou pojistku pro zajištění, že navržená komponenta je nejen teoreticky optimalizována, ale také prakticky realizovatelná a bezpečná.



Obrázek 42 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Byly provedeny nezávislé verifikační analýzy dvou optimalizovaných návrhů, které byly vytvořeny pomocí Density-based metody (jedna s cílem minimalizovat poddajnost a druhá minimalizovat napětí), a také byla provedena verifikace návrhu získaného pomocí *TO* využívající Level-set based metodu s cílem minimalizace poddajnosti.

Detaily verifikační analýzy byly specifikovány v souladu se strukturální analýzou, která je podrobně popsána v kapitole 4.1.3. Díky lineárnímu charakteru verifikační analýzy bylo možné modelovanou geometrii reprezentovat pomocí *FEM* složené z menších tetraedrických elementů druhého řádu (CTETRA(10)). Velikost těchto elementů byla stanovena na 1,7 mm pro těhlici a 1 mm pro náboj.

Návrhy jsou vyhodnocovány pro kritický zátěžný stav kombinace brzdění a zatáčení.

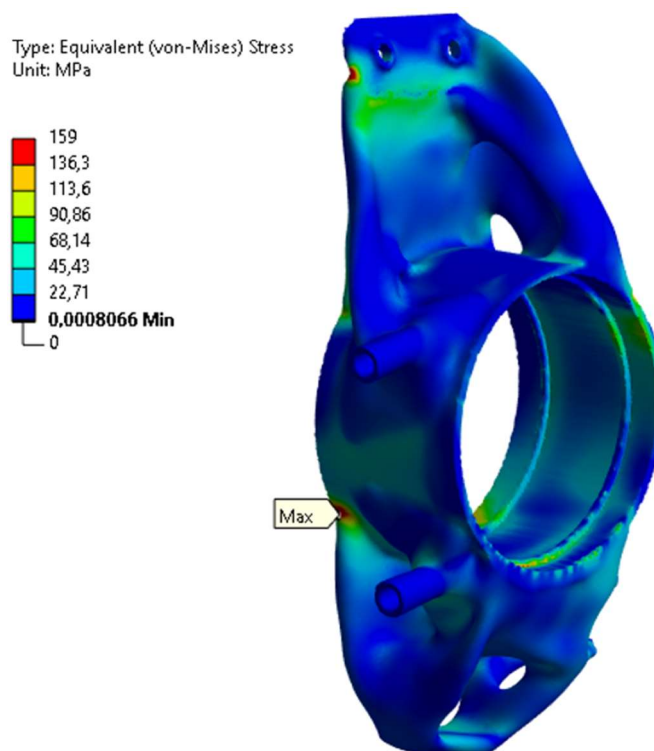
Při porovnání výsledků bude pro jednotlivé návrhy použito následující značení:

| | Metoda topologické optimalizace | Cílová funkce | Označení návrhu |
|----|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1. | Density-based | Min. poddajnost | DBP |
| 2. | Density-based | Min. napětí | DBN |
| 3. | Level-set based | Min. poddajnost | LSBP |

Tabulka 10 Přehled použitého značení návrhových variant

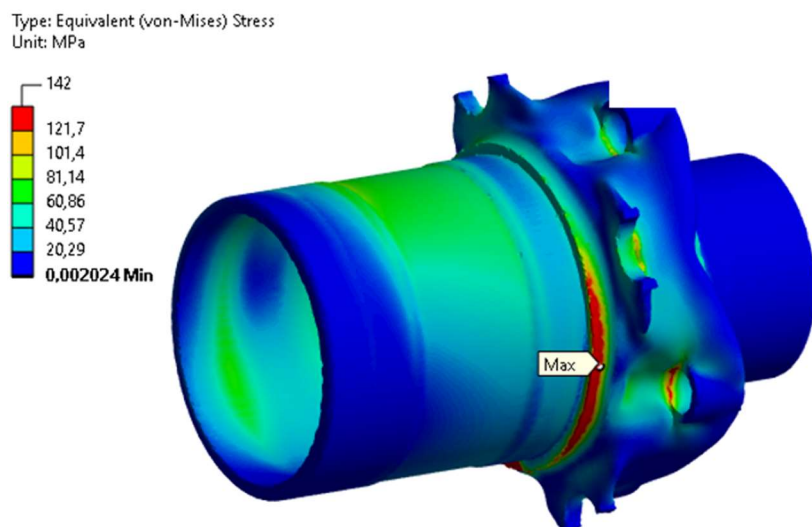
Hodnocení ekvivalentního napětí

V návrhu těhlice DBP bylo dosaženo maximálního ekvivalentního napětí dle Von-Misesova kritéria, a to přibližně 159 MPa. Největší napětí bylo zaznamenáno v oblasti válcovou plochou vnitřního ložiska a dolním ramenem těhlice. Tato lokalizace maximálního napětí je detailně zobrazena na následujícím obrázku.



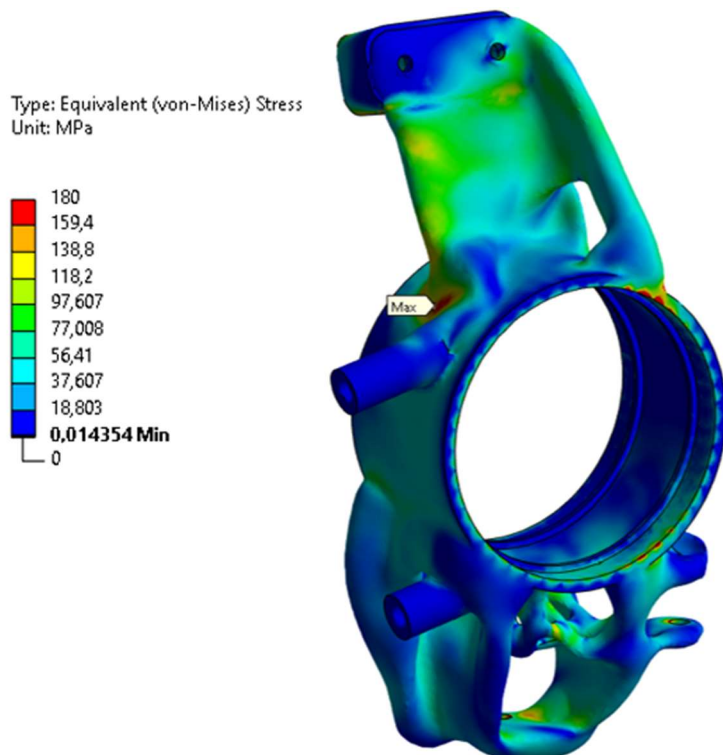
Obrázek 43 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misesse pro návrh těhlice DBP

Maximální ekvivalentní napětí náboje u návrhu *DBP* dosahovalo hodnoty 142 MPa v blízkosti osazení vnějšího ložiska. Na dalším obrázku je možné vidět celkové rozložení napětí na povrchu náboje.



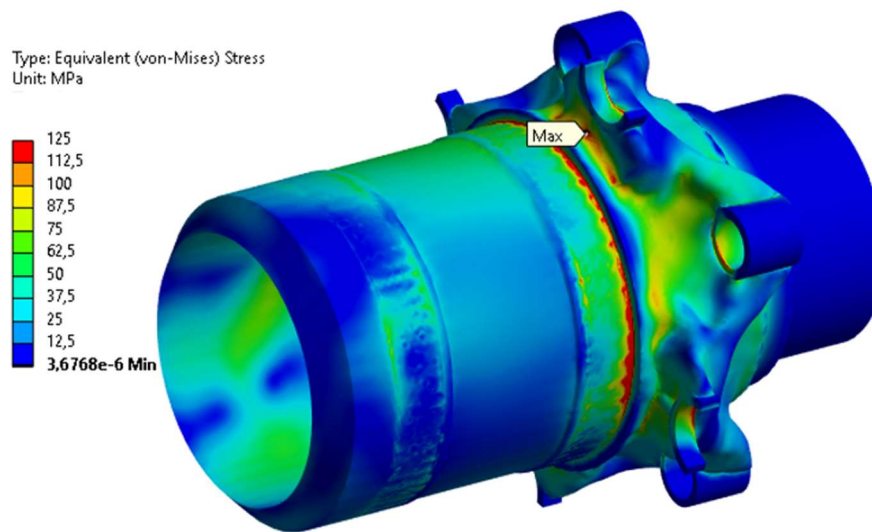
Obrázek 44 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misesse pro návrh náboje DBP

V návrhu těhlice DBN dosáhlo maximální ekvivalentní napětí podle Von-Misesova kritéria hodnoty přibližně 180 MPa. Nejvyšší hodnoty napětí byly lokalizovány v oblasti mezi horním šroubem brzdového třmenu a horním ramenem těhlice, což je detailně znázorněno na následujícím obrázku.



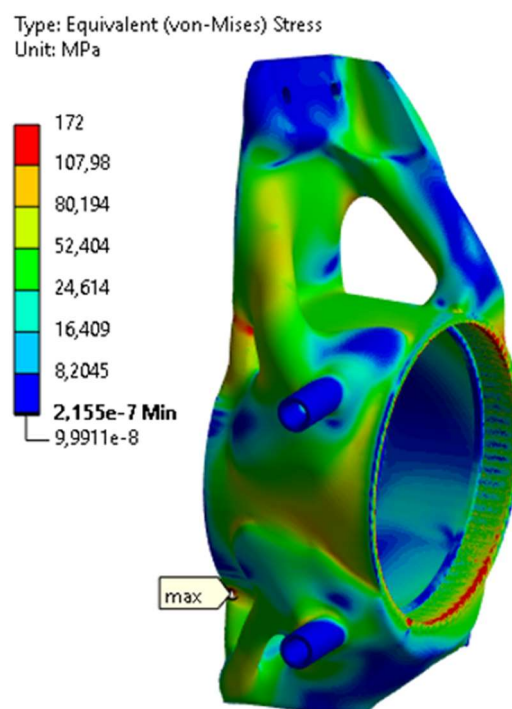
Obrázek 45 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misesse pro návrh těhlice DBN

Maximální hodnoty ekvivalentního napětí (Von-Mises) pro těhlice návrhu DBN dosahují hodnoty okolo 125 MPa. Tato oblast se nachází mezi osazením pro ložisko a uchycením brzdového kotouče. Rozložení napětí na komponentě je vidět na obrázku níže.



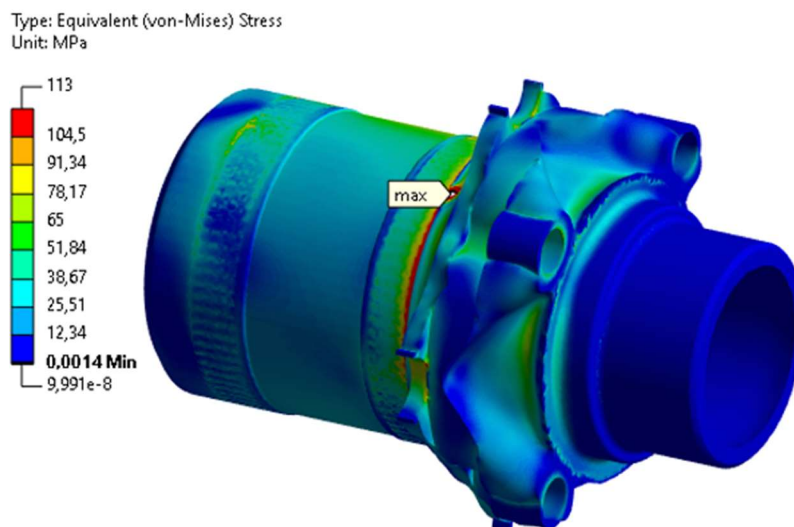
Obrázek 46 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Mise pro návrh náboje DBN

V návrhu těhlice *LSBP* se maxima ekvivalentního napětí nacházejí v oblasti mezi spodní ramenem těhlice a válcovou plochou pro uložení vnitřního ložiska náboje kola. Maximální hodnota napětí je v tom to návrhu okolo 172 MPa.



Obrázek 47 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Mise pro návrh těhlice *LSBP*

Maximální hodnota ekvivalentního napětí náboje návrhu *LSBP* dosahuje hodnot okolo 113 MPa v okolí osazení vnějšího ložiska náboje.



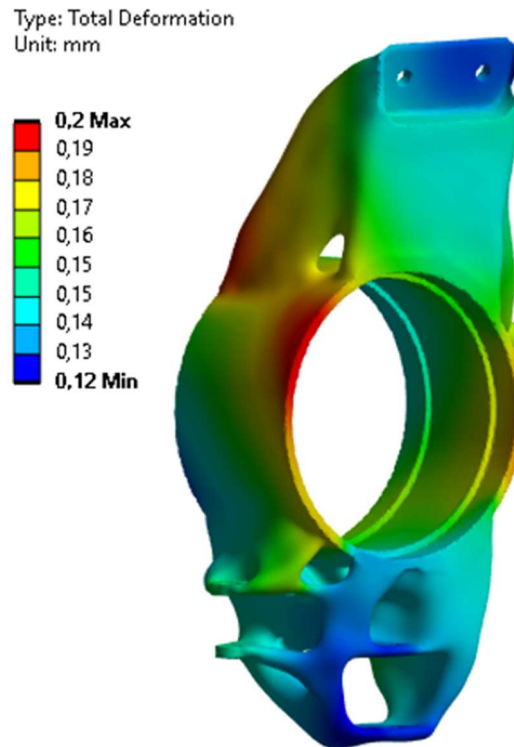
Obrázek 48 Rozložení ekvivalentního napětí podle Von-Misese pro návrh náboje LSBP

Napětí v šesti zkoumaných komponentách byla vyhodnocena mimo oblasti, kde byly definovány kontaktní body nebo okrajové podmínky. Tento přístup zajišťuje, že hodnoty napětí nejsou ovlivněny matematickými podstatou výpočtu, které nemají fyzikální relevanci.

Hodnocení deformace

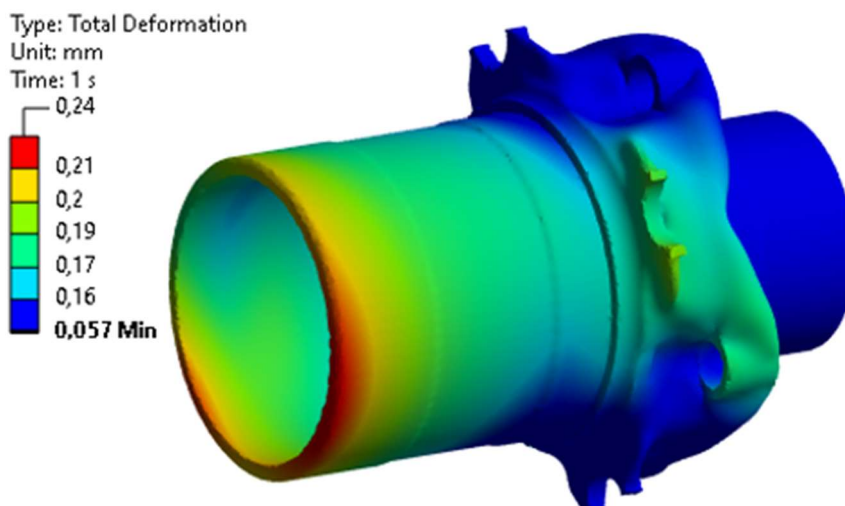
Při srovnání různých návrhů komponent je klíčové také zohlednit maximální deformaci, jelikož má výrazný vliv na jízdní stabilitu vozidla. Vysoká deformace může během jízdy negativně ovlivnit jeho chování, což je nežádoucí z hlediska bezpečnosti a výkonu. Proto je nezbytné tyto aspekty pečlivě analyzovat a optimalizovat v rámci procesu návrhu komponent.

Těhlice návrhu *DBP* vykazuje maximální deformaci 0,20 mm okolí osazení vnitřního ložiska náboje.



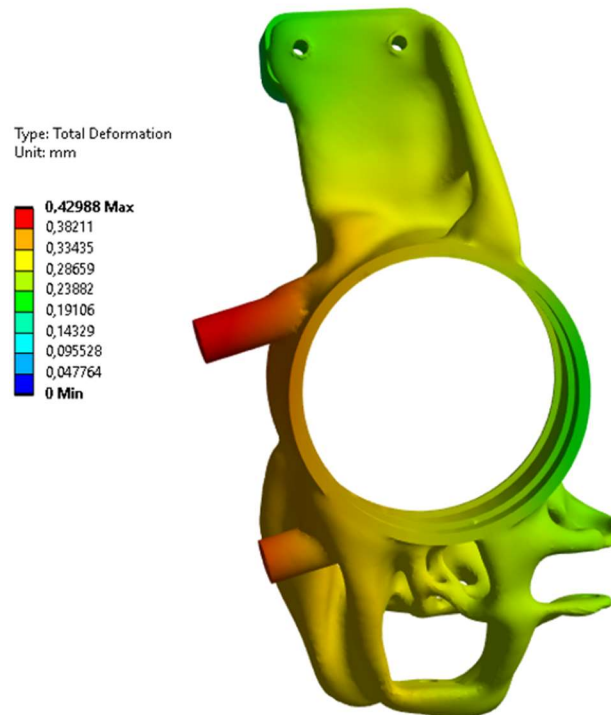
Obrázek 49 Deformace těhlice návrh *DBP*

Ložisko návrhu *DBP* je v oblasti uložení vnitřního ložiska náboje deformováno o 0,24 mm.



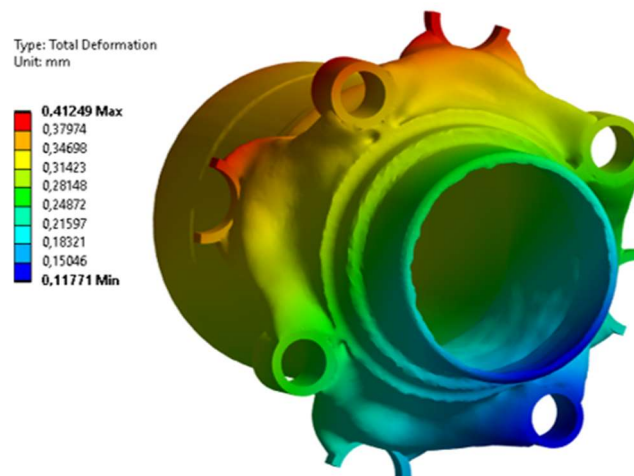
Obrázek 50 Deformace náboje návrh *DBP*

V návrhu těhlice *DBN* dochází k maximální deformaci 0,43 mm v místě uchycení brzdového třmenu.



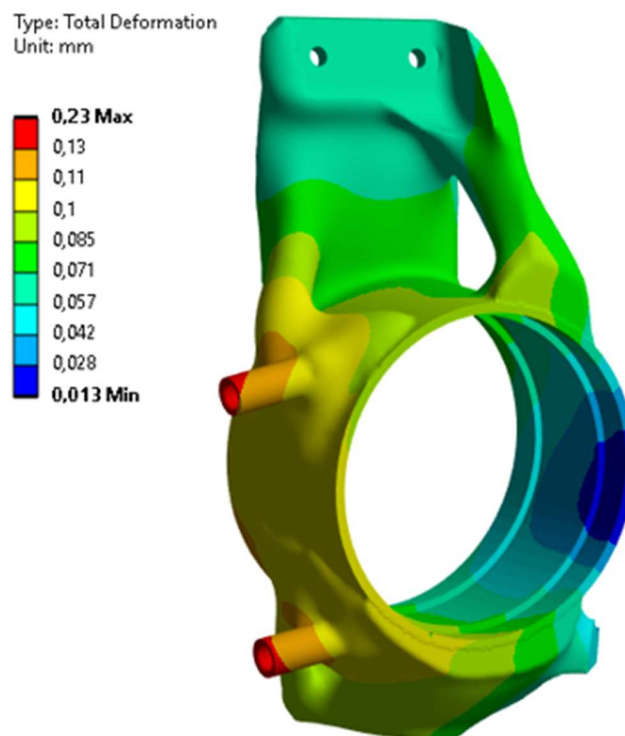
Obrázek 51 Deformace těhlice návrh DBN

Náboj návrhu *DBN* je maximálně deformován v místě uchycení brzdového kotouče o 0,41 mm.



