



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní



## TÝMOVÁ CVIČENÍ PŘEDMĚTU MKP I

Návody do cvičení předmětu „MKP I“

Martin Fusek

František Fojtík

Ostrava 2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Týmová cvičení předmětu MKP I

Autoři: Martin Fusek, František Fojtík

Vydání: první, 2011

Počet stran: 90

Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.**



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu

Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147

Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Martin Fusek, František Fojtík

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2729-2

## POKYNY KE STUDIU

### Týmová cvičení předmětu MKP I

Pro studium problematiky výpočtového modelování pomocí metody konečných prvků jste obdrželi studijní balík obsahující:

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující pokyny ke studiu,
- sbírku zadání praktických úloh pro tvorbu MKP modelu vybraných součástí.
- CD-ROM obsahující modely

### Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu Pružnost a pevnost I.

### Cílem týmových cvičení předmětu MKP I

Cílem je seznámení se se základními pojmy výpočtového modelování pomocí metody konečných prvků. Po prostudování modulu by měl student být schopen samostatně vytvořit 3D model součásti se zadáné technické dokumentace vhodný pro analýzu metodou konečných prvků. Stanovit a zadat vhodné okrajové podmínky modelu. Realizovat statickou MKP analýzu a vyhodnotit získané napěťově deformační chování modelu.

### Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského studia oboru Aplikovaná mechanika studijního programu Strojní inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly dále děleny na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

*Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přejí autoři.*

Martin Fusek a František Fojtík

## OBSAH

<b>1</b>	<b>NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ V TECHNICKÉ PRAXI.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Modelování.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2</b>	<b>Matematická teorie pružnosti .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Způsoby řešení.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4</b>	<b>Metoda konečných prvků .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5</b>	<b>Základní informace o software .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ZÁKLADNÍ INFORMACE O PROGRAMU NASTRAN .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>ZÁKLADY PRÁCE V PROGRAMU PATRAN .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Rozhraní programu.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Hlavní menu.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Aplikační menu.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Panel pro rychlý přístup k často používaným funkcím .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Grafické okno.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Aplikační formulář .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Okno historie a příkazový řádek.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Ikona stavu.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Základy práce s myší.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Základní soubory Patranu.....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>TVORBA MODELU V SYSTÉMU PATRAN.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Založení nové databáze .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2</b>	<b>Práce s geometrií .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Tvorba geometrie.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Import geometrie .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>TVORBA SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ A APLIKACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Automatická generace sítě .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2</b>	<b>Vytvoření materiálových modelů a definice vlastností .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>Aplikace okrajových podmínek na model.....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>NASTAVENÍ A SPUŠTĚNÍ PROGRAMU NASTRAN .....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>NAČTENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>ZÁKLADNY PRÁCE PŘI TVORBĚ GEOMETRIE V PATRANU.....</b>	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>MOŽNOSTI JEDNOTLIVÝCH SÍŤOVACÍCH ALGORITMŮ .....</b>	<b>38</b>

10	IMPORT, ÚPRAVA GEOMETRIE, PŘÍPRAVA KONEČNO-PRVKOVÉHO MODELU A JEDNODUCHÁ STATICKÁ ANALÝZA .....	40
11	MOŽNOSTÍ TVORBY SÍTĚ NA REÁLNÉM TĚLESE.....	44
12	DIMENZIONÁLNÍ ZJEDNODUŠENÍ MODELU MKP .....	47
13	AXIÁLNÍ SPOJKA .....	49
13.1	Víko spojky .....	50
13.1.1	Tvorba modelu.....	50
13.1.2	Okrajové podmínky.....	51
13.1.3	Analýza .....	51
13.2	Čep spojky .....	53
13.2.1	Tvorba modelu.....	53
13.2.2	Okrajové podmínky.....	53
13.2.3	Analýza .....	54
13.3	Pouzdro spojky.....	56
13.3.1	Tvorba modelu.....	56
13.3.2	Okrajové podmínky.....	57
13.3.3	Analýza .....	57
13.4	Hnací hřídel .....	59
13.4.1	Tvorba modelu.....	59
13.4.2	Okrajové podmínky.....	59
13.4.3	Analýza .....	60
13.5	Šroub víka spojky .....	63
13.5.1	Tvorba modelu.....	63
13.5.2	Okrajové podmínky.....	63
13.5.3	Analýza .....	64
13.6	Příložka .....	65
13.6.1	Tvorba modelu.....	65
13.6.2	Okrajové podmínky.....	65
13.6.3	Analýza .....	66
14	UPÍNACÍ HLAVA .....	68
14.1	Svařenec hlavy.....	69
14.1.1	Tvorba modelu.....	69
14.1.2	Okrajové podmínky.....	70

14.1.3	Analýza .....	70
14.2	Víko hlavy .....	72
14.2.1	Tvorba modelu.....	72
14.2.2	Okrajové podmínky.....	73
14.2.3	Analýza .....	73
14.3	Hřídel hlavy .....	75
14.3.1	Tvorba modelu.....	75
14.3.2	Okrajové podmínky.....	75
14.3.3	Analýza .....	76
14.4	Pouzdro hlavy.....	79
14.4.1	Tvorba modelu.....	79
14.4.2	Okrajové podmínky.....	80
14.4.3	Analýza .....	80
14.5	Šroub hlavy.....	82
14.5.1	Tvorba modelu.....	82
14.5.2	Okrajové podmínky.....	82
14.5.3	Analýza .....	83
14.6	Vložka ložiska.....	84
14.6.1	Tvorba modelu.....	84
14.6.2	Okrajové podmínky.....	85
14.6.3	Analýza .....	85
14.7	Páka mechanismu .....	87
14.7.1	Tvorba modelu.....	87
14.7.2	Okrajové podmínky.....	88
14.7.3	Analýza .....	88
14.8	Čep páky .....	89
14.8.1	Tvorba modelu.....	89
14.8.2	Okrajové podmínky.....	89
14.8.3	Analýza .....	90

# 1 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ V TECHNICKÉ PRAXI



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat pojem modelování a jednotlivé druhy modelů.
- Rozèznat jednotlivé typy modelů.
- Znát možné chyby, které při tvorbě modelů existují.
- Základní předpoklady lineární teorie pružnosti.
- Znát rozdíly a výhody mezi analytickým a numerickým přístupem k řešení problémů.
- Definovat základní kroky metody konečných prvků.
- Vědět základní informace o software Patran a Nastran.



**Výklad**

## 1.1 Modelování

Při řešení problémů se může postupovat dvěma odlišnými přístupy a to: přímým řešením problému a nepřímým řešením. V technické praxi je vhodný druhý přístup. Nepřímé řešení je takové, že místo formulovaného problému se řeší jiný, který je snadněji zvládnutelný. Prostřednictvím jeho řešení se získá řešení primárně formulovaného problému. Hovoříme o modelování. Modelování neboli simulace představuje experimentální proces, při němž se zkoumanému objektu jednoznačně dle určitých kritérií přiřazuje model. Model může být: fyzický, abstraktní nebo kombinovaný. V tomto textu se zaměříme pouze na modely abstraktní a to pouze na jednu skupinu a to modely výpočtové.

Proto, aby úloha mohla být vyřešena správně, musí mít řešitel potřebné znalosti, (získané jednak ve škole, jednak praxí či samostudiem), musí mít k dispozici výpočetní prostředek (což je v současnosti počítač s potřebným programovým vybavením). Nejdůležitější vlastnostmi, při tvorbě výpočetních modelů, jsou však v první řadě tvůrčí schopnosti, zkušenosť, cit a intuice.

Obecný postup při vytváření a řešení výpočtového modelu (zaměříme se na oblast mechaniky pružného tělesa) se dá obecně shrnout do následujících kroků:

1. Zadání úlohy.
2. Rozbor zadání a smysl úlohy.

3. Výběr teorie, která bude použita při řešení úlohy (pruty, skořepiny, rovinná napjatost, atd.).
4. Volba metody řešení (analyticky, numericky).
5. Sestavení úplného souboru vstupních dat (geometrie, materiál, zatížení, aj.).
6. Sestavení výpočtového modelu (zjednodušení, co zahrnout a co vypustit).
7. Vlastní řešení.
8. Zpracování výsledků a jejich interpretace.
9. Rozhodnutí o dalším postupu (konec, nebo pokračování a úprava modelu).

Při vytváření a řešení modelů se můžou, a také se vyskytují, chyby. Chyba je realita, se kterou se musí počítat. Nejzávažnější je chyba, kdy daný model neobsahuje všechny důležité vlastnosti podstatné z hlediska řešení daného problému. Takováto chyba je těžko odhalitelná a může vést ke katastrofickým problémům. Model se chová správně, ale neřeší námi hledaný problém.

## 1.2 Matematická teorie pružnosti

V tomto textu budeme řešit problematiku chování pružných těles při zatěžování a určovat jejich deformačně-napěťovou odezvu. Na jejím základě je možno rozhodnout, zda byl správně proveden návrh dané strojní součásti a ta vyhovuje daným provozním podmínkám. Omezíme se pouze na lineární problémy mechaniky. Proto je vhodné si v této části zopakovat základní předpoklady lineární teorie pružnosti.

Lineární teorie pružnosti vychází z předpokladu malých posuvů, malých přetvoření a z platnosti Hookeova zákona. Pod pojmem posuvy se zde i v následujícím textu myslí tzv. zobecněné posuvy, tedy posuvy nebo natočení. **Malé posuvy** jsou takové, že těleso po zatížení nezmění znatelně svou polohu. Zobecněné posuvy jsou vzhledem k rozměrům tělesa tak malé, že podmínky rovnováhy mohou být psány pro původní, nedeformovanou konfiguraci a výpočet napětí může být vztažen rovněž k původním rozměrům a to se zanedbatelnou chybou. **Malá přetvoření** znamenají, že rozměry každého objemového elementu tělesa se v důsledku zatížení znatelně nemění. Pokud platí předchozí věta, lze pro vyjádření vztahů mezi přetvořeními a posuvy použít Cauchyho geometrické rovnice. Chování materiálu je předpokládáno izotropní a homogenní. Vztah mezi napětím a přetvořením jsou pak dány **Hookovým zákonem**.

## 1.3 Způsoby řešení

Konkrétní fyzikální děje lze popsat diferenciálními rovnicemi, případně soustavou diferenciálních rovnic, spolu s okrajovými podmínkami, odpovídajícími fyzikální realitě. Pro volbu metody řešení existují dvě základní možnosti: První možností je řešení analytické, druhou možností je řešení numerické.

Při analytickém řešení hledáme výsledek ve tvaru spojitých funkcí. Využívají se přitom postupy matematické analýzy, využitím diferenciálního a integrálního počtu. Výhodou tohoto, historicky staršího postupu je, že v případě nalezení analytického řešení v uzavřeném tvaru máme k dispozici obecnou funkční závislost mezi vstupními a výstupními veličinami řešeného problému. S takto získaným předpisem pak lze jednoduše pracovat a je použitelný pro obdobný typ problémů. Základním problémem však je, že nalezení analytického řešení v uzavřeném tvaru je možné pouze pro velmi omezenou škálu úloh. Zpravidla se jedná o úlohy s jednoduchou geometrií a při odvození je použito mnoho zjednodušení.

Řešení numerické, je řešení přibližné. Při tomto postupu se převádí problém hledání spojitých funkcí na problém hledání konečného počtu neznámých parametrů, pomocí nichž se hledané funkce přibližně approximují. Tento přechod se označuje jako diskretizace. Numerické řešení je v zásadě dostupné pro každou matematicky popsanou úlohu, jakékoli geometrie a jakkoliv komplikovanou. Při praktických aplikacích je však složitost úlohy omezena kapacitou dostupného hardware a software. Výsledky numerického řešení se vztahují jen ke konkrétní řešené úloze a jakékoli úpravy a optimalizace vyžadují opakování celého procesu tvorby a řešení modelu.

Existuje mnoho metod pro numerické řešení. V současné době je v technické praxi jednoznačně nejpoužívanější pro řešení inženýrských úloh metoda konečných prvků (MKP). Tato numerická metoda má největší výhodu ve své univerzálnosti. Dostupné výpočtové programy, využívající metodu konečných prvků, jsou již velmi robustními softwarovými balíky.

## 1.4 Metoda konečných prvků

Jak již bylo zmíněno výše, bude se v tomto textu pracovat pouze s lineární teorií pružnosti. Nutno podotknout, že metoda konečných prvků není omezena na tuto problematiku, ale lze jí využít i při řešení velké škály fyzikálních problémů (teplo, proudění, aj.).

Základní myšlenkou metody konečných prvků je rozložení tělesa na menší části - elementy, konečné prvky - na kterých je analýza chování poměrně jednoduchá. V deformační variantě, která je nejrozšířenější, se vychází z nahrazení posuvů náhradními funkcemi. Tyto funkce se berou ve tvaru polynomů prostorových souřadnic. Celý postup metody konečných prvků se dá vyjádřit v několika krocích:

1. Rozdelení řešené oblasti (tělesa, soustavy) na podoblasti, tzv. konečné prvky či elementy.
2. Formulace chování jednotlivých elementů.
3. Opětovné složení a získání výsledné soustavy rovnic popisujících chování celého systému využitím rovnic získaných při analýze elementů.
4. Aplikace okrajových či počátečních podmínek.
5. Vlastní řešení systému rovnic. Získání primárních neznámých. V případě deformační varianty MKP se jedná o posuvy.

6. Získání dodatečných (odvozených) výsledků. V případě pružného tělesa se jedná např. o přetvoření a napětí, popř. další veličiny.

Při použití komerčních systémů, což je dnes již běžná věc, jsou některé kroky metody před uživatelem buďto částečně, nebo úplně skryty. Krok 1., tedy tvorba sítě, je často prováděna pomocí automatických generátorů. Kroky 2. a 3. jsou zcela skryty. O formulaci a chování elementu je možno se dočíst z dokumentace dodávané k danému software. Čtvrtý bod, související s aplikací okrajových a počátečních podmínek je v plné režii uživatele systému. Proto, aby byl tento krok proveden správně, musí mít uživatel potřebné znalosti a zkušenosti v daném oboru, do kterého řešený problém spadá. Krok pátý se často omezuje pouze na volbu typu výpočetní metody (přímé, iterační, aj.) a nastavení daného postupu. Posledním krokem je krok šestý, který je v rukou uživatele a platí pro něj stejné poznámky jako pro bod čtvrtý.

Zde se nebudeme zabývat odvozením základních postupů a rovnic metody konečných prvků, je zde ukázána pouze aplikace pomocí programu Patran a Nastran. Pro hlubší pochopení je čtenář odkazován na specializovanou literaturu.

## 1.5 Základní informace o software

V tomto textu bude vysvětlena základní práce s programy Patran a Nastran od firmy MSC Software. MSC.Software (dříve MacNeal-Schwendler Corporation) je největší světový dodavatel systémů v oblasti řešení počítačové podpory inženýrských návrhů. V portfoliu firmy jsou i další modelovací a výpočetní systémy, jmenujme např. software Marc, Adams, Actran, SimXpet, XFlow, a další.

Program Patran je pre/post-procesní software určený na tvorbu konečnoprvkových modelů a získání výsledků řešení. Umožňuje vytváření geometrie, zadávání materiálových vlastností, tvorbu okrajových či počátečních podmínek, nastavení vlastní analýzy. Velká podpora je kladena na import a editaci již hotových geometrických modelů z konstrukčních CAD systémů. Poskytuje také velké množství funkcí na úpravu takto nainportovaných modelů. Patran spolupracuje s velkým množstvím konečnoprvkových řešičů, jmenujme např. Nastran, Marc, Abaqus, LS-Dyna, Ansys, a další. V oblasti postprocesingu zde existují velké možnosti jednak vykreslení získaných výsledků (mapy průběhu vypočtených veličin, grafy, aj.), jednak je možno získané výsledky zobrazovat v testové podobě popřípadě je možno tyto výsledky uložit do externího souboru pro další zpracování.

Produkt Nastran je světově nejpoužívanější konečnoprvkový program. První kód s tímto názvem je spjat s Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA). V současné době existuje několik klonů Nastranu (např. NEi Nastran, NX Nastran, OCF Nastran, aj.) a produkt od firmy MSC Software je jedním z nich. Oblast výpočtů, ve kterých je možno použít Nastran je široká – napěťová analýza, dynamika, vibrace, řešení komplexních systémů, lineární a nelineární analýzy, optimalizace, aj. Produkt se, v současné době, hlavně zaměřuje na simulovalní multidisciplinárních problémů.

V následujícím textu jsou zmíněny základní informace pro využití zmíněného software. Jsou zde uvedeny informace, které se váží k lineární statické analýze pružných těles.

Budou zmíněny základní postupy nutné pro tvorbu konečnoprvkového modelu, informace týkají se nastavení řešiče a jeho spuštění a postupy pro získání a zobrazení výsledků proběhlé analýzy.



### Další zdroje

Bližší informace o firmě na softwarových produktech lze nalézt na internetové adrese firmy <http://www.msccsoftware.com>, popř. na stránkách české pobočky firmy MSC software <http://www.msccsoftware.cz>.

## 2 ZÁKLADNÍ INFORMACE O PROGRAMU NASTRAN



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete znát

- ⊕ Základní informace o výpočetním systému Nastran od fy MSC software.
- ⊕ Základní typy souborů pro komunikaci s tímto řešičem.
- ⊕ Základní vztah mezi programy Nastran a Patran.



**Výklad**

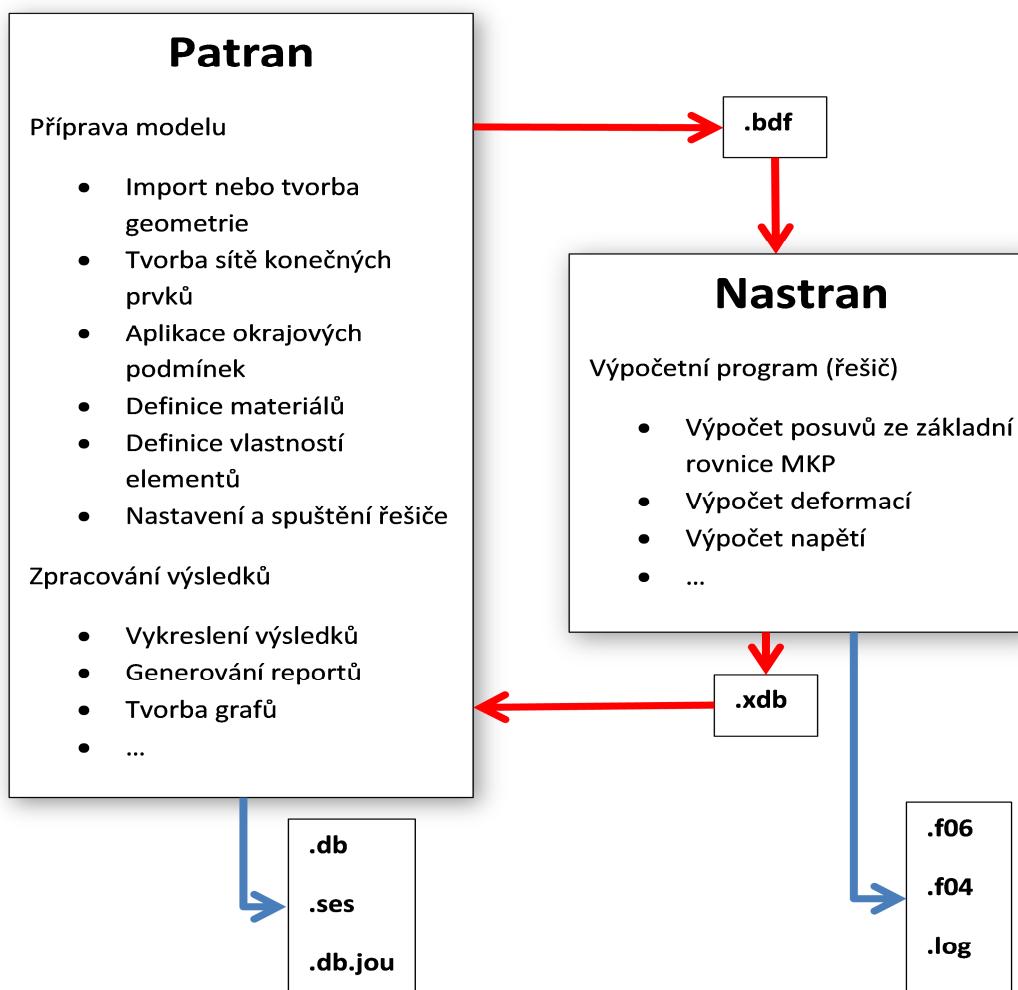
Program Nastran je konečnoprvkový řešič. Jméno programu je odvozeno z **NAsa STructural ANalysis System**. Program je primárně napsán v jazyce Fortran a v současnosti obsahuje více než milión řádku kódu. Je dostupný pod mnoha operačními systémy a může být spuštěn na osobním počítači i na velkých superpočítacích. Program jako takový se skládá z množství modulů, kde každý modul odpovídá za určitou specifickou operaci (aplikace okrajových podmínek, generování matic, vlastní řešení, atd.). Jednotlivé moduly jsou kontrolovány pomocí vnitřního jazyka DMAP (Direct Matrix Abstraction Program).

Program obsahuje veliké množství analýz. Každý typ analýzy je označen jako sekvence řešení (solution sequence) a má svoje kódové číslo. Tak například sekvence 101 je lineární statická analýza, 129 je nelineární transientní analýza, 700 explicitní nelineární analýza, atd.

Program Nastran neposkytuje žádné grafické rozhraní, neposkytuje žádné funkce pro grafickou tvorbu modelu. Všechny vstupy a výstupy programu jsou zprostředkovány pomocí textových souborů. Základní typy souborů jsou:

- Vstupní soubor (Input File) – obsahuje definici modelu. Jedná se o textový soubor a může mít libovolnou koncovku, nejčastěji „\*.bdf“ a „\*.dat“.
- Výsledkový soubor (Result File) – Toto je hlavní Nastranovský výstupní soubor. Obsahuje všechny žádané výsledky analýzy, například posuvy, přetvoření, napětí, atd. Jedná se o ASCII soubor a je možné ho procházet v libovolném textovém editoru. Dále tento soubor obsahuje diagnostické, varovné a chybové hlášky, které mohou pomoci při ověřování a ladění modelu. Přípona souboru je „\*.f06“.
- Soubor obsahující informace o běhu Nastranu (Execution Summary File). Obsahuje časovou historii běhu dané úlohy. Přípona souboru je „\*.f04“ a opět se jedná o textový soubor.

- Log soubor. Obsahuje informace o běhu na daném operačním systému. Přípona souboru je „\*.log“ a opět se jedná o textový soubor.
- Výsledkový soubor typu op2. Jedná se o další možný výsledkový soubor, ale tento je užíván programem Patran. Jedná se o binární soubor a jeho přípona je „\*.op2“.
- Výsledkový soubor typu xdb. Jedná se o další možný výsledkový soubor, ale tento je užíván programem Patran. Jedná se o binární soubor a jeho přípona je „\*.xdb“ . V současnosti využívá častěji než soubor typu op2.
- Další soubory jsou generovány při běhu programu a lze o nich najít informace v návodě dodávané s instalací programu.



Obrázek 2.1- Vztah mezi programy Nastran a Patran

Protože program neposkytuje žádné grafické rozhraní pro tvorbu modelu ani pro vizualizaci výsledků existuje mnoho programů, které právě tento „nedostatek“ odstraňují. Jedná se o pre- a post- procesní programy, které umožňují tvorbu popřípadě import geometrie modelu, generování sítě konečných prvků, zadávání okrajových podmínek, vykreslování výsledků atd. Jedním z takovýchto systémů je právě program Patran. O programu budou uvedeny podrobnější informace v následující kapitole. Na obrázku Obrázek 2.1 je zobrazen vztah mezi těmito dvěma programy.

Vraťme se ještě ke vstupnímu souboru. Jak bylo zmíněno výše, jedná se o textový soubor, který je možno prohlížet a editovat v libovolném textovém editoru. Tato vlastnost umožňuje vložit do souboru příkazy, které nejsou přímo podporovány v grafickém programu (např. Patran). Do souboru je možno přidávat dále poznámky, jednoduše ho editovat a tím měnit model aniž by bylo nutno spouštět pre- procesní program. Dále se soubor hodí při ladění. Struktura souboru je pevně daná a je vhodné, aby se s ní uživatel systému dobře seznámil. Pro podrobné prostudování této problematiky je vhodné projít dokumentaci k danému software.



### Další zdroje

Detailnější informace lze nalézt v dokumentaci dodávané s daným software, např. na internetových stránkách <http://www.mscsoftware.com>. Pro lineární analýzy jsou nejhodnější dokumenty, dodávané s instalací produktu, následující: „*Quick Reference Guide*“, „*Getting Started User's Guide*“ a „*Linear Static User's Guide*“.

### 3 ZÁKLADY PRÁCE V PROGRAMU PATRAN



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete znát

- Základní informace o programu Patran od fy MSC software.
- Základní typy souborů generované při tvorbě modelu.
- Rozhraní programu a jeho základní funkce.



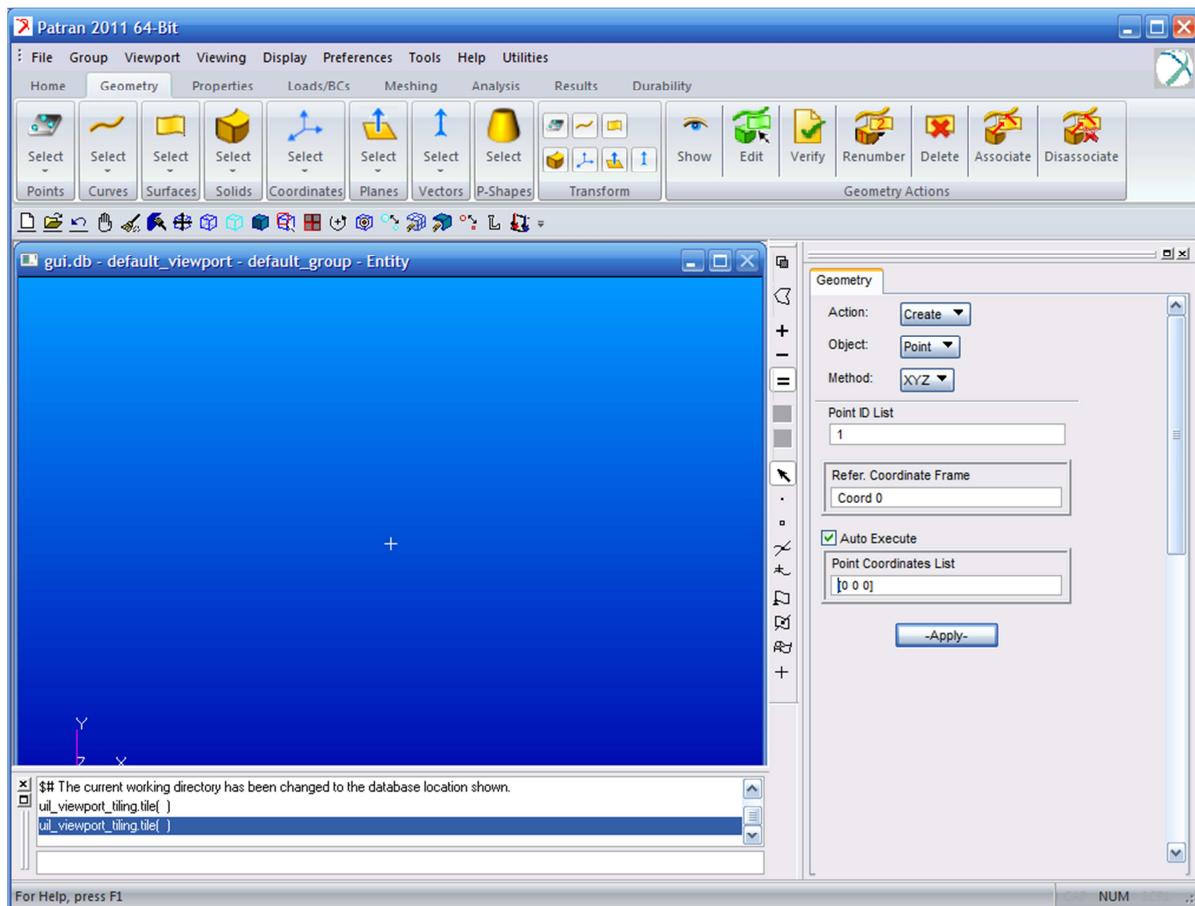
**Výklad**

#### 3.1 Rozhraní programu

Program Patran lze spustit na různých platformách. Zde se zaměříme pouze na grafické prostředí spuštěné v operačním systému MS Windows. Na ostatních platformách je toto rozhraní a jeho ovládání velmi podobné.