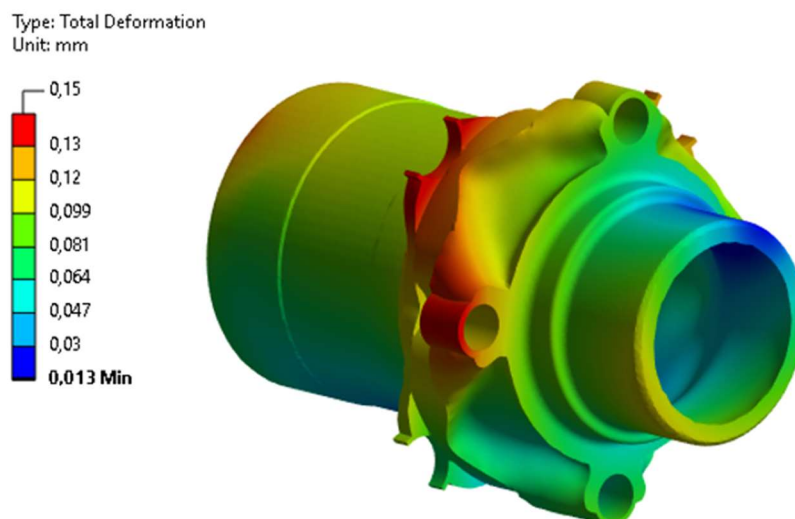
Obrázek 52 Deformace náboje návrh DBN

U těhlice návrhu *LSBP* dochází k maximální deformaci 0,23 mm oblasti uchycení šroubů brzdového třmenu



Obrázek 53 Deformace těhlice návrh LSBP

V případě náboje návrhu LSBP dochází k maximální deformaci 0,15 mm v uchycení brzdového kotouče.



Obrázek 54 Deformace náboje návrh LSBP

Shrnutí a porovnání výsledků optimalizovaných návrhů po verifikační analýze

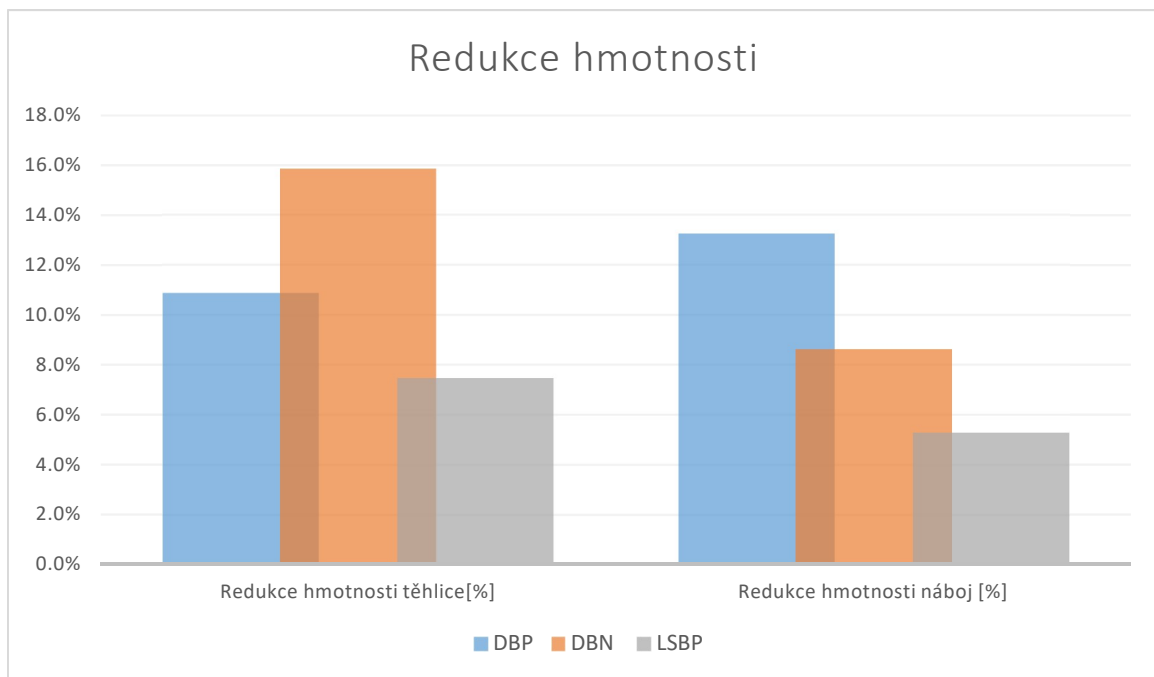
V této kapitole jsou ve strukturované tabulce číslo 11 shromážděny a přehledně prezentovány hodnoty týkající se hmotnosti, maximálních redukovaných napětí Von-Mises a nejvyšších deformací pro každý z optimalizovaných návrhů těhlice a náboje. Tyto hodnoty jsou poté systematicky srovnány se současným provedením těhlice a náboje. Výsledné změny v hodnotách jsou vyjádřeny procentuálně ve vztahu k původnímu designu, přičemž pozitivní změna (například snížení hmotnosti, napětí nebo

deformace) je reprezentována kladnou hodnotou a negativní změna (nárůst hmotnosti, napětí nebo deformace) je zaznamenána jako záporná hodnota.

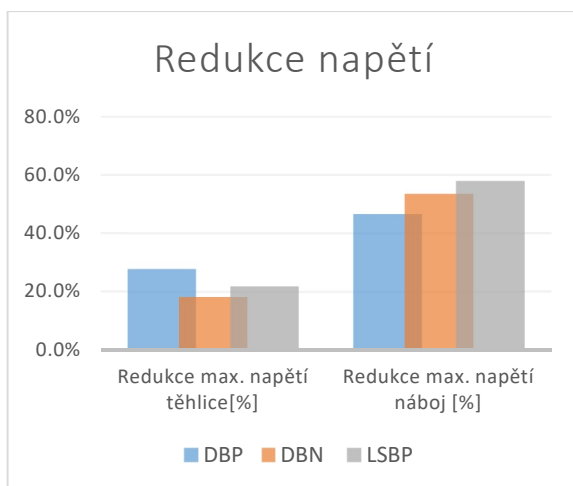
| Parametr | Stávající řešení | | DBP | | DBN | | LSBP | |
|--|------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | těhlice | náboj | těhlice | náboj | těhlice | náboj | těhlice | náboj |
| Hmotnost [kg] | 0,442 | 0,302 | 0,394 | 0,272 | 0,372 | 0,286 | 0,409 | 0,291 |
| Redukce hmotnosti [%] | - | - | 10,9 | 13,2 | 15,8 | 8,6 | 7,5 | 5,3 |
| Max. redukované napětí [MPa] | 220 | 268 | 159 | 143 | 180 | 125 | 172 | 113 |
| Změna max. redukovanéh o napětí [%] | - | - | 27,7 | 46,6 | 18,2 | 53,4 | 21,8 | 57,8 |
| Max. deformace [mm] | 0,32 | | 0,20 | 0,24 | 0,43 | 0,41 | 0,23 | 0,15 |
| Změna deformace [%] | - | - | 37,5 | -14,3 | -34,4 | -95,1 | 28,1 | 28,6 |

Tabulka 11 Souhrn zkoumaných vlastností optimalizovaných návrhů těhlice a náboje

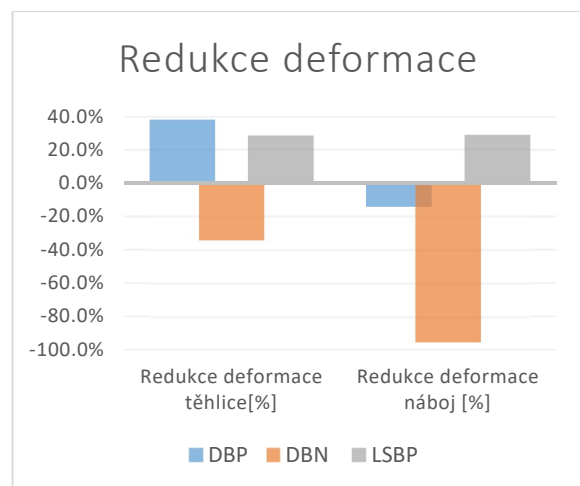
V návaznosti na prezentované hodnoty v tabulce jsou klíčové metriky, jako jsou hmotnost, maximální redukovaná napětí Von-Mises a maximální deformace, dále ilustrovány pomocí následujících grafů, které umožňují rychlejší interpretaci popisujících změn.



Obrázek 55 Grafické srovnání změny hmotnosti optimalizovaných návrhů



Obrázek 56 Grafické srovnání změny maximálního napětí optimalizovaných návrhů



Obrázek 57 Grafické srovnání změny deformace optimalizovaných návrhů

Pro výběr řešení s nevyšším výkonem vzhledem ke stanoveným kritériím je vytvořena matice hodnocení. Každý ze tří návrhů těhlice a tří návrhů náboje je numericky ohodnocen body 1 až 3, kde vyšší bodové ohodnocení odpovídá lepším výsledkům zkoumaného kritéria. Stanoveným kritériím, redukcí hmotnosti, napětí a deformaci je přiřazen váhový faktor 1, 3 nebo 5.

| Těhlice | | | | | | |
|-----------------|-------------|----------|--------|-----------|----------|-----------------------|
| | kritérium | hmotnost | napětí | deformace | Σ | normalizovaná hodnota |
| | váha | 5 | 3 | 1 | | |
| Varianta | DBP | 2 | 3 | 3 | 22 | 0,8 |
| | DBN | 3 | 1 | 1 | 19 | 0,7 |
| | LSBP | 1 | 2 | 2 | 13 | 0,5 |
| | Ideál | 3 | 3 | 3 | 27 | 1 |

Tabulka 12 Matice hodnocení těhlice

Ze zhodnocení zkoumaných návrhů těhlice i náboje dosáhl nejlepších výsledků návrh *DBP*, tedy návrh z topologické optimalizace využívající metodu Density based jejíž cílovou funkcí byla minimalizace poddajnosti.

| Náboj | | | | | | |
|-----------------|-------------|----------|--------|-----------|----------|-----------------------|
| | kritérium | hmotnost | napětí | deformace | Σ | normalizovaná hodnota |
| | váha | 5 | 3 | 1 | | |
| Varianta | DBP | 3 | 1 | 2 | 20 | 0,7 |
| | DBN | 2 | 2 | 1 | 17 | 0,6 |
| | LSBP | 1 | 3 | 3 | 17 | 0,6 |
| | Ideál | 3 | 3 | 3 | 27 | 1 |

Tabulka 13 Matice hodnocení těhlice

4.1.8 Predikce životnosti těhlice a náboje vystavené víceosému namáhání

Komponenty těhlice a náboj kola studentské formulce jsou během provozu vystaveny stochastickému dynamickému zatížení. Kombinované namáhání a přítomnost tvarových nepravidlostí (vrubů) ve struktuře konstrukce vedou k víceosému namáhání.

Pro hodnocení životnosti komponent pod složitým zatěžováním je nutné stanovit omezující předpoklady. V tomto případě bylo stochastické zatížení nahrazeno zatížením harmonickým proporcionálním a asymetrií cyklu $R=0$ (míjivé zatížení). Predikce životnosti byla stanovena pro kritickou kombinaci zatížení brzdění a zatačení.

Pro hodnocení životnosti byla použita hypotéza M-D-C (Margetin-Durka-Chmelko). Kritérium M-D-C navržené v [18, 38] využívá nelineární kombinaci amplitudy smykového napětí a maximální hodnoty normálového napětí působícího na kritické rovině. Kritická rovina je definována jako rovina s maximální amplitudou smykového napětí. Koeficient, který váží hodnotu normálového napětí, je založen na parametrech čistého torze a čistého tahu/kompresie podle Basquinových rovnic.

Životnost, R=0

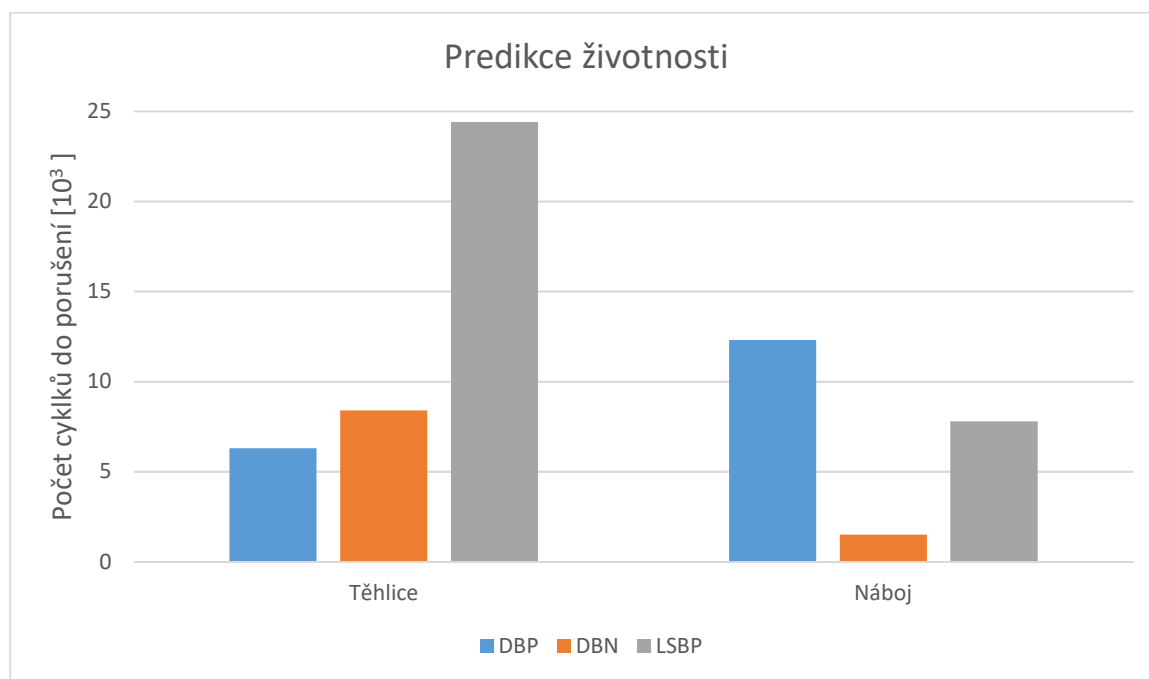
| | DBP | | DBN | | LSBP | |
|-------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | těhlice [10 ³ cyklů] | Náboj [10 ³ cyklů] | těhlice [10 ³ cyklů] | náboj [10 ³ cyklů] | těhlice [10 ³ cyklů] | náboj [10 ³ cyklů] |
| UPI 2.5 % | 18,7 | 36,3 | 25,2 | 4,6 | 71,6 | 23,6 |
| RL 50 % | 6,3 | 12,3 | 8,4 | 1,5 | 24,4 | 7,8 |
| LPI 97.5 % | 2,1 | 4,2 | 2,8 | 0,5 | 8,4 | 2,6 |

LPI – dolní predikční interval, RL – regresní čára, UPI – horní predikční interval

Tabulka 14 Výsledky predikce životnosti

V tabulce 14 je uveden přehled výsledků predikce životnosti posuzovaných variant návrhu těhlice. Uvedeny jsou hodnoty cyklů do selhání pro regresní čáru a pro dolní a horní predikční interval.

Výsledky jsou dále znázorněny v následujícím grafu, kde jsou uvedeny hodnoty odpovídající regresní čáře.



Obrázek 58 Predikovaná životnost navržených komponent – hodnoty RL

Pravidla závodů studentských formulí nařizují návrh a použití závodního vozu pouze pro jednu sezónu, což snižuje požadavek na počet cyklů, kterým musí navržené komponenty odolat.

Navrhované komponenty (těhlice a náboj) jsou, z pohledu bezpečnosti, kritickými částmi vozu a před jejich použitím by mělo být provedeno experimentální ověření životnosti.

4.2 Topologická optimalizace konzoly podjezdové zábrany

Druhá popisovaná případová studie je věnována návrhu konzoly zábrany tramvajového vozu. Podjezdová ochrana je důležitá součástí jak aktivní, tak pasivní bezpečnostní výbavy tramvají. V rámci standardního provozu má za úkol odstraňovat z cesty tramvaje větší překážky, které by mohly vést k jejímu vykolejení v důsledku zaklínění pod vozidlem. V případě pasivní bezpečnosti se podjezdová ochrana uplatňuje zejména při nehodě s chodcem. Pokud dojde k situaci, kdy je chodec po srážce s

tramvají sražen pod vůz, podjezdová ochrana jej zachytí a odkloní od vozidla, což zabraňuje jeho dalšímu zatahování pod tramvaj nebo do oblasti podvozku, kde by mohl utrpět vážná zranění způsobená koly tramvaje.

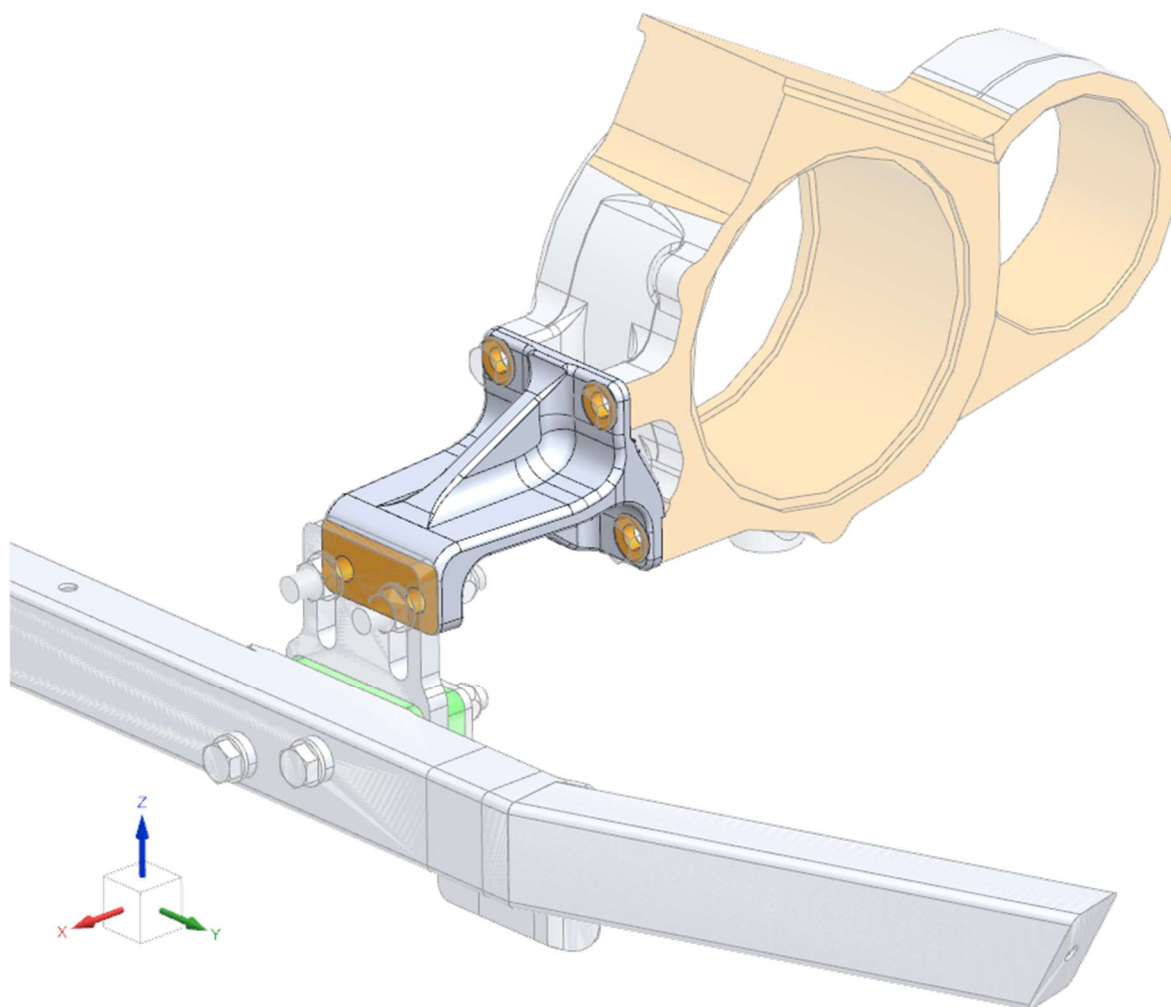


Obrázek 59 Umístění podjezdové zábrany na vozidle

Cílem návrhu je snížení hmotnosti optimalizované konstrukce konzoly podjezdové zábrany.

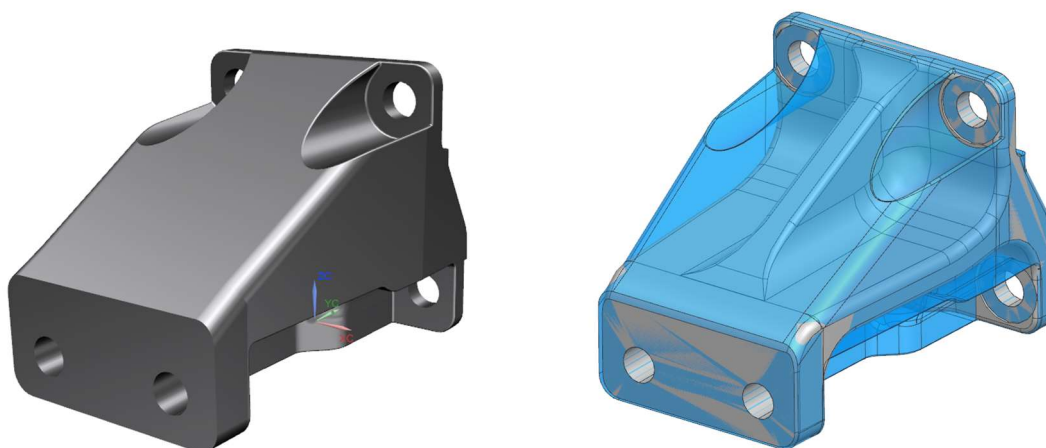
4.2.1 Definice optimalizované geometrie

Úvodní etapa procesu návrhu se zaměřuje na určení geometrie pro topologickou optimalizaci, jak je ilustrováno na obrázku 16 v diagramu procesu návrhu. Geometrie, určená pro topologickou optimalizaci, je definována s ohledem na maximální dostupné rozměry v rámci daného prostoru pro instalaci. Tato geometrie také zahrnuje v úvahu nutnost spojení s ostatními komponentami: pro připevnění konzoly ke kyvnému rameni nápravy jsou použity čtyři šrouby typu M16x35-8.8 a pro uchycení ochranného rámu dva šrouby M16x55-8.8. Na obrázku 59 je představena zkoumaná konzola, přičemž místa, kde dojde ke kontaktu s hlavami šroubů pro připojení k nápravě a plochy pro montáž rámu zábrany, jsou vyznačeny oranžovou barvou.



Obrázek 60 Původní konzola podjezdové zábrany

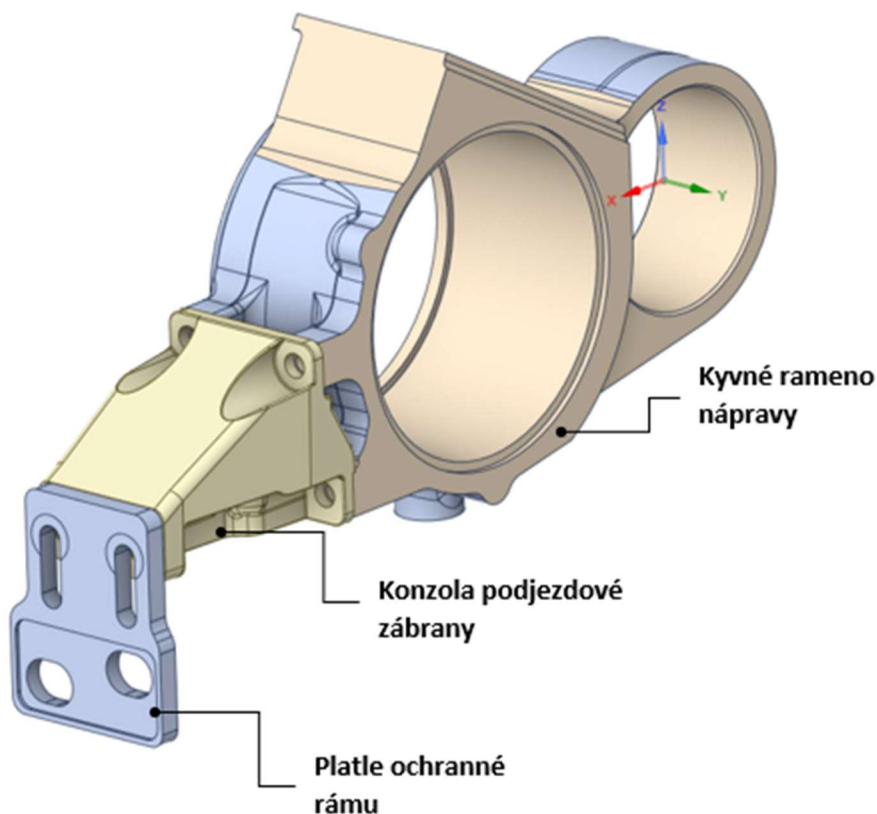
Definovaný optimalizační prostor zobrazený na obrázku níže, má hmotnost 11,284 kg.



Obrázek 61 Optimalizační prostor konzoly podjezdové zábrany

4.2.2 Příprava výpočtového modelu konzoly podjezdové zábrany

Druhým krokem v postupu návrhu komponenty zobrazeném na obrázku 16, je tvorba FEM modelu pro potřeby strukturálních analýz. Obecně platné předpoklady a omezení související s diskretizací vstupní geometrie byly podrobněji diskutovány v první případové studii v kapitole 4.1.2 Příprava výpočtového modelu těhlice a náboje.

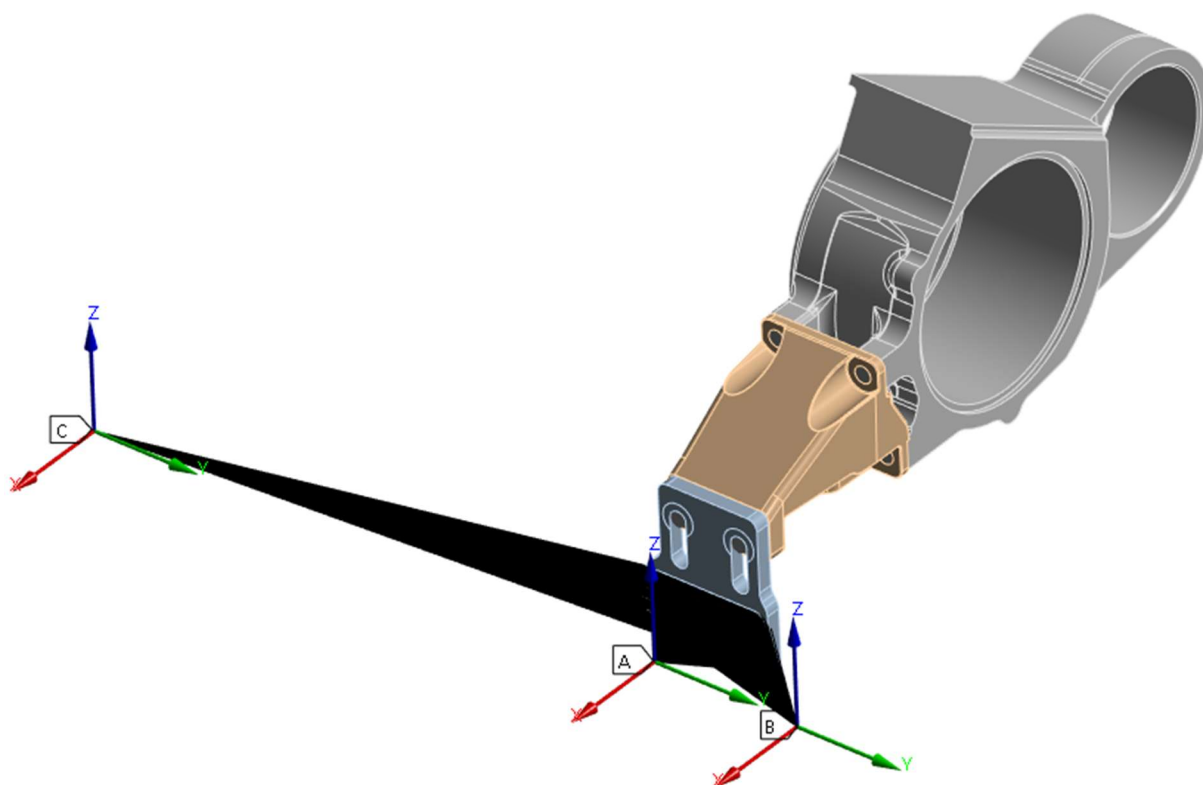


Obrázek 62 Vstupní geometrie

Strukturální analýzy s využitím metody konečných prvků (FEM) jsou prováděny v softwaru ANSYS Mechanical 2023 R1.

Výpočetní modely pro kynné rameno, konzolu podjezdové zábrany a platle ochranného rámu jsou sestaveny z tetraedrických elementů druhého řádu. Velikost elementů v optimalizované oblasti je určena na 3 mm. K definici okrajových podmínek jsou využívány 1D prvky typu Remote point, jímž jsou přiřazeny vlastnosti nosníku. Spojovací prvky (6x šroub M16) jsou nahrazeny jednorozměrnými prvky typu BEAM.

Na následujícím obrázku je bod A představuje umístění hmotného bodu pro ekvivalentní zatížení od poloviny rámu zábrany, bod B je použit pro aplikaci lokálního zatížení před kolem smetadla a bod C je určen pro zatížení, kterému musí smetadlo odolávat po své celé délce.



Obrázek 63 umístění 1-D prvků pro definici zátěžných stavů

Popis zvoleného materiálu

Pro výrobu optimalizované konzoly je použita ocel EOS 316L, W-Nr. 1.4404 dle evropské klasifikace, dle DIN X2CrNiMo 17-12-2. Materiál je ve formě prášku o zrnitosti od cca 20–65 μm (90 % prášku ve velikostech částic v rozmezí 25–45 μm).

| Wt [%] | Fe | Cr | Ni | Mo | C | N |
|--------|------|---------------|---------------|-------------|--------|-------|
| 316L | Rest | 17,00 - 19,00 | 13,00 - 15,00 | 2,25 - 3,00 | < 0,03 | < 0,1 |

Obrázek 64 Materiálové složení oceli EOS 316L

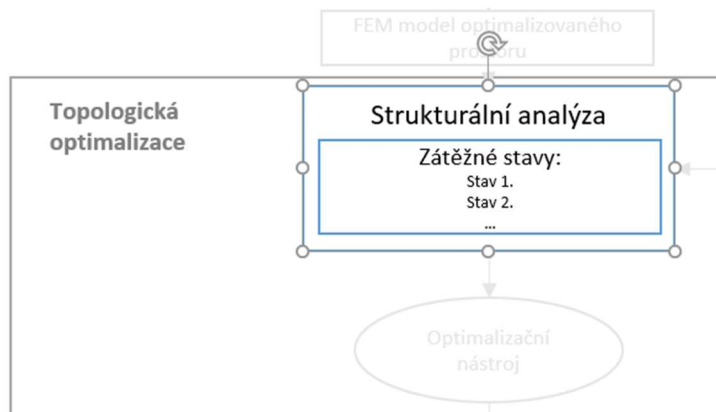
Mechanické vlastnosti oceli 316L vyrobené aditivní technologií jsou shrnuty v tabulce 15.

| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------|---------|
| ρ [g/cm ³] | 7,97 |
| E [MPa] | 182 |
| ν [-] | 0.28 |
| R _{p0.2} [MPa] | 476 |
| R _m [MPa] | 574 |
| A _{5,65} [%] | 13,1 |

Tabulka 15 Mechanické vlastnosti materiálu 316L pro aditivně vyrobená zkušební tělesa

4.2.3 Strukturální analýza konzoly podjezdové zábrany

Posledním krokem předcházející samotné topologické optimalizaci je tvorba strukturální analýzy obrázek 65.



Obrázek 65 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

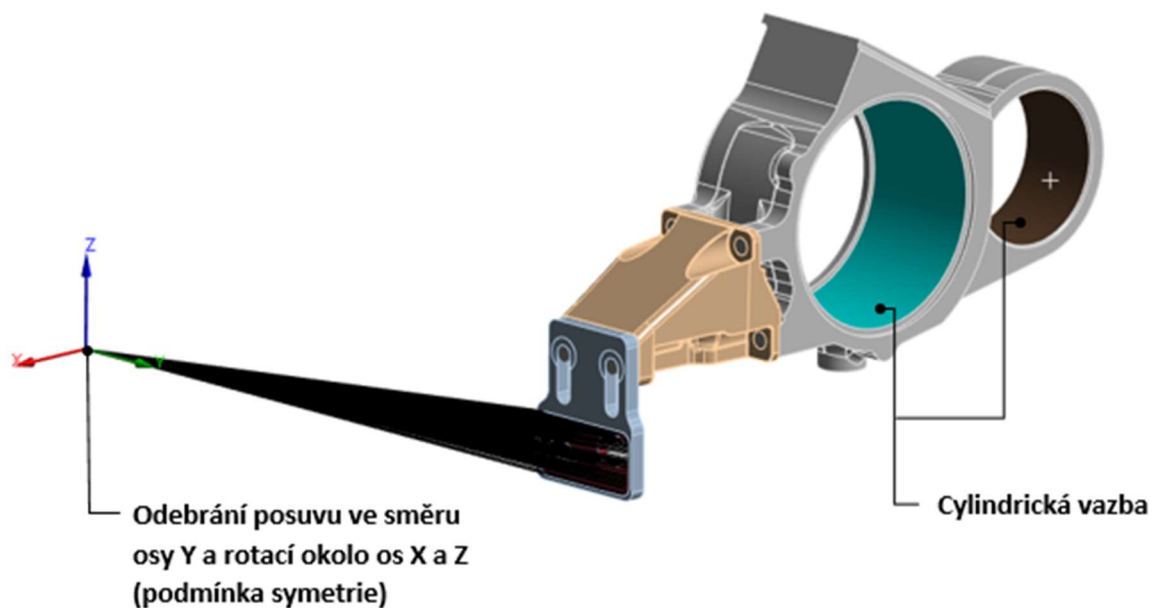
Aplikovaná zatížení jsou vyplynula z požadavků zadavatele. Na šroubová spojení mezi konzolou a kyvným ramenem nápravy a platí ochranného rámu je aplikováno předepnutí 24 kN.

Vyhodnocovány byly následující čtyři zátěžné stavy:

| Zátěžný stav | Pozice A | Pozice B | Pozice C |
|-----------------|----------|------------|-----------|
| | g [-] | F_x [kN] | F_z [N] |
| Z1 | - | 10 | - |
| Z2 | - | - | 10 |
| g _z | 10 | - | - |
| g _{-z} | 10 | - | - |

Tabulka 16 Hodnoty zatížení pro zkoumané zátěžné stavy

Okrajové podmínky byly definovány na Remote point C a na válcové plochy kyvného ramena nápravy dle obrázku níže.



Obrázek 66 Definice okrajových podmínek

4.2.4 Strukturální analýza současného provedení konzoly podjezdové zábrany

Stávající konzola podjezdové zábrany je vyrobena metodou odlévání z materiálu G24Mn6+QT2. Hmotnost současné konzoly je 5,962 kg.

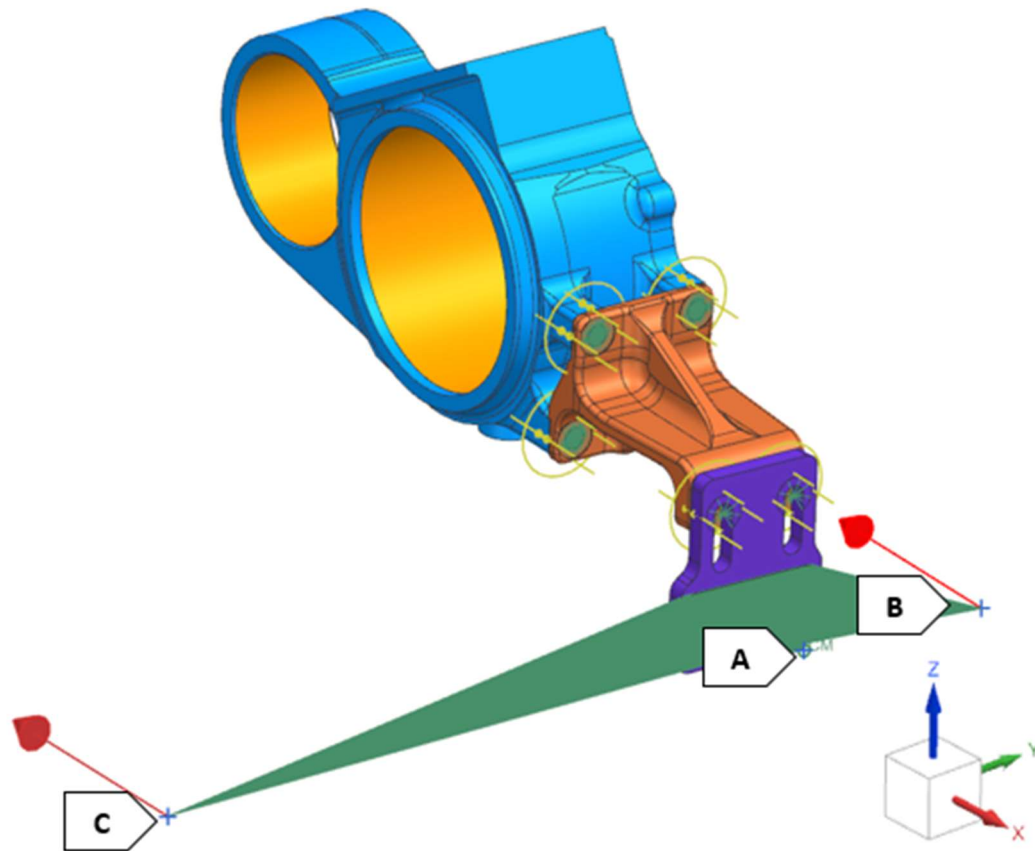
Strukturální analýza byla provedena v softwaru Siemens Simcenter 3D NX (verze 2206), použit je řešič NX Nastran (Sol 101 Linear Statics).

Hodnoty mechanických vlastností uvedené v tabulce 17 jsou převzaty z normy ČSN 42 2709, která je ekvivalentní pro G24Mn6+QT2.

| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------|---------|
| ρ [kg/m ³] | 7830 |
| E [MPa] | 210,2 |
| ν [-] | 0.29 |
| R _{p0.2} [MPa] | 300 |

Tabulka 17 Mechanické vlastnosti materiálu G24Mn6+QT2

Výpočtový model zobrazený na obrázku 67 je definován shodně s modelem popsáním v předcházející kapitole. Silové účinky jsou definovány na pozice A, B a C a zrychlení ve směrech souřadného systému. Šroubová spojení šrouby M16 jsou nahrazeny 1D prvky (označenými žlutě), na která je aplikováno předepnutí 24 kN. Na styčné plochy mezi kyvným ramenem nápravy a konzolou resp., konzolou a platí ochranného rámu je definován kontakt s koeficientem tření 0,1.