Program se dá spustit standardními postupy platné pro operační systém Windows a to buď spuštěním přes nabídku start, nebo přes zástupce. Po spuštění a načtení (nebo založení nové) databáze se objeví rozhraní viditelné na obrázku Obrázek 3.1. Jedná se o nové „skinovatelné“ rozhraní uvolněné do plného používání od verze 2010. Při popisu ovládání programu bude popisováno právě toto moderní rozhraní. Rozhraní Patranu se skládá z následujících částí:

- hlavní menu (menu bar),
- aplikační menu (ribbon groups menus),
- panel pro rychlý přístup (quick access toolbar),
- grafické okno (viewport),
- okno historie (history window),
- příkazový řádek (command line),
- aplikační formulář (application form)
- a ikona stavu (status icon).



Obrázek 3.1 – Pohled na uživatelské rozhraní programu Patran

### 3.1.1 Hlavní menu



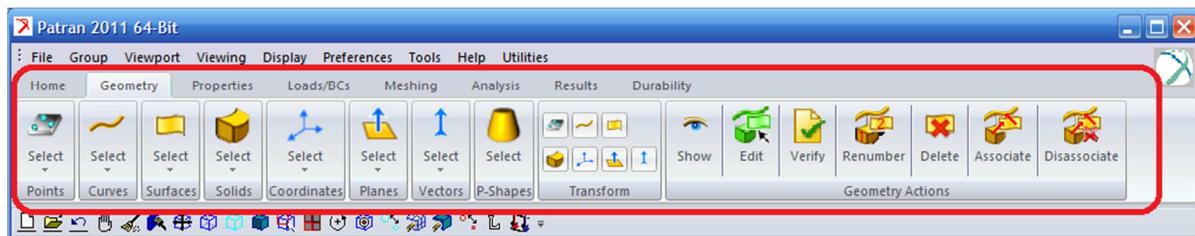
Obrázek 3.2 - Hlavní menu programu (vyznačeno červeně)

Pomocí tohoto menu je možno přistupovat k hlavním funkcím programu. Jednotlivé položky menu skrývají následující funkce:

- Menu **File**, slouží k práci se soubory, např. založení nové nebo načtení již vytvořené databáze, tisk, importy a exporty modelů, aj.
- Menu **Group** je zaměřeno na práce s grupami. Grupy jsou zjednodušeně seznamy (pojmenované oblasti) modelu, blíže viz níže v textu. Pomocí tohoto menu se dají grupy vytvořit, smazat, editovat, atd.
- Menu **Viewport** slouží k nastavení zobrazení grafického okna (barvy, osvětlení, atd.) a nastavení pohledů v daném okně.

- Menu **Display** je určeno k zobrazení a nastavení vzhledu jednotlivých entit jednak geometrického, jednak konečnoprvkového modelu.
- V menu **Preferences** jsou dostupné funkce pomocí kterých je možno ovlivnit chování programu, jako je nastavení databáze, možností chování myši při práci, aj.
- Menu **Tools** umožňuje přístup k pomocníkům jako je například MSC.Fatigue určený pro únavovou analýzu, Beam Tool určený k definování průřezů, aj.
- V menu **Help** je dostupná nápověda k programu.
- Menu **Utilities**, zde jsou dostupné další přídavné funkce, které umožňují efektivněji práci při správě a vytváření modelu než základní funkce Patranu.

### 3.1.2 Aplikační menu



Obrázek 3.3- Aplikační menu (vyznačeno červeně)

Aplikační menu (popř. pruh) slouží k přístupu k funkcím Patranu. Jednotlivé záložky (ribbonby) už svým názvem napovídají, kterou částí procesu tvorby modelu se zabývají. Nemá cenu podrobně rozebírat jednotlivé funkce skryté v jednotlivých záložkách, protože jich existuje veliké množství. K některým funkcím se dostaneme níže v tomto textu, ostatní je možno dohledat v nápovědě.

### 3.1.3 Panel pro rychlý přístup k často používaným funkcím



Obrázek 3.4 - Panel pro rychlý přístup (vyznačen červeně)

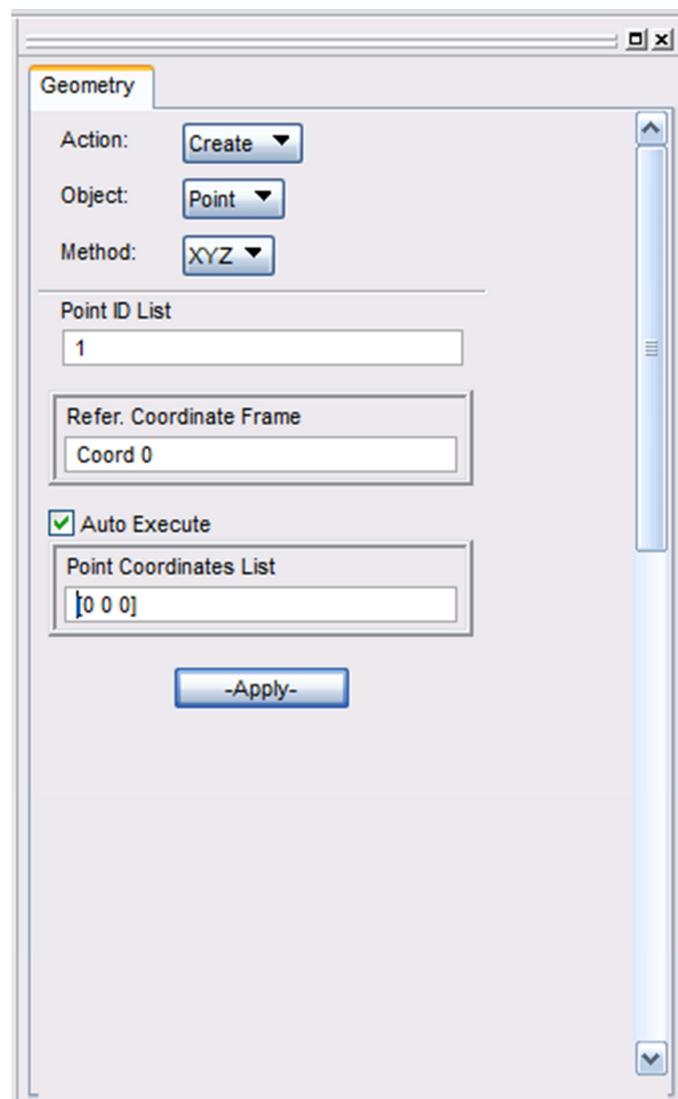
Pro často používané funkce je zde **panel pro rychlý přístup**, který je umístěn pod aplikačním menu. Jeho vzhled je možno upravovat a přidávat popř. odebírat jednotlivé funkce dle potřeby.

### 3.1.4 Grafické okno

Grafické okno (viewport) zabírá největší část uživatelského rozhraní programu. Toto okno lze vidět jako velkou modrou plochu na obrázku Obrázek 3.1

### 3.1.5 Aplikační formulář

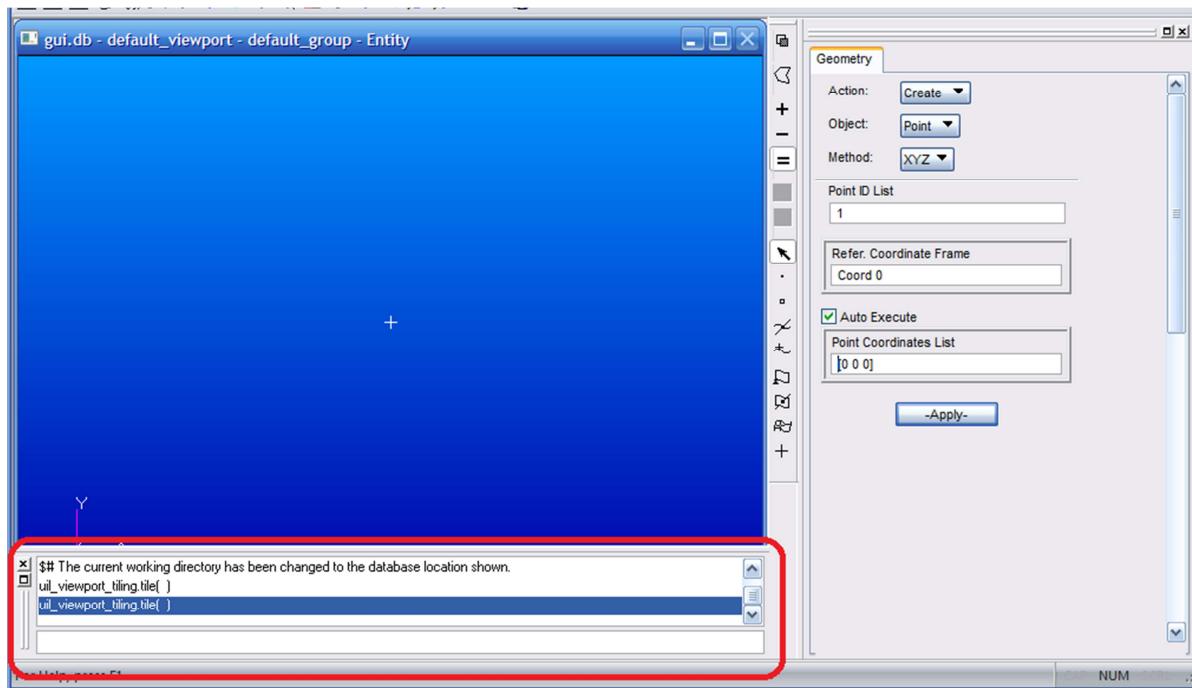
Přepnutím v aplikačním menu a zvolením funkce se změní vzhled aplikačního formuláře. Každý formulář vypadá jinak, ale obsahuje obdobné či stejné typy prvků, pomocí kterých je možno vykonávat jednotlivé příkazy. V tomto okně se pracuje metodou „shora - dolů“. Jednotlivé názvy položek jsou velmi intuitivní a ke každé položce je dostupná nápověda přes horkou klávesu F1. Jak je patrné jednotlivé okno se skládá jednak z „listboxů“ ve kterých se vybírá správná položka, jednak z textových oken do kterých se zadávají vstupní hodnoty. Pro potvrzení funkce se používají tlačítka. Do vstupních boxů je možno data zadat dvěma způsoby, a to jednak manuálně, nebo grafickou cestou, tzn. pomocí selekce myši.



Obrázek 3.5 - Aplikační formulář

### 3.1.6 Okno historie a příkazový řádek

Další položkou grafického rozhraní programu Patran je okno historie. V tomto okně se vypisují všechny provedené operace, varování a chyby. Vypsané texty mohou být zvýrazněny barevně. Normální informace se vypisují černým textem, důležité informace modře a chybové hlášky červeně. Proto je vhodné, aby uživatel pracoval s tímto oknem. Pod oknem historie je umístěn příkazový řádek, do kterého lze zadávat manuálně příkazy.



Obrázek 3.6 - Okno historie a příkazový řádek (vyznačeno červeně)

### 3.1.7 Ikona stavu

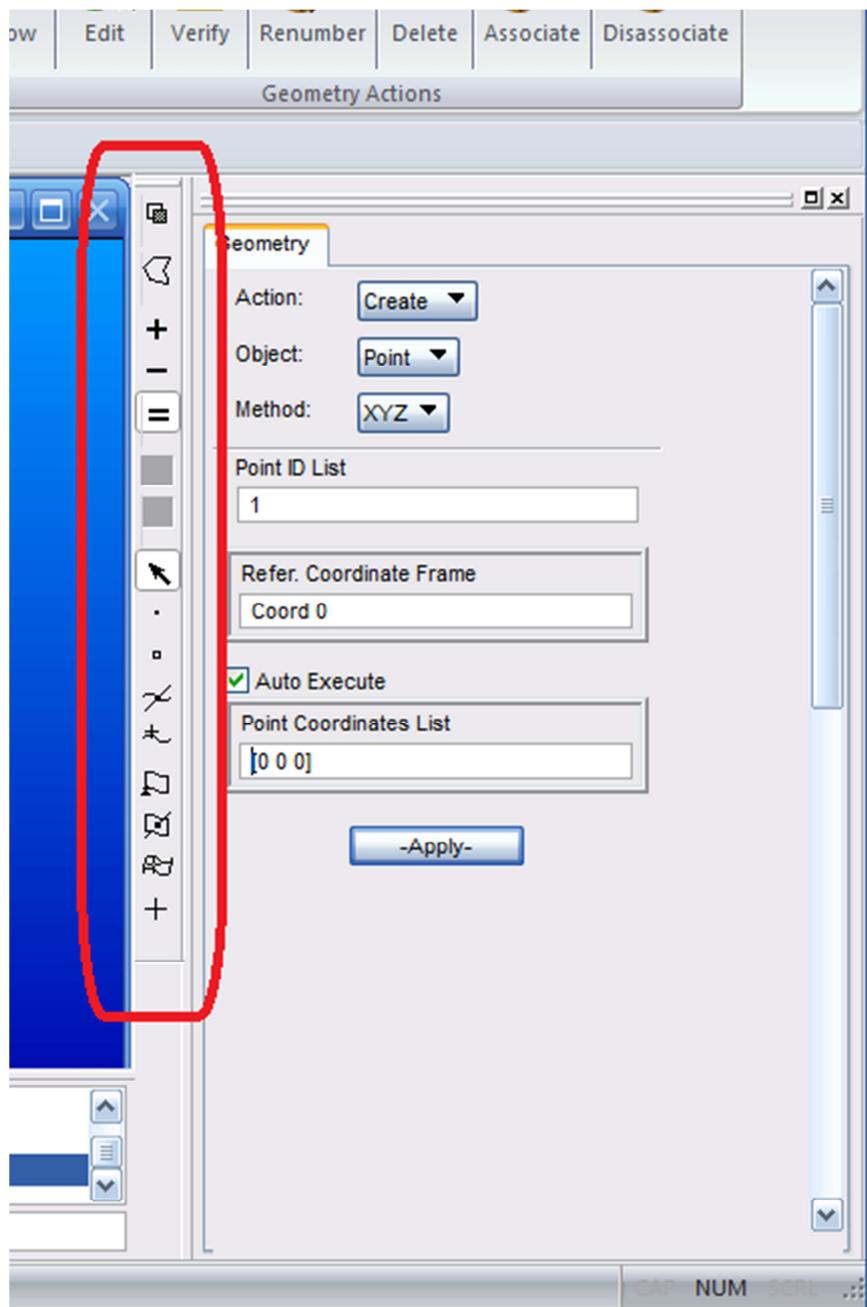
V pravém horním rohu je umístěna ikona představující glób se symbolem firmy mscsoftware. Ikona může být ve třech základních stavech. Pokud se glób netočí, program nevykonává žádnou akci. Pokud glób rotuje a jeho podklad je modrý, program vykonává nějakou funkci a je možno tuto operaci přerušit příkazem abort. Funkce abort je dostupná pod ikonou představující dlaň a je umístěna na aplikačním pruhu v záložce „Home“ anebo je defaultně přítomná v panelu pro rychlý přístup. Poslední stav, který může být indikován ikonou stavu, je nepřerušitelná operace. Tento stav je zobrazován rotujícím se glóbem a červeným podkladem. Takovýto stav nemůže být přerušen abort ikonou, lze ho přerušit na úrovni operačního systému a to shozením procesu Patranu.



Obrázek 3.7 - Ikona stavu (zvýrazněna červeně)

## 3.2 Základy práce s myší

Při prací s myší je vhodné využít selekčního filtru, pomocí kterého je možno zadat pouze selekci požadované entity. Defaultní umístění panelu filtru je vlevo od aplikačního formuláře avšak tato pozice se dá libovolně měnit (plovoucí panel). Vzhled tohoto filtru se mění dle možných selekcí.



Obrázek 3.8 - Selekční filtr (zvýrazněn červeně)

Při výběru pomocí myši je možno postupovat několika způsoby. Pokud myší pohybujeme po grafickém okně, dochází při přechodu přes entitu k zvýraznění této entity (např. plocha, objem, atd.). Při kliknutí levým tlačítkem myši na tuto entitu se vyber. Pokud je nutno vybrat současně více položek je nutno použít funkční tlačítko „shift“na klávesnici. Pro odselekování omylem vybrané entity je možno použít kombinaci „ctrl“ + „shift“ + pravé tlačítko myši. Obdobně slouží tlačítka na filtrování výběru a to tlačítka „plus“, „minus“. Tlačítko „rovná se“ odpovídá piknutí myší na jednu entitu bez držení funkčních kláves. V případě výběru více entit lze využít výběru pomocí boxu a to jednak obdélníkového, který se provádí tak, že se zmáčkne levé tlačítko myši a to se drží při táhnutí přes model. Při stlačení klávesy „ctrl“ je možno vytvářet výběr pomocí n-úhelníku. Konec výběru se zakončí dvojklikem levého tlačítka myši.

Chování myši a nastavení jednotlivých kláves při výběru se dá upravit v hlavním menu v položce „Preferences > Mouse ...“ a „Preferences > Picking ...“.

### 3.3 Základní soubory Patranu

Výše bylo zmíněno, že položka hlavního menu File, slouží k práci se soubory, např. založení nové nebo načtení již vytvořené databáze, tisk, importy a exporty modelů, aj. Zde budou stručně popsány základní soubory používané programem Patran. Jedná se o následující soubory:

- **Databáze (Database)** – je základní soubor. V tomto souboru je vlastně uložen celý námi vytvářený model, tj. jednak geometrie, konečnoprvková síť, okrajové podmínky, nastavení analýzy, atd. Přípona souboru je „\*.db“. Soubor databáze je binární soubor. Platí jeden model, jeden databázový soubor.
- **Jouranal File** – Tento soubor se váže na jeden model (databázi). V tomto souboru jsou zapsány všechny PCL příkazy, které byly použity při vytváření modelu v dané databázi. Soubor je doplňován při každé relaci, u které byl editován model v dané databázi. PCL je zkratka pro „Programing Command Language“, což je vnitřní programovací jazyk programu Patran. Tento soubor se dá využít pro vytváření programových sekvencí (maker) nebo pro restaurování vlastní databáze. Jedná se o textový soubor a je ho možno tedy otevřít v libovolném textovém editoru. Jméno souboru je stejné jako jméno databáze a jeho přípona je „\*.db.jou“.
- **Session File** – Obdoba journal file, ale tento soubor je otevřen při každém spuštění Patranu a uzavřen při ukončení programu. Obsahuje tedy informace o jednom sezení. V pracovním adresáři se tedy může objevit několik session souborů. Soubor je opět textový, tedy je možno ho prohlédnout v libovolném textovém editoru. Přípona souboru je „\*.ses“ a navíc se může za touto příponou objevit číslo, např. „\*.ses.01“, daná počtem tohoto typu souboru. Kromě automatického záznamu, lze session soubory generovat a přehrát pomocí položky hlavního menu a to „File > Session File“.



#### Další zdroje

Detailnější informace lze nalézt v dokumentaci dodávané s daným software, popř. na internetových stránkách <http://www.mscsoftware.com>.

## 4 TVORBA MODELU V SYSTÉMU PATRAN



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ▢ Založit novou databázi.
- ▢ Základní stavební prvky geometrie v programu.
- ▢ Základní práci při tvorbě geometrického modelu.
- ▢ Provést import geometrie z externího souboru.



**Výklad**

Základní kroky při tvorbě nového konečno-prvkového modelu v programu Patran mohou být shrnuty do následujících kroků:

1. Založení a nastavení nové databáze.
2. Tvorba nebo import geometrie.
3. Vytvoření materiálových modelů a definice vlastností chování.
4. Aplikace okrajových/počátečních podmínek na model.
5. Tvorba sítě konečných prvků.

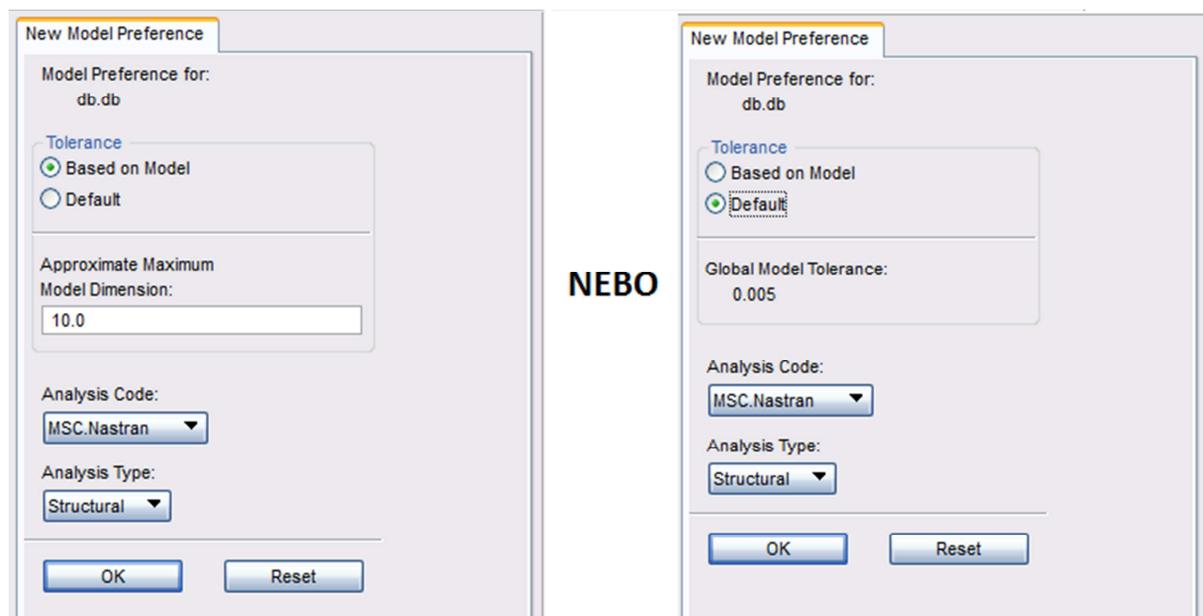
Tento postup odpovídá postupu ve směru zleva doprava v aplikačním pruhu.

*Pozn.: V některých případech je možno začít vytvářet model od kroku čtyři, tj. od generování elementů přímo. Tento postup je vhodný například při modelování prutových soustav, apod. Ve většině případů se však postupuje, nebo je vhodné postupovat, dle výše zmíněného postupu.*

### 4.1 Založení nové databáze

Prvním krokem při tvorbě nového konečno-prvkového modelu je vytvoření nové databáze. Vytvoření databáze se provede pomocí příkazu z hlavního menu „File > New ...“. Po stlačení se objeví na obrazovce dialogové okno, pomocí kterého se vybere umístění a název souboru. V okně je nutno zadat název databáze a potvrdit tlačítkem „OK“.

*Pozn.: V názvech adresářů a názvech souborů je lepší nepoužívat diakritiku, tj. čárky, háčky a zbytečné mezery!*



Obrázek 4.1 – Aplikační formulář při založení databáze

V aplikačním okně je nutno nastavit položky Tolerance. Tolerance modelu může být zadána dvěma způsoby. Budě na základě přibližné velikosti modelu (pokud ji známe), tj. položka „Based on Model“, zadá se hodnota do okna „Model Dimension“. Druhá možnost je nastavení „Default“, kdy se tolerance nastaví na defauktní hodnotu programu. V obou případech se dá hodnota tolerance během práce s modelem měnit pomocí položky hlavního menu „Preferences > Global ... > položka Global Model Tolerance“.

Dále se musí nastavit výpočetní program, s kterým má Patran spolupracovat. Toto nastavení ovlivní nabídku funkcí programu Patran pouze pro daný řešič. V případě použití programu Nastran jako řešiče musí být položka „Analysis Code:“ nastavena na hodnotu „MSC.Nastan“ (popř. „MD.Nastan“). Vše je nutno potvrdit tlačítkem „OK“. Nastavení databáze viz Obrázek 4.1.

## 4.2 Práce s geometrií

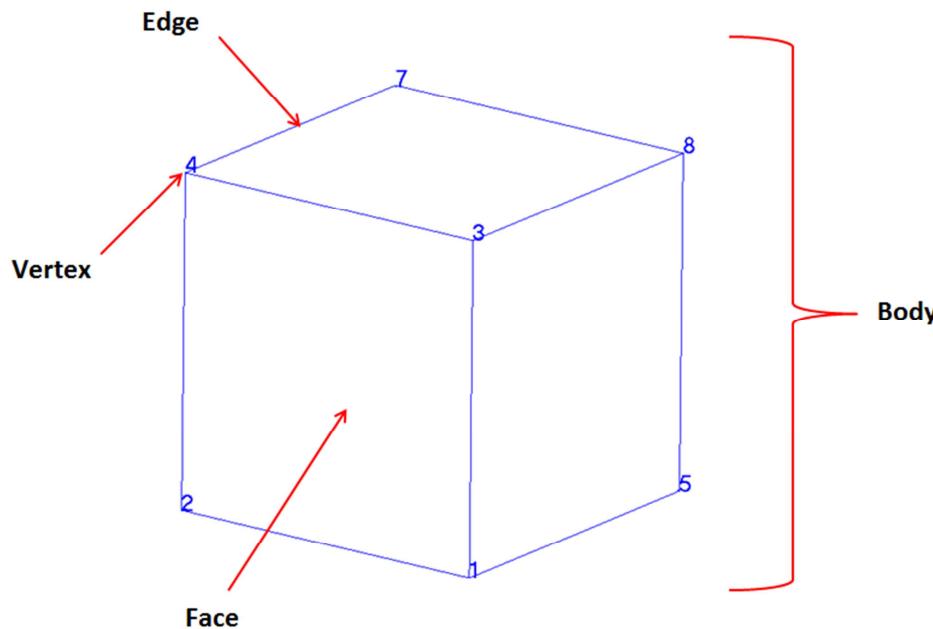
Geometrie může být v Patraru konstruována přímo, nebo může být naimportována z externího CAD systému a poté upravena. Budou popsány oba přístupy.

### 4.2.1 Tvorba geometrie

Při modelování geometrie existují dva přístupy. Jedním je možnost použití standardních funkcí *Patranoovského modeléru*, druhý přístup je použít *Parasolid jádro*. Standardní funkce využívají unikátní kód (knihovny). Jejich vývoj má za sebou dlouhou historii. Druhou možností je využití parasolid jádra v Patraru. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost mít zakoupenou separátní licenci pro použití této knihovny.

Funkce, určeny pro modelování jsou umístěny v aplikačním menu pod záložkou „Geometry“. Tato záložka obsahuje jednak funkce pro vytváření základních entit geometrického modelu, jednak funkce pro manipulaci s těmito entitami jako jsou posuvy, zrcadlení, atd., jednak funkce pro měření, editaci již hotových entit, verifikaci, mazání atd. Program tedy obsahuje všechny důležité funkce pro práci s geometrií. Na tomto místě je

nutno podotknout, že program Patran není CAD modelář, i když je s ním možno bez problému takto pracovat.