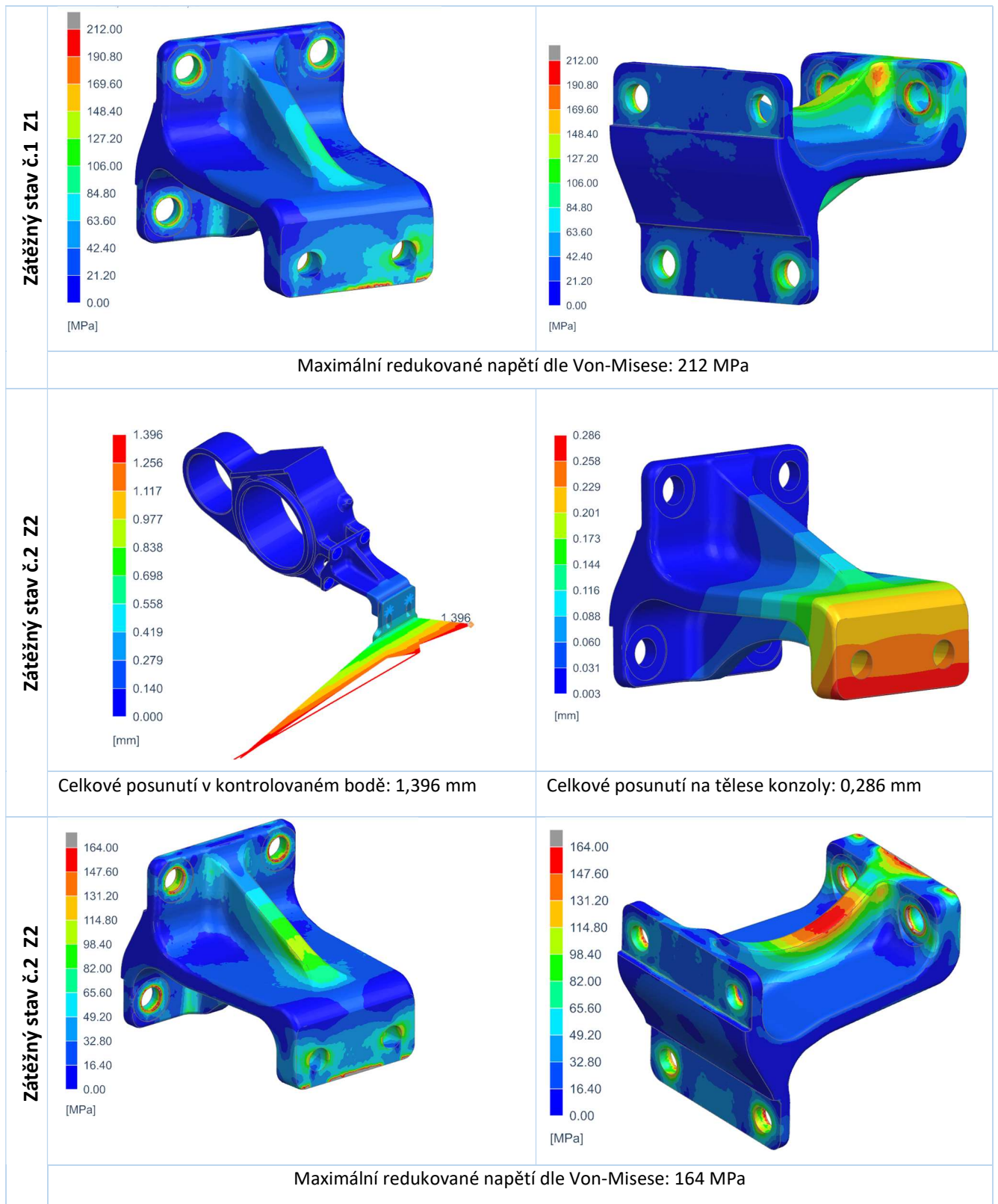


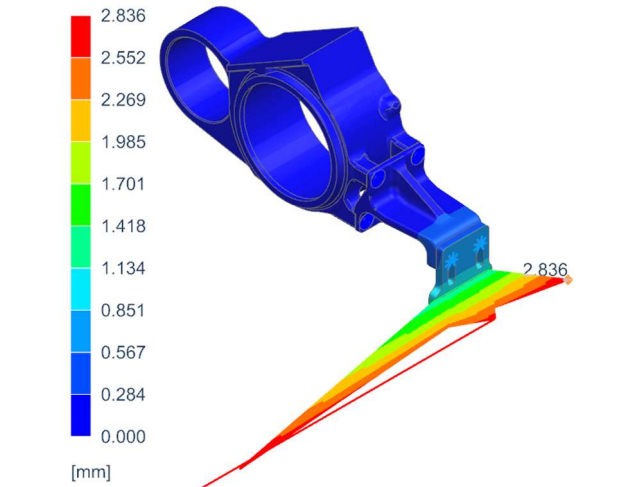
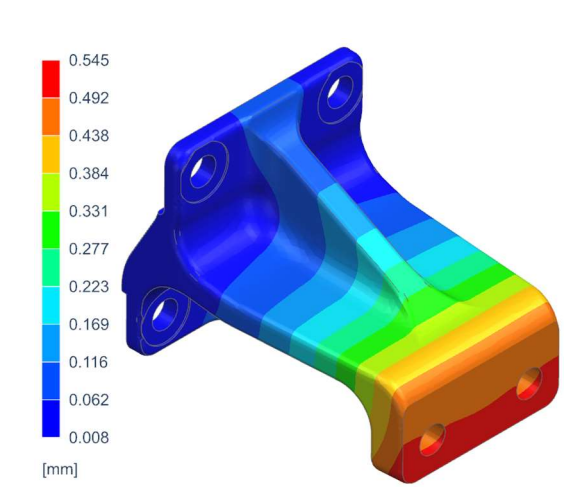
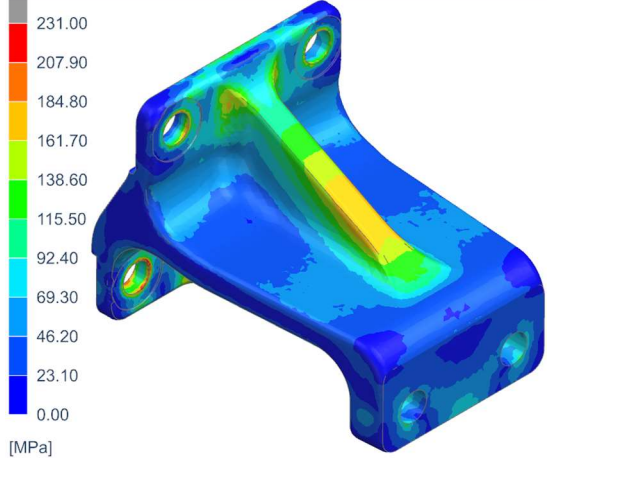
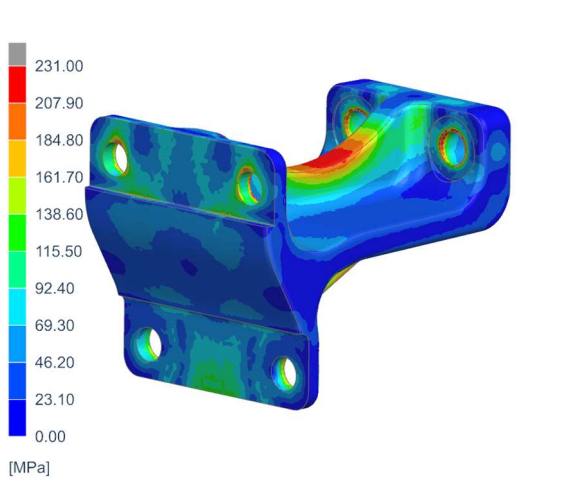
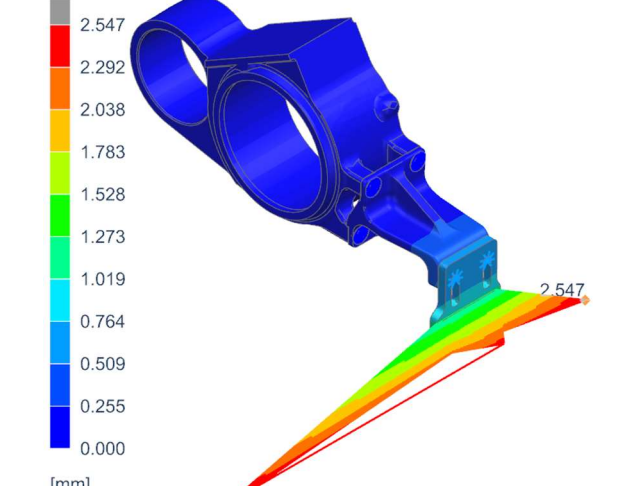
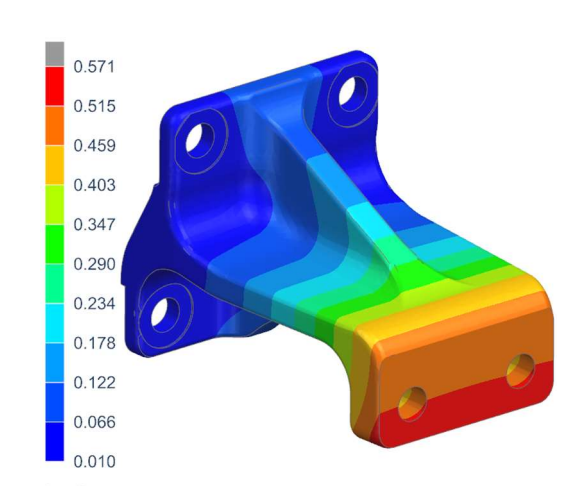
Obrázek 67 FEM model současného řešení konzoly

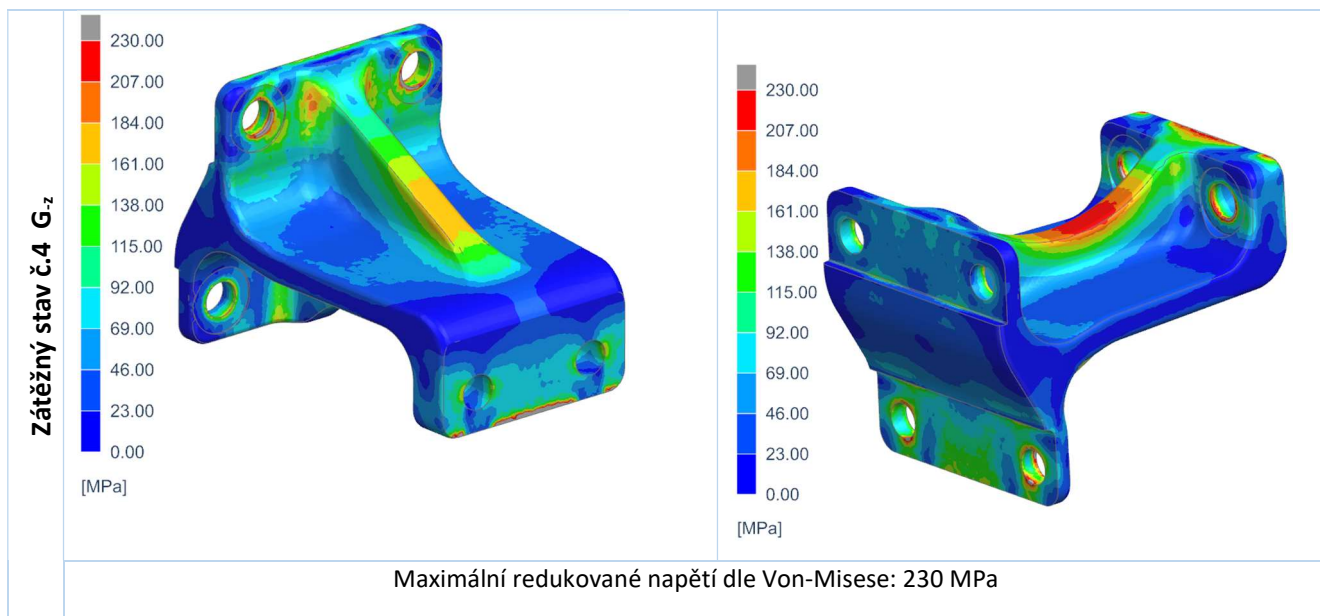
Výsledky strukturální analýzy současného provedení konzoly jsou vyhodnocovány individuálně pro jednotlivá zatížení. Deformace je vyhodnocena pro sestavu komponent kyvného ramene nápravy, konzoly, platle a 1D prvků reprezentujících rám zábrany a dále konzola jako samostatný díl. Napětí je hodnoceno metodou Von-Mises.

Výsledky jsou zobrazeny a shrnuty následující tabulce.

| | | |
|----------------------------|--|---|
| Zátěžný stav č.1 Z1 | <p>Color scale for displacement [mm]: 0.000 to 1.568. The maximum displacement at point C is 1.568 mm.</p> | <p>Color scale for displacement [mm]: 0.003 to 0.348. The maximum displacement on the bracket body is 0.348 mm.</p> |
| | Celkové posunutí v kontrolovaném bodě: 1,578 mm | Celkové posunutí na tělese konzoly: 0,348 mm |



| | | |
|--|---|--|
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Zátěžný stav č.3 G_z</p> |  <p style="text-align: right;">2.836</p> |  |
| <p>Celkové posunutí v kontrolovaném bodě: 2,836 mm</p> | | <p>Celkové posunutí na tělese konzoly: 0,545 mm</p> |
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Zátěžný stav č.3 G_z</p> |  |  |
| <p>Maximální redukované napětí dle Von-Mises: 231 MPa</p> | | |
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Zátěžný stav č.4 G_z</p> |  <p style="text-align: right;">2.547</p> |  |
| <p>Celkové posunutí v kontrolovaném bodě: 2,547 mm</p> | | <p>Celkové posunutí na tělese konzoly: 0,571 mm</p> |

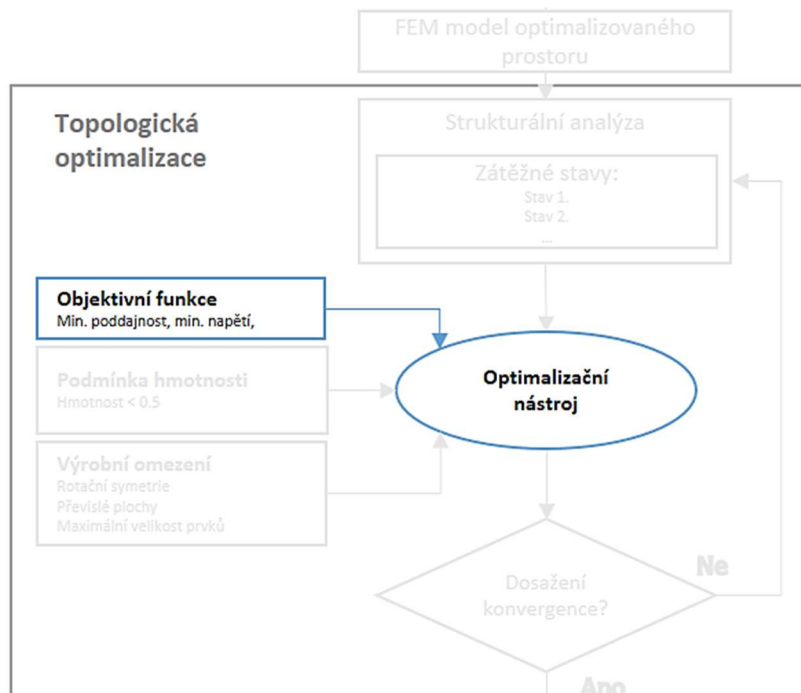


Tabulka 18 Výsledky struk. analýzy současného provedení konzoly

Stávající konzola vykazuje největší deformaci a redukované napětí při zatížení zrychlením ve směru, resp. opačném směru kladné osy Z. Maximální redukované napětí podle Von-Misese je 231 MPa a celková deformace konzoly je 0,571 mm.

4.2.5 Topologická optimalizace konzoly podjezdové zábrany

V této kapitole je popsána definice samotné topologické optimalizace konzoly. Ta přímo navazuje na předchozí kroky v postupu návrhu, ve kterých byl připraven výpočtový model a definována strukturální analýza.



Obrázek 68 Aktuální fáze ve vztahu k diagramu procesu návrhu

Pro potřeby druhé případové studie je použita optimalizace využívající přístupu Density-based, která pracuje s distribucí pseudo-hustoty materiálu v návrhovém prostoru a byla podrobněji popsána v kapitole 4.1.5.

Cílem optimalizace je v tomto případě minimalizace napětí podle Von-Misesse. Na rozdíl od studie těhlice a náboje studentské formule, nemá deformace zásadní negativní vliv při provozu a hlavním požadavkem je tedy staticky odolat silám od zatížení $Z1$ a $Z2$ a dynamickým účinkům od zrychlení během celé své životnosti.

Simulace ve svém výsledku zohledňuje všechny čtyři zátěžné stavy ($Z1$, $Z2$, G_z a G_z) rovnocenně, tedy s váhovým faktor 1 pro každý ze zátěžných stavů.

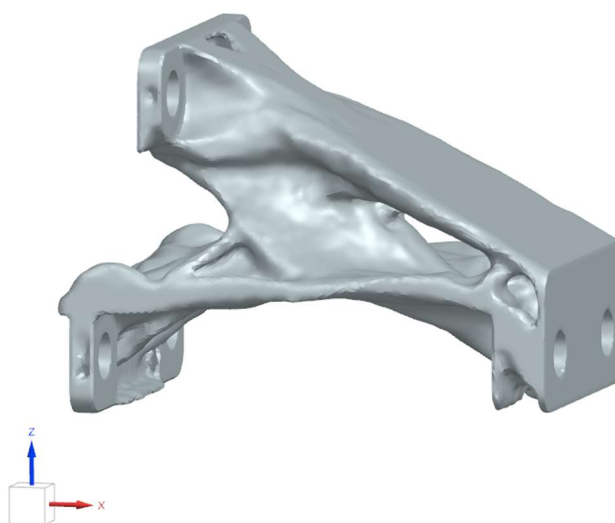
Nastavení analýzy je shrnuto v následující tabulce:

| | | |
|---------------------|--|--|
| | Maximální počet iterací | 500 |
| | Minimální normalizovaná hustota | 0,001 |
| | Přesnost konvergence | 0,1 % |
| | Penalizační faktor | 3 |
| | Maximální hmotnost konzoly | 42 % |
| Konstrukční omezení | rovinná symetrie | Rovnoběžná rovina ležící mezi osami šroubů konzoly |
| | velikost toků | min. 6 mm |
| | odformovatelnost | vytěžitelnost geometrie ve směru osy Z bez podkosů |
| Maximální posunutí | dosedací plocha platle a ochranného rámu | 1,5 mm |

Tabulka 19 Parametry nastavení topologické optimalizace (Density-based, minimalizace napětí)

Výpočtový model obsahuje 660545 uzlů a doba činila 15h 23m při použití 16 fyzických jader a 32 virtuálních jader s procesorem Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2650 v2 @ 2,60 Ghz.

Obrázek 69 zobrazuje geometrii získanou z výše popsané topologické optimalizace. Hmotnost tohoto návrhu činí 4,85 kg.

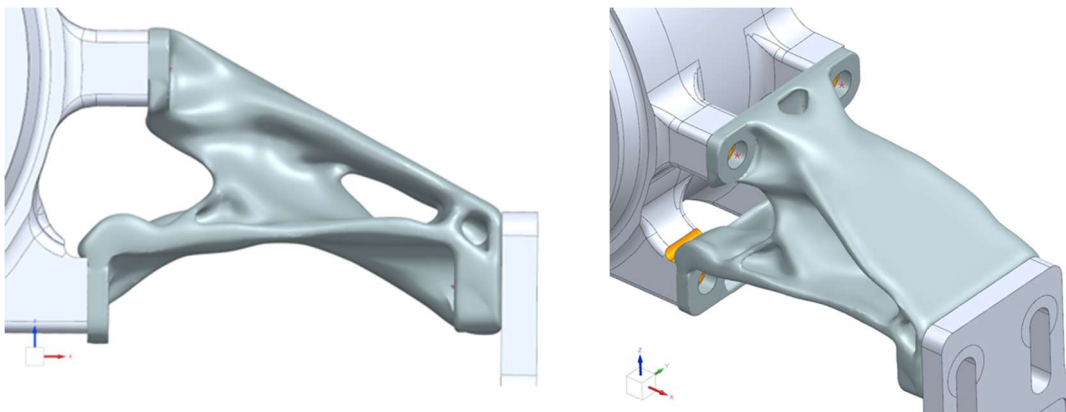


Obrázek 69 Optimalizovaná geometrie Density-based optimalizace s cílem min. napětí

4.2.6 Úprava návrhu po topologické optimalizaci

Z topologické optimalizace byla získána geometrie, která má svůj povrch ovlivněný samotnou výpočtovou sítí a ostrými přechody mezi oblastmi, kde byl materiál zachován a místy, kde byla pseudo-hustota penalizována k nule. V tomto kroku návrhu jsou z geometrie odstraněny tyto nerovnosti a vruby. Dále jsou upraveny funkční plochy (dosedací plochy a otvory pro šrouby) pro následnou nezávislou verifikační analýzu.

Úpravy geometrie jsou provedeny v SW Siemens NX, kde je provedena i nezávislá verifikační analýza. Geometrie ve formátu *stl* je v prvním kroku úpravy opravena a následně převedena na konvergentní těleso. To je následně v nástroji Polygon Modeling „vyhlazeno“. Následně jsou oblast funkčních ploch, které byly ovlivněny TO nahrazeny parametrickou geometrií s přísnými rozměry.



Obrázek 70 Upravená geometrie optimalizované konzoly podjezdové zábrany

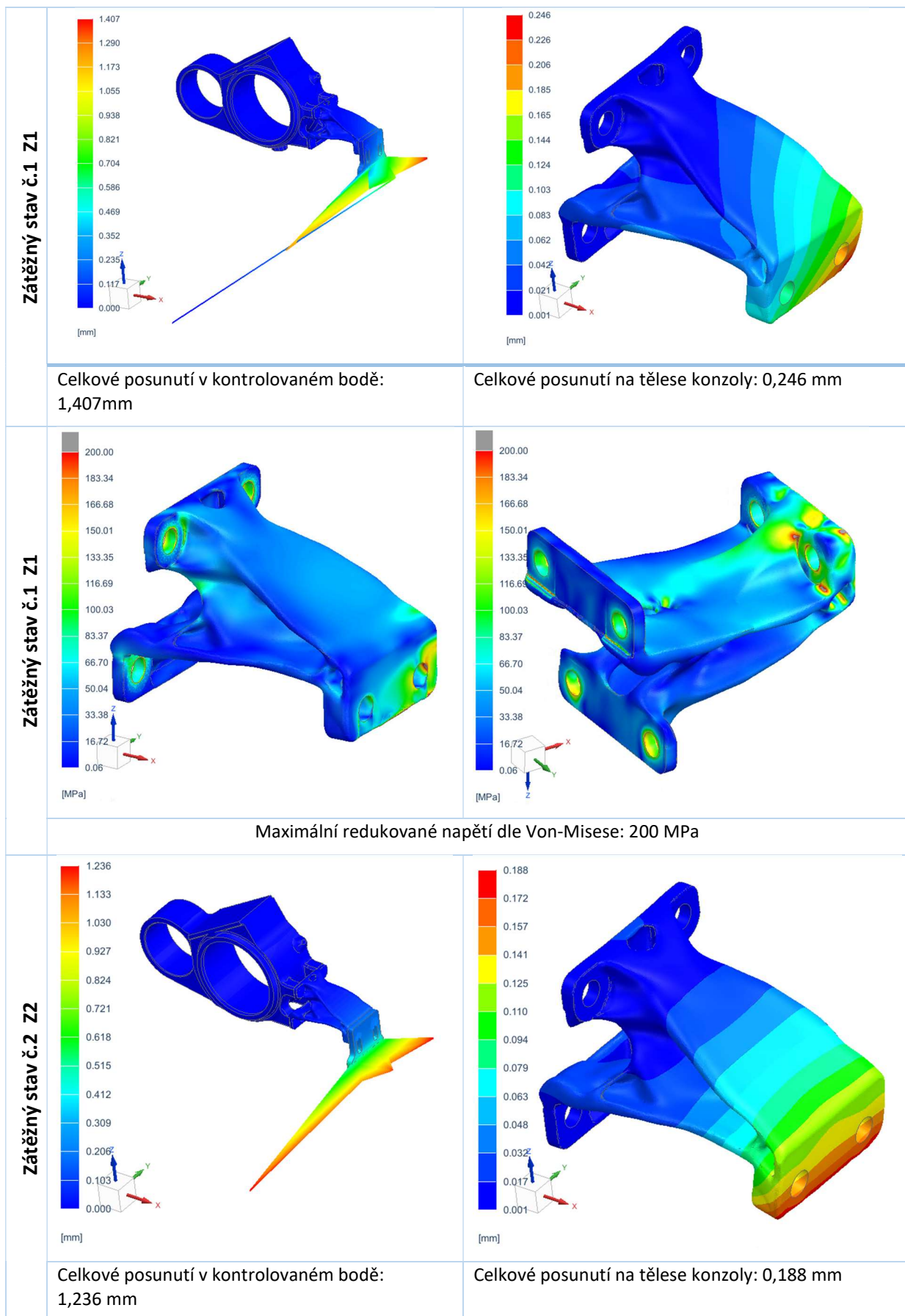
4.2.7 Nezávislá verifikační analýza

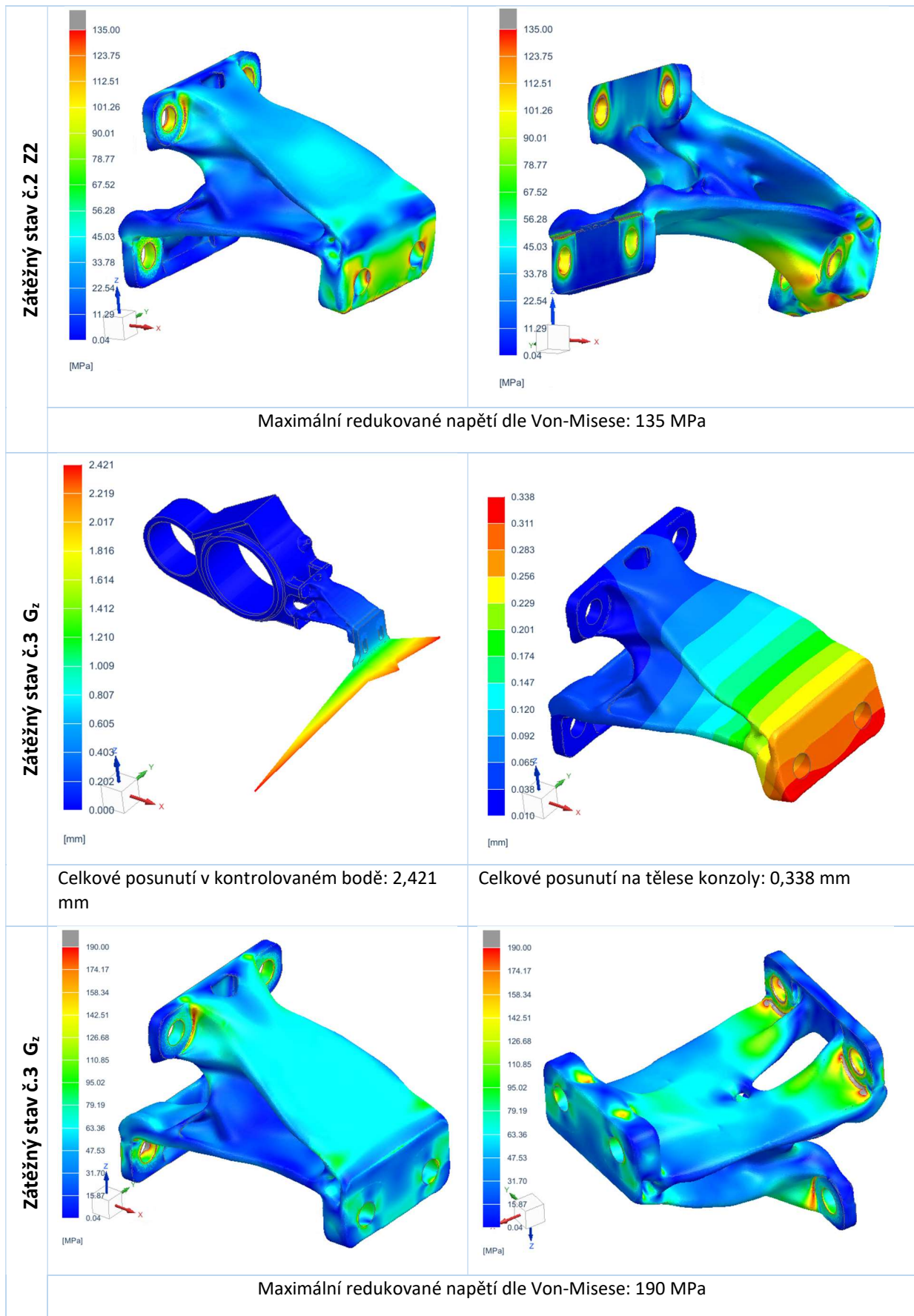
Závěrečným krokem v navržené metodologii postupu návrhu je provedení nezávislé verifikační analýzy jejichž cíle jsou podrobněji popsány v první případové studii.

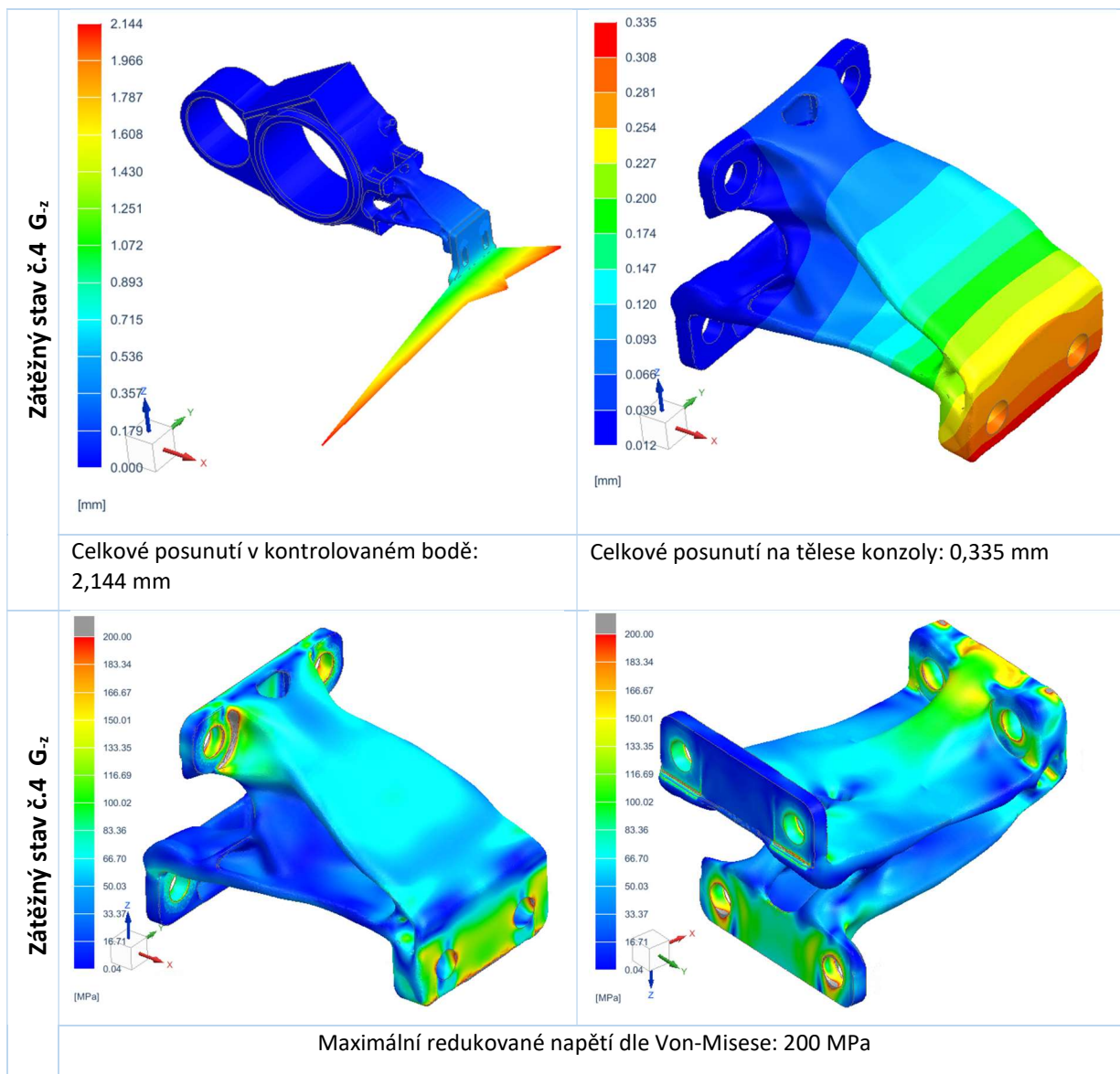
Verifikační analýze je podroben optimalizovaný návrh s cílem minimalizace napětí Von-Mises. Pro analýzu je použita vyhlazená geometrie s opravenými připojovacími prvky.

Detaily verifikační analýzy byly specifikovány v souladu se strukturální analýzou, která je podrobně popsána v kapitole 4.2.3. Sít' optimalizovaného návrhu je tvořena tetraedrickými elementy druhého řádku typu CTETRA(10) o velikosti 1,5 mm.

Hodnoceny jsou výsledky separovaně pro jednotlivé zátěžné stavy a shrnuty jsou v následující tabulce:







Tabulka 20 Výsledky nezávislé verifikační analýzy optimalizovaného návrhu konzoly

Maximální ekvivalentní napětí Von-Mises 200 MPa se vyskytuje při zatížení Z_1 a G_z . Při zatížení Z_1 se maximální napětí nachází v oblasti díry pro šroub platle ochranného rámu vzdálenější od podélné osy vozidla. Pod zatížením zrychlením G_z se maximální napětí nachází okolí dosedací plochy platle blízko osy symetrie konzoly.

Konzola je při zatížení G_z a G_z maximálně deformována 0,338 resp. 0,335 mm.

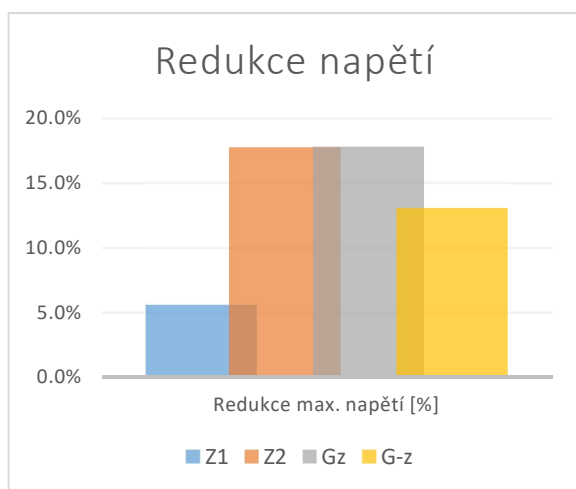
Shrnutí a porovnání výsledků optimalizovaných návrhů po verifikační analýze

V této sekci je představena strukturovaná tabulka 21, v níž jsou systematicky uspořádány a zřetelně prezentovány údaje o hmotnosti, maximálních redukovaných napětích Von-Mises a největších deformacích optimalizovaného návrhu konzoly podjezdové zábrany. Tyto údaje jsou následně porovnány s aktuálním provedením konzoly. Procentuální rozdíly v hodnotách ve srovnání s původním designem jsou zaznamenány, kde pozitivní změna (jako je snížení hmotnosti, napětí nebo deformace) je vyjádřena kladným číslem a negativní změna (zvýšení hmotnosti, napětí nebo deformace) je uvedena jako záporné číslo.

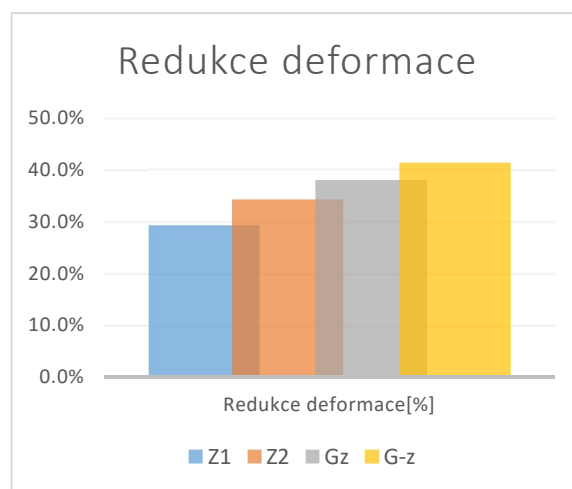
| Parametr | Stávající řešení | Optim. řešení | Stávající řešení | Optim. řešení | Stávající řešení | Optim. řešení | Stávající řešení | Optim. řešení |
|--|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| Hmotnost [kg] | 5,96 | 4,87 | - | - | - | - | - | - |
| Redukce hmotnosti [%] | 22 | | - | - | - | - | - | - |
| | Z₁ | | Z₂ | | G_z | | G_{-z} | |
| Max. redukované napětí [MPa] | 212 | 200 | 164 | 135 | 231 | 190 | 230 | 200 |
| Změna max. redukovanéh o napětí [%] | 5,7 | | 17,7 | | 17,7 | | 13,0 | |
| Max. deformace [mm] | 0,348 | 0,246 | 0,286 | 0,188 | 0,545 | 0,338 | 0,571 | 0,335 |
| Změna deformace [%] | 29,3 | | 34,3 | | 38,0 | | 41,3 | |

Tabulka 21 Souhrn zkoumaných vlastností optimalizované konzoly podjezdové zábrany

Klíčové parametry jako jsou hmotnost, maximální redukovaná napětí Von-Mises a maximální deformace uvedené v souhrnné tabulce výše, jsou pro rychlejší interpretaci dále zobrazeny pomocí následujících grafů.



Obrázek 71 Grafické srovnání změny maximálních napětí



Obrázek 72 Grafické srovnání změny deformací optimalizovaného návrhu

Topologickou optimalizací bylo dosaženo návrhu, jehož hmotnost je snížena o 22 % ve srovnání se se stávajícím konzolou podjezdové zábrany. Zároveň došlo ke snížení maximálního redukované napětí Von-Mises o 17,7 % a deformace až o 41,3 %.

4.2.8 Predikce životnosti konzoly podjezdové zábrany vystavené víceosému namáhání

Během provozu je konzola zábrany vystavena dynamickému stochastickému zatížení, které vyplývá z provozních podmínek kolejového vozidla. Tyto zatěžovací jevy lze z hlediska frekvence výskytu rozdělit na výjimečná zatížení charakterizovaná obvykle vyšší amplitudou a provozní zatížení, jež se v průběhu běžného provozu objevují standardně. Životnost dané komponenty je primárně ovlivněna právě těmito běžně se vyskytujícími zatěžovacími jevy, a proto se při hodnocení životnosti komponenty kladný důraz na provozní zatížení.

Pro potřeby demonstrace navržené metody návrhu komponent, kterou prezentuje tato práce, byl aplikován zjednodušující průběh zátěžného stavu, který však vede ke konzervativním výsledku. Použité zatížení má harmonický proporcionalní průběh, souměrné střídavé ($R=-1$) pro zátěžné stavy G_z a G_{-z} .

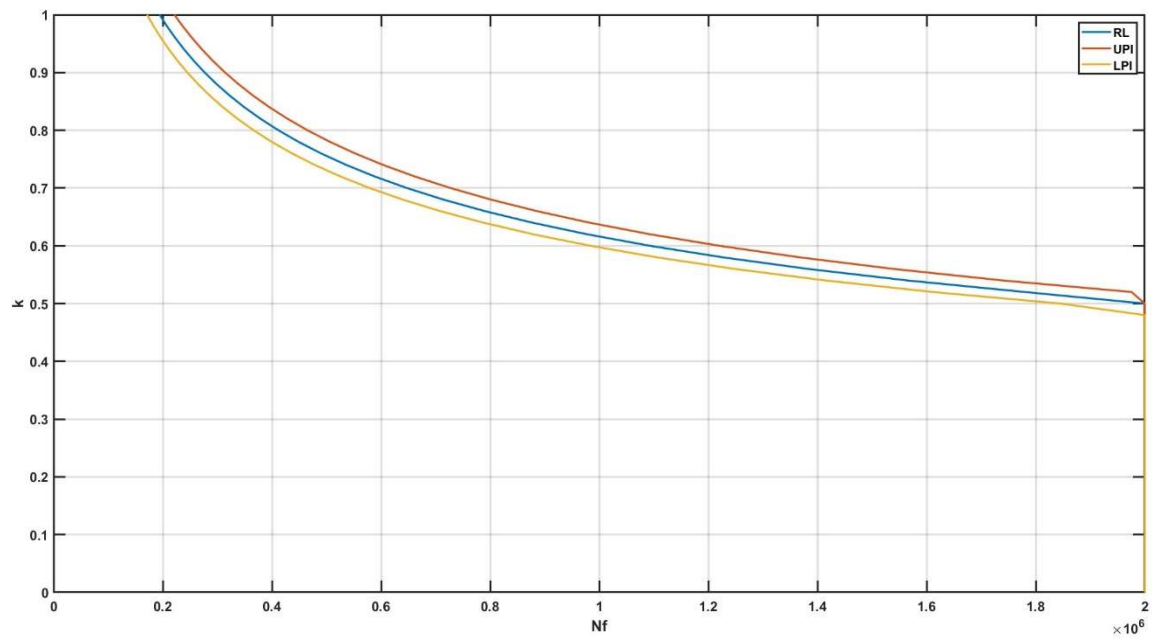
Pro hodnocení životnosti je použita hypotéza $M-D-C$, která vykazuje dobrou shodu s experimentálními zkouškami únavy.

| Zatížení | $R=-1$ | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | G_z [10^3 cyklů] | G_{-z} [10^3 cyklů] |
| UPI 2.5 % | 176,6 | 141,4 |
| RL 50 % | 138,6 | 105,2 |
| LPI 97.5 % | 98,3 | 68,4 |

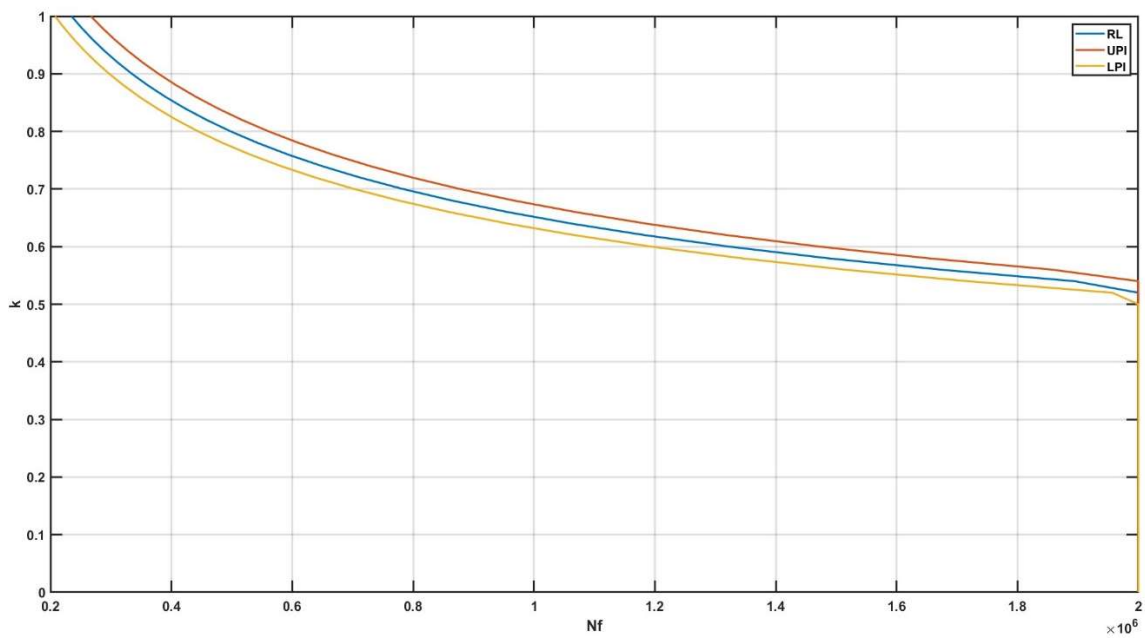
Tabulka 22 Výsledky predikce životnosti

Výsledky predikce životnosti zobrazené v tabulce 22, zobrazují počet cyklů do porušení pro maximální amplitudu odpovídající zrychlení konzoly 10g ve směru, resp. v záporném směru osy Z.