Obrázek 4.2 - Topologické struktury

Patran kombinuje topologické struktury pro definování geometrie. Topologické struktury jsou znázorněny na obrázku Obrázek 4.2 pro případ prostorové entity. Všechny topologické entity mohou být vybrány pro provedení potřebné operace. Mezi základní stavební prvky geometrie v Patranu patří:

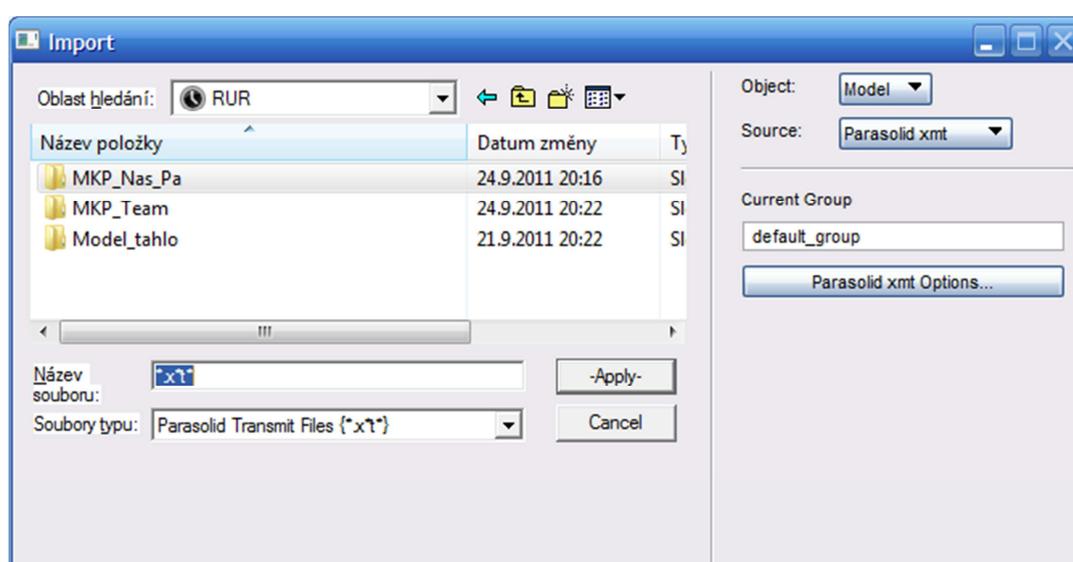
- **Bod (Point)** - je bezdimenzionální entita, která reprezentuje místo v prostoru. Při vytváření geometrií v Patranu, tj. křivek, ploch a objemů, jsou body tvořeny automaticky. Při vytváření vyšších entit není nutné vytvářet nejprve body. Při vytváření sítě se na uzlech dají generovat 0D prvky (např. osamělé hmoty).
- **Křivka (Curve)** - je jednorozměrná entita. Křivka je popsána obecnou vektorovou funkcí s jednou parametrickou proměnnou. V základním nastavení se zobrazuje žlutou barvou.
- **Plocha (Surface)** - v programu Patran se rozeznávají dva základní typy ploch. Jedná se o *jednoduché plochy* (simple surface), zobrazují se zeleně a o *plochy komplexní* (complex surface), které se zobrazují fialově. Rozdíl se projeví pro uživatele v době generování sítě. Jednoduchá plocha může být síťována libovolným způsobem, tj. IsoMesh, Paver a Hybrid. Naproti tomu komplexní plocha může být síťována pouze posledními dvěma způsoby. Více o vytváření sítě viz níže.
  - **Jednoduchá plocha** může mít pouze 3 nebo 4 hrany. V případě 3 hran se jedná o plochu se čtyřmi hranami, kdy jedna je degenerována.
  - **Komplexní plocha** (complex surface, nebo také označovaná trimmed surface) je zobrazena fialově. Může mít více než čtyři hrany a navíc může mít vnitřní

hranice (otvory, dutiny, atd.). Při definici této plochy nejsou použity parametrické souřadnice.

- **Objem** (Solid) - obdobně jako v případě ploch existují dva základní typy objemových entit – *jednoduchý* (simple) a *komplexní* (komplex) objem. Liší se barvou. Jednoduchý objem je zobrazen v základním zobrazení modře, komplexní objem bíle. Rozdíl se projeví pro uživatele v době generování sítě. Na jednoduchém objemu může být sítě vytvořena libovolným způsobem, tj. IsoMesh, TetMesh. Můžou být tedy generovány prvky ve tvaru čtyř- pěti- a šestistěnů. Naproti tomu komplexní objem může být sítě vytvořen pouze metodou TetMesh. Více o vytváření sítě nalezne čtenář v příslušné části textu.
  - **Jednoduchý objem** je definován parametrickou funkcí o třech parametrických proměnných. Může mít od 4 do 6 vnějších ploch. V případě 4 a 5 hraničních ploch jsou 2 nebo 1 plocha degenerovány.
  - **Komplexní objem** může mít libovolný počet hraničních povrchů. V Patranu se objevuje pojmenování „boundary representation“ nebo taky B-rep. Komplexní solid může být vytvořen v nativním Patranovském formátu nebo může být reprezentován v parasolid formátu.
- Kromě výše zmíněných entit lze při modelování použít **roviny**, **vektory** a uživatelsky definované **souřadné systémy**.

#### 4.2.2 Import geometrie

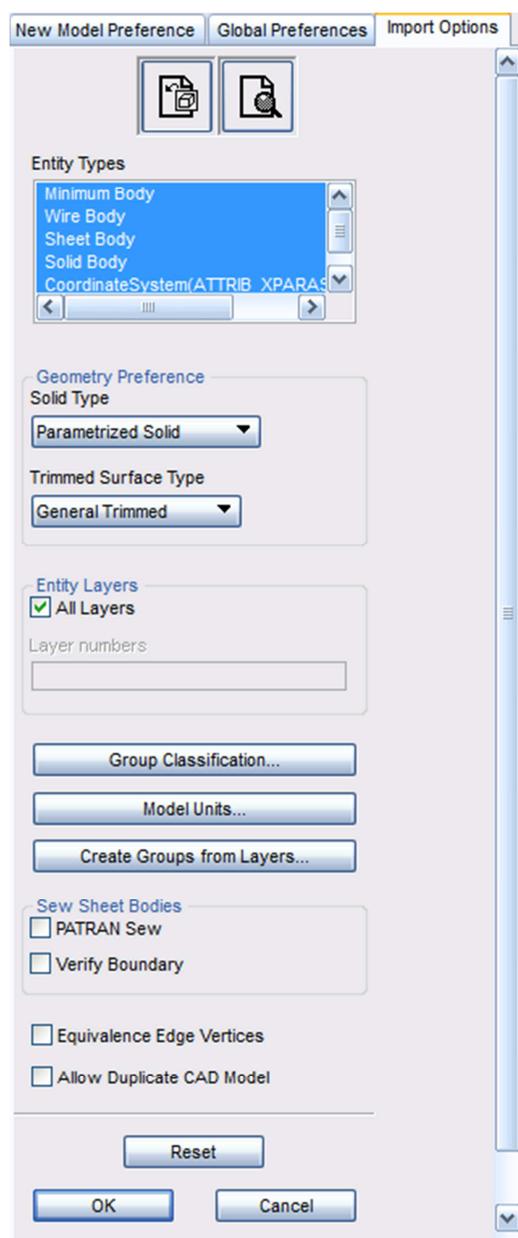
Import se provádí pomocí menu „File > Import ...“. Otevře se dialogové okno, viz. Obrázek 4.3. Program Patran umožňuje importovat velké množství nejen geometrických formátů. Zde se omezíme na popis importu souboru ve formátu parasolid. Importy ostatních formátů je velice podobný. V okně přepnout položky na hodnoty „Object: Model“ a „Source: Parasolid xmt“. Dále pak zmáčknout tlačítko „Parasolid xmt Options...“.



Obrázek 4.3 - Dialogové okno importu

V aplikačním formuláři se objeví parametry importu pro zvolený typ souboru, viz Obrázek 4.4. Zde jsou všechny dostupné nastavení importu pro daný formát souboru. Program Patran obecně nehlídá jednotky, za to je zodpovědný uživatel. Jedině při nastavení geometrie a importu je nutno zadat jednotky. Proto, aby byl model dobře načten, je nutné zvolit vhodné jednotky při importu. V novém okně kliknout na tlačítko „Model Units“, objeví se nová záložka. Zde vybrat potřebné jednotky, nejčastěji milimetry. Vše potvrdit tlačítkem „OK“ a po návratu do předchozí záložky potvrdit znova tlačítkem „OK“ nebo ještě nastavit potřebná nastavení (většinou není potřeba). Ve stále otevřeném dialogovém okně pro výběr souboru vybrat potřebný soubor a potvrdit tlačítkem „-Apply-“,

Na obrazovce se objeví nové okno, ve kterém jsou shrnutý informace o importu. Toto okno zavřeme tlačítkem „OK“. Tímto je celý proces importu ukončen. V grafickém okně je načtena geometrie a je možno s ní pracovat.



Obrázek 4.4- Import aplikační formulář



## Řešený příklad

Předtím, než budeme pokračovat v dalším výkladu, by bylo vhodné si vyzkoušet základní práci popsanou v předcházejícím textu. Pro prostudování základních možností modelování v Patru bylo vytvořeno instruktážní video. Toto video je dostupné na přiloženém CD. Jedná se o video č. 1. Bližší informace k tomuto příkladu naleznete v kapitole 8, která slouží jako doplňkový text k instruktážnímu videu.

## 5 TVORBA SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ A APLIKACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



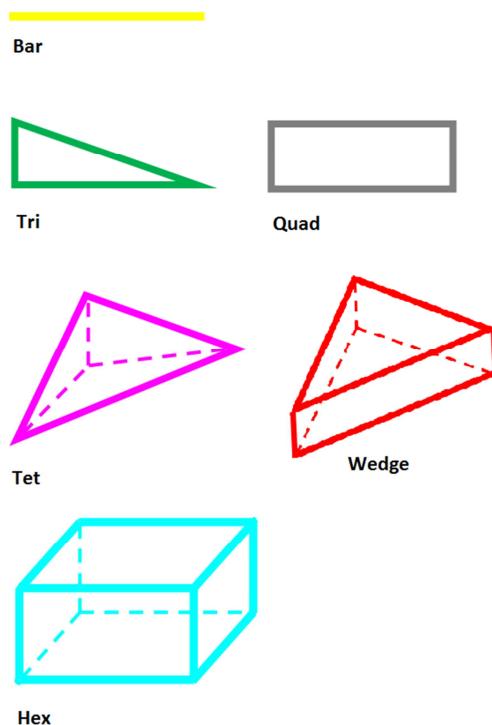
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete

- Znát rozdíl mezi manuálním a automatickým způsobem tvorby sítě.
- Znát typy a použitelnost jednotlivých algoritmů tvorby sítě.
- Nastavení materiálových parametrů.
- Definovat vlastnosti elementů.



**Výklad**

Přístup k funkcím pro vytváření a editaci sítě konečných prvků jsou skryty v aplikačním menu v záložce „Meshing“. Konečné prvky mohou mít různý tvar, podle toho na jakou reprezentaci se mají použít. Základní tvary jsou znázorněny na obrázku Obrázek 5.1.



Obrázek 5.1 - Základní tvary prvků

Kromě tvaru se ještě rozeznávají prvky s lineární či kvadratickou approximací. Prvky, které mají pouze uzly v rozích, jsou lineární, prvky které mají tzv. meziuzly (uzly umístěné

např. uprostřed hrany či plochy) jsou kvadratické. Kromě tvaru musí být element popsán z pohledu jeho fyzikální chování. To je zadáváno pomocí vlastností („properties“), viz výše.

V programu Patran se dá síť konečných prvků vytvářet třemi způsoby:

- **Manuální tvorba sítě**, tj. manuálně se vytvoří uzly a na nich se vytvoří elementy. Tento postup je poměrně náročný a hodí se spíše pro menší úlohy. Příkladem kdy je možno využít tento postup je modelování příhradových soustav, popřípadě rámových konstrukcí.
- **Automatická generace sítě** – při tomto způsobu se využije automatický generátor sítě, který vytvoří síť na základě geometrického modelu. Vhodným nastavením parametrů generátoru se dosahuje určité hustoty a kvality sítě.
- **Kombinace předchozích způsobů** – příkladem může být například vytváření speciálních prvků na již generovaném modelu, např. tvorba tzv. rigid prvků, nebo manuální úprava vygenerované sítě.

### 5.1.1 Automatická generace sítě

Obecný postup při tvorbě sítě, při automatické generaci, je možno rozdělit do následujících kroků:

- Vytvoří se, nebo se importuje geometrie. Při importu se dále vyčistí nepotřebné části (např. malá sražení, otvory, atd., tedy z pohledu výpočtu nepodstatné části).
- Zvolí se topologie elementu (např. čtyřstěn, lineární, kvadratický, aj.).
- Vybere se typ síťovacího algoritmu („mesher“, např. Paver)
- Nastaví se parametry sítě (např. velikost elementu, pokrytí oblouků, atd.)
- Provede se vlastní síťování. Pokud vzniklá síť (na kvalitě sítě záleží přesnost výsledků) nesplňuje podmínky, může se celý proces od bodu 2. opakovat až do dosažení požadované hustoty a kvality sítě.

V případě automatická generace sítě jsou v programu dostupné různé typy automatických generátorů sítí. Jednotlivé generátory mají svoje výhody a nevýhody a dále pak jsou zde omezení, kdy lze jednotlivé generátory použít. V programu jsou dostupné následující algoritmy pro tvorbu sítě:

**IsoMesh** (pro tvorbu mapované sítě) – 1D, 2D, 3D sítě. Vhodný pro síťování všech parametrických entit, tj. křivek (žlutá), jednoduchých ploch (zelená) a objemů (modrá). Jestliže je geometrie neparametrická nelze tento algoritmus použít.

**Paver** – 2D sítě. Je použitelný na jakoukoliv plochu tedy jak na jednoduchou (zelenou), tak na komplexní (fialovou). Algoritmus začíná při vytváření sítě na hranách a směruje směrem do středu plochy.

**Hybrid** – 2D sítě. Obdobně jako Paver algoritmus, ale většinou vytváří lépe strukturovanou síť. Třeba konkrétně vyzkoušet.

**TetMesh** – 3D síť. Použitelný na jakýkoli typ objemu (bílý, modrý). Generuje síť tvořenou čtyřstěny (tetraedry). Využívá se tzv. Delauney algoritmus. Vytváření sítě je v následujících krocích: nejprve se vytvoří síť na povrchu (pomocí hybridního postupu, viz výše) a pak se generují z takovýchto prvků prvky do prostoru (objemu). Jedná se o robustní a rychlý algoritmus.

**Sweep mesh** – 2D, 3D síť. Jedná se o metodu vytahování entit. Z jednorozměrné entity při vytahování vzniká entita dvourozměrná, z dvourozměrné entity pak entita trojrozměrná. Pomocí tohoto postupu se dají vytvářet velmi dobré sítě. Existuje několik možnosti vytahování (ve směru normály, rotace, podél křivky, atd.).



## Řešený příklad

Předtím, než budeme pokračovat v dalším výkladu, by bylo vhodné vyzkoušet základní si práci popsanou v předcházejícím textu. Pro prostudování základních možností tvorby sítě konečných prvků v programu Patran, bylo vytvořeno instruktážní video. Toto video je dostupné na přiloženém CD. Jedná se o video č. 2. Bližší informace k tomuto příkladu naleznete v kapitole 9, která slouží jako doplnkový text k instruktážnímu videu.

## 5.2 Vytvoření materiálových modelů a definice vlastností

Pro popsání fyzikálního chování modelu je nutno zadat jednak materiálový model chování materiálu, jednak správně nastavit vlastnosti chování jednotlivých elementů. Využívají se funkce skryté v záložce „Properties“ v aplikačním menu.



Obrázek 5.2 - Aplikační pruh při volbě materiálů a definování vlastností elementů



## Další zdroje

Pro popis jednotlivých elementů a jejich vlastností je vhodné prostudovat manuál dodávaný s řešičem, v našem případě program Nastran. V případě tohoto produktu se jedná o dokumentaci v manuálech, které jsou dodaný přímo v instalaci, s názvy „*Quick Reference Guide*“, „*Getting Started User's Guide*“ a „*Linear Static User's Guide*“.

## 5.3 Aplikace okrajových podmínek na model

Pro unikátní řešení je nutno zadat potřebné okrajové podmínky. Existují dva základní typy okrajových podmínek:

- **Kinematické** – představují vazby tělesa k okolí. Vazební (kinematické) okrajové podmínky musí být v případě statické analýzy zadány tak, aby nemohlo dojít k posuvu tělesa jako tuhého celku. Pokud nebude tato podmínka splněna řešení nezkonverguje a ve výstupní souboru řešiče (f06) se objeví chybová hláška. Toto omezení lze obejít, ale to přesahuje rámec tohoto textu.
- **Silové** – Obecně rozdělujeme dvě skupiny silových okrajových podmínek a to objemové (např. vlastní tíha, zrychlení, atd.) a povrchové (např. tlak). K takto definovaným podmínkám se dají přidat i tzv. osamělé síly (momenty). Pro silové okrajové podmínky je k dispozici velká paleta funkcí.

Okrajové podmínky mohou být konstantní nebo proměnné (např. prostorově). Takovéto okrajové podmínky se definují pomocí tzv. polí (LBC Fields).

Kromě zadání okrajových podmínek je zde možnost vytvořit případy zatížení (zátěžné stavy), tzv. „**Load Cases**“. Jedná se o to, že jeden model může být zatížen více způsoby. Např. v prvním případě most může být zatížen jen vlastní váhou vozovky, v druhém případě na něj působí zatížení od projíždějícího auto, dále pak povětrnostní vlivy, atd. Z každého zatížení je možno vytvořit jeden zátěžný stav a provést potřebné simulace. V případě lineární analýzy platí princip superpozice a lze separátní výsledky sčítat. Toto je možno provést při zpracování výsledků a analyzovat jednotlivé kombinace bez nutnosti počítání.

Okrajové podmínky lze aplikovat přímo na konečnoprvkový, nebo na geometrický model. Oba dva přístupy mají svoje výhody a nevýhody. Aplikace okrajových podmínek na geometrický model má tu výhodu, že při změně sítě se nemusí měnit. Tyto okrajové podmínky jsou automaticky při generování vstupního souboru řešiče převedeny na konečnoprvkový model. Při aplikaci okrajových podmínek přímo na konečno-prvkovou síť je úplná kontrola uživatele nad zadáním. Další výhodou je možnost aplikace „speciálních“ prvků do výpočtového modelu, např. tzv. „rigid“ prvky, aj.

## 6 NASTAVENÍ A SPUŠTĚNÍ PROGRAMU NASTRAN



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete znát

- Jak založit novou úlohu (job) v programu Patran pro řešič Nastran.
- Nastavení parametrů úlohy a řešiče podle Vašich požadavků.

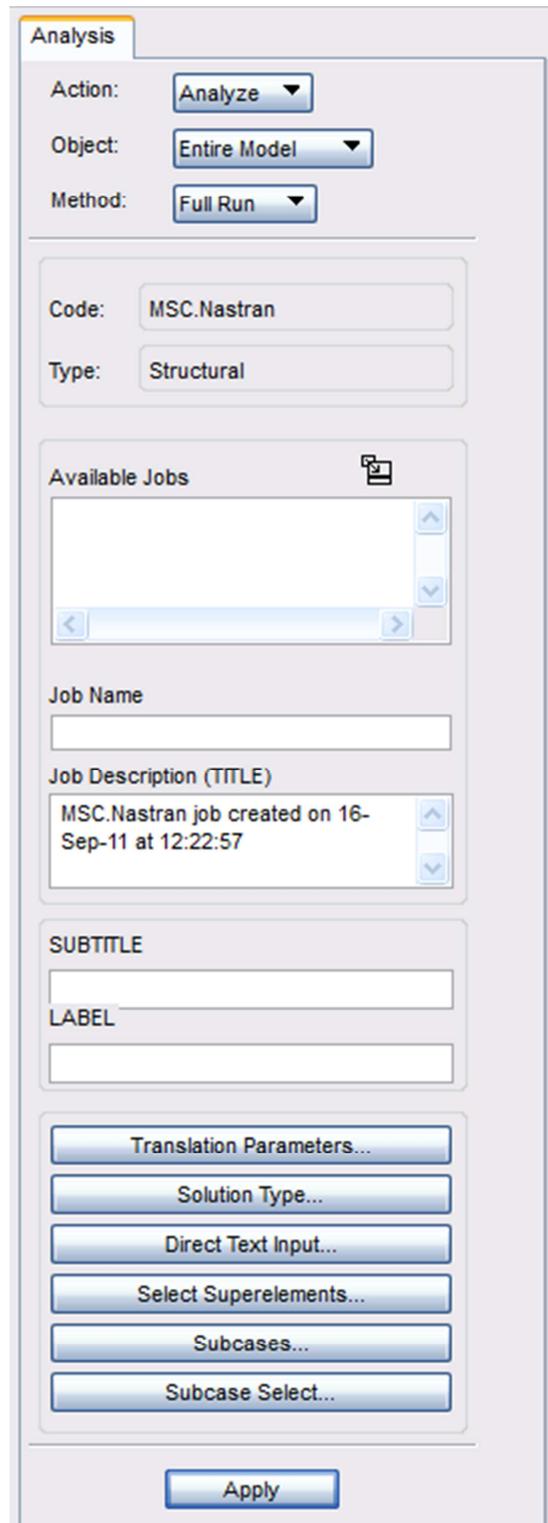


**Výklad**

K nastavení řešiče a k jeho spuštění se přistupuje přes záložku „Analysis“. V případě, že pro výpočty je zvolený program Nastran, je aplikační formulář znázorněn na obrázku Obrázek 6.1. V daném formuláři jsou dostupné následující položky:

- **Available Jobs** – jedná se o definované úlohy uložené v dané databázi. V databázi může být více úloh.
- **Job Name** – slouží k vytvoření jména pro novou úlohu, ve které budou uložena jednotlivá nastavení. Je vhodné dávat jednotlivým úlohám popisné názvy.
- **Title, Subtitle, Label** - jsou nepovinné položky a slouží k vytvoření poznámek k námi definované úloze.
- Tlačítko „**Translation parameters ...**“ otevře nové okno, ve kterém jsou nastavení určená pro příslušný řešič, tedy Nastran, a nastavení parametrů translace modelu.
- Tlačítko „**Solution Type ...**“ otevře novou záložku s názvem „Solution Type“, ve které je možno vybrat typ analýzy, jednotlivá nastavení dané analýzy. Důležitou položkou je definice typu výsledkového souboru.
- Tlačítko „**Direct Text Input ...**“ je určené pro přímé ovlivnění textového vstupního souboru Nastranu. Ne všechny možnosti řešiče lze přímo „naklikat“ z uživatelského rozhraní programu Patran. V tomto případě je možno vygenerovat vstupní soubor a ten manuálně zeditovat použitím libovolného textového editoru, nebo lze použít dialogové okno, které se spustí právě stlačením tlačítka „Direct Text Input ...“.
- Tlačítko „**Subcases ...**“. Při stlačení tlačítka se otevře nové okno, ve kterém se na základě zátěžních stavů, viz okrajové podmínky výše, dají definovat tzv. subcases, tedy nastavení jednotlivých zátěžních stavů. Mohou se definovat parametry, které výsledky počítat a ukládat do výstupních souborů, dále lze definovat textové vstupy pro přímé ovlivnění vstupního souboru řešiče, aj.

- Tlačítko „**Subcase Select ...**“ je určeno k výběru jednotlivých „Subcase“ definovaných v předchozím kroku, které budou vypočten při běhu jedné úlohy (job). Takto získané výsledky lze pak jednoduše kombinovat.



Obrázek 6.1 - Aplikační formulář úlohy při použití Nastranu

## 7 NAČTENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH ZPRACOVÁNÍ



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



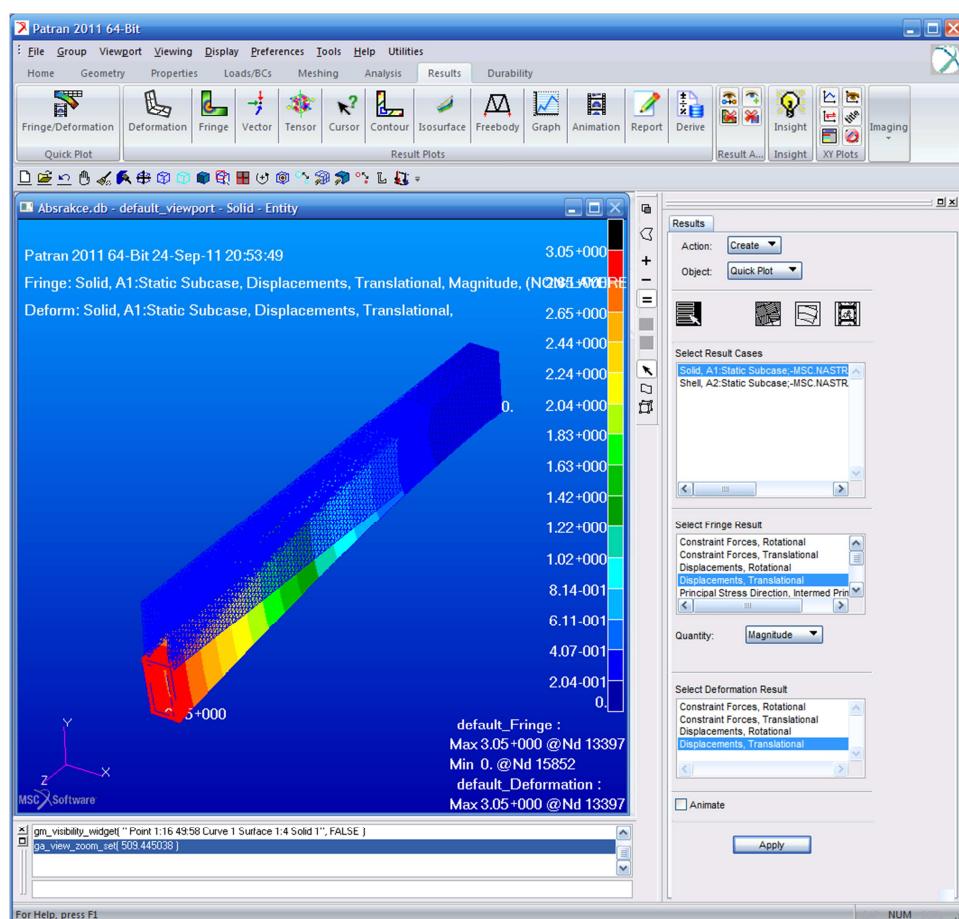
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Popsat regulační obvod.
- Definovat pojmy z oblasti automatizace a informatiky.
- Vyřešit příklady týkající se automatizace a informatiky



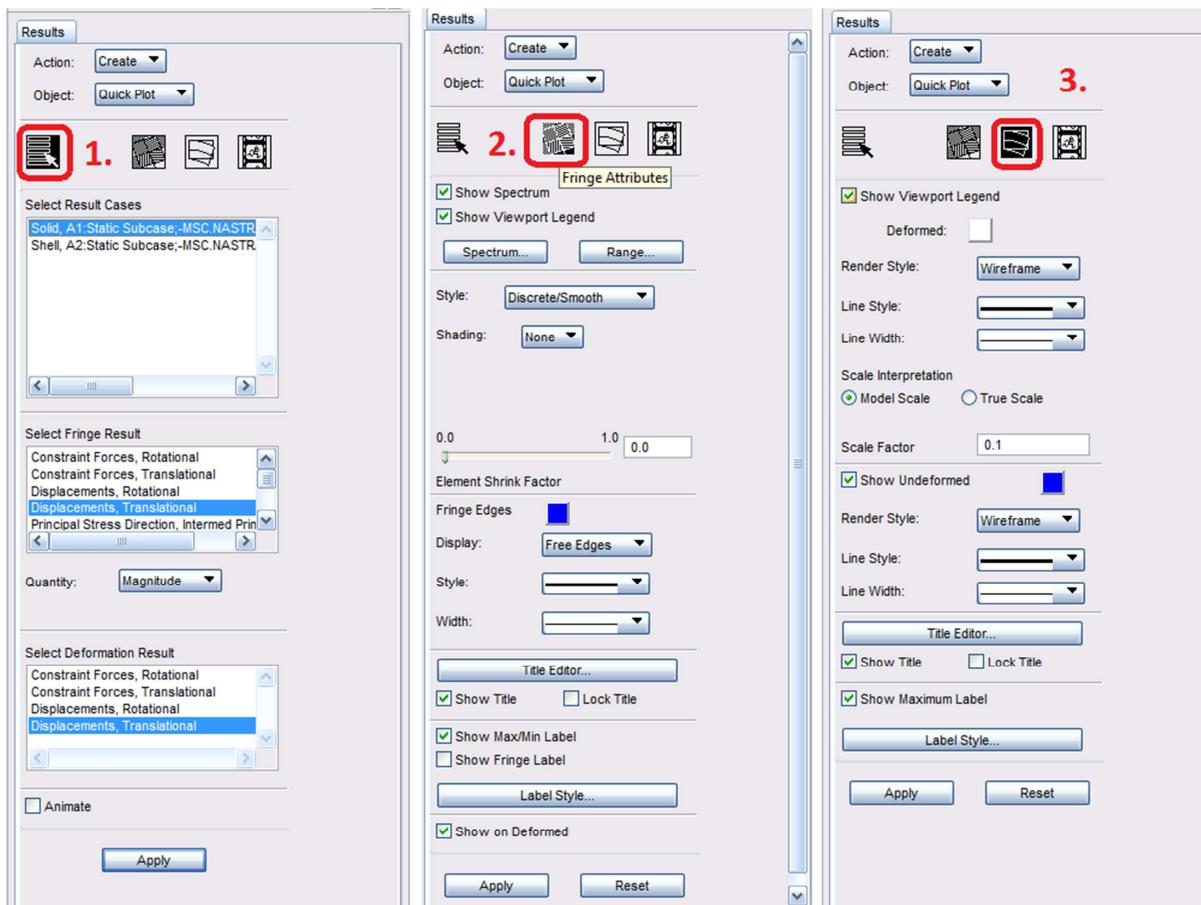
**Výklad**

Posledním krokem analýzy je zobrazení výsledků a jejich zhodnocení. K výsledkům se lze dostat přes záložku „Results“ v aplikačním menu. V tomto menu je nepřeberné množství funkcí pro získání a zobrazení výsledků.