Pro přepočet cyklů na hodiny, nebo kilometry, které konzola vydrží, by byla nutná podrobná analýza zatížení během reálného provozu (založená na dostatečně dlouhém/reprezentativním provozním měření). Takový experimentální program by však již byl nad kapacitní rámec této práce. Na následujícím obrázku 73 a 74 je proto graficky zobrazen vliv velikosti amplitudy na predikovanou životnost, kde k je koeficient snižující amplitudu zatížení.



Obrázek 73 Parametrická predikce životnosti pro zatížení -z



Obrázek 74 Parametrická predikce životnosti pro zatížení +z

5 Závěr

Předkládaná disertační práce si kladla za cíl tvorbu postupu, vedoucího konstruktéra při navrhování složitě namáhané komponenty vozidla s podporou topologické optimalizace a při volbě kovového tisku pro její výrobu.

Pro samotnou disertační práci byly vytyčeny tři hlavní cíle:

1. Shrnutí současného stavu normalizace v oblasti kovového tisku;
2. Výpočtově-experimentální validace několika alternativních hypotéz kumulace únavového poškození při multiaxiální únavě tištěných kovových dílů (s předpokládaným omezením na harmonické proporcionální zatížení);
3. Numerické simulace, topologická optimalizace a remodeling aditivně vyráběných dílů (se závěrečným posouzením jejich únavové životnosti).

V první aktivitě byl shrnut současný stav normalizace aditivních technologií a pozornost byla zaměřena na dvě největší SDO, Evropské ISO a Americké ASTM. Obě v současné době vyvíjejí standardy pro AM v součinnosti pro co nejrychlejší dosažení požadavků průmyslového odvětví. Hlavní úsilí je soustředěno na potřeby technologie kovového tisku LPBF, která má největší potenciál pro uplatnění ve výrobě průmyslových komponent. Současně jsou ale také vyvíjeny normativy, které budou sloužit konstruktérům jako nástroj, podle kterého vyhodnotí vhodnost použití AM pro konkrétní komponentu. Bez podpory kvalitních norem nebude možné zavést AM do plnohodnotného průmyslového využití. Zároveň je nutné vývoj některých norem upřednostnit. Některé normy mají větší dopad napříč různými průmyslovými odvětvími, v jiném případě je vznik některé normy podmíněn existencí jiné normy. Například normalizace procesních parametrů tisku může jen stěží zaručit tisk kvalitních dílů bez normalizace vstupního materiálu, který podléhá pouze interním předpisům konkrétního producenta materiálu pro AM. Od prezentace Tézí disertační práce na počátku roku 2023 bylo publikováno 73 nových norem souvisejících s odvětvím kovového tisku. Tento fakt dobře ilustruje značný význam a rozsáhlé úsilí věnované rozvoji kvalitní podpory pro aditivní výrobní sektor prostřednictvím procesu standardizace.

V druhé části byly vyrobeny a následně testovány zkušební vzorky při různých módech zatěžování (tah-tlak, krut, kombinace). Zkušební vzorky byly testovány ve stavu „as-built“. To znamená bez dalších technologických úprav povrchu, což má vliv na pevnost, ale také především na únavovou životnost. Ta je citlivá na drsnost povrchu, která u AM komponent není stejná po celém povrchu dílu, ale má lokální charakter a přítomnost vrubů, které vznikají u všech technologií kovového tisku z důvodu nutnosti podpor, které musí být po dokončení tisku odstraněny. Vlastnosti zkušebních vzorků se blížily očekávaným vlastnostem reálné součásti. Experimentálně zjištěná únavová životnost vzorků z materiálů MS1 a 316L při kombinovaném namáhání byla porovnána s životností vypočtenou pomocí vybraných hypotéz (Findley, Carpinteri-Spagnoli, Dang-Van, M-D-C). Materiál AISi10Mg použitý pro první případovou studii nebyl z časového důvodu a faktu, že Regionální technologický institut ani Fakulta strojní nedisponuje licencí pro tisk z tohoto materiálu, experimentálně plně ověřen pro kombinované zatížení. Z provedených srovnání bylo kritérium M-D-C vyhodnoceno jako nejvhodnější pro hodnocení únavové životnosti víceosém namáhání. Toto kritérium vede u obou zkoumaných materiálů ke konzervativním výsledkům, které byly v dobré shodě s výsledky experimentálně zkoušených vzorků. Toto kritérium bylo použito i pro hodnocení životnosti těhlice s nábojem (první případová studie) navržených z materiálu AISi10Mg, jelikož umožňuje i hodnocení materiálů, které mají nižší únavovou životnost v tahu/tlaku než v krutu.

Dále byla navržena metodika postupu pro návrh komponent a je uvedena ve vývojovém diagramu na obrázku 16. Ta byla posléze podrobně prezentována na dvou případových studiích, jež úspěšně potvrdily aplikovatelnost této metodiky. První případová studie byla zaměřena na konstrukci těhlice a náboje vozidla studentské formule. Na komponenty pro motorsport je kladen důraz na výkon, tedy využitelnost materiálu, minimální hmotnost při maximální pevnosti a tuhost. Samotná životnost dílů je v předpokládaná pro jednu závodní sezónu. Z těchto důvodů byl pro tyto komponenty zvolen materiál AlSi10Mg, který poskytuje velmi dobrý poměr mezi mechanickými vlastnostmi a hmotností. Navrhována byla soustava komponent, které byly během simulací v plně interakci, což znamená, že změna poddajnosti jedné při ovlivňuje zatížení a tvar druhé součásti. V rámci této studie byly podrobně popsány jednotlivé etapy návrhového procesu, což poskytuje konstruktérům metodický rámec pro jejich vlastní návrhy.

Druhá případová studie realizovala návrh konzoly podjezdové zábrany tramvaje. Ta má velmi rozdílné požadavky oproti komponentám pro motorsport a důraz je zde kladen především na životnost a hmotnost je zde na druhém místě. V této studii byla metodika, původně aplikovaná na komponenty vozidla formule student, adaptována pro materiál 316L, což je nerezová ocel známá pro svou vynikající korozní odolnost a mechanické vlastnosti. Navržená konzola byla následně vyrobena s využitím aditivních technologií a podrobena komplexnímu testování ve Výzkumném a zkušebním ústavu Plzeň s.r.o.

U obou optimalizovaných součástí byla na závěr výpočtově posouzena životnost pomocí kritéria M- D- C. Uvažována byla harmonická, proporcionální zatížení, která respektuje současný stav ve zkoumání multiaxiální únavy. V reálném provozu silničního, resp. kolejového vozidla se takováto kombinace zatížení prakticky nevyskytuje. Hodnocení neproporcionálně náhodně zatěžovaných komponent vyrobených pomocí AM přepokládají intenzivní měření a experimentální testy, které jsou nad rámec disertační práce, ale představují potenciál pro další výzkum v této oblasti.

Popsaný postup byl mimo tuto disertační práci také aplikován při návrhu optimalizované frézovací hlavy, soustružnického nože a skládacího mechanismu invalidního vozíku.

Přestože tato metodika byla již úspěšně aplikována, je důležité zdůraznit, že pro komplexní hodnocení neproporcionálně a náhodně zatěžovaných komponent, zvláště těch, které byly vyrobeny pomocí aditivních technologií, je nezbytný další výzkum. Současné poznání a metodiky se mohou ukázat jako nedostatečné pro plné pochopení a předpovídání životnosti takto specifických komponent. To poukazuje na potřebu rozvoje nových výzkumných směrů, které by se zaměřily na specifika aditivní výroby a její vliv na únavové vlastnosti materiálů a komponent. Tento další výzkum by měl být multidisciplinární a zahrnovat pokročilé modelování, experimentální testování a vývoj nových teoretických přístupů k hodnocení únavy, aby bylo možné adekvátně reagovat na unikátní výzvy spojené s aditivně vyráběnými kovovými komponenty.

Publikační činnost doktoranda obsahuje:

5.1.1 Seznam prací doktoranda publikovaných (přijatých k publikaci) vztahujících se k tématu disertace.

Sumarizace výstupů dle jejich typu

| | |
|-------------------------------------|---|
| Články v odborných časopisech: | 2 |
| Příspěvky ve sbornících konferencí: | 7 |
| Funkční vzorky: | 5 |
| Ověřené technologie: | 1 |
| Výzkumné zprávy k projektům: | 7 |

Seznam publikační aktivity vztahující se k tématu disertační práce

[A1] STEPANEK, Martin, et al. **Parametric predictions of fatigue life of printed samples from MS1 and 316L materials**. Procedia Structural Integrity, 2024, 53: 58-64. D, m. p. 14 %

[A2] STEPANEK, M; RAZ, K a CHVAL, Z. **Topology optimization of the tool holder produced with additive manufacturing**. Online. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, roč. 1199, č. 1. ISSN 1757-8981. . D, m. p. 60 %

[A3] HANZL, P. ZETKOVÁ, ZETEK, M. ŠTĚPÁNEK, M. Effect of Selected Factors on the Accuracy of Load Capacity of the Schoen Gyroid Cellular Structure. Manufacturing Technology, 2017, roč. 17, č. 3, s. 302-306. ISSN: 1213-2489. Jsc, m. p. 25 %

[A4] RÁŽ, K. CHVAL, Z. ŠTĚPÁNEK, M. Transtibial Prosthetic Socket Produced Using Additive Manufacturing. In Proceedings of 5th International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2022. s. 243-250. ISBN: 978-981-16-9631-2, ISSN: 2195-4356. D, m. p. 33 %

[A5] RAZ, Karel; CHVAL, Zdenek; STEPANEK, Martin. Topological Optimization of the Milling Head. In: *International Conference on Mechanical, System and Control Engineer*. Springer, Singapore, 2021. p. 171-177. D, m. p. 40 %

[A6] SEDLACEK, Frantisek; KALINA, Tomas; STEPANEK, Martin. Optimization of components with topology optimization for direct additive manufacturing by DLMS. Materials, 2023, 16.15: 5422. Jimp, m. p. 10 %

Užitné vzory, průmyslové vzory, funkční vzorky a ověřené technologie

[A7] SOUKUP, R.; ŘEBOUN, J.; KALAŠ, D.; TURJANICA, P.; KADLEC, P.; ŠÍMA, K.; PRETL, S.; POLÁČEK, L.; **ŠTĚPÁNEK, M.**, CHVAL, Z.; ŠERÁKOVÁ, M.; KARPÍŠEK, P.; KOŽELUH, J.; BLECHA, T.; **Nová technologie pouzdření elektronických modulů integrovaných do textilií s využitím 3D tisku odolávající náročným podmínkám.** 2023. ZČU, OVĚŘENÁ TECHNOLOGIE 22190-OT001-2023, m.p. 10 %

[A8] KEPKA, M.; ZETEK, M.; BAKIR, Y.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; RÁŽ, K.; KOLÁŘ, P.; ČÁDA, J.; TRUBELOVÁ, Š.; KOŠTĚL, J.; CHMELKO, V.; MARGETIN, M. **Funkční vzorek skládacího mechanismu ramen nápravy invalidního vozíku.** 2023. ZČU, FUNKČNÍ VZOREK FV31/2023/21200, m.p. 5 %

[A9] KEPKA, M.; ZETEK, M.; BAKIR, Y.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; RÁŽ, K.; KOLÁŘ, P.; ČÁDA, J.; TRUBELOVÁ, Š.; KOŠTĚL, J.; CHMELKO, V.; MARGETIN, M. **Funkční vzorek skládacího mechanismu ramen nápravy invalidního vozíku.** 2023. ZČU, FUNKČNÍ VZOREK FV31/2023/21200, m.p. 5 %

[A10] ZETEK, M.; KEPKA, M.; KUČERA, P.; TEPLÝ, R.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; RÁŽ, K.; KOLÁŘ, P.; KOŠTĚL, J.; **Soustružnický nůž.** 2023. ZČU, FUNKČNÍ VZOREK FV029/2023/21200, m.p. 10 %

[A11] ZETEK, M.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; KOLÁŘ, P.; KOŠTĚL, J.; **Frézovací hlava.** 2022. ZČU, FUNKČNÍ VZOREK FV027/2022/21200, m.p. 25 %

[A12] **ŠTĚPÁNEK, M.**; ŠEDIVÝ, M.; STARÝ, T.; **Přídavný pohon invalidního vozíku.** 2017. ZČU, FUNKČNÍ VZOREK FV027/2022/21200, m.p. 34 %

Seznam prací autora nevztahujících se k tématu disertační práce

[A13] **STEPANEK, M.**; ZAHÁLKA, M.; MACH, J.; MENTL, V.; BUNDA, Z.; VOLÁK, J.; **The Measurement of Longitudinal Deformation of Miniature Test Specimens** [online]. [vid. 2024-02-21]. D

[A14] VOLÁK, J.; BUNDA, Z.; VARNER, M.; KOULA, V.; MACH, J.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; MENTL, V.; **EFFECTS OF DEVICE IMPERFECTIONS ON SMALL PUNCH TEST.** In *Conference Proceedings - METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials.* Ostrava: TANGER Ltd., Keltickova 62, 710 00 Ostrava, Czech Republic, EU, 2018. s. 646-651. ISBN: 978-80-87294-84-0. ,D, m.p. 14 %

[A15] MACH, J.; MENTL, V.; VOLÁK, J.; BUNDA, Z.; **ŠTĚPÁNEK, M.**; **FATIGUE TESTING OF MINIATURE TEST SPECIMENS AND CORRELATION OF THE RESULTS WITH THE STANDARD TEST SPECIMENS.** In *Conference Proceedings - METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials.* Ostrava: TANGER Ltd., Keltickova 62, 710 00 Ostrava, Czech Republic, EU, 2018. s. 766-771. ISBN: 978-80-87294-84-0., D, m.p. 20 %

Další aktivita

Odborná 3měsíční stáž STU Bratislava „Ústav aplikovanej mechaniky a mechatroniky“. Výzkum únavových vlastností tištěných materiálu vystavených kombinovanému namáhání tah (tlak)/krut.

6 Citovaná literatura

- [1] VLK, Miloš. *Dynamická pevnost a životnost*. 2., přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 978-80-214-0427-4.
- [2] Rocket propulsion engine built with selective laser melting technology from SLM Solutions. *Aerospace Manufacturing and Design* [online]. [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/rocket-propulsion-engine-selective-laser-melting-slm-solutions/>
- [3] WOHLERS, Terry T. a Tim CAFFREY. *Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, 2015. ISBN 978-0-9913332-1-9.
- [4] SEIFI, Mohsen, Ayman SALEM, Jack BEUTH, Ola HARRYSSON a John J. LEWANDOWSKI. Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. *JOM* [online]. 2016, **68**(3), 747–764. ISSN 1047-4838, 1543-1851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-015-1810-0
- [5] SEIFI, Mohsen. Standards for additive manufacturing: the latest developments by ASTM International's Dr Mohsen Seifi. *TCT Magazine* [online]. 4. březen 2020 [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/api/content/644a8730-5c6a-11ea-9292-1244d5f7c7c6/>
- [6] MAKES, America a ANSI Additive Manufacturing Standardization COLLABORATIVE. Standardization roadmap for additive manufacturing. *February), Public Draft*. 2017.
- [7] YANG, Sheng a Yaoyao Fiona ZHAO. Additive manufacturing-enabled part count reduction: a lifecycle perspective. *Journal of mechanical design*. 2018, **140**(3).
- [8] PEELS, Joris. Reducing Part Count with 3D Printing: What Are the Advantages? *3DPrint.com / The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 8. listopad 2021 [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://3dprint.com/284009/reducing-part-count-with-3d-printing-what-are-the-advantages/>
- [9] *Advancing Additive #6 - Predicting Printed Part Durability - Additive Manufacturing Software* [online]. 5. listopad 2020 [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/additive/aa-e6/>
- [10] SURESH, S., ed. Stress–life approach. In: S. SURESH, ed. *Fatigue of Materials* [online]. 2. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 1998 [vid. 2022-11-27], s. 221–255. ISBN 978-0-521-57847-9. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511806575.009
- [11] Assess vehicle structural durability faster. *Siemens Resource Center* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/white-paper-vehicle-structural-durability-design>
- [12] ERDELYI, Hunor, Nicolas LAMMENS, Wim VAN PAEPEGEM a Brecht VAN HOOREWEDER. Impact of additive manufacturing process conditions on the dynamic performance of metallic components. In: *NAFEMS 18 Dach conference: NAFEMS 18 Dach conference : abstracts* [online]. 2018 [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/1854/LU-8629277>

- [13] NAFEMS - *Why do I need Multiscale Modeling?* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: https://www.nafems.org/publications/resource_center/bm_jan_18_10/
- [14] *Relating AM Conditions and Fatigue Performance of 3D Printed Metallic Parts - Simcenter* [online]. 14. listopad 2018 [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/relating-am-conditions-and-fatigue-performance-of-3d-printed-metallic-parts/>
- [15] KEVAN, Tom. Material Insights into Additive Manufacturing. *Digital Engineering* [online]. 15. červen 2021 [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/material-insights-into-additive-manufacturing>
- [16] Predict fatigue life with Simcenter 3D. *Siemens Resource Center* [online]. [vid. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/white-paper-predict-fatigue-life-for-additive-manufacturing>
- [17] SHAMSAEI, Nima a Jutima SIMSIRIWONG. Fatigue behaviour of additively-manufactured metallic parts. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2017, **7**, 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017, 3–10. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2017.11.053
- [18] CHMELKO, Vladimír a Matúš MARGETIN. The performance of selected multiaxial criteria under tension/torsion loading conditions. *International Journal of Fatigue* [online]. 2020, **135**, 105532. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105532
- [19] RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE a Milan ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1992.
- [20] NOURIAN-AVVAL, Ahmad a Ali FATEMI. Fatigue performance and life prediction of cast aluminum under axial, torsion, and multiaxial loadings. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2021, **111**, 102842. ISSN 0167-8442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2020.102842
- [21] SCHULZ, M, N LAMMENS, M HACK a H ERDÉLYI. Machine Learning Enhanced Durability Analysis of Additively Manufactured Lightweight Components. In: *NAFEMS Nordic Seminar: CAE in Support of Sustainability and Durability*. 2019.
- [22] LAMMENS, N, M SCHULZ, H ERDÉLYI, S DONDEERS a M HACK. Addressing the Fatigue Challenge of Additive Manufacturing. In: *Automotive CAE Companion: Carhs*. 2021.
- [23] RASMUSSEN, Carl Edward a Christopher K. I. WILLIAMS. *Gaussian Processes for Machine Learning* [online]. 2005 [vid. 2022-11-28]. Dostupné z: doi:10.7551/mitpress/3206.001.0001
- [24] ZHOU, Maiqiang, N. PAGALDIPTI, H.L. THOMAS a Y.K. SHYY. An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2004, **26**, 308–317. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-003-0351-2
- [25] EOS. EOS launches M 290 metal 3D printer. *Metal Powder Report* [online]. 2014, **69**(4), 38. ISSN 0026-0657. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-0657(14)70178-X

- [26] MILLIKEN, Douglas L. Milliken William F. *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A: SAE International, 1994. ISBN 978-1-56091-526-3.
- [27] KASPRZAK, Edward M. a David GENTZ. The Formula SAE Tire Test Consortium-Tire Testing and Data Handling. In: *Motorsports Engineering Conference & Exposition* [online]. 2006, s. 2006-01–3606 [vid. 2021-11-04]. Dostupné z: doi:10.4271/2006-01-3606
- [28] ZIENKIEWICZ, Olek C., Robert L. TAYLOR a J. Z. ZHU. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Seventh Edition*. 7 edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-1-85617-633-0.
- [29] BICKFORD, John, ed. *Handbook of Bolts and Bolted Joints*. 1st edition. B.m.: CRC Press, 1998.
- [30] BENDSØE, Martin P. *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995 [vid. 2024-01-11]. ISBN 978-3-662-03117-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-03115-5
- [31] HARL, Bostjan a and Marko KEGL. Topology optimization course for mechanical engineering students. *International Journal of Mechanical Engineering Education* [online]. 2022, **50**(2), 364–388. ISSN 0306-4190. Dostupné z: doi:10.1177/0306419020967883
- [32] OTOMORI, Masaki, Takayuki YAMADA, Kazuhiro IZUI a Shinji NISHIWAKI. Matlab code for a level set-based topology optimization method using a reaction diffusion equation. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2015, **51**(5), 1159–1172. ISSN 1615-1488. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-014-1190-z
- [33] ZHOU, M. a G. I. N. ROZVANY. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1991, **89**(1–3), 309–336.
- [34] HIDAKA, Yuki, Takahiro SATO, Kota WATANABE a Hajime IGARASHI. Stochastic topology optimization based on level-set method. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2014, **33**(6), 1904–1919. ISSN 0332-1649. Dostupné z: doi:10.1108/COMPEL-11-2013-0375
- [35] WU, Jing a Li WU. Revised Level Set-Based Method for Topology Optimization and Its Applications in Bridge Construction. *The Open Civil Engineering Journal* [online]. 2017, **11**(1) [vid. 2024-01-11]. Dostupné z: doi:10.2174/1874149501711010153
- [36] QU, Dongyue, Fanbing LIU, Xiuming LI a Chunhua ZHAO. The Level Set Topological Optimization Method based on the Constraints of Volume and Stress. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2017, **95**, 12010. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20179512010
- [37] WANG, Michael Yu, Xiaoming WANG a Dongming GUO. A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2003, **192**(1), 227–246. ISSN 0045-7825. Dostupné z: doi:10.1016/S0045-7825(02)00559-5
- [38] MARGETIN, Matúš a Miroslav ŠULKO. Fatigue lifetime estimation of bearing pin of console manipulator loaded with multiaxial random loading. *Procedia Engineering* [online]. 2018, **213**, 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, 788–796. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2018.02.074

- [39] *Additive Manufacturing Standards - Standards Products - Standards & Publications - Products & Services* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/additive-manufacturing-standards.html>
- [40] WONG, Kenneth. Techniplas: Combining Additive Manufacturing (AM), Generative Design, and AI to Explore Lightweighting. *Robotics 24/7* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.robotics247.com/article/techniplas-combining-additive-manufacturing-am-and-generative-design-to-explore-new-possibilities>
- [41] IAV Sees Huge Potential With 3D-Printed Pistons. *Wards Intelligence* [online]. 12. duben 2018 [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://wardsintelligence.informa.com/WI059461/IAV-Sees-Huge-Potential-With-3D-Printed-Pistons>

PŘÍLOHA č.1 - Přehled vydaných norem pro AM

Výpis poskytuje přehledné srovnání stavu vydaných norem americké *ASTM*, evropského *ISO* a české *ČSN*. Vypsány budou pouze normy, které mají obecnou platnost pro AM, normy pro tisk z kovů a normy pro prostředky pozemní dopravy.

Přehled je platný k 2.2.2024

Počet vydaných norem viz. Tabulka 23, je doplněn kompletním seznamem norem dále pod tabulkou.

| <i>ASTM</i> | <i>ISO</i> | <i>ISO/ASTM</i> | <i>ČSN ISO</i> |
|-------------|------------|-----------------|----------------|
| 40 | 40 | 19 | 23 |

Tabulka 23 Počet vydaných norem pro AM dle jednotlivých organizací

ASTM

Applications

1. F3554-22 Standard Specification for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Grade 4340 (UNS G43400) via Laser Beam Powder Bed Fusion for Transportation Applications

Design

1. *ISO/ASTM52911-1-19* Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals
2. 2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1 (Withdrawn 2013)
3. *ISO/ASTM52950-21* Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing
4. *ISO/ASTM52915-20* Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2
5. *ISO/ASTM52910-18* Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations
6. F3413-19e1 Guide for Additive Manufacturing — Design — Directed Energy Deposition
7. F3530-22 Standard Guide for Additive Manufacturing — Design — Post-Processing for Metal PBF-LB
8. *ISO/ASTM52911-3-23* Additive manufacturing — Design — Part 3: PBF-EB of metallic materials

Materials and Processes

1. F3187-16 Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals
2. F3184-16 Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion
3. *ISO/ASTM52901-16* Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased *AM* Parts
4. *ISO/ASTM52904-19* Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications
5. F3301-18a Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion
6. F3049-14(2021) Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes
7. *ISO/ASTM52930-21* Additive manufacturing — Qualification principles — Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment
8. *ISO/ASTM52925-22* Additive manufacturing of polymers — Feedstock materials — Qualification of materials for laser-based powder bed fusion of parts
9. *ISO/ASTM52920-23* Additive manufacturing — Qualification principles — Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites
10. F3592-23 Standard Guide for Additive Manufacturing of Metals – Powder Bed Fusion – Guidelines for Feedstock Re-use and Sampling Strategies
11. F3607-22 Standard Specification for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Maraging Steel via Powder Bed Fusion
12. *ISO/ASTM52935-23* Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Qualification of coordination personnel

Terminology

1. F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)
2. *ISO/ASTM52900-21* Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary

Test Methods

1. *ISO/ASTM52902-19* Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
2. *ISO/ASTM52907-19* Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metallic powders
3. F2971-13(2021) Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
4. *ISO/ASTM52921-13(2019)* Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies
5. F2921-11e3 Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies (Withdrawn 2013)
6. F3122-14(2022) Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
7. F3571-22 Standard Guide for Additive Manufacturing – Feedstock – Particle Shape Image Analysis by Optical Photography to Identify and Quantify the Agglomerates/Satellites in Metal Powder Feedstock
8. F3606-22 Standard Guide for Additive Manufacturing — Feedstock Materials — Testing Moisture Content in Powder Feedstock [39]
9. F3522-22 Standard Guide for Additive Manufacturing of Metals — Feedstock Materials — Assessment of Powder Spreadability
10. F3624-23 Standard Guide for Additive Manufacturing of Metals – Powder Bed Fusion – Measurement and Characterization of Surface Texture
11. F3626-23 Standard Guide for Additive Manufacturing — Test Artifacts — Accelerated Build Quality Assurance for Laser Beam Powder Bed Fusion (PBF-LB)

- 12 ISO/ASTMTR52917-EB Additive Manufacturing — Round Robin Testing — General Guidelines
- 13 F3637-23 Standard Guide for Additive Manufacturing of Metal — Finished Part Properties — Methods for Relative Density Measurement
- 14 F3615-23 Standard Practice for Additive Manufacturing — Powder Bed Fusion — Condition-Defined Maintenance for Optical Systems
- 15 ISO/ASTM52902-23 Additive manufacturing — Test artefacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
- 16 ISO/ASTMTR52905-EB Additive Manufacturing of Metals — Non-Destructive Testing and Evaluation — Defect Detection in Parts

ISO

1. *ISO 17296-2:2015* Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedstock
2. *ISO 17296-3:2014* Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
3. *ISO/ASTM 52900:2021* Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary
4. *ISO/ASTM 52901:2017* Additive manufacturing — General principles — Requirements for purchased *AM* parts
5. *ISO/ASTM 52902:2019* Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
6. *ISO/ASTM 52904:2019* Additive manufacturing — Process characteristics and performance — Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications
7. *ISO/ASTM TR 52906:2022* Additive manufacturing — Non-destructive testing — Intentionally seeding flaws in metallic parts
8. *ISO/ASTM 52907:2019* Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metal powders
9. *ISO/ASTM 52909:2022* Additive manufacturing of metals — Finished part properties — Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion

10. *ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations*
11. *ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals*
12. *ISO/ASTM TR 52912:2020 Additive manufacturing — Design — Functionally graded additive manufacturing*
13. *ISO/ASTM 52915:2020 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2*
14. *ISO/ASTM TR 52917:2022 Additive manufacturing — Round robin testing — General guideline*
15. *ISO/ASTM 52921:2013 Standard terminology for additive manufacturing — Coordinate systems and test methodologies*
16. *ISO/ASTM 52925:2022 Additive manufacturing of polymers — Feedstock materials — Qualification of materials for laser-based powder bed fusion of parts*
17. *ISO/ASTM TS 52930:2021 Additive manufacturing — Qualification principles — Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment*
18. *ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing*
19. *ISO 17295:2023 Additive manufacturing — General principles — Part positioning, coordinates and orientation*
20. *ISO/ASTM 52902:2023 Additive manufacturing — Test artefacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems*
21. *ISO/ASTM TR 52905:2023 Additive manufacturing of metals — Non-destructive testing and evaluation — Defect detection in parts*
22. *ISO/ASTM TR 52906:2022 Additive manufacturing — Non-destructive testing — Intentionally seeding flaws in metallic parts*
23. *ISO/ASTM 52908:2023 Additive manufacturing of metals — Finished part properties — Post-processing, inspection and testing of parts produced by powder bed fusion*
24. *ISO/ASTM 52909:2022 Additive manufacturing of metals — Finished part properties — Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion*

25. ISO/ASTM 52911-3:2023 Additive manufacturing — Design — Part 3: PBF-EB of metallic materials
26. ISO/ASTM 52920:2023 Additive manufacturing — Qualification principles — Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites
27. ISO/ASTM 52926-1:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 1: General qualification of operators
28. ISO/ASTM 52926-2:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 2: Qualification of operators for PBF-LB
29. ISO/ASTM 52926-3:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 3: Qualification of operators for PBF-EB
30. ISO/ASTM 52926-4:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 4: Qualification of operators for DED-LB
31. ISO/ASTM 52926-5:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 5: Qualification of operators for DED-Arc
32. ISO/ASTM 52931:2023 Additive manufacturing of metals — Environment, health and safety — General principles for use of metallic materials
33. ISO/ASTM 52935:2023 Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Qualification of coordination personnel
34. ISO/ASTM 52939:2023 Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements
35. *ISO/ASTM 52945:2023 Additive manufacturing for automotive — Qualification principles — Generic machine evaluation and specification of key performance indicators for PBF-LB/M processes*
36. ISO/ASTM TR 52952:2023 Additive manufacturing of metals — Feedstock materials — Correlating of rotating drum measurement with powder spreadability in PBF-LB machines

ČSN

1. ČSN EN ISO/ASTM 52941 (011801) - Aditivní výroba – Výkon a spolehlivost systému – Akceptační testy pro laserové fúzní stroje s kovovým práškem pro kovové materiály pro letecký průmysl
2. ČSN P CEN ISO/ASTM/TS 52930 (011801) - Aditivní výroba – Zásady kvalifikace – Instalace, provoz a výkon (IQ/OQ/PQ) zařízení PBF-LB
3. ČSN EN ISO 17296-2 (011810) - Aditivní výroba – Základní principy -

Část 2: Přehled kategorií procesu a surovin

4. ČSN EN ISO 17296-3 (011810) - Aditivní výroba – Základní principy – Část 3: Hlavní charakteristiky a odpovídající metody zkoušení
5. ČSN EN ISO/ASTM 52950 (011810) - Aditivní výroba – Základní principy – Přehled zpracování dat
6. ČSN EN ISO/ASTM 52942 (011815) - Aditivní výroba – Kvalifikační principy – Kvalifikace operátorů strojů a zařízení pro laserovou fúzi kovového prášku metodou práškového lože používaných v leteckém a kosmickém průmyslu
7. ČSN EN ISO/ASTM 52903-1 (011816) - Aditivní výroba – Aditivní výroba plastových materiálů na bázi vytlačování – Část 1: Suroviny
8. ČSN EN ISO/ASTM 52900 (011822) - Aditivní výroba – Obecné zásady – Základy a slovník
9. ČSN EN ISO/ASTM 52925 (011822) - Aditivní výroba polymerů – Výchozí materiály – Kvalifikace materiálů pro laserové tavení dílů v práškovém loži
10. ČSN EN ISO/ASTM 52925 (011822) - Aditivní výroba polymerů – Výchozí materiály – Kvalifikace materiálů pro laserové tavení dílů v práškovém loži
11. ČSN EN ISO/ASTM 52901 (011827) - Aditivní výroba – Základní principy – Požadavky na nakupované součásti z aditivní výroby
12. ČSN EN ISO/ASTM 52902 (011828) - Aditivní výroba – Zkušební artefakty – Hodnocení geometrické způsobilosti aditivních výrobních systémů

13. ČSN EN ISO/ASTM 52907 (011829) - Aditivní výroba – Vstupní materiály – Metody charakterizace kovových prášků
14. ČSN EN ISO/ASTM 52910 (011830) - Aditivní výroba – Návrh – Požadavky, směrnice a doporučení
15. ČSN EN ISO/ASTM 52911-1 (011830) - Aditivní výroba – Konstrukce – Část 1: Fúze kovů na bázi práškového podkladu
16. ČSN EN ISO/ASTM 52904 (011831) - Aditivní výroba – Vlastnosti a výkon procesu – Postup pro splnění požadavků kritických aplikací při použití procesu kovové fúze na bázi práškového lože
17. ČSN EN ISO/ASTM 52909 (011802) - Aditivní výroba – Vlastnosti hotového dílu – Orientační a lokalizační závislost mechanických vlastností pro tavení kovového prášku
18. ČSN EN ISO 17295 (011810) - Aditivní výroba – Základní principy – Umístění dílů, souřadnice a orientace
19. ČSN EN ISO/ASTM 52920 (011810) - Aditivní výroba – Kvalifikační zásady – Požadavky na průmyslové procesy aditivní výroby a výrobní místa
20. ČSN EN ISO/ASTM 52931 (011812) - Aditivní výroba kovů – Životní prostředí, zdraví a bezpečnost – Obecné zásady pro použití kovových materiálů
21. ČSN EN ISO/ASTM 52936-1 (011812) - Aditivní výroba polymerů – Zásady kvalifikace – Část 1: Obecné zásady a příprava zkušebních těles pro PBF-LB
22. ČSN EN ISO/ASTM 52915 (011825) - Specifikace formátu souboru pro aditivní výrobu (AMF) Verze 1.2
23. ČSN EN ISO/ASTM 52911-3 (011830) - Aditivní výroba – Konstrukce - Část 3: PBF-EB kovových materiálů

PŘÍLOHA č.2 – Topologicky optimalizovaná komponenta nápravy automobilu

Obrázek 75 zobrazuje prvek nápravy automobilu, navržená pomocí generativního modelování a vyrobená pomocí AM.



Obrázek 75 Optimalizovaná část nápravy automobilu vyrobená přímo z výsledku TO [40]

PŘÍLOHA č.3 – Spojování dílů sestavy v jeden samostatný díl

Obrázek 76 zobrazuje příklad části raketového pohodu, kde AM umožnilo redukovat přibližně 300 dílů v 7 podsestavách v jednu samostatnou komponentu.



Obrázek 76 Návrh části raketového motoru zjednodušující montáž a redukující hmotnost [8]

PŘÍLOHA č.4 - Využití lattice struktury pro odlehčení pístu spalovacího motoru se zabudovanými chladicími kanály

Obrázek 77 zobrazuje aditivně vyrobený píst spalovacího motoru, pro jehož odlehčení byla použita lattice struktura. Konstrukce také obsahuje zabudovaný chladicí systém, který zvyšuje odolnost této konstrukce.



Obrázek 77 Řez odlehčeným aditivně vyrobeným pístem s chladicími kanály [41]

PŘÍLOHA č.5 - Mechanické zkoušky materiálu MS1 pro technologii DMLS

Evropská klasifikace: W-Nr. 1.2709

DIN: DIN X3NiCoMoTi 18-9-5

Chemické složení

Materiál ve formě prášku o velikosti zrna od 0,2 μm – 70 μm .

| Wt [%] | Ni | Co | Fe | Mo | Ti | Al | Cr | Mn | P | S | C | Si |
|--------|-------|---------|--------|---------|---------|-----------|------|------|-------|-------|-------|------|
| MS1 | 17-19 | 8.5-9.5 | zbytek | 4.5-5.2 | 0.6-0.8 | 0.05-0.15 | <0.5 | <0.1 | <0.01 | <0.01 | <0.03 | <0.1 |

Tabulka 24 Chemické složení oceli EOS Maraging Steel MS1

Mechanické vlastnosti

| Tep. [°C] | TT_O_X | | | | | TŽ_O_X | | | | | TV_O_X | | | | |
|--------------|-----------|------------|---------------|-------------|----------|------------|------------|---------------|-------------|----------|------------|------------|---------------|-------------|----------|
| | Č.V. | E [GPa] | R0,2 [Mpa] | Rm [Mpa] | A [%] | Č.V. | E [GPa] | R0,2 [Mpa] | Rm [Mpa] | A [%] | Č.V. | E [GPa] | R0,2 [Mpa] | Rm [Mpa] | A [%] |
| 20 | 54 | 160 | 1062 | 1190 | 13,6 | 95 | 145 | 801 | 1090 | 14,3 | 153 | 186 | 1961 | 2045 | 5,4 |
| 450 | 51 | 147 | 1160 | 1271 | 5,9 | 108 | 144 | 1095 | 1296 | 9,3 | 157 | 148 | 1458 | 1586 | 5,7 |
| 600 | 45 | 105 | 507 | 820 | 37,0 | 106 | 76 | 590 | 812 | 33,6 | 155 | 107 | 525 | 845 | 31,4 |
| 800 | 46 | 62 | 203 | 303 | 22,8 | 105 | 57 | 200 | 311 | 21,3 | 148 | 88 | 199 | 304 | 29,5 |

Legenda:

TT_O_X tištěný_obrobený povrch_směr tisku X

TŽ_O_X tištěný + žíhaný_obrobený povrch_směr tisku X

TV_O_X tištěný + vytvrzený_obrobený povrch_směr tisku X

Tabulka 25 Mechanické vlastnosti vzorků tištěných ve směru X

Únavové vlastnosti

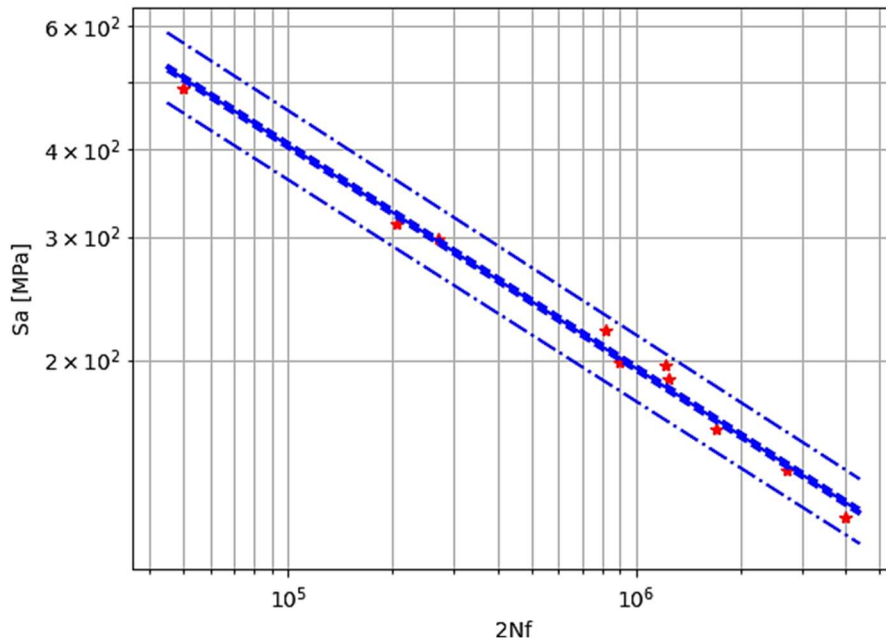
Zkoušky únavové pevnosti oceli MS1 prováděné v režimech čistý tah/tlak, čistý krut a v kombinovaném režimu byly prováděny na válcových dutých

Souhrnný přehled výsledků, viz Tabulka 26 (č.v. – číslo vzorku, typ – geometrie vzorku, F – amplituda síly, M_k – amplituda krouticího momentu, cesta – druh zátěžné cesty).