Obrázek 7.1 - Quick Plot

Nejúžívanější funkce je položka „Quick Plot“. Pomocí této položky je možno rychle vykreslit jednak zdeformovaný tvar součásti a jednak jednotlivé veličiny zájmu (napětí, posuvy, deformace, ...). Funkce poskytuje také položky, pomocí kterých je možno nastavit zobrazování jednotlivých výsledků, a to jak popisků (velikost písma, umístění na obrazovce, aj.), tak grafického vyjádření (spektrum, rozsah, aj.).



Obrázek 7.2 - Quick plot: 1. Výběr zobrazovaných veličin, 2. Nastavení parametrů zobrazování vybraných veličin, 3. Nastavení parametrů vykreslení deformovaného tvaru.

Dalšími položkami menu „Results“ jsou nabídky pro vykreslení deformací, hodnot ve formě barevných map, vektorů tenzorů, kontur, tvorba grafů z načtených hodnot, generování reportů, možnosti výpočtů s vypočtených dat, atd.



## Řešený příklad

Předtím, než budeme pokračovat v dalším výkladu, by bylo vhodné vyzkoušet si základní práci popsanou v předcházejícím textu.

Pro prostudování základních možností tvorby sítě konečných prvků v programu Patran, bylo vytvořeno instruktážní video. Toto video je dostupné na přiloženém CD. Jedná se o videa č. 3, 4 a 5. Bližší informace k těmto příkladům naleznete v kapitolách 10, 11 a 12, která slouží jako doplňkový text k instruktážním videím.

## 8 ZÁKLADNÍ PRÁCE PŘI TVORBĚ GEOMETRIE V PATRANU

Pro prostudování základních možností modelování v Patranu bylo vytvořeno instruktážní video. Jsou zde předvedeny základní postupy tvorby výše popsaných entit geometrie. Jedná se o video č. 1.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



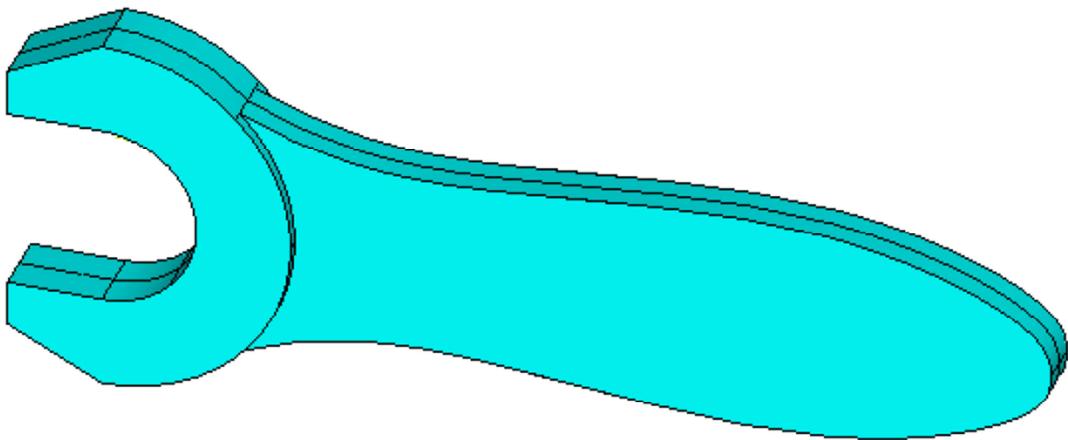
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Spustit program Patran.
- Založit a nakonfigurovat novou databázi.
- Vytvořit geometrický model objemového tělesa.
- Provést export geometrického modelu z databáze Patranu do souboru ve formátu parasolid.

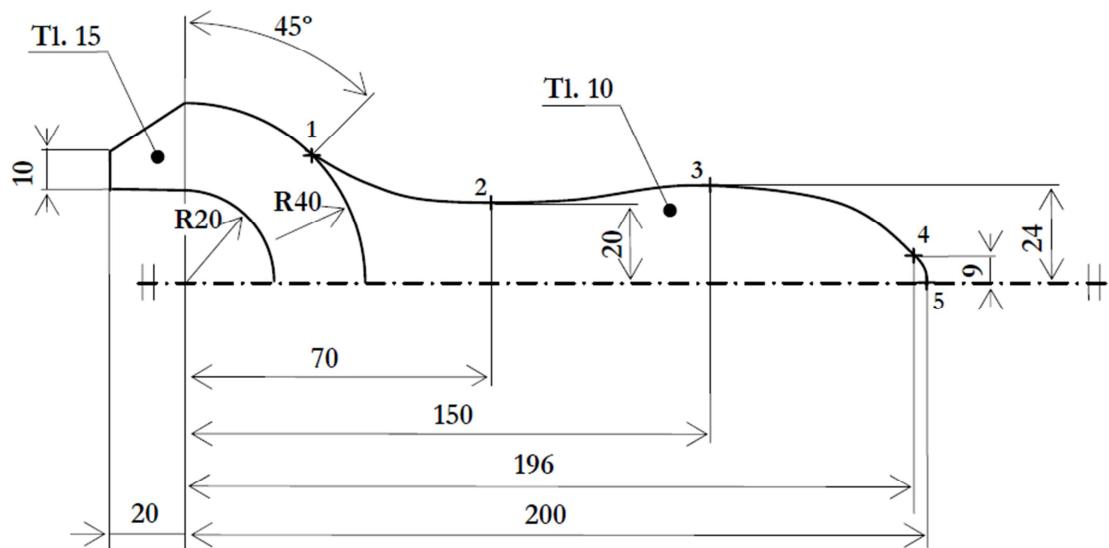


**Zadání**

Prvním úkolem je vytvořit geometrický model zjednodušeného maticového klíče, viz Obrázek 8.1 a Obrázek 8.2, a jeho export z proprietární databáze Patranu do obecnějšího formátu parasolid, který je možný načíst ve většině výpočtových a CAD systémů. Je nutno na tomto místě připomenout, že program Patran není primárně určen jako CAD systém na tvorbu trojrozměrné grafiky, ale jako nástroj pro přípravu konečno-prvkového modelu a na vizualizaci získaných výsledků řešení.



Obrázek 8.1 – Geometrický model zjednodušeného maticového klíče



Obrázek 8.2 – Výkres maticového klíče



### CD-ROM

Zmiňované video je dostupné na přiloženém CD-ROM nosiči.

## 9 MOŽNOSTI JEDNOTLIVÝCH SÍŤOVACÍCH ALGORITMŮ

Pro prostudování základních možností tvorby sítě v Patranu bylo vytvořeno instruktážní video. Jsou zde předvedeny základní postupy tvorby konečno-prvkové sítě na dvou- a trojrozměrných geometrických entitách. Jedná se o video č. 2.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



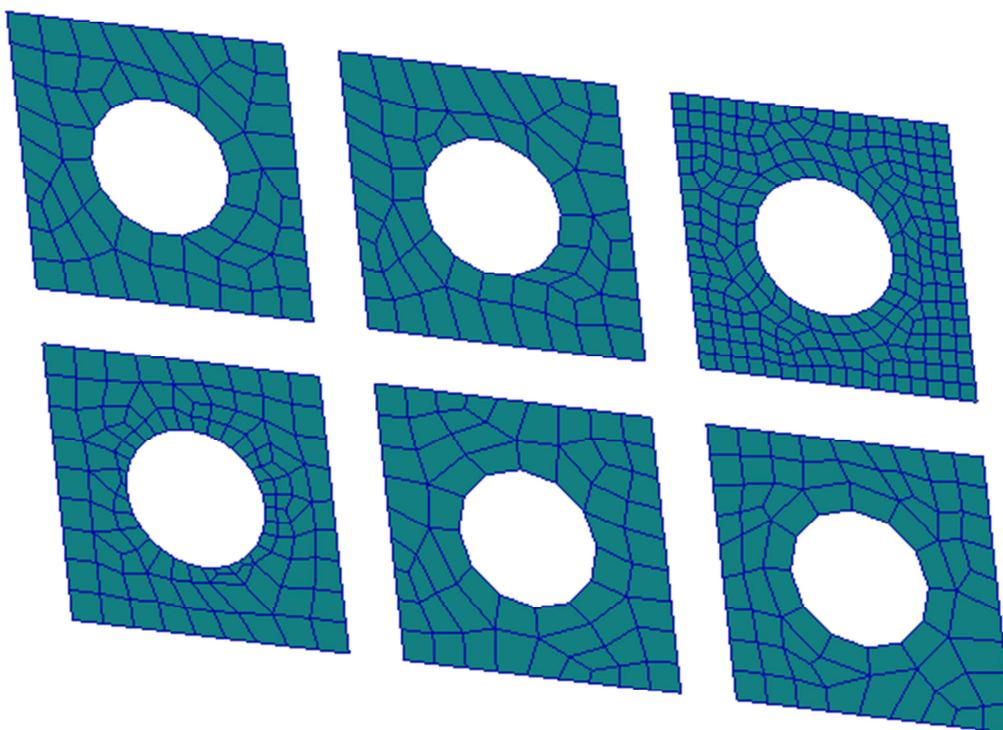
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Vybrat si mezi vhodným síťovacím algoritmem jak pro tvorbu rovinných tak prostorových sítí.
- Nastavit jednotlivé parametry algoritmů tak, aby vznikla vhodná síť.
- Upravit vhodně geometrii modelu, tak aby bylo dosaženo vhodného tvaru sítě konečných prvků.

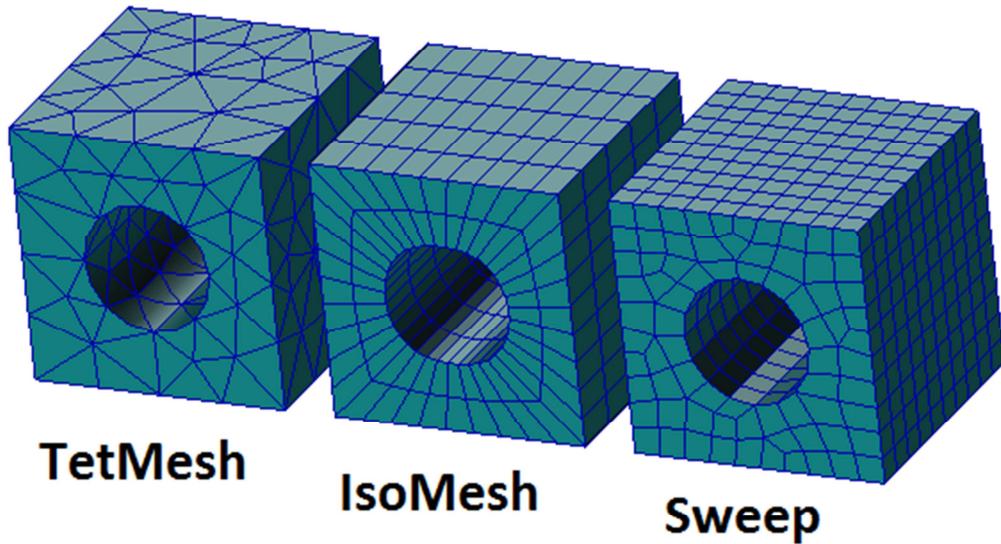


**Zadání**

Úkolem této úlohy je seznámit se s možnostmi tvorby sítě pro rovinné a prostorové úlohy. Úloha je řešena na jednoduchých tělesech, viz obrázky.



Obrázek 9.1 - Možnosti "Paver" sitáře na komplexní ploše



Obrázek 9.2 - Možnosti tvorby sítě prostorových prvků na komplexním objemu



### CD-ROM

Zmiňované video je dostupné na přiloženém CD-ROM nosiči.

## 10 IMPORT, ÚPRAVA GEOMETRIE, PŘÍPRAVA KONEČNO-PRVKOVÉHO MODELU A JEDNODUCHÁ STATICKÁ ANALÝZA

Pro prostudování základních postupů při vytváření konečno-prvkového modelu v programu Patran bylo vytvořeno instruktážní video. Jsou zde předvedeny základní postupy importu geometrického modelu, jeho úprava, nastavení materiálu a vlastností chování jednotlivých prvků, tvorba konečno-prvkové sítě, zadání okrajových podmínek, nastavení parametrů řešiče, provedení konečno-prvkové analýzy programem Nastran a načtení a zpracování výsledků analýzy. Jedná se o video č. 3.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Provést import geometrie do programu Patran z externího souboru.
- Upravit nainportovanou geometrii a odstranit tak nepotřebné detaily geometrického modelu, které jsou nepodstatné z hlediska výpočtu.
- Zadat materiál a vlastnosti elementů.
- Vytvořit konečno-prvkovou síť na reálném tělese.
- Provést nastavení parametrů řešiče Nastran, spustit analýzu.
- Načíst a zpracovat výsledky řešení v programu Patran.



**Zadání**

Úkolem tohoto videa je seznámit se s tvorbou výpočtového konečno-prvkového modelu reálné součásti. Zadáním je zpracovat napěťově-deformační analýzu páky stahováku. Stahovák je zobrazen na obrázku Obrázek 10.1. Samostatné rameno páky pak na obrázku Obrázek 10.2.

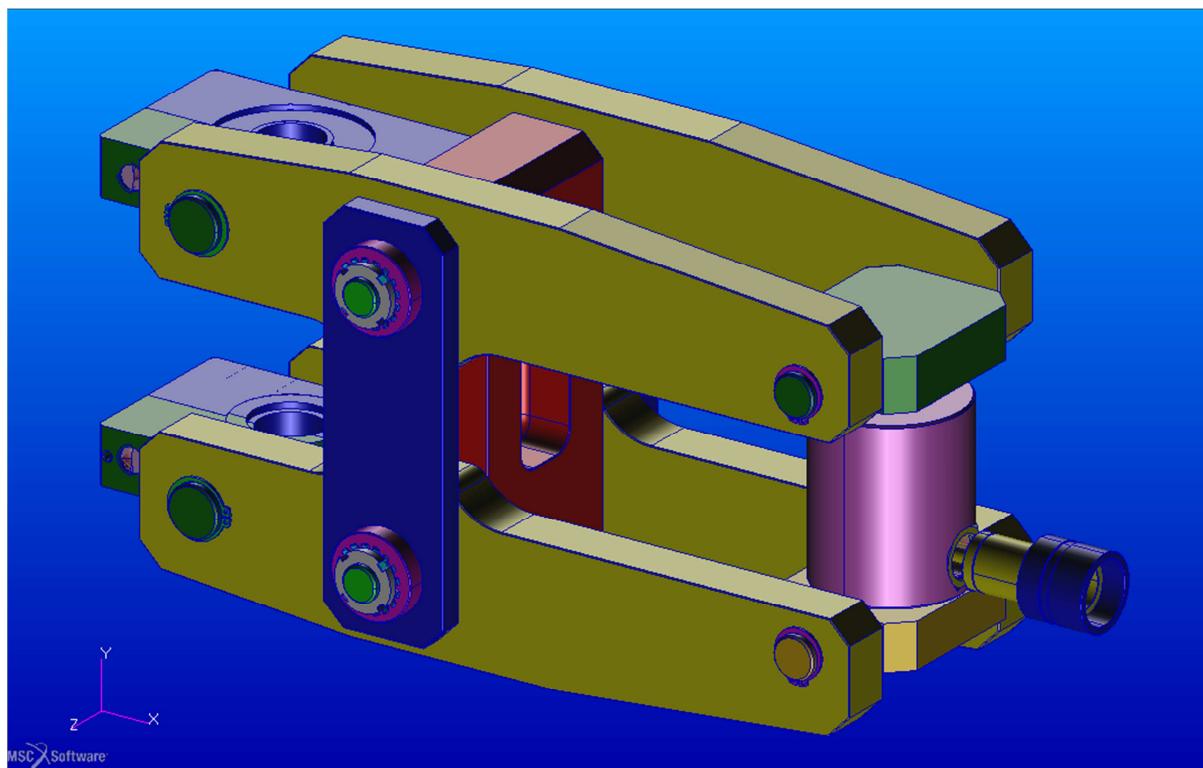
Pro unikátní výpočet je nutno znát okrajové podmínky. Ty jednak vycházejí z uložení ramene, jednak ze silového působení. Jsou zakresleny na obrázku Obrázek 10.3.

Při zadávání okrajových podmínek je nutno se přiblížit co nejpřesněji chování reálného systému, protože nevhodně vytvořené okrajové podmínky mohou celý výpočet úplně znehodnotit. V tomto případě bylo v místě zadání silové okrajové podmínky použito rozložení tlaku v místě otvoru pro čep. Hodnota tlaku byla určena z působící síly a z rozměrů otvoru pro čep. Uvažuje se, že rozložení průběhu kontaktního tlaku je dle funkce sinus. Vzorec pro výsledný tlak má pak tvar

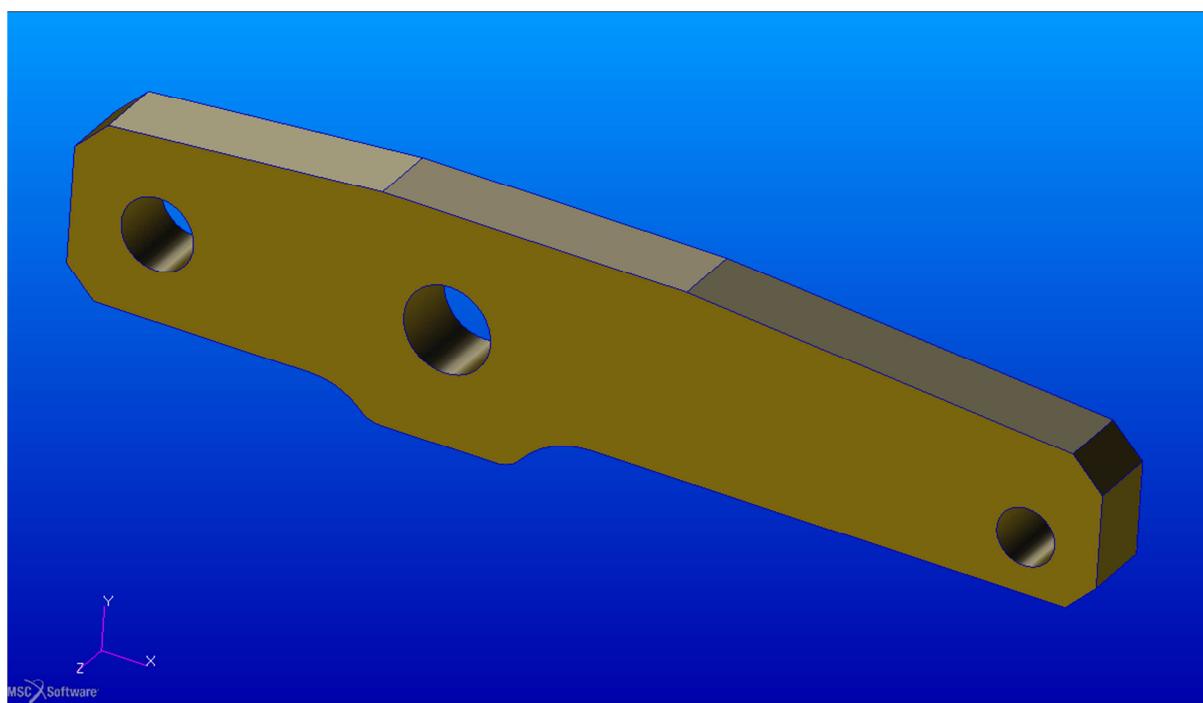
$$p_0 = \frac{2F}{\pi R t},$$

kde  $p_0$  je tlak,  $F$  je zadaná působící síla  $R$  je poloměr otvoru pro čep a  $t$  je šířka páky. Lze použít i jiný typ rozložení než je dle funkce sinus a to dle uvážení popř. zkušeností

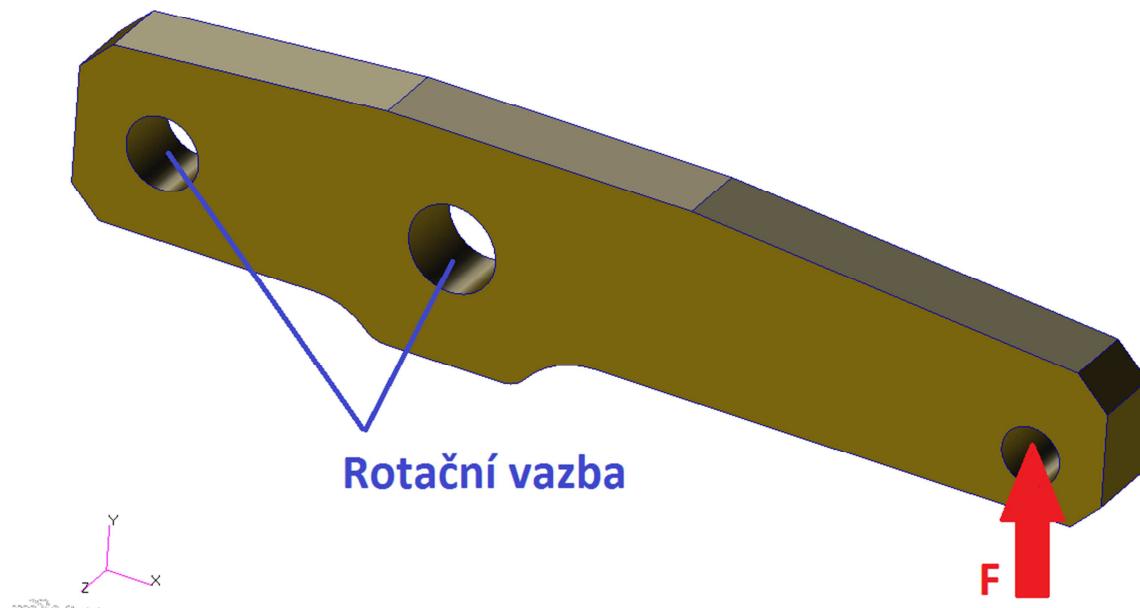
řešitele. V tom případě je ale nutno odvodit pro výpočet tlaku jiný vzorec, než který je uvedený, tak aby byla zachována výsledná hodnota působící síly.



Obrázek 10.1 - Obrázek modelu sestavy stahováku



Obrázek 10.2 – Rameno stahováku



Obrázek 10.3 – Okrajové podmínky modelu

V místě působení tlaku je nutno definovat pomocný souřadný systém (cylindrický), definovat funkci, podle které je daný tlak rozložen. V příkladu je užito funkce `sinr(x)`, což je funkce počítající sinus úhlu `x` zadáno v radiánech. Jedná se o funkci z knihovny funkcí jazyku PCL, což je vnitřní programovací jazyk systému Patran. Bližší informace o PCL nalezezájemce v dokumentaci dodávané s programem.

Obdobně je nutno zadat okrajové podmínky pro simulaci v místech otvorů pro čep. Pro definici okrajových podmínek je nutno vytvořit pomocné souřadné systémy (cylindrické) a předepsat k nim příslušné parametry, tj. zabránit v posuvu v radiálním a osovém směru a povolit rotace.

Materiál součásti se předpokládá izotropní a homogenní s elastickými vlastnostmi:

- modulu pružnosti v tahu  $E = 210000 \text{ MPa}$ ,
- Poissonova čísla  $\mu = 0,3$ .

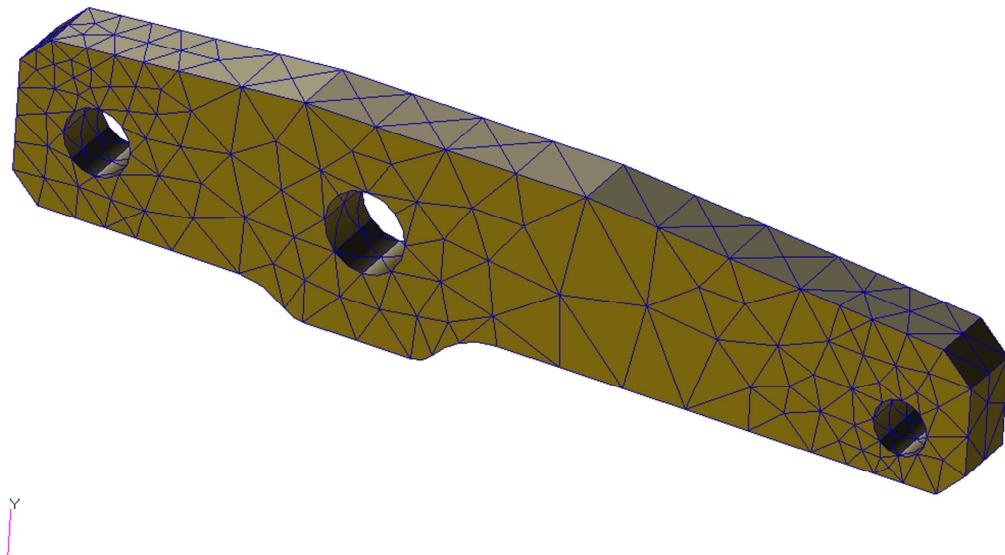


### Úlohy k řešení 10.1.

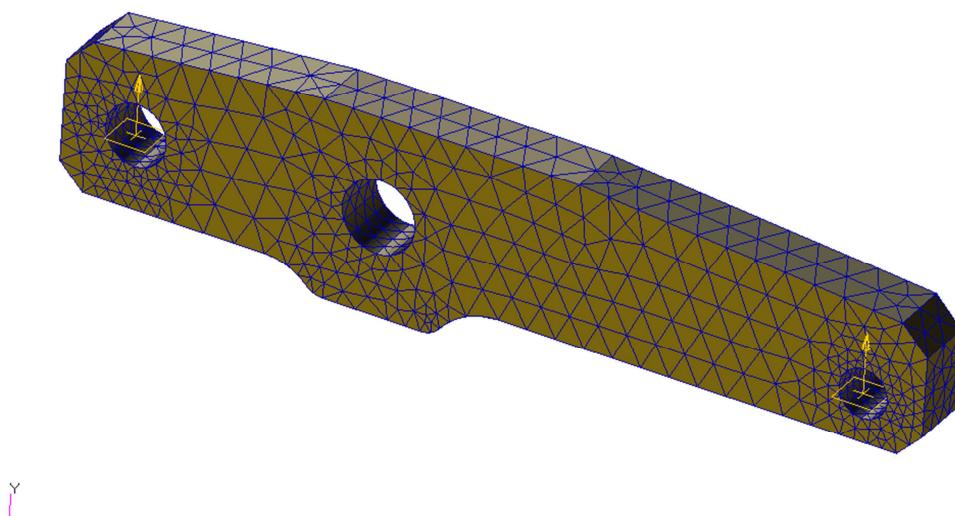
Protože výsledky získané metodou konečných prvků jsou závislé na hustotě sítě, provedte zahuštění sítě modelu a novou analýzu. Pokuste se změnit velikost elementu (alespoň na polovinu, tj. zhustit síť dvojnásobně), popřípadě i vhodně nastavit hodnoty parametrů schované pod tlačítkem „**TetMesh Parameters ...**“, tak aby se co nejvhodněji pokryla oblast v okolí otvorů apod. O dalších způsobech síťování tohoto modelu pojednává video č. 4, viz dále. Možné tvary sítí před a po přesíťování jsou patrné z obrázku Obrázek 10.4 a obrázku Obrázek 10.5

Úkoly jsou následující:

1. Vytvořte novou síť a provedte analýzu.
2. Porovnejte získané výsledky s výsledky z předchozího řešení.
3. Vypočítejte, o kolik procent se změnila hodnota maximálního průhybu a napětí.



*Obrázek 10.4 – Možný tvar sítě před přesíťováním*



*Obrázek 10.5 - Možný tvar sítě po přesíťováním*



## **CD-ROM**

Zmiňované video je dostupné na přiloženém CD-ROM nosiči. Současně je zde dostupný geometrický model ramene stahováku.

## 11 MOŽNOSTI TVORBY SÍTĚ NA REÁLNÉM TĚLESE

Pro prostudování základních možností tvorby sítě v Patranu bylo vytvořeno instruktážní video č. 2. Jsou zde předvedeny základní postupy tvorby konečno-prvkové sítě na dvou- a trojrozměrných geometrických entitách. Jak postupovat při tvorbě konečno-prvkového modelu a jak získat výsledky řešení bylo ukázáno na videu č. 3. Jednalo se o model ramene stahováku. Toto video, video č. 4, ukazuje další možnosti generování sítě pro již zmínované rameno stahováku.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



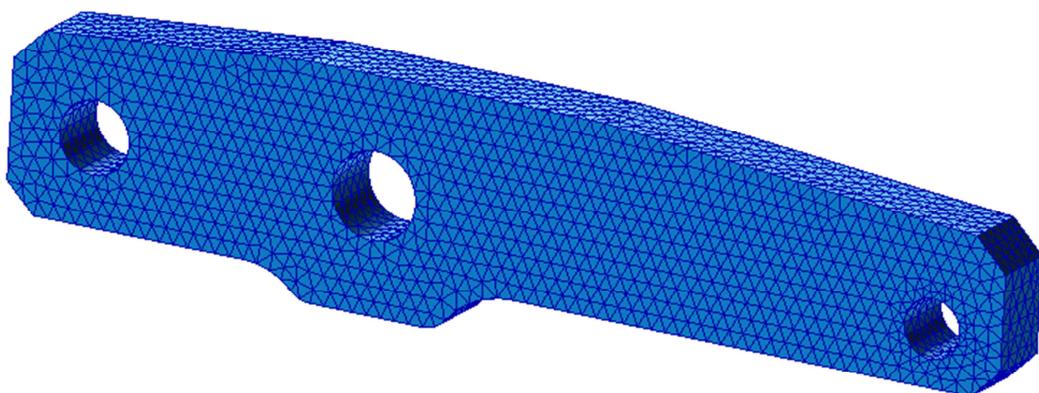
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Vybrat si mezi vhodným síťovacím algoritmus pro daný příklad geometrie.
- Další možnosti ovlivnění hustoty sítě při použití automatického generátoru „TetMesh“.
- Znát novou technikou tvorby sítě nazvanou „Mesh on mesh“.
- Aplikovat metodu „Sweep“ při tvorbě sítě.

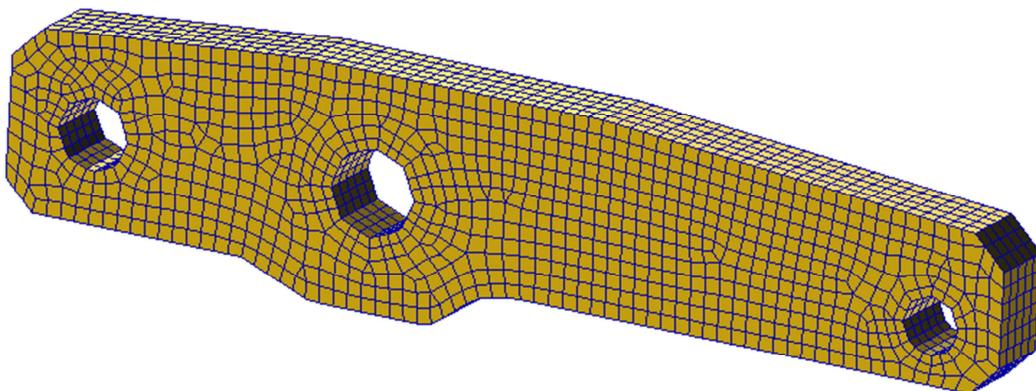


**Zadání**

Úkolem tohoto videa je seznámit se s tvorbou konečno-prvkového sítě reálné součásti. Jedná se o stejnou součást jako v předchozím příkladu, tedy o rameno stahováku. Zadáním je rozšířit znalosti o možnostech ovlivnění hustoty sítě pomocí „TetMeshru“. Dále pak vyzkoušet si jinou techniku tvorby sítě než jen využití automatického generátoru. Bude využita technika tvorby rovinné sítě nazvaná „Mesh on mesh“ a poté technika vytahování, tzv. „Sweep“. Ukázky sítí jsou na následujících obrázcích.

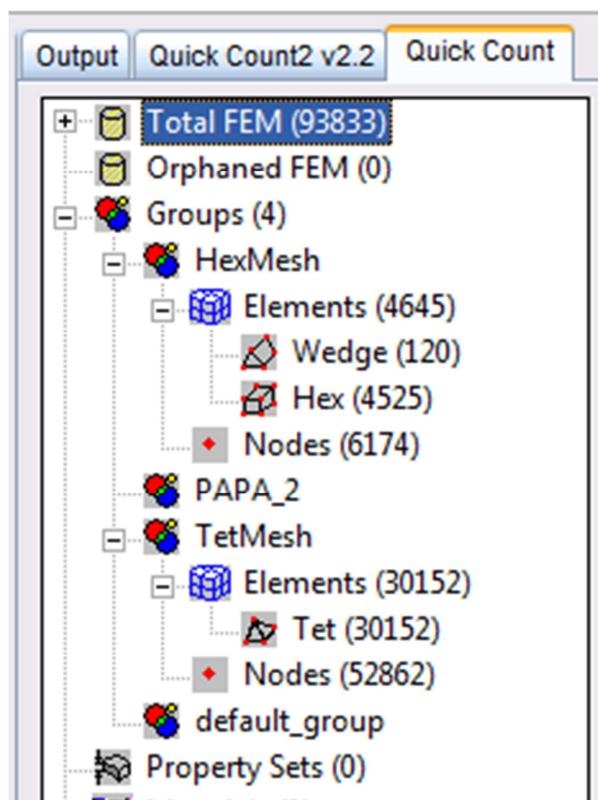


Obrázek 11.1- Síť vytvořena pomocí automatického generátoru



Obrázek 11.2 – Síť vytvořena pomocí metody „Sweep“

Pro pokrytí stejné oblasti pomocí TET prvků (čtyřstěnů) se potřebuje mnohem více prvků než v případě pokrytí řešené oblasti prvky ve tvaru HEX (krychle), popř. WEDGE (klíny). Porovnání je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 11.3 – Počty prvků a uzlů modelu získané pomocí funkce „Quick Count“

Při vytváření sítě se dává přednost HEX prvkům (krychličky) před prvkům tvaru WEDGE (klíny). Obdobně se dává přednost prvkům WEDGE (klíny) před prvkům TET (čtyřstěny). Co se týče volby, jestli se jedná o lineární nebo kvadratické prvky, je jasno u TET prvků, ty se využívají ve variantě s meziuzly, protože lineární varianta nedává dobré výsledky. Naproti tomu výsledky s prvkům HEX jsou dostatečně přesné v obou dvou variantách. U lineárních prvků je však obvykle potřeba větší hustota sítě.



## Úlohy k řešení 11.2.

V prezentovaném příkladu je vytvořena síť konečných prvků pro obě dvě varianty, tedy pro případ automatické generace sítě s tetra prvky, jednak tvorba sítě pomocí metody „sweep“. Vašimi úkoly je:

1. Doplnit model o okrajové podmínky. Je doporučeno vytvořit pro jednotlivé případy samostatné databáze, nebo využít techniku výpočtu po jednotlivých grupách (viz Video č. 5).
2. Provést analýzy a srovnat dosažené výsledky.
3. Porovnat časy potřebné na řešení jednotlivých úloh. Běhové informace lze nalézt na konci log souboru (viz Video č. 5).
4. Vyberte si vhodné těleso (např. model maticového klíče vytvořený v prvním příkladu, tj. video č. 1) a vyzkoušejte si Vaše dosavadní znalosti a dovednosti při tvorbě sítě konečných prvků. Vyzkoušejte si provést analýzu dané součásti. Získané výsledky můžete ověřit např. přibližným analytickým výpočtem.



## CD-ROM

Zmiňované video je dostupné na přiloženém CD-ROM nosiči. Současně je zde dostupný geometrický model ramene stahováku.

## 12 DIMENZIONÁLNÍ ZJEDNODUŠENÍ MODELU MKP

V klasické pružnosti se při modelování problémů technické praxe využívá poměrně velké množství abstrakce. Je to dán omezeními vyplývajícími z možnosti analytického řešení. Často se zde využívá dimenzionální zjednodušení – prut, nosník, skořepina, aj. Takováto zjednodušení je možno zahrnout i do výpočtového modelu v metodě MKP. Často tento přístup vede k rychlým výsledkům s dostatečnou přesností. Je si však nutno uvědomit co daným přístupem získáme a co ztratíme. Případ dimenzionálního zjednodušení modelů je ukázán na jednoduchém příkladu vetknutého nosníku a je zpracován ve videu č. 5.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



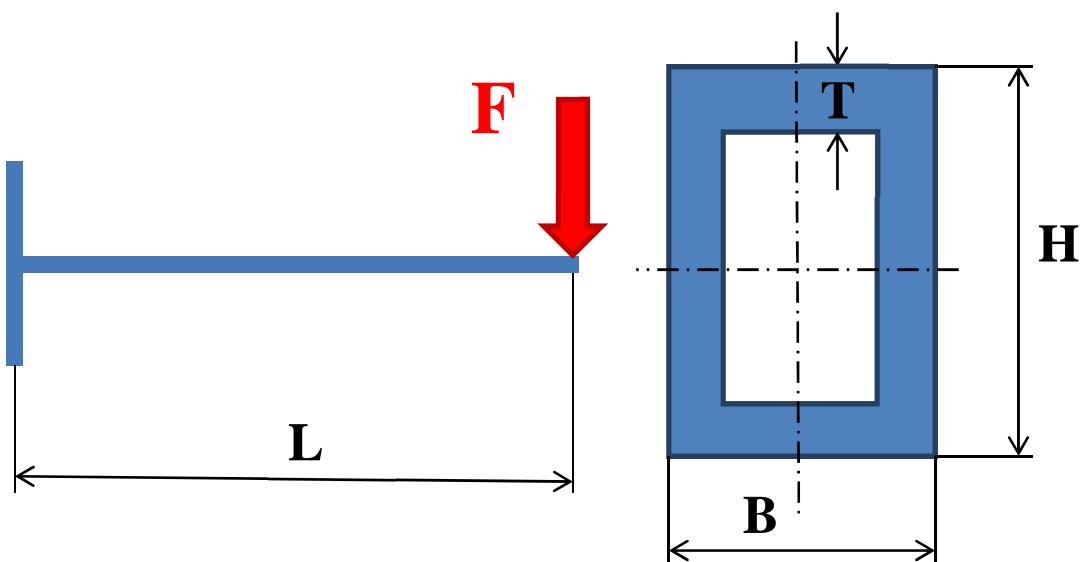
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Vytvořit abstraktnější model vašeho problému.
- Vytvořit model pomocí nosníkových a skořepinových prvků.
- Pracovat s tzv. grupami v systému Patran.



**Zadání**

Úkolem tohoto videa je seznámit se s možnostmi tvorby abstraktnějších modelů z pohledu dimenze úlohy. Úlohou je vytvořit tři výpočtové modely vetknutého nosníku zatíženého na volném konci osamělým břemenem (silou). Schéma úlohy viz Obrázek 12.1.



Obrázek 12.1 – Schéma úlohy

Rozměry jsou následující:

- délka  $L = 1000 \text{ mm}$ ,
- šířka  $B = 60 \text{ mm}$ ,
- výška  $H = 120 \text{ mm}$ ,
- tloušťka  $L = 10 \text{ mm}$ .

Materiál součásti se předpokládá izotropní a homogenní s elastickými vlastnostmi:

- modulu pružnosti v tahu  $E = 210000 \text{ MPa}$ ,
- Poissonova čísla  $\mu = 0,3$ .

Okrajové podmínky:

- na levé straně je nosník vетknut,
- na pravé působí síla  $F = 10 \text{ kN}$ .

Modely budou následující:

1. Model trojrozměrný, využívající prostorové prvky.
2. Model využívající skořepinové prvky.
3. Model využívající nosníkové prvky.

Jednotlivé kroky tvorby modelů jsou ilustrovány na příslušném videu. Rozměry jednotlivých elementů byly voleny tak, aby charakteristický rozdíl (velikost elementu) byla stejná pro všechny modely. Jsou porovnány tyto výsledky:

- čas potřebný pro výpočet,
- počet prvků a uzelů modelu,
- maximální průhyb volného konce.

Zmíněné výsledky jsou shrnutý do následující tabulky. Výsledky hovoří samy za sebe. Je pouze na tvůrci modelu jaký typ modelu zvolí a to na základě požadovaných dat, které potřebuje získat z modelu.

Model	Průhyb [mm]	Počet elementů	Počet uzelů	Reálný čas [t]
Beam	3,04	100	101	3,848
Shell	3,08	3200	3232	6,268
Solid	3,05	19701	39127	52,481

Tabulka 12.1- Srovnání jednotlivých modelů



## CD-ROM

Zmiňované video je dostupné na přiloženém CD-ROM nosiči.

## 13 AXIÁLNÍ SPOJKA

Jedná se o zařízení k přenosu osové tahové/tlakové síly mezi hydraulickým válcem a sdruženým tenzometrickým snímačem torzního zkušebního stroje. Hnací hřídel axiální spojky přenáší krouticí moment. Axiální spojka tento krouticí moment eliminuje a zabraňuje jeho přenosu na pístnici hydraulického válce. Přenášený krouticí moment je roven 800Nm. Axiální zatížení, které přenáší samotná spojka je 20000N v obou směrech. Cílem této kapitoly je rozbor zatížení jednotlivých součástí upínací hlavy. Na základě tohoto rozboru stanovit okrajové podmínky pro jednotlivé součásti. Dále vypočítat statickou napěťově deformační odezvu u jednotlivých součástí upínací hlavy na zadané okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



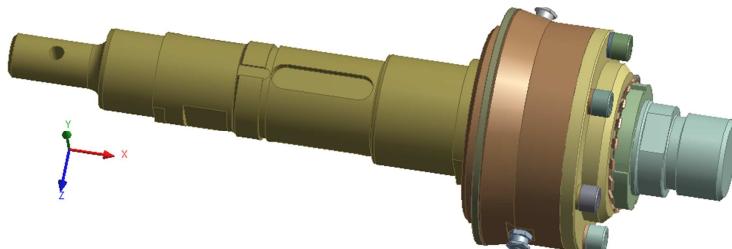
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Vytvořit 3D modely jednotlivých součástí axiální spojky.
- Analyzovat a zadat vhodné okrajové podmínky.
- Vypočítat statickou napěťově deformační odezvu u jednotlivých součástí na zadané okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků.

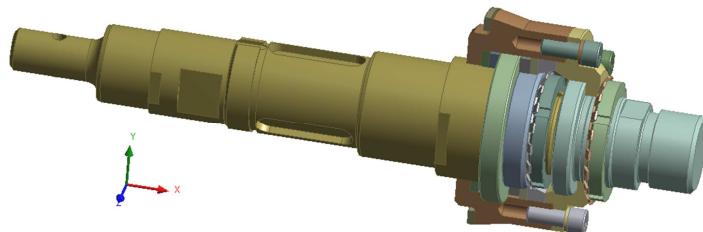


**Úkol**

Na základě výkresové dokumentace, popsaného modelu axiální spojky a na základě uvedeného zatížení, provedte statickou napěťově deformační odezvu u jednotlivých vybraných součástí axiální spojky na zadané okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků. Model axiální spojky je uvedený na Obrázku 13.1 a v částečném řezu na Obrázku 13.2.



Obrázek 13.1 – 3D model axiální spojky



Obrázek 13.2 – 3D model axiální spojky v částečném řezu

## 13.1 Víko spojky

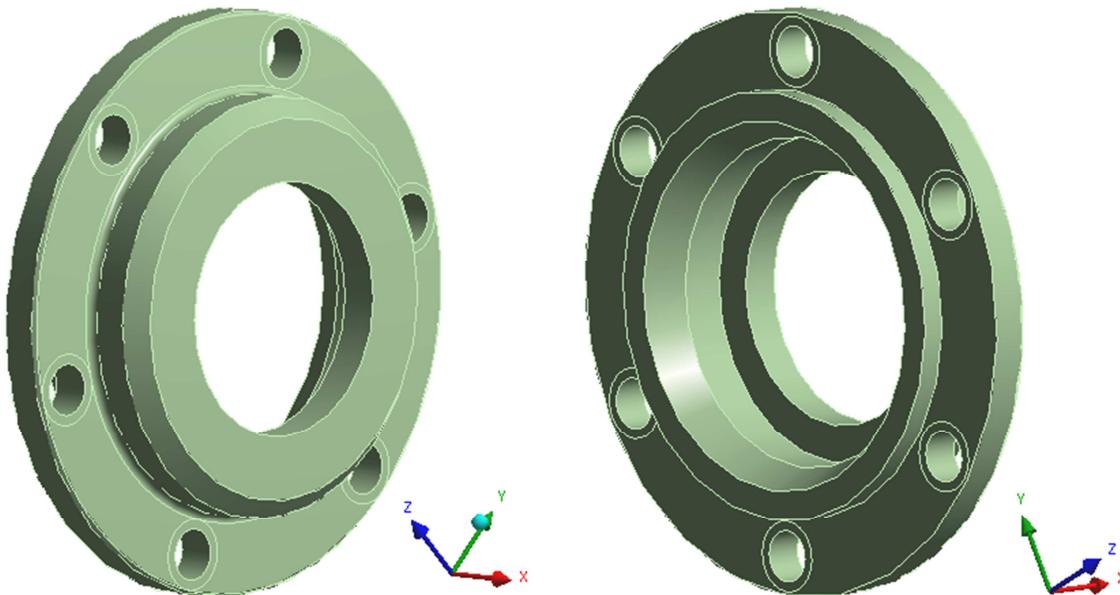
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model víka spojky vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu víka spojky. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



### Úkol

#### 13.1.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 13.5 vytvořte v programu vhodný 3D model víka spojky. Hotový model určený pro statickou napěťově deformační analýzu je uvedený na Obrázku 13.3. Na čelní ploše v okolí otvorů pro šrouby vytvořte plochu ve tvaru mezikruží (velikostně odpovídající hlavě šroubu) pro zadání příslušných okrajových podmínek uvedených na Obrázku 13.4.



Obrázek 13.3 – 3D model víka spojky

Víko spojky je vyrobeno z běžné konstrukční oceli 11 523. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 13.1.

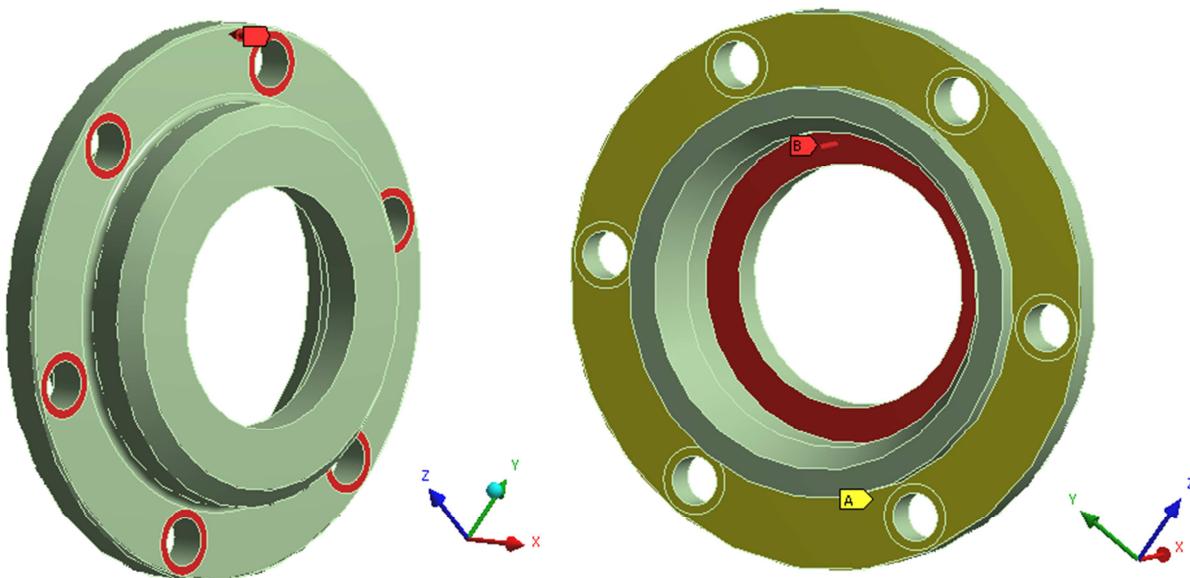
Tabulka 13.1- Materiálové vlastnosti oceli 11 523

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
11 523	206000	0,3	560	400

### 13.1.2 Okrajové podmínky

Víko spojky potažmo celá spojka přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 20000N. Na Obrázku 13.4 jsou uvedeny okrajové podmínky.

V místě upínacích otvorů na čelní ploše víka spojky (červená plocha na levé části Obrázku 13.4) zadejte na příslušné plochy odpovídající hlavám upínacích šroubů osovou tlakovou sílu 4500N tato síla odpovídá předpětí ve šroubu, které je vyvolané vhodným utahovacím momentem. Na dosedací ploše víka (žlutá plocha na pravé části Obrázku 13.4) aplikujte deformační okrajovou podmínky tzv. tlakovou vazbu (compression only support) pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému v tlakové oblasti. Na vnitřní plochu osazení víka spojky (červená plocha na pravé části Obrázku 13.4) zadejte osovou tlakovou sílu 20000N.



Obrázek 13.4 – Okrajové podmínky

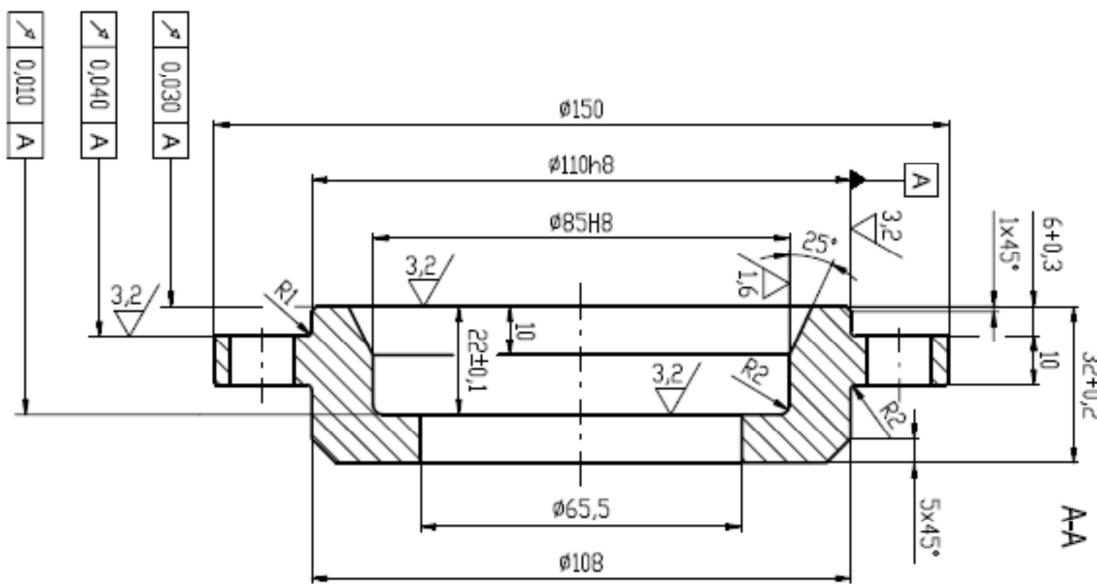
### 13.1.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro dva případy zatížení osovou tahovou a tlakovou silou na vnitřní osazení víka spojky (červená plocha na pravé části Obrázku 13.4).

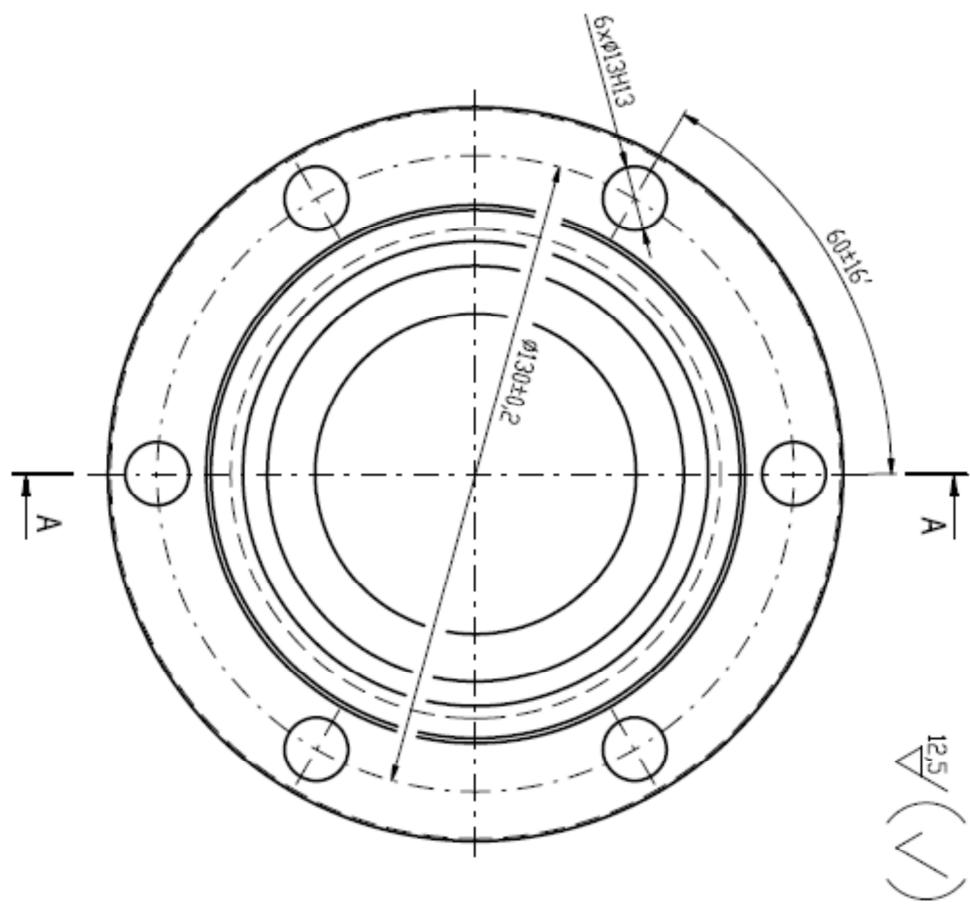
Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



NEOZNAČENÉ HRANY SRAZIT 0,5x45°



Obrázek 13.5 – Výkres víka spojky

## 13.2 Čep spojky

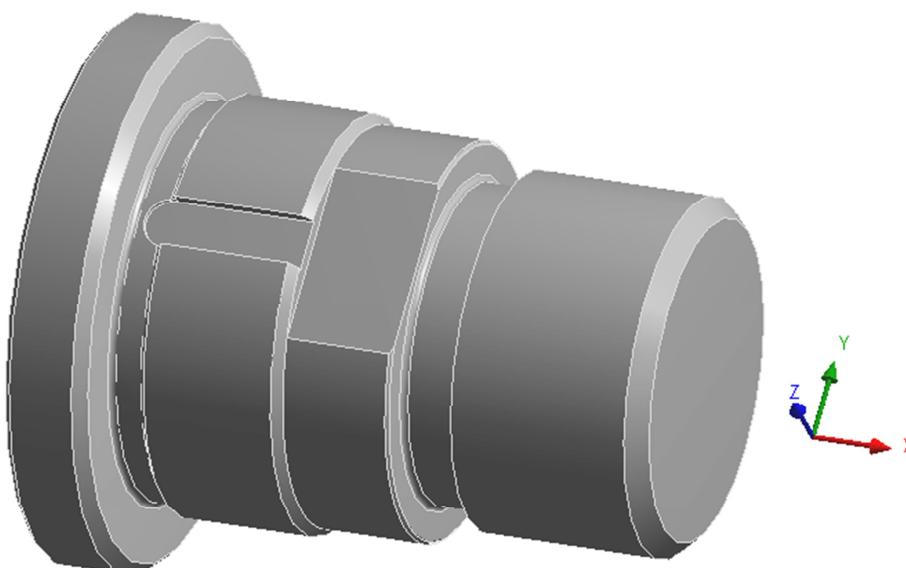
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model čepu spojky vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu čepu spojky. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



### Úkol

#### 13.2.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 13.8 vytvořte 3D model čepu spojky. Model upravte tak, aby neobsahoval přebytečná zaoblení a skosení hran. 3D model čepu spojky vytvořený dle výkresové dokumentace je uvedený na Obrázku 13.6.



Obrázek 13.6 – 3D model čepu spojky

Čep spojky je vyrobený z nízkolegované konstrukční oceli 15 260.7 zušlechtěná na střední pevnost. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 13.2.

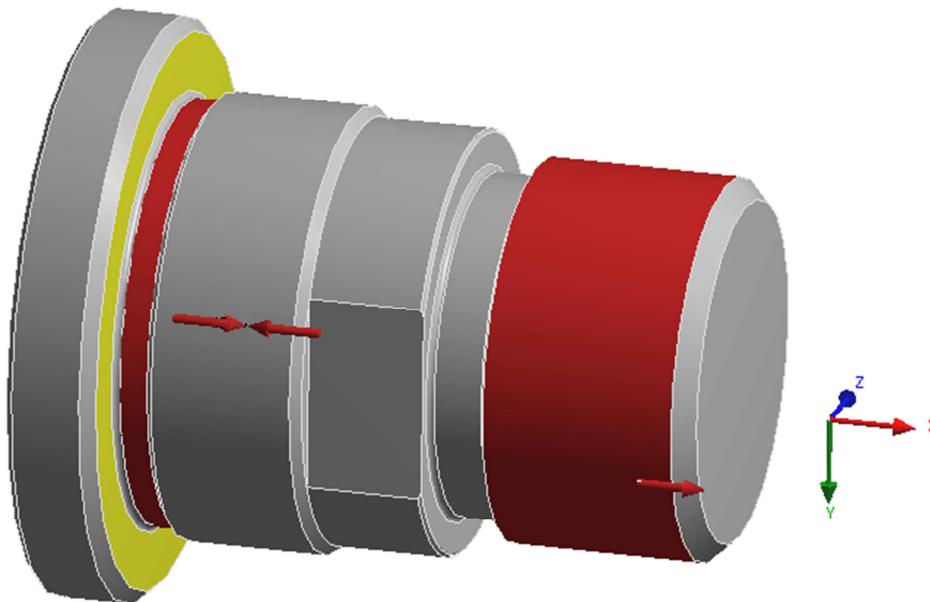
Tabulka 13.2- Materiálové vlastnosti oceli 15 260.7

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 260.7	215000	0,3	885	735

#### 13.2.2 Okrajové podmínky

Čep spojky přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 20000N. Na Obrázku 13.7 jsou uvedeny okrajové podmínky, které vyplývají z rozboru namáhání celé spojky.

Na osazení čepu spojky v místě, kde čep spojky dosedá na osazení víka spojky (žlutá plocha na levé části Obrázku 13.7) zadejte okrajovou podmínku pro zamezení posuvu v ose x dle uvedeného souřadného systému. Na vnitřní plochu zápicu (červená plocha na levé části Obrázku 13.7) aplikujte okrajovou podmínku simulující předpětí ve šroubu. Velikost předepínací síly zvolte větší než je celková přenášená osová síla. Na příslušnou plochu v místě, kde je čep spojky spojený v pístnici hydraulického válce (červená plocha na pravé části Obrázku 13.7) zadejte osovou tahovou sílu 20000N.



Obrázek 13.7 – Okrajové podmínky

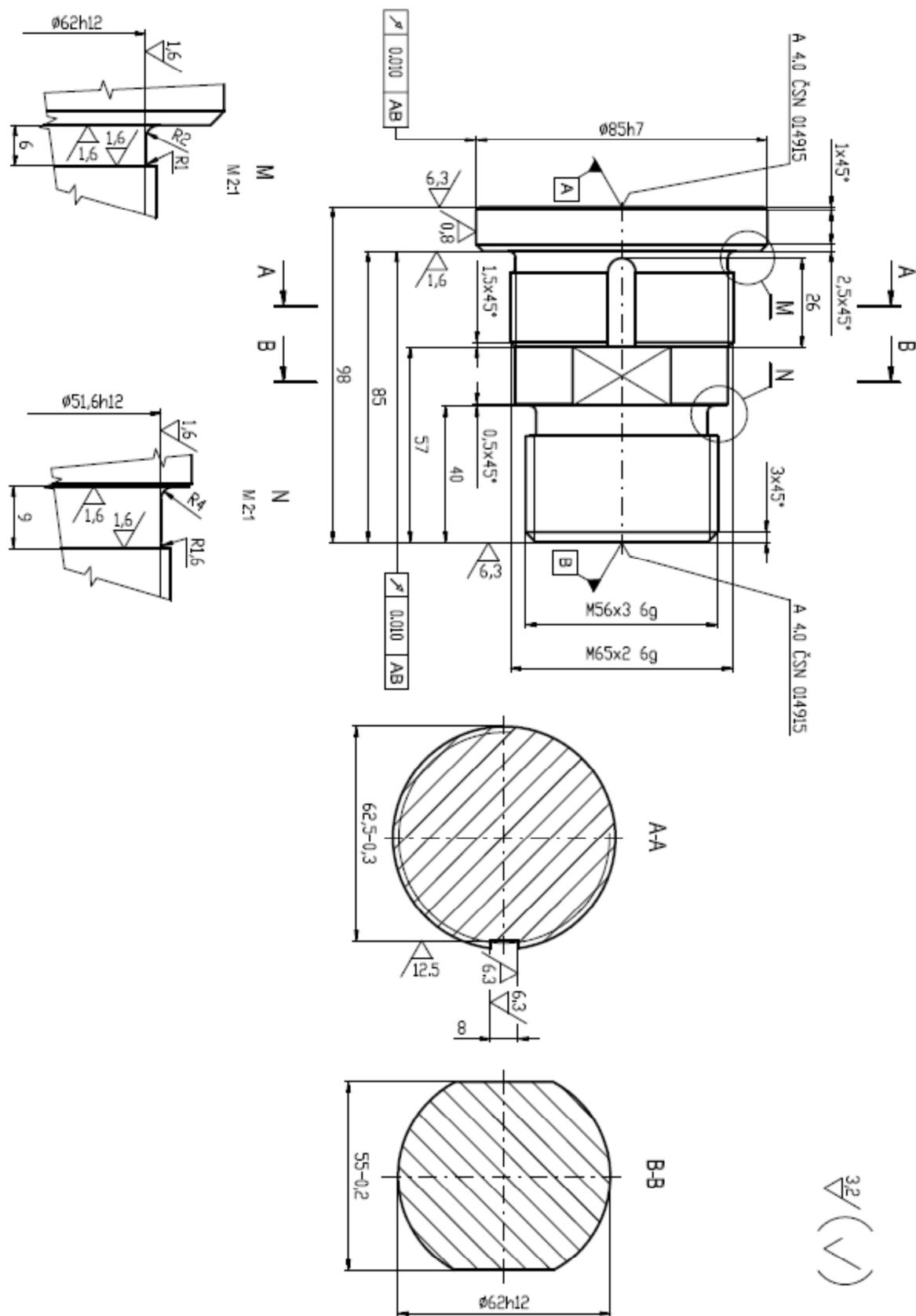
### 13.2.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte statickou napěťově deformační analýzu čepu spojky metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro dva případy zatížení osovou tahovou a tlakovou silou (červená plocha na pravé části Obrázku 13.7).

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 13.8 – Výkres čepu spojky

### 13.3 Pouzdro spojky

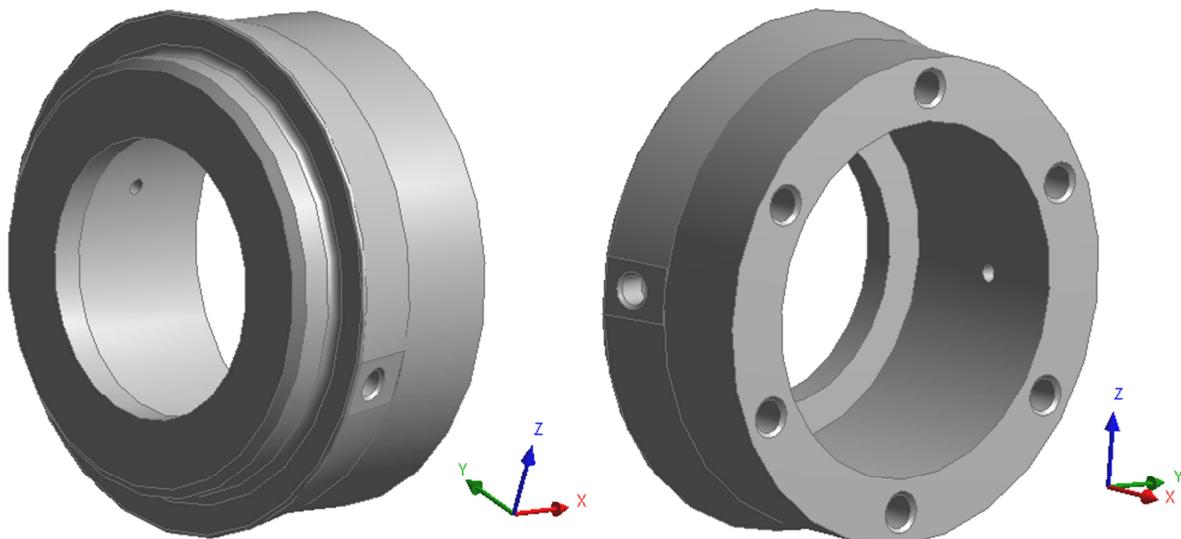
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model pouzdra spojky vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu pouzdra spojky. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



#### Úkol

##### 13.3.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 13.11 vytvořte 3D model pouzdra spojky. Hotový model určený pro statickou napěťově deformační analýzu je uvedený na Obrázku 13.9. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie pouzdra spojky s ohledem na snížení počtu elementů a uzlů MKP modelu. Závitové otvory pro šrouby nahraďte válcovými otvory příslušného průměru.



Obrázek 13.9 – 3D model pouzdra spojky

Pouzdro spojky je vyrobeno z nízkolegované konstrukční oceli 15 241. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 13.3.

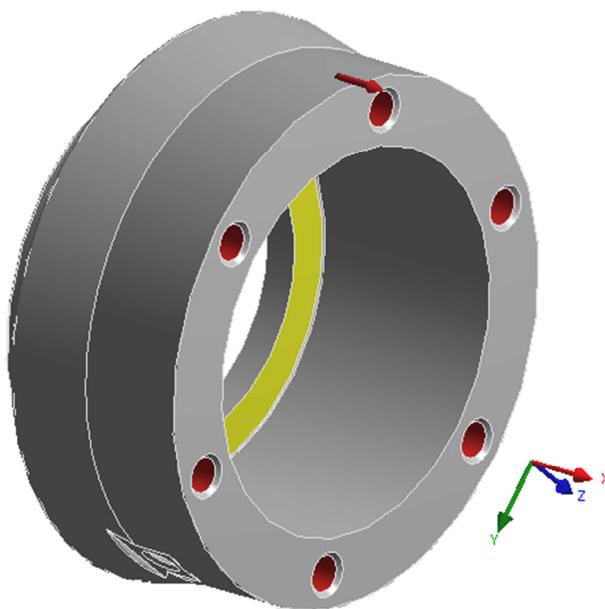
Tabulka 13.3- Materiálové vlastnosti oceli 15 241

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 241	214000	0,3	680	540

### 13.3.2 Okrajové podmínky

Pouzdro spojky potažmo celá spojka přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 20000N. Na Obrázku 13.10 jsou uvedeny okrajové podmínky získané z rozboru zatížení celé spojky.

V místě upínacích otvorů na čelní ploše pouzdra spojky (červené plochy na pravé části Obrázku 13.10) zadejte osovou tahovou sílu 3334N pro každý jednotlivý závitový otvor tato síla na jeden šroub odpovídá zatížení, které přenáší celá spojka. Na vnitřní dosedací ploše pouzdra spojky, v místě kde se je pouzdro v kontaktu s kroužkem axiálního ložiska (žlutá plocha na levé části Obrázku 13.10) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému. Na vnitřní plochu osazení víka spojky (červená plocha na pravé části Obrázku 13.10) zadejte osovou tlakovou sílu 20000N.



Obrázek 13.10 – Okrajové podmínky

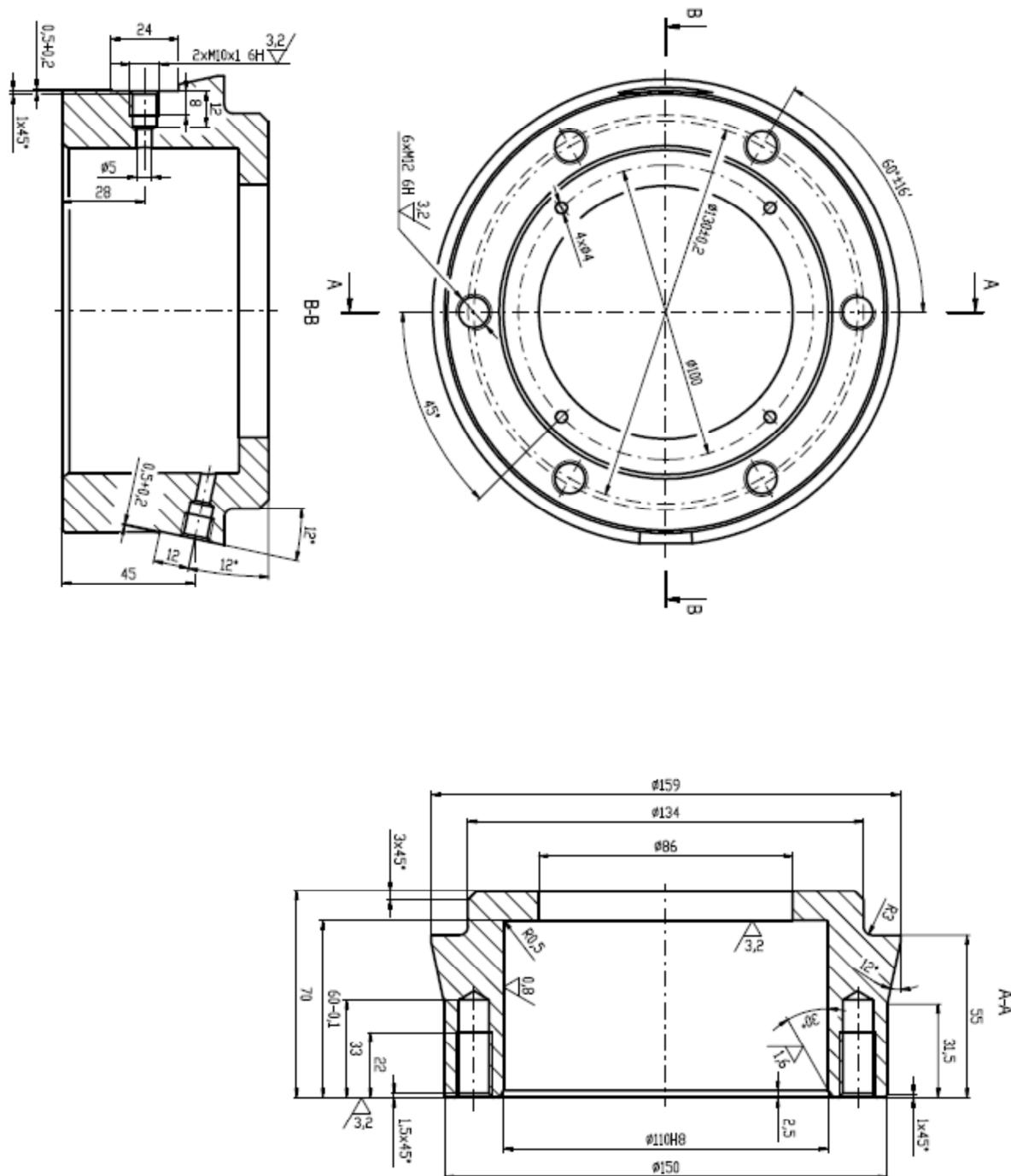
### 13.3.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsáný případ zatížení osovou silou, případně navrhněte a vyzkoušejte jiné okrajové podmínky a porovnejte jejich použitelnost.

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 13.11 – Výkres pouzdra spojky

## 13.4 Hnací hřídel

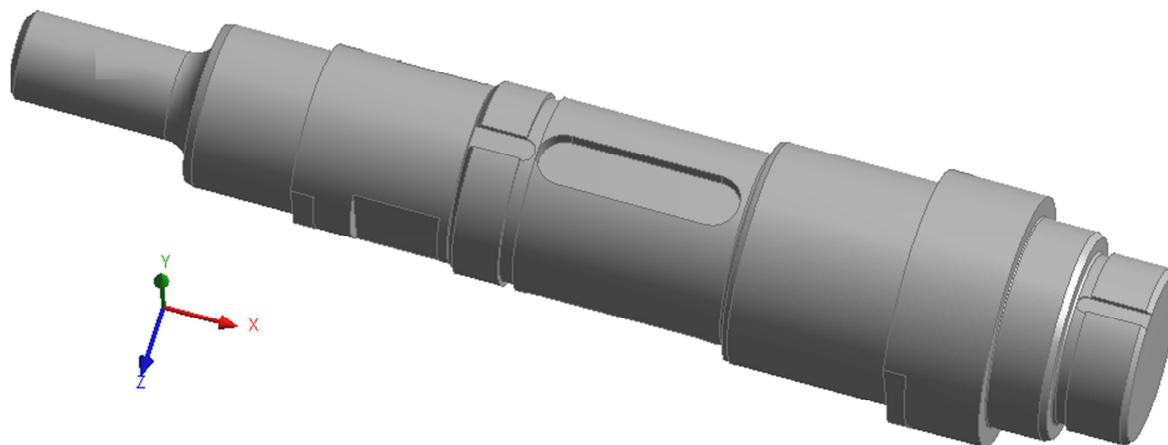
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model hnací hřídele určený pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu hnací hřídele. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



### Úkol

#### 13.4.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 13.16 vytvořte vhodný 3D model hnací hřídele. Model hnací hřídele vytvořený dle uvedené výkresové dokumentace je zobrazený na Obrázku 13.12. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie hnací hřídele (odstranění sražených hran, radiusů atd.) s ohledem na snížení počtu elementů a uzlů MKP modelu. Hnací hřídel je určena k přenosu osové tahové/ tlakové síly a přenáší rovněž i krouticí moment.



Obrázek 13.12 – 3D model hnací hřídele

Hnací hřídel je vyrobena z nízkolegované konstrukční oceli 15 240.7 zušlechtěná na střední pevnost. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 13.4.

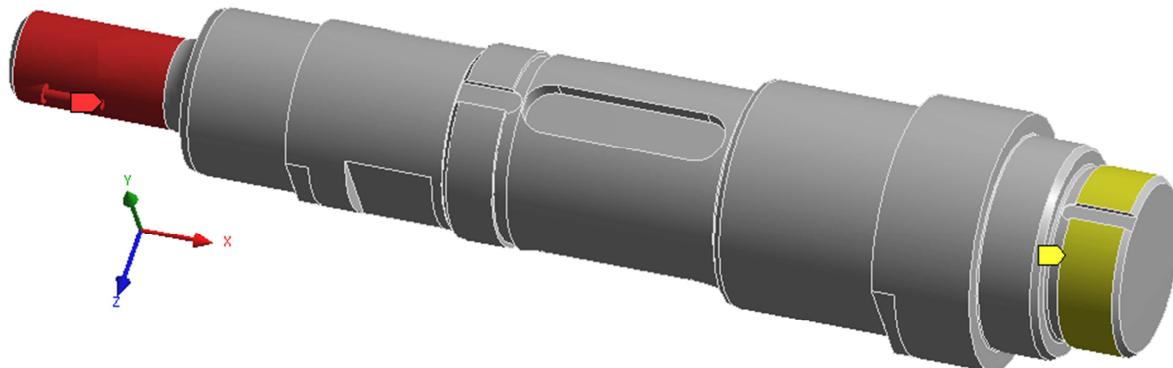
Tabulka 13.4– Materiálové vlastnosti oceli 15 240.7

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 240.7	214000	0,3	1170	981

#### 13.4.2 Okrajové podmínky

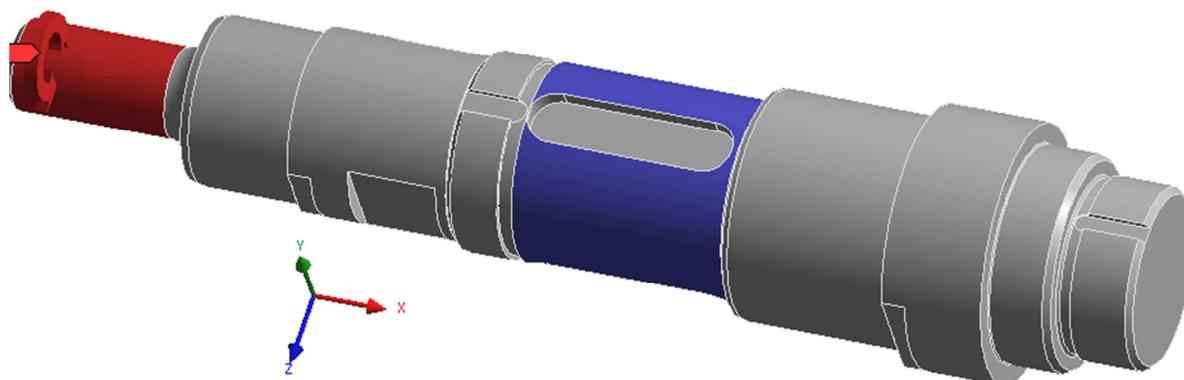
Hnací hřídel přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 20000N a krouticí moment 800Nm. Na Obrázku 12.13 a Obrázku 13.14 jsou uvedeny okrajové podmínky pro oba způsoby zatížení. Kombinace obou způsobů zatížení je uvedena na Obrázku 13.15.

Na osazení hnací hřídele v místě uchycení snímače osové síly a krouticího momentu působí na hřídel osová tahová/tlaková síla 20000N. Působiště síly je uvedeno na Obrázku 13.13 a označeno červenou barvou. Na opačném konci, v místě uchycení axiálního kroužku ložiska spojky je zvolena deformační okrajová podmínka pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému (žlutá plocha na pravé části Obrázku 13.13).



Obrázek 13.13 – Okrajové podmínky

Na osazení hnací hřídele v místě uchycení snímače osové síly a krouticího momentu působí na hřídel amplituda krouticího momentu 800Nm. Plocha osazení, přes kterou je krouticí moment přenášen, je uvedena na Obrázku 13.14 a označena červenou barvou. Uprostřed hřídele, v místě kde se nachází setrvačník je aplikována cylindrická deformační okrajová podmínka pro zamezení posuvu v tangenciálním směru (modrá plocha uprostřed Obrázku 13.14).



Obrázek 13.14 – Okrajové podmínky

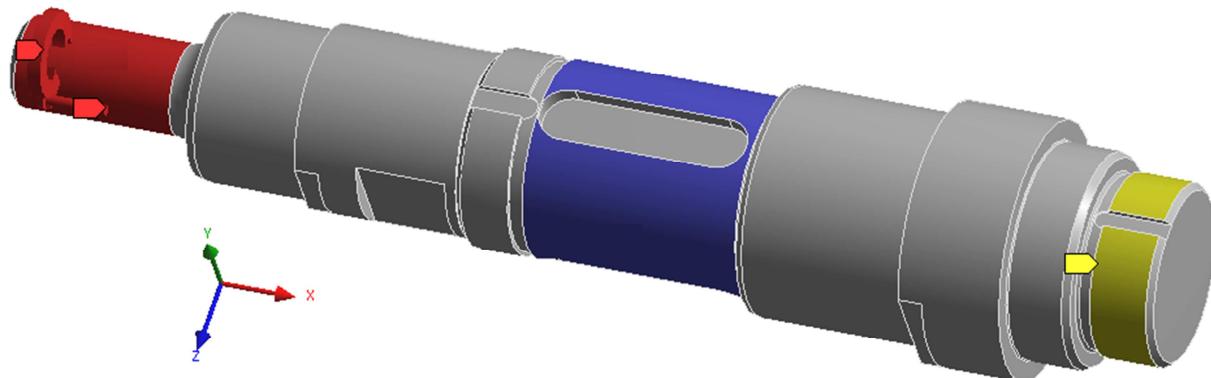
### 13.4.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro tři případy zatížení.

První případ zatížení osovou tahovou/potlačovou silou je uvedený na Obrázku 13.13.

Druhý případ zatížení krouticím momentem je uvedený na Obrázku 13.14.

Třetí případ zatížení je kombinací obou předchozích způsobů zatížení tedy kombinací osové tahové/tlakové síly v kombinaci s krouticím momentem. Tento případ je uvedený na Obrázku 13.15.

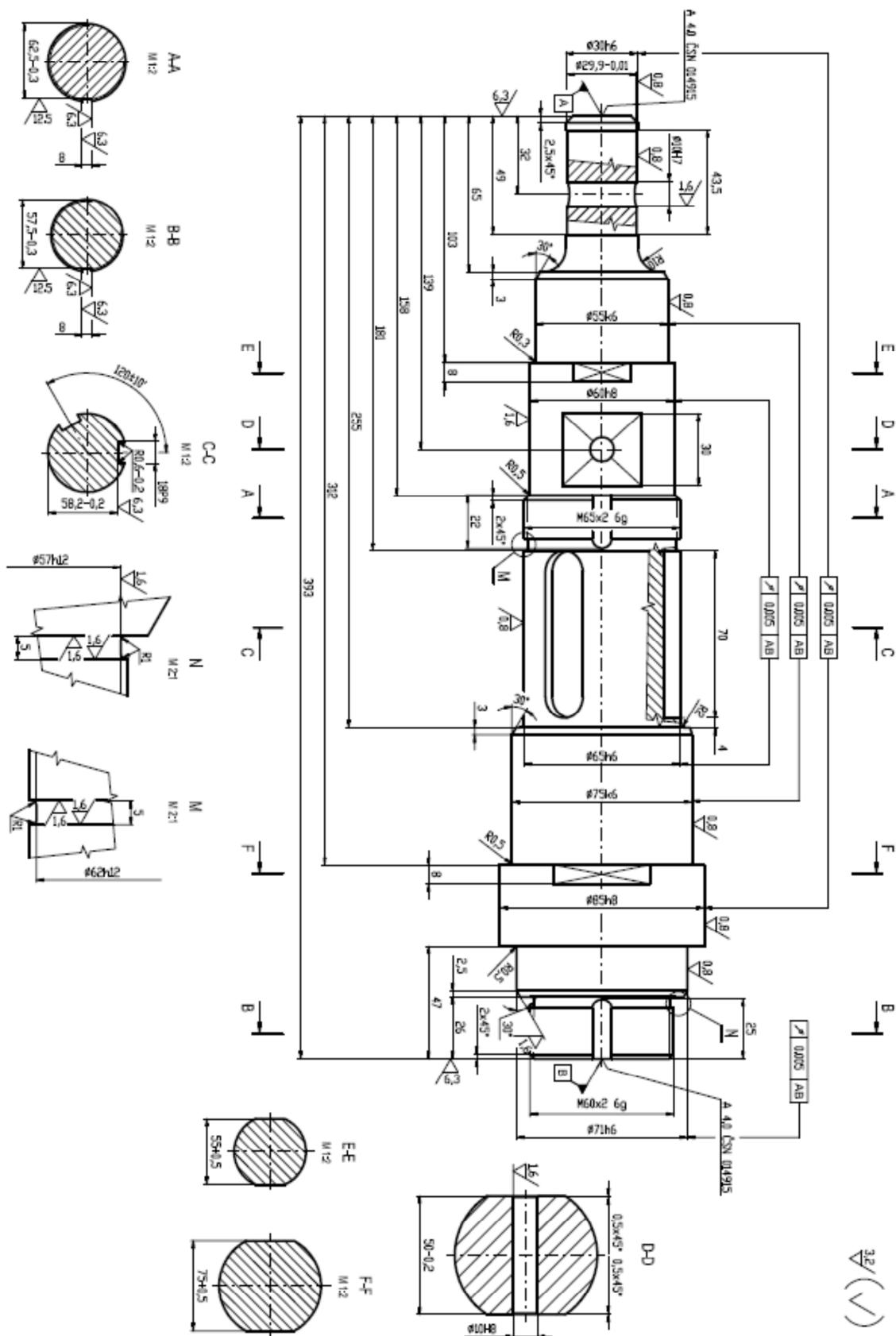


Obrázek 13.15 – Okrajové podmínky třetí případ zatížení

Řešení proveděte pro několik typů a velikostí sítě konečných prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledné osové a redukované napětí pro jednotlivé případy zatížení a pro jejich kombinaci porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající bezpečnost k mezním stavům daného materiálu.



### Obrázek 13.16 – Hnací hřídel

## 13.5 Šroub víka spojky

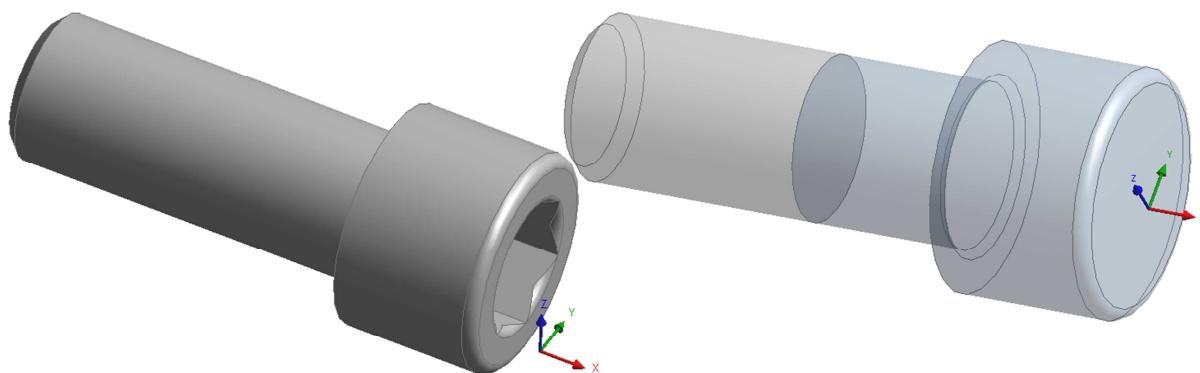
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model šroubu víka spojky určený pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu šroubu víka spojky. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



### Úkol

#### 13.5.1 Tvorba modelu

Na základě technické dokumentace a doporučení normy ČSN 02 1143.50 vytvořte 3D model šroubu víka spojky M12 x 30. 3D model šroubu vytvořený dle technické dokumentace je uvedený v levé části Obrázku 13.17. Zjednodušený model vhodný pro napěťově deformační analýzu je uvedený v pravé části Obrázku 13.17. Dřík šroubu modelujte na minimální průměr závitu a ve vzdálenosti 14mm od hlavy šroubu rozdělte model dělící rovinou vymezující aplikace okrajových podmínek.



Obrázek 13.17 – 3D model šroubu víka spojky

Šroub víka spojky je dle uvedené normy vyrobený pro třídu pevnosti 12.9 což odpovídá materiálovým parametrům uvedeným v tabulce 13.5.

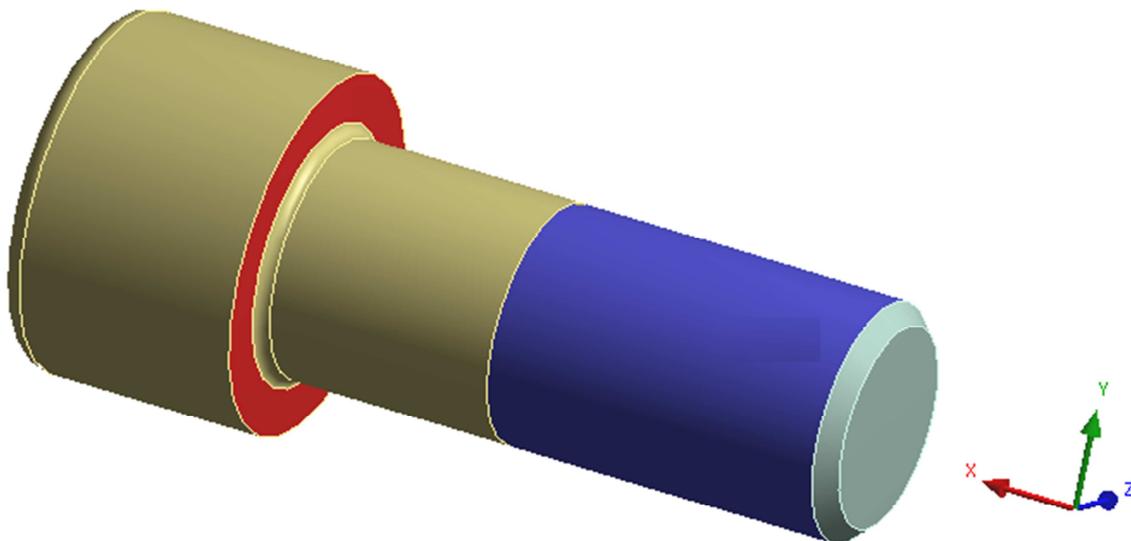
Tabulka 13.5– Materiálové vlastnosti oceli třídy pevnosti 12.9

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
12.9	210000	0,3	1200	1080

#### 13.5.2 Okrajové podmínky

Všechny šrouby víka spojky (6 kusů) musí přenést celkovou osovou sílu větší než je síla přenášená samotnou spojkou tedy 20000N. Celkovou sílu přenášenou šrouby zvolíme 24000N. Na jeden šroub připadá síla 4000N. Na Obrázku 13.18 jsou uvedeny aplikované okrajové podmínky.

V místě čelní plochy hlavy šroubu (červená plocha na Obrázku 13.18) zadejte osovou tlakovou sílu 4000N, tato síla odpovídá předpětí ve šroubu, které je vyvolané vhodným utahovacím momentem. Na válcovou plochu dříku šroubu (modrá plocha na Obrázku 13.18) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v osách x, y, z uvedeného souřadného systému. Délka plochy odpovídá délce závitů, který je zašroubovaný v pouzdře spojky. V tomto případě je délka zašroubované části dříku šroubu rovna 16mm.



Obrázek 13.18 – Okrajové podmínky

### 13.5.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky proveděte napěťově deformační analýzu šroubu metodou konečných prvků. Analýzu proveděte pro popsaný případ zatížení osovou tlakovou silou na příslušné ploše hlavy šroubu (červená plocha na Obrázku 13.18).

Řešení proveděte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.

## 13.6 Příložka

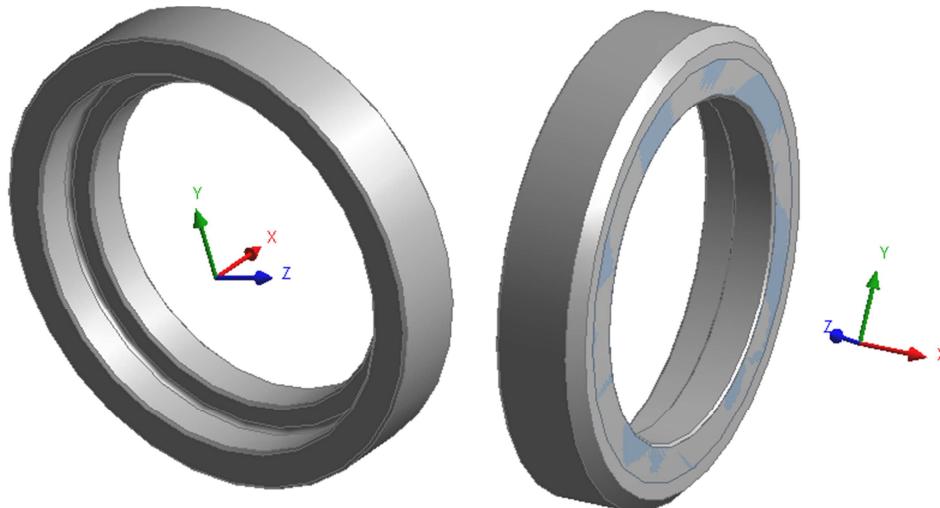
Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model příložky spojky určený pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu příložky. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.



### Úkol

#### 13.6.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 13.21 vytvořte 3D model příložky. 3D model příložky vytvořený dle technické dokumentace je uvedený na Obrázku 13.19. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie příložky s ohledem na snížení počtu elementů a uzelů MKP modelu. Z modelu odstraňte přebytečné zaoblení a sražení hran. Při tvorbě MKP modelu zvažte použití symetrických nebo axi-symetrických okrajových podmínek.



Obrázek 13.19 – 3D model příložky

Příložka spojky je vyrobena běžné konstrukční oceli 11 600. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 13.6.

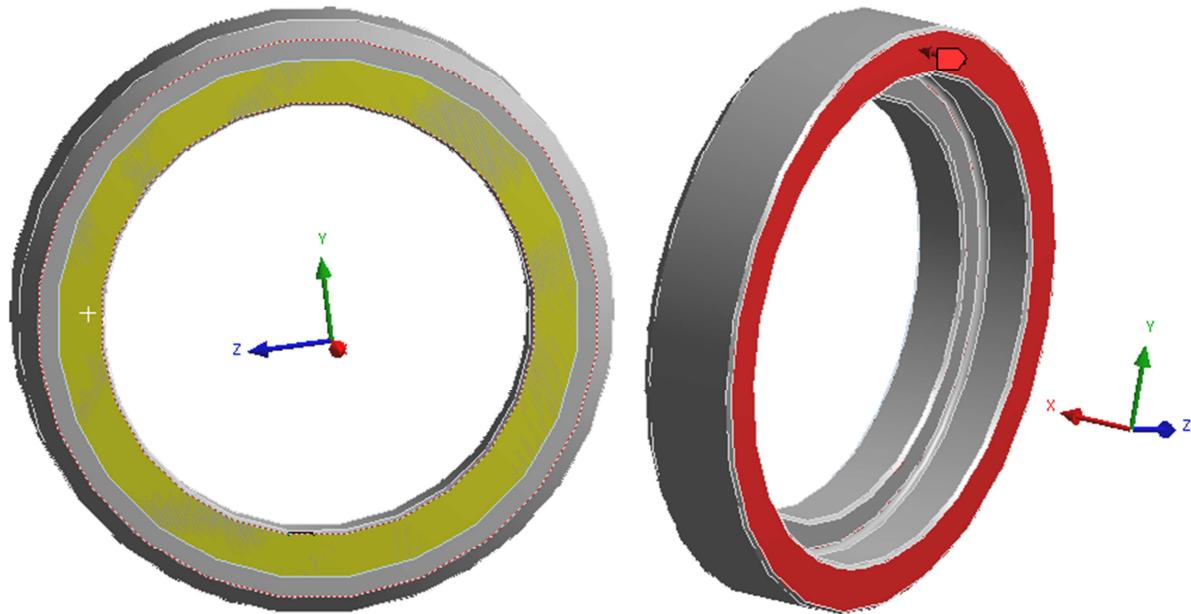
Tabulka 13.6– Materiálové vlastnosti oceli 11 600

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
11 600	210000	0,3	570	295

#### 13.6.2 Okrajové podmínky

Příložka ve spojce slouží k fixaci axiálního ložiskového kroužku, který přenáší axiální zatížení 20000N. Na Obrázku 13.20 jsou uvedeny okrajové podmínky.

V místě, kde příložka dosedá na ložiskový kroužek, na čelní ploše příložky (červená plocha na pravé části Obrázku 13.20) zadejte osovou tlakovou sílu 20000N. Na dosedací ploše příložky (žlutá plocha na levé části Obrázku 13.20) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému. Ohraničení a velikost dosedací plochy odpovídá velikosti dosedací plochy MB podložky. Vnější průměr podložky je dle ČSN 02 3640 roven 73mm. Tuto plochu vytvořte již při vytváření MKP modelu.



Obrázek 13.20 – Okrajové podmínky

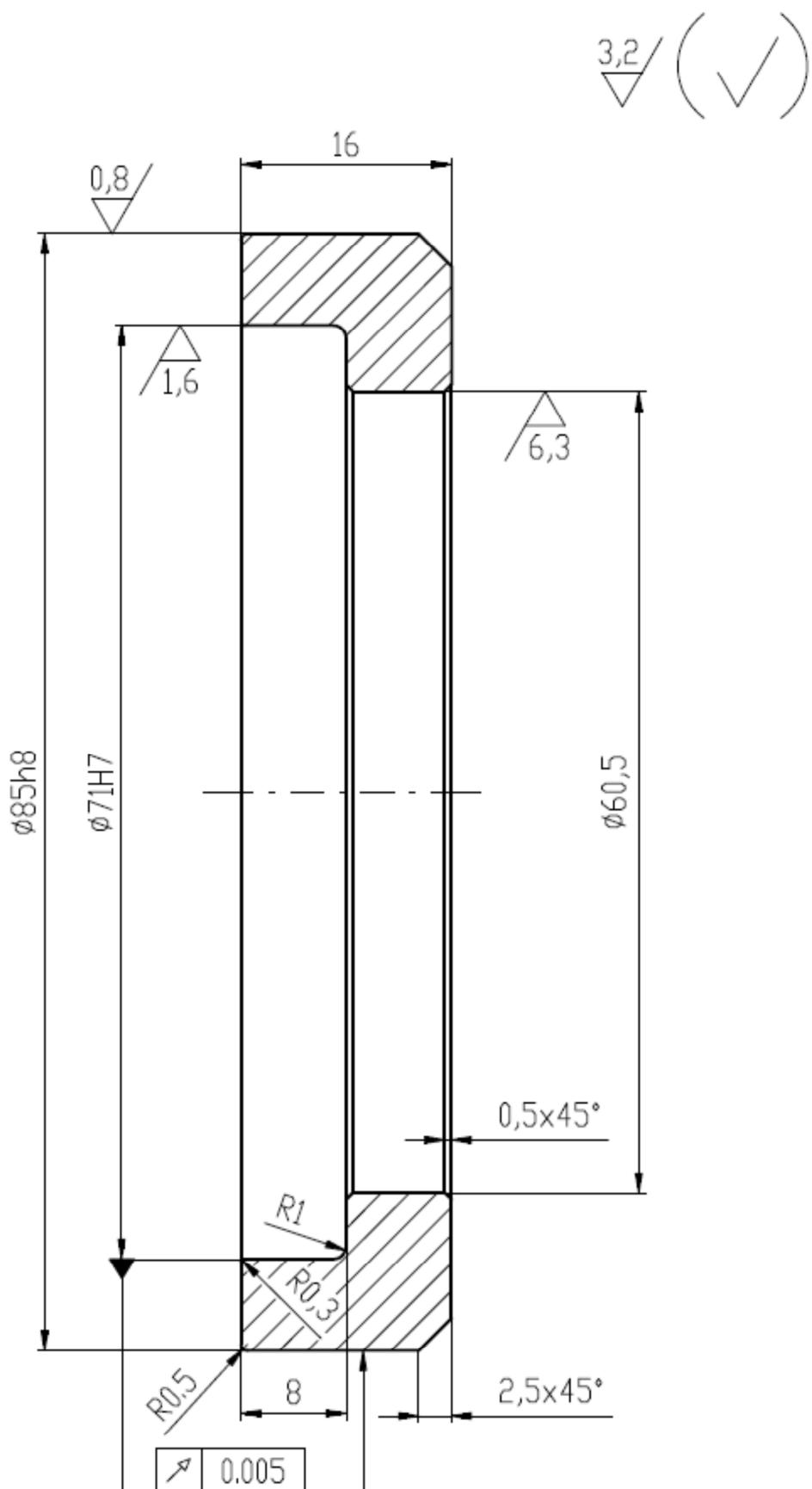
### 13.6.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu příložky metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsaný případ zatížení osovou tlakovou silou na osazení příložky (červená plocha na pravé části Obrázku 1.6.2).

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických případně axi-symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 13.21 – Výkres příložky

## 14 UPÍNACÍ HLAVA

Jedná se o zařízení k přenosu osové tahové/tlakové síly a krouticího momentu ze čtyřkloubového mechanismu převodovky hnací části torzního zkušebního stroje. Přenášený krouticí moment je roven 800Nm. Axiální zatížení tahové nebo tlakové, které je přenášeno hnací hřídelí upínací hlavy je 30000N.

Cílem této kapitoly je rozbor zatížení jednotlivých součástí upínací hlavy. Na základě tohoto rozboru stanovit okrajové podmínky pro jednotlivé součásti. Dále vypočítat statickou napěťově deformační odezvu u jednotlivých součástí upínací hlavy na zadané okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků.



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



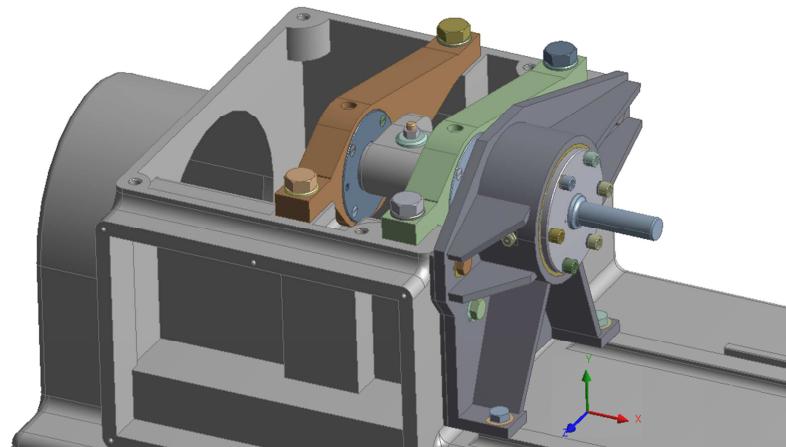
**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ⊕ Z uvedené technické dokumentace vytvořit 3D modely jednotlivých součástí upínací hlavy vhodné pro MKP analýzu.
- ⊕ Analyzovat a zadat vhodné okrajové podmínky na jednotlivé součásti upínací hlavy.
- ⊕ Vypočítat statickou napěťově deformační odezvu u jednotlivých součástí na zadané silové a deformační okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků.



**Úkol**

Na základě výkresové dokumentace, popsaného modelu upínací hlavy a na základě uvedeného zatížení a způsobu uchycení jednotlivých součástí, provedte statickou napěťově deformační analýzu u jednotlivých vybraných součástí axiální spojky jako odezvu na zadané okrajové podmínky pomocí metody konečných prvků. Model upínací hlavy a její uložení na rámu zkušebního stroje je uvedeno na Obrázku 14.1.



Obrázek 14.1 – 3D model upínací hlavy

## 14.1 Svařenec hlavy

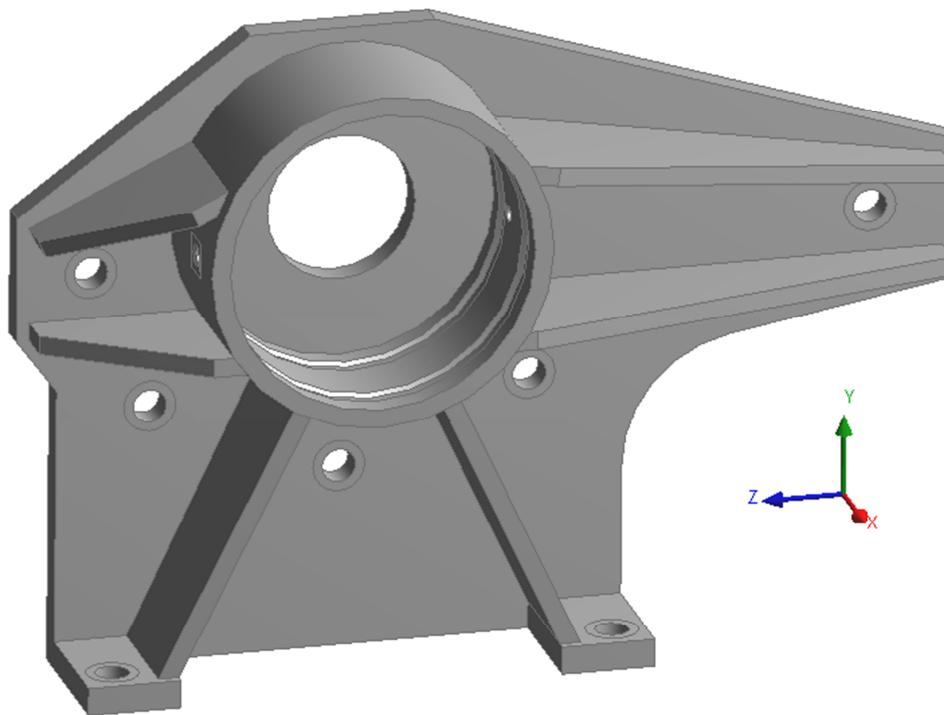


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model svařence hlavy vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu svařence hlavy. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.1.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 14.4 vytvořte v programu vhodný 3D model svařence hlavy. Hotový model určený pro statickou napěťově deformační analýzu je uvedený na Obrázku 14.2. Na čelní ploše v okolí otvorů pro šrouby vytvořte plochu ve tvaru mezikruží (velikostně odpovídající hlavě šroubu) pro zadání příslušných okrajových podmínek uvedených na Obrázku 14.3.



Obrázek 14.2 – 3D model svařence hlavy

Svařenec hlavy je vyrobený z běžné konstrukční oceli 11 523.1. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.1.

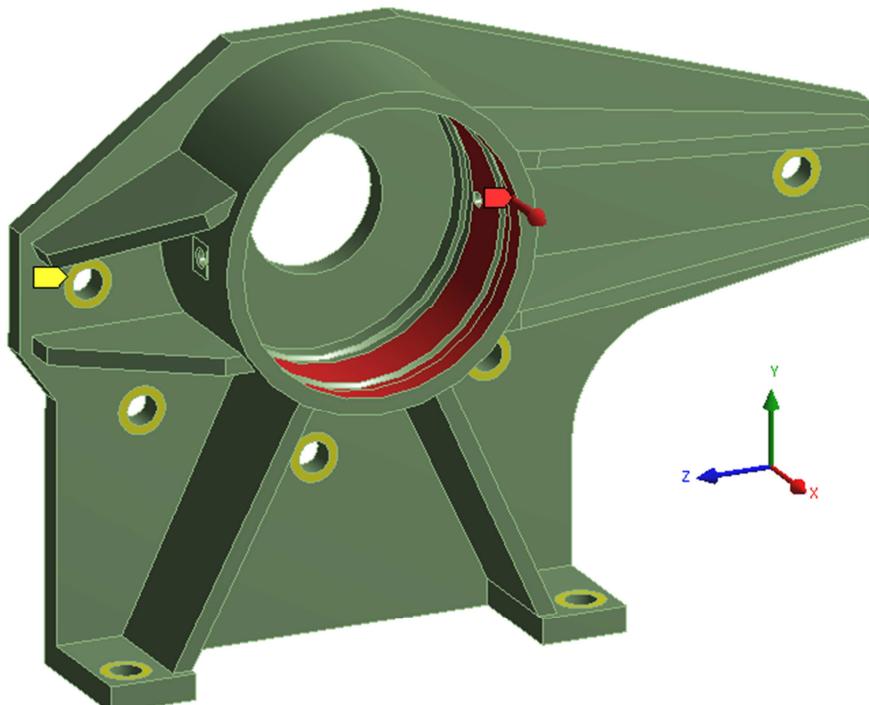
Tabulka 14.1 – Materiálové vlastnosti oceli 11 523.1

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
11 523.1	206000	0,3	560	400

### 14.1.2 Okrajové podmínky

Svařenec hlavy potažmo celá upínací hlava přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 30000N. Na Obrázku 14.3 jsou uvedeny okrajové podmínky získané z rozboru zatížení upínací hlavy.

V místě upínacích otvorů na čelní a spodní ploše svařenice hlavy (žlutá plocha na Obrázku 14.3) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v příslušné ose uvedeného souřadného systému. Na vnitřní plochu pouzdra svařenice hlavy (červená plocha na Obrázku 14.3) zadejte osovou tahovou sílu 30000N.



Obrázek 14.3 – Okrajové podmínky

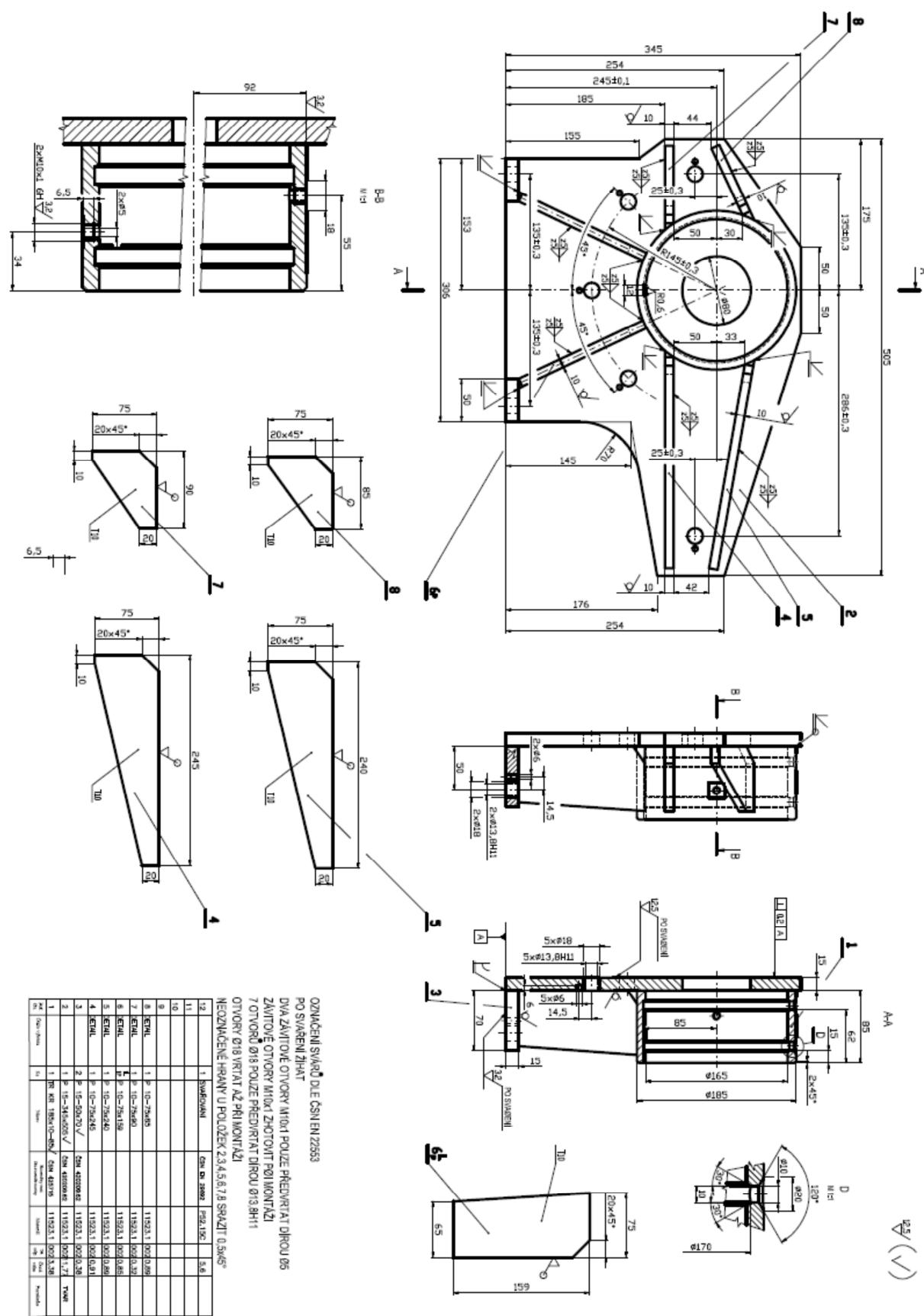
### 14.1.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsany případ zatížení osovou tahovou silou na vnitřní osazení pouzdra svařenice hlavy (červená plocha na Obrázku 14.3).

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků v kritických místech konstrukce součásti a diskutujte nad její použitelnost.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 14.4 – Výkres svařence hlavy

## 14.2 Víko hlavy

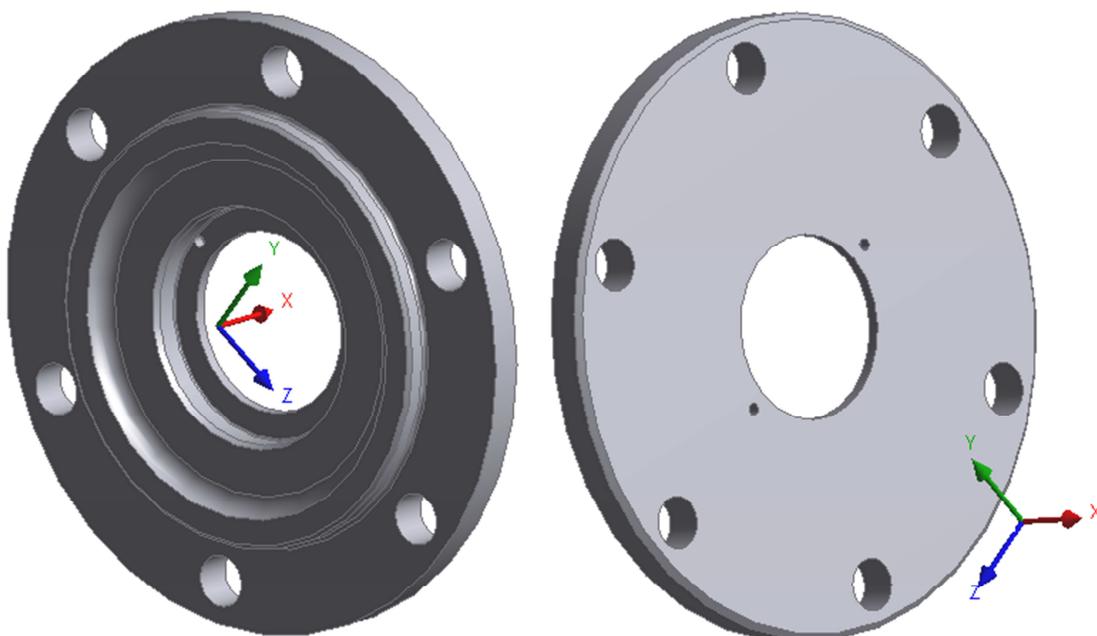


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model víka hlavy vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu víka hlavy. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.2.1 Tvorba modelu

Na základě technické dokumentace uvedené na Obrázku 14.7 vytvořte vhodný 3D model víka hlavy. Hotový model určený pro statickou napěťově deformační analýzu je uvedený na Obrázku 14.5. Na čelní ploše v okolí otvorů pro šrouby vytvořte plochu ve tvaru mezikruží (velikostně odpovídající hlavě šroubu) pro zadání příslušných okrajových podmínek uvedených na Obrázku 14.6.



Obrázek 14.5 – 3D model víka spojky

Víko hlavy je vyrobeno z běžné konstrukční oceli 11 600. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.2.

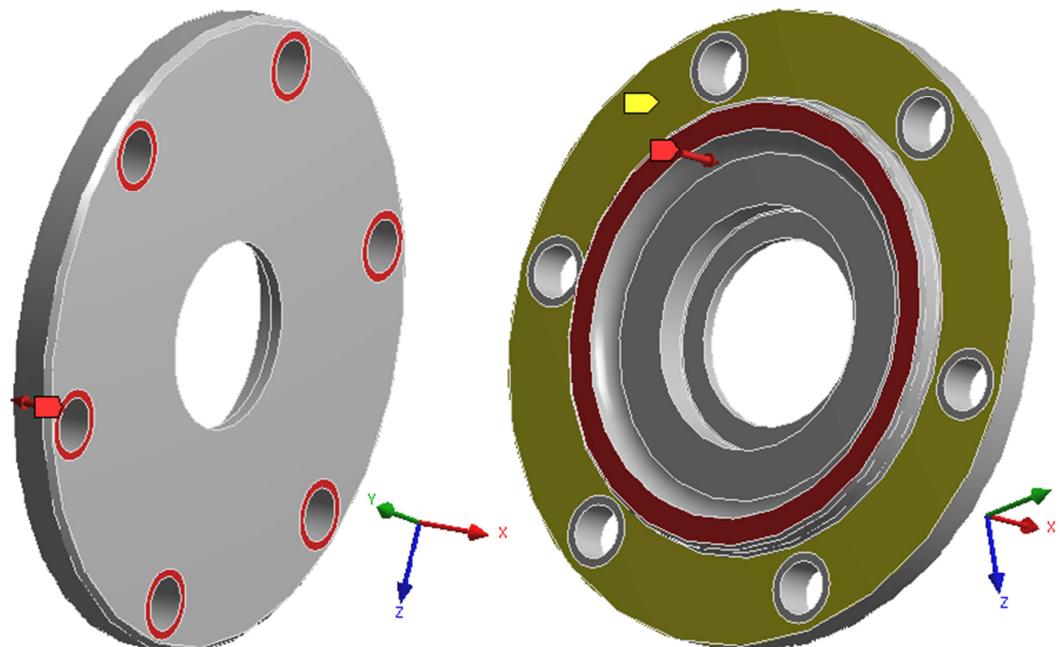
Tabulka 14.2- Materiálové vlastnosti oceli 11 600

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
11 600	210000	0,3	570	295

### 14.2.2 Okrajové podmínky

Víko hlavy potažmo celá upínací hlava přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 30000N. Na Obrázku 14.6 jsou uvedeny okrajové podmínky, které byly stanoveny z rozboru zatížení upínací hlavy.

V místě upínacích otvorů na čelní ploše víka hlavy (červená plocha na levé části Obrázku 14.6) zadejte na příslušné plochy odpovídající hlavám upínacích šroubů osovou tlakovou sílu 5500N tato síla odpovídá předpětí jednoho šroubu, které je vyvolané vhodným utahovacím momentem. Na dosedací ploše víka (žlutá plocha na pravé části Obrázku 14.6) aplikujte deformační okrajovou podmínky tzv. tlakovou vazbu (compression only support) pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému v tlakové oblasti. Na vnitřní plochu osazení víka spojky (červená plocha na pravé části Obrázku 14.6) zadejte osovou tlakovou sílu 30000N, která je na tuto plochu přenášena kroužkem axiálního ložiska.



Obrázek 14.6 – Okrajové podmínky

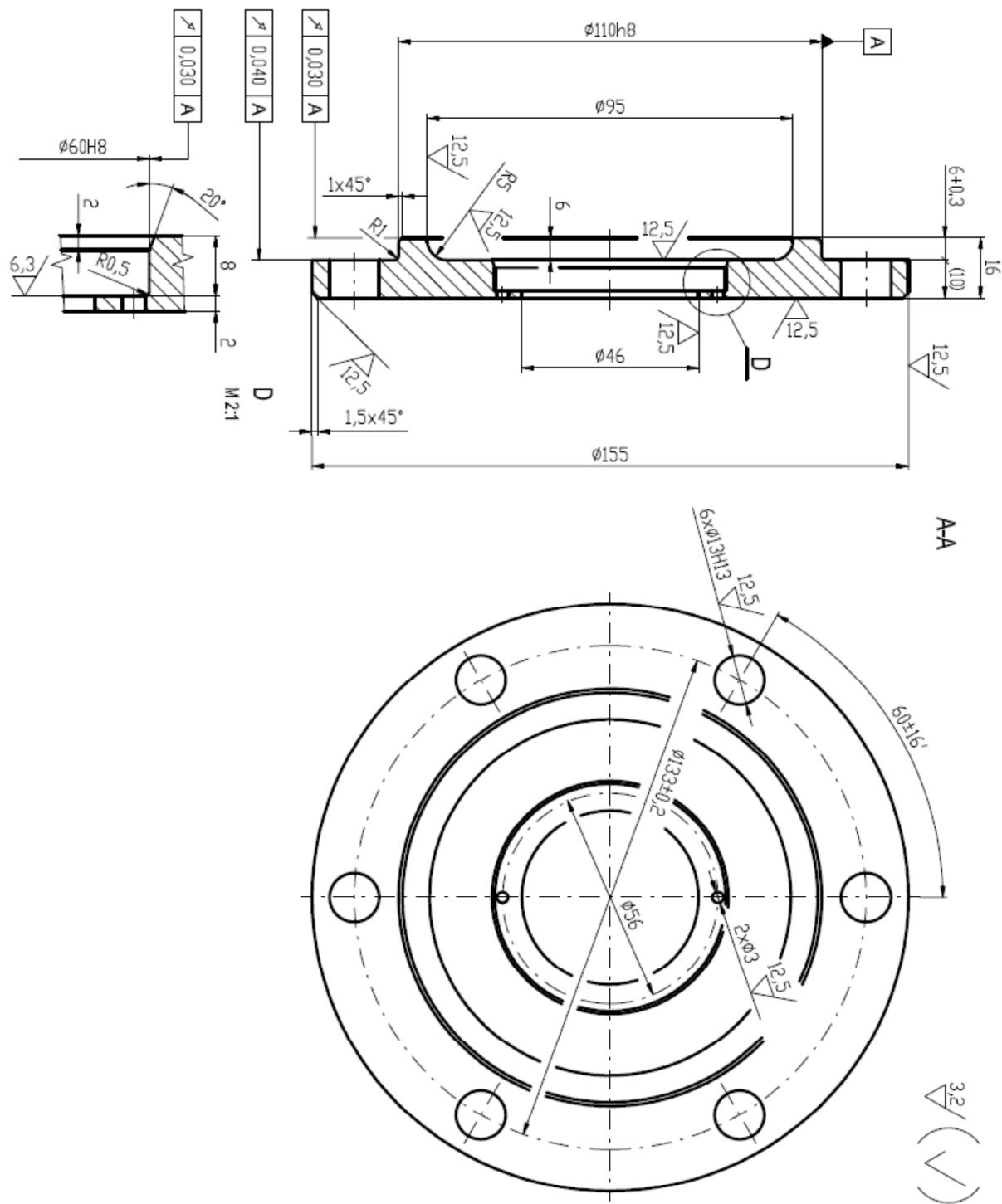
### 14.2.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsaný zatížení osovou a tlakovou silou na vnitřní osazení víka hlavy (červená plocha na pravé části Obrázku 14.6), případně navrhněte jiné okrajové podmínky.

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 14.7 – Výkres víka hlavy

## 14.3 Hřídel hlavy

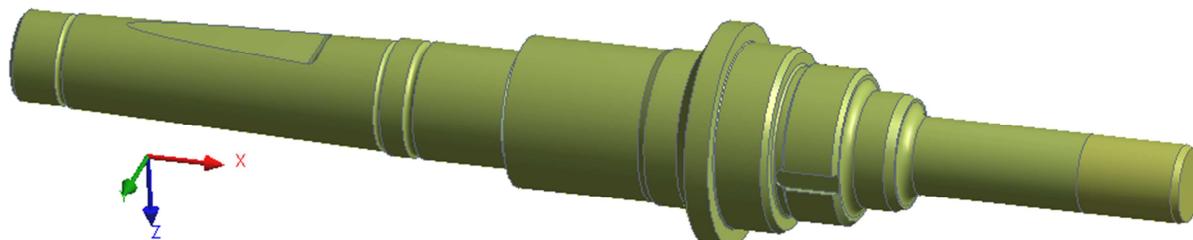


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model hřídele hlavy vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu hřídele hlavy. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.3.1 Tvorba modelu

Na základě technické dokumentace uvedené na Obrázku 14.12 vytvořte vhodný 3D model hřídele hlavy. Model hřídele hlavy vytvořený dle uvedené výkresové dokumentace je zobrazený na Obrázku 14.8. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie hřídele hlavy (odstranění sražených hran, přechodových rádiusů atd.) s ohledem na zjednodušení MKP modelu a s tím spojené snížení počtu elementů a uzelů MKP modelu. Hřídel hlavy je určena k přenosu krouticího momentu a přenáší rovněž i osovou tahovou/tlakovou sílu.



Obrázek 14.8 – 3D model hřídele hlavy

Hřídel hlavy je vyrobena z nízkolegované konstrukční oceli 15 240.7 zušlechtěná na střední pevnost. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.3.

Tabulka 14.3 – Materiálové vlastnosti oceli 15 240.7

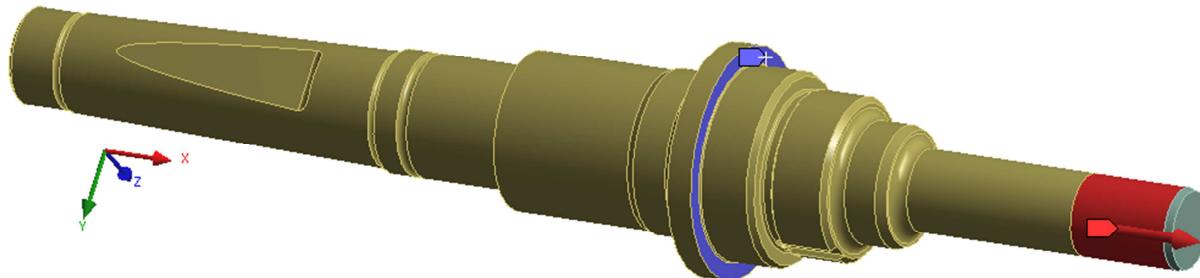
Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 240.7	214000	0,3	1170	981

#### 14.3.2 Okrajové podmínky

Hřídel hlavy přenáší osovou tahovou nebo tlakovou sílu 30000N a krouticí moment 800Nm. Na Obrázku 14.9 a Obrázku 14.10 jsou uvedeny okrajové podmínky pro oba způsoby zatížení. Kombinace obou způsobů zatížení je uvedena na Obrázku 14.11.

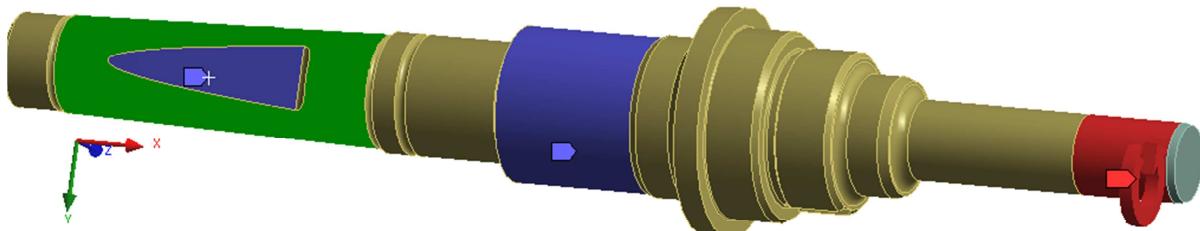
Na osazení hřídele hlavy (délka osazení je 40mm) v místě uchycení upínací kleštiny na hřídel osová tahová/tlaková síla 30000N. Působiště síly je označeno červenou barvou je na Obrázku 14.9. V místě, kde se opírá osazení hřídele o kroužek axiálního ložiska, je zvolena

deformační okrajová podmínka pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému (modrá plocha uprostřed Obrázku 14.9).



Obrázek 14.9 – Okrajové podmínky

Na osazení hřídele hlavy (délka osazení je 40mm) v místě uchycení upínací kleštiny působí na hřídele amplituda krouticího momentu 800Nm. Plocha osazení, přes kterou je krouticí moment na hřídele přenášen, je uvedena na Obrázku 14.10 a označena červenou barvou. Uprostřed hřídele, v místě kde se nachází radiální válečkové ložisko je aplikována cylindrická deformační okrajová podmínka pro zamezení posuvu v radiálním směru (modrá plocha uprostřed Obrázku 14.10). V levé části hřídele, v místě kde se nachází pouzdro páky je aplikována cylindrická deformační okrajová podmínka pro zamezení posuvu v radiálním směru (zelená plocha v levé části Obrázku 14.10). V místě, kde je hřídel spojena klínem s pákou převodového ústrojí (modrá plocha v levé části Obrázku 14.10) je aplikovaná okrajová podmínka zabraňující posuvu hřídele ve všech směrech x, y, z tedy vetknutí.



Obrázek 14.10 – Okrajové podmínky

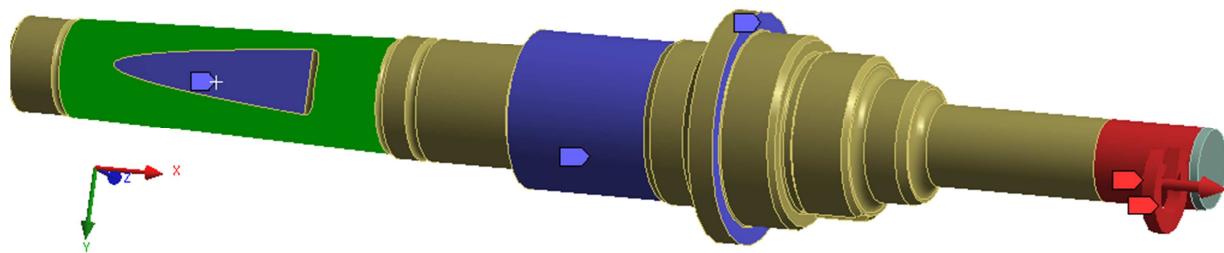
### 14.3.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu hřídele hlavy metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro tři případy zatížení:

První případ zatížení osovou tahovou potažmo tlakovou osovou silou je uvedený na Obrázku 14.10.

Druhý případ zatížení krouticím momentem je uvedený na Obrázku 14.11.

Třetí případ zatížení je kombinací obou předchozích způsobů zatížení tedy kombinací osové tahové/tlakové osovou síly v kombinaci s krouticím momentem. Okrajové podmínky pro tento případ kombinovaného zatížení jsou uvedený na Obrázku 14.12.

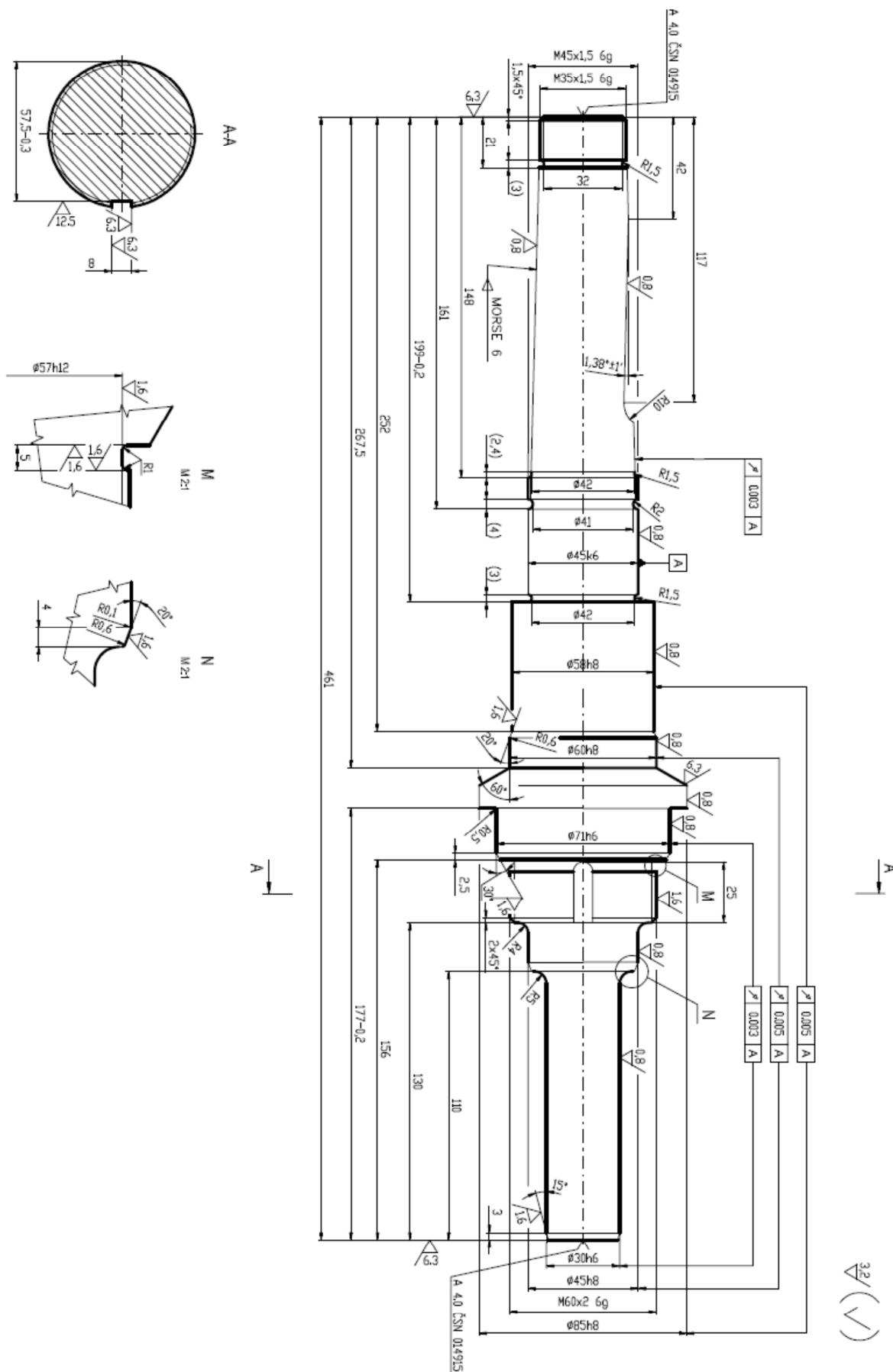


Obrázek 14.11 – Okrajové podmínky případ kombinovaného zatížení

Řešení, u všech třech způsobů zatížení, proveděte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledné osové a redukované napětí pro jednotlivé případy zatížení a pro jejich kombinaci porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající bezpečnost k mezním stavům daného materiálu.



Obrázek 14.12 – Výkres hnací hřídele

## 14.4 Pouzdro hlavy

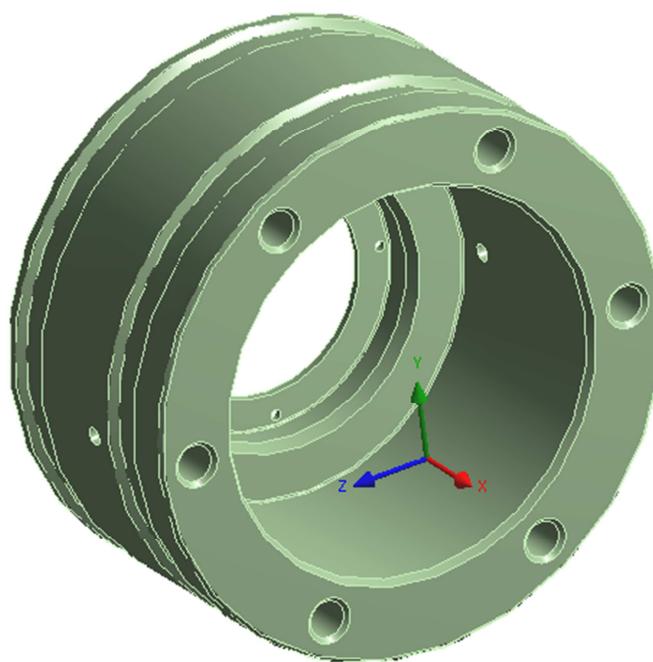


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model pouzdra hlavy určený pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu pouzdra hlavy. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.4.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 14.15 vytvořte 3D model pouzdra hlavy. Hotový model vytvořený dle uvedené technické dokumentace je zobrazený na Obrázku 14.13. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie pouzdra hlavy s ohledem na snížení počtu elementů a uzlů MKP modelu. Při tvorbě modelu zvažte aplikaci symetrických okrajových podmínek. Závitové otvory pro šrouby nahraďte válcovými otvory příslušného průměru.



Obrázek 14.13 – 3D model pouzdra hlavy

Pouzdro spojky je vyrobeno z nízkolegované konstrukční oceli 15 241. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.4.

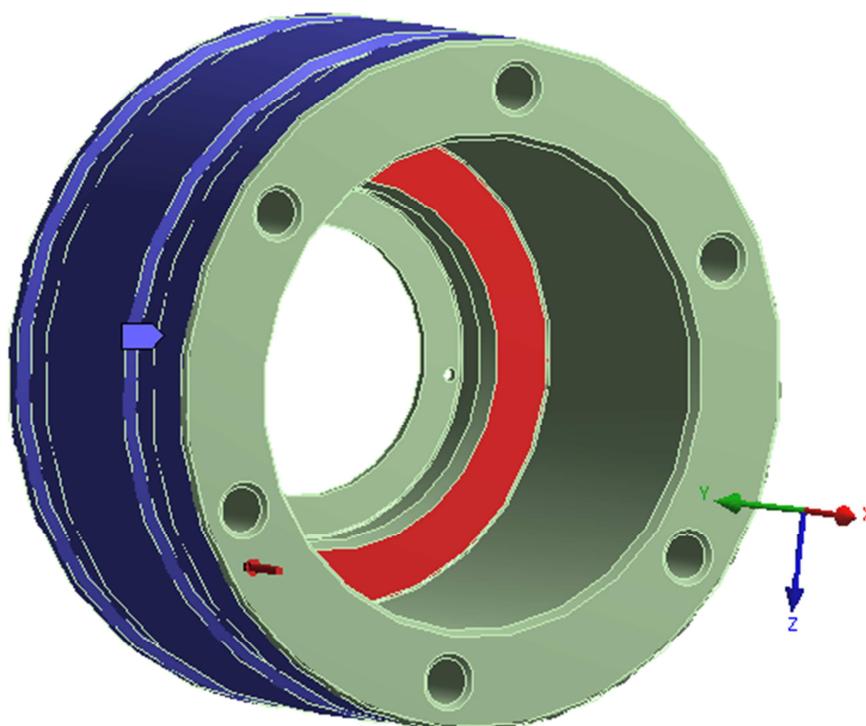
Tabulka 14.4 – Materiálové vlastnosti oceli 15 241

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 241	214000	0,3	680	540

#### 14.4.2 Okrajové podmínky

Pouzdro hlavy potažmo celá hlava přenáší osovou tahovou a tlakovou sílu 30000N. Na Obrázku 14.14 jsou uvedeny okrajové podmínky získané z rozboru zatížení upínací hlavy.

Na obvodové osazené ploše je pouzdro hlavy zalito tekutým kovem ve svařenci hlavy. Tento konstrukční prvek nahradíme deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu ve všech směrech x, y, z (vetknutí) uvedeného souřadného systému (modrá plocha na Obrázku 14.14). Na vnitřní ploše osazení pouzdra hlavy v místě kontaktu s vnitřním kroužkem axiálního ložiska zadejte osovou tlakovou sílu 30000N (červená plocha na Obrázku