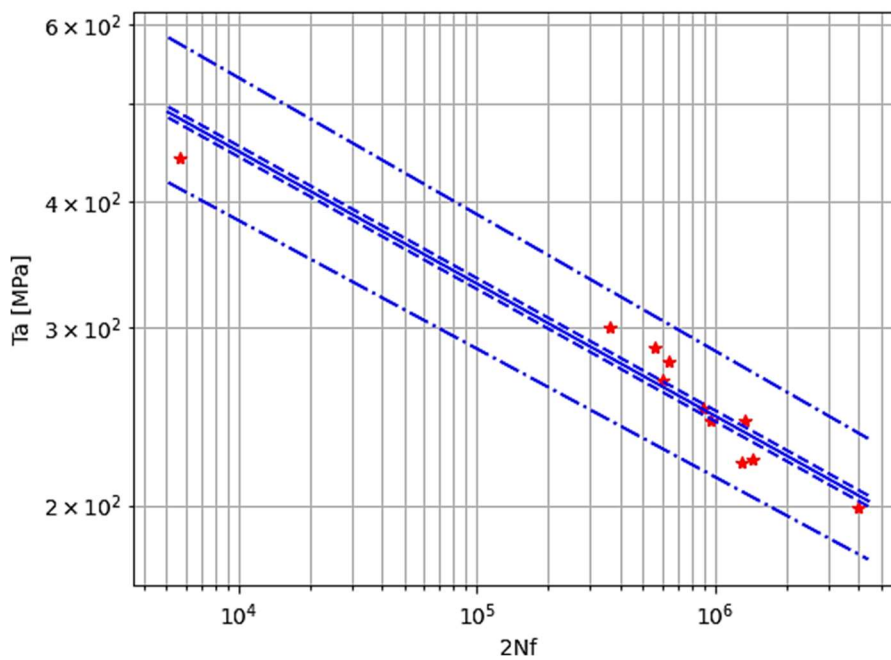
| Tah/Tlak | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|---------------------|----------------------|----------------------|-----|----------|----------------|
| Č.v. | F[kN] | M _k [Nm] | σ _a [MPa] | τ _a [MPa] | typ | cesta | N _f |
| 001 | 7,5 | 0 | 298,04 | 0 | 1c | tah/tlak | 139395 |
| 1 | 4,9 | 0 | 196,65 | 0 | 1c | tah/tlak | 626200 |
| 002 | 12,3 | 0 | 488,3 | 0 | 1c | tah/tlak | 29515 |
| 2 | 4,7 | 0 | 188,29 | 0 | 1c | tah/tlak | 686492 |
| 003 | 5,5 | 0 | 220,07 | 0 | 1c | tah/tlak | 431530 |
| 3 | 4 | 0 | 158,96 | 0 | 1c | tah/tlak | 893916 |
| 4 | 3,5 | 0 | 139,09 | 0 | 1c | tah/tlak | 1464751 |
| 5 | 3 | 0 | 119,19 | 0 | 1c | tah/tlak | 2000000 |
| 6 | 5 | 0 | 198,7 | 0 | 1c | tah/tlak | 469492 |
| 575 | 13,2 | 0 | 312,62 | 0 | 1a | tah/tlak | 105448 |
| Krut | | | | | | | |
| 501 | 0 | 95,4 | 0 | 441,43 | 1a | krut | 2857 |
| 503 | 0 | 64,8 | 0 | 299,97 | 1a | krut | 182623 |
| 517 | 0 | 52,5 | 0 | 242,92 | 1a | krut | 654938 |
| 531 | 0 | 42,9 | 0 | 198,75 | 1a | krut | 2000000 |
| 548 | 0 | 47,7 | 0 | 220,61 | 1a | krut | 654938 |
| 556 | 0 | 60 | 0 | 277,75 | 1a | krut | 322054 |
| 557 | 0 | 52,5 | 0 | 243,04 | 1a | krut | 484938 |
| 558 | 0 | 48 | 0 | 222,2 | 1a | krut | 726720 |
| 562 | 0 | 62 | 0 | 287,01 | 1a | krut | 283116 |
| 571 | 0 | 57,5 | 0 | 266,18 | 1a | krut | 302981 |
| 572 | 0 | 54 | 0 | 249,98 | 1a | krut | 449106 |
| Kombinované namáhání tah/tlak-krut | | | | | | | |
| 577 | 8,3 | 21,1 | 196,94 | 97,89 | 1a | 6a | 452451 |
| 574 | 8,4 | 42,7 | 198,52 | 197,82 | 1a | 6a | 173851 |
| 578 | 6,6 | 33,9 | 155,97 | 157,08 | 1a | 6a | 363447 |
| 561 | 4,2 | 43,2 | 100 | 200 | 1a | 6a | 406700 |
| 565 | 4,2 | 21,6 | 100 | 100 | 1a | 6a | 2000000 |
| 553 | 6,8 | 17,3 | 160 | 80 | 1a | 6a | 2000000 |
| 579 | 10,6 | 54 | 250 | 250 | 1a | 6b | 84569 |
| 580 | 8,4 | 43,2 | 200 | 200 | 1a | 6b | 306543 |

Tabulka 26 Výsledky experimentálních zkoušek únavy

Výsledky únavy pro čistý tah/tlak v podobě Basquinovy křivky je možné vidět na následujících obrázcích a její parametry jsou shrnuty v tabulce níže.



Obrázek 78 Basquinova křivka životnosti pro čistý tah/tlak



Obrázek 79 Basquinova křivka životnosti pro čistý krut

| $k=-0,99$ | RČ | HKI (95%) | DKI (95%) | HPI (95%) | DPI (95%) |
|-----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| σ_f' [MPa] | 15860 | 16019 | 15702 | 18192 | 13850 |
| b_σ | -0,3185 | -0,3185 | -0,3185 | -0,3205 | -0,3165 |
| $\sigma_{c,-1}$ [MPa] | 125 | 126 | 124 | 139 | 112 |

RČ – regresní čára,
 HKI,DKI - horní resp, dolní konfidenční interval, HPI,DPI - horní resp, dolní predikční interval, k - součinitel korelace

Tabulka 27 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro čistý tah/tlak

| k=-0,99 | RČ | HKI (95%) | DKI (95%) | HPI (95%) | DPI (95%) |
|---------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| τ_f' [MPa] | 1505 | 1523 | 1486 | 1851 | 1239 |
| b_τ | -0,1313 | -0,1313 | -0,1313 | -0,1355 | -0,1273 |
| $\tau_{c,-1}$ [MPa] | 205 | 207 | 202 | 236 | 179 |

RČ – regresní čára,
 HKI, DKI – horní resp, dolní konfidenční interval, HPI, DPI – horní resp, dolní predikční interval, k – součinitel korelace

Tabulka 28 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro čistý krut

Rozptyl cyklických vlastností materiálů je obecně vyjadřován statistickými intervaly spolehlivosti, které vycházejí z předpokladu Studentovho rozdělení experimentálních bodů na jednotlivých hladinách životnosti (menší rozsah experimentálních vůči Gaussovu rozdělení, V tabulkách 27 a 28 byly použité vztahy pro rozptyl regresní čáry (konfidenční interval spolehlivosti) ve tvaru:

$$\sigma_{a,p\%} = \sigma_f' + b_\sigma(2N_f) \pm t_{p\%}S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(2N_f - \overline{2N_f})^2}{\sum_j (2N_{f_j}^2 - \overline{2N_f}^2)}}$$

a pro rozptyl bodu na jednotlivých hladinách (predikční interval spolehlivosti) v tvaru:

$$\sigma_{a,p\%} = \sigma_f' + b_\sigma(2N_f) \pm t_{p\%}S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(2N_f - \overline{2N_f})^2}{\sum_j (2N_{f_j}^2 - \overline{2N_f}^2)}}$$

PŘÍLOHA č.6 - Únavové zkoušky materiálu 316L pro technologii DMLS

Výsledky provedených zkoušek únavy jsou uvedeny v následující tabulce.

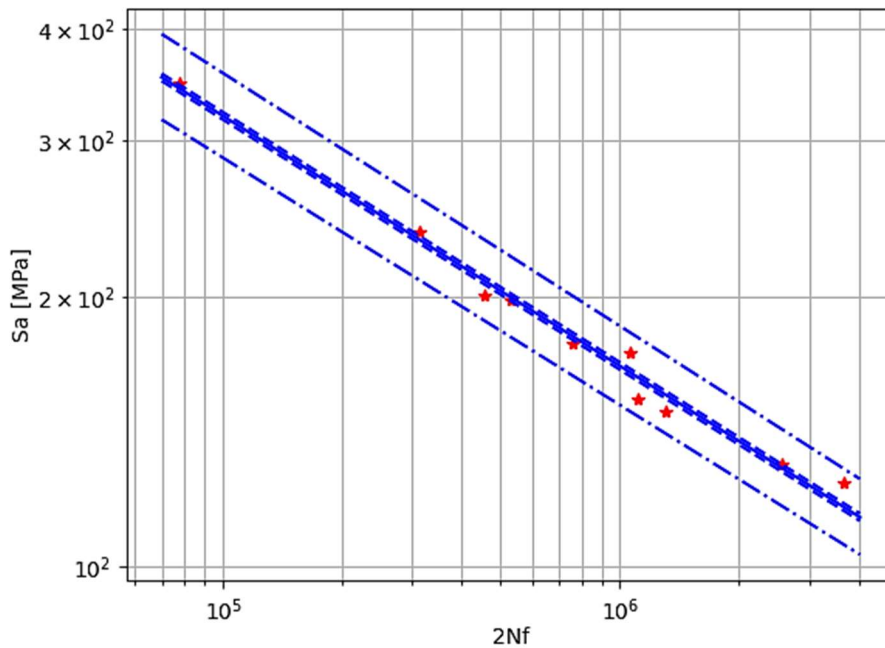
| č.v. | σ_a [MPa] | τ_a [MPa] | cesta | N_f |
|-------|------------------|----------------|----------------|---------|
| 1 | 347,54 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 38895 |
| 2 | 198,59 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 265175 |
| 3 | 173,77 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 532731 |
| 4 | 148,95 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 653145 |
| 5 | 124,12 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 1832010 |
| 6 | 177,63 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 379680 |
| 7 | 201,31 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 228770 |
| 8 | 153,94 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 556810 |
| 9 | 130,26 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 1275310 |
| 10 | 236,84 | 0 | tah/tlak, R=-1 | 156930 |
| M01 | 118,42 | 0 | tah/tlak, R=0 | 1455000 |
| M02 | 165,79 | 0 | tah/tlak, R=0 | 587850 |
| M03 | 189,47 | 0 | tah/tlak, R=0 | 273649 |
| M04 | 213,15 | 0 | tah/tlak, R=0 | 181363 |
| M05 | 177,63 | 0 | tah/tlak, R=0 | 340371 |
| M06 | 142,10 | 0 | tah/tlak, R=0 | 751512 |
| M07 | 153,94 | 0 | tah/tlak, R=0 | 461590 |
| KN1 | 0 | 189,80 | krut | 115655 |
| KN2 | 0 | 169,89 | krut | 148445 |
| KN3 | 0 | 139,80 | krut | 371315 |
| KN4 | 0 | 129,62 | krut | 536980 |
| KN5 | 0 | 203,69 | krut | 83640 |
| KN6 | 0 | 109,71 | krut | 913080 |
| KN7 | 0 | 155,08 | krut | 262625 |
| KN8 | 0 | 119,90 | krut | 618725 |
| KN9 | 0 | 216,00 | krut | 29640 |
| KN10 | 0 | 99,99 | krut | 1211530 |
| KO_01 | 99,95 | 99,99 | 11a | 395329 |
| KO_02 | 139,73 | 70,36 | 11a | 417308 |
| KO_03 | 69,87 | 140,54 | 11a | 234334 |
| KO_04 | 89,76 | 89,99 | 11a | 493449 |
| KO_05 | 79,81 | 79,99 | 11a | 765796 |
| KO_06 | 69,87 | 69,99 | 11a | 1414598 |
| KO_07 | 139,73 | 139,80 | 11b | 115184 |
| KO_08 | 119,84 | 119,90 | 11b | 175530 |
| KO_09 | 99,95 | 99,99 | 11b | 541173 |
| KO_10 | 79,81 | 79,99 | 11b | 1336277 |
| KO_11 | 139,73 | 69,99 | 11b | 522584 |

Tabulka 29 Souhrnný přehled výsledků experimentálních zkoušek únavy (316L)

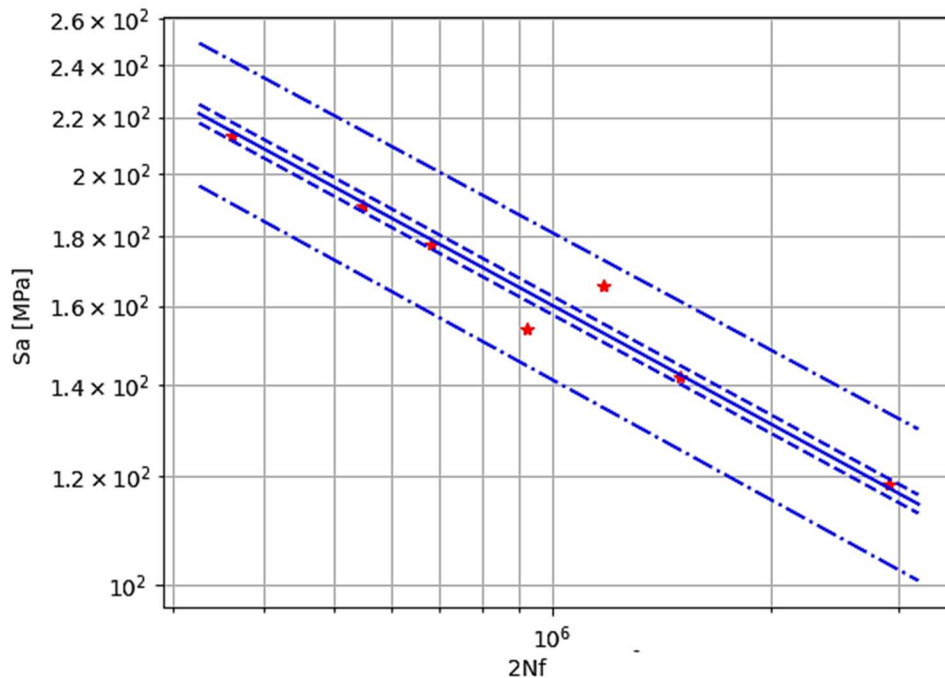
(č.v. – číslo vzorku, σ_a – amplituda normálového napětí, τ_a – amplituda smykového napětí,

cesta – druh zatěžovací cesty, N_f – počet cyklů do lomu)

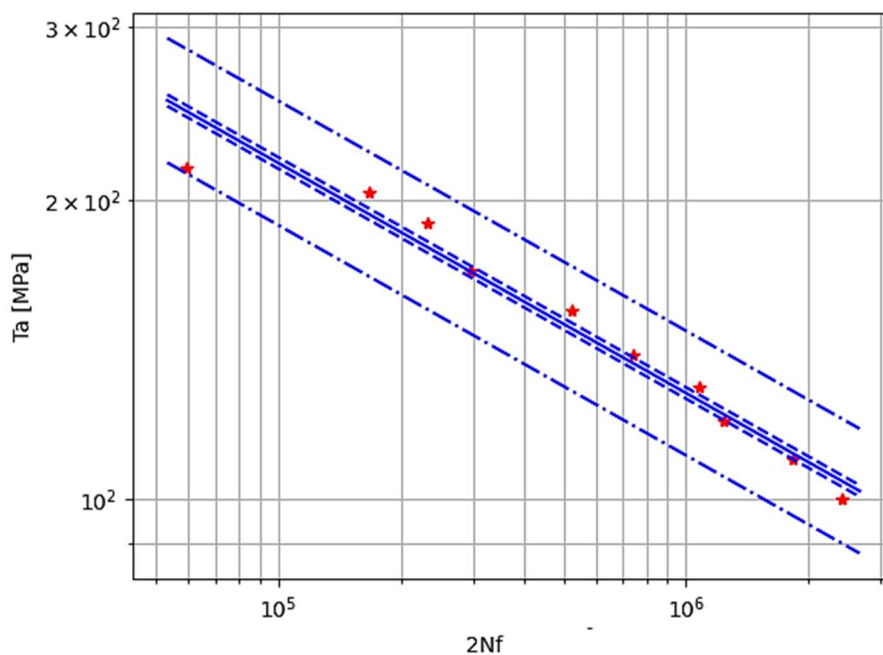
Výsledky únavy pro čistý tah/tlak v podobě Basquinovy křivky je možné vidět na následujících obrázcích a její parametry jsou shrnuty v tabulce níže.



Obrázek 80 Basquinova křivka životnosti pro střídavé zatížení tah/tlak (316L)



Obrázek 81 Basquinova křivka životnosti pro míjivé zatížení cyklickým tahem (316L)



Obrázek 82 Basquinova křivka životnosti pro čistý krut (316L)

| | | | | | |
|---|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $k=-0,99$ | RČ | HKI (95%) | DKI (95%) | HPI (95%) | DPI (95%) |
| σ_f [MPa] | 7978,95 | 8053,88 | 7904,71 | 9240,82 | 6911,91 |
| $b\sigma$ | -0,2796 | -0,2796 | -0,2796 | -0,2828 | -0,2765 |
| $\sigma_{c,-1}$ [MPa] | 113,78 | 114,86 | 112,73 | 125,57 | 103,34 |
| RČ – regresní čára, HKI,DKI - horní resp, dolní konfidenční interval, HPI,DPI - horní resp, dolní predikční interval, k - součinitel korelace | | | | | |

Tabulka 30 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro střídavý tah/tlak (316L)

| | | | | | |
|---|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $k=-0,99$ | RČ | HKI (95%) | DKI (95%) | HPI (95%) | DPI (95%) |
| σ_f [MPa] | 8613,72 | 8749,54 | 8480 | 9317,16 | 7949,23 |
| $b\sigma$ | -0,2884 | -0,2884 | -0,2884 | -0,2852 | -0,2917 |
| $\sigma_{c,-1}$ [MPa] | 107,42 | 109,11 | 105,76 | 121,97 | 94,33 |
| RČ – regresní čára, HKI,DKI - horní resp, dolní konfidenční interval, HPI,DPI - horní resp, dolní predikční interval, k - součinitel korelace | | | | | |

Tabulka 31 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro mijivý tah (316L)

| | | | | | |
|---|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $k=-0,99$ | RČ | HKI (95%) | DKI (95%) | HPI (95%) | DPI (95%) |
| τ_f [MPa] | 3163,96 | 3206,07 | 3122,4 | 3654,55 | 2739,06 |
| $b\tau$ | -0,2922 | -0,2322 | -0,2322 | -0,2322 | -0,2323 |
| $\tau_{c,-1}$ [MPa] | 92,68 | 93,91 | 91,46 | 107,12 | 80,17 |
| RČ – regresní čára, HKI,DKI - horní resp, dolní konfidenční interval, HPI,DPI - horní resp, dolní predikční interval, k - součinitel korelace | | | | | |

Tabulka 32 Parametry Basquinovy křivky životnosti pro čistý krut (316L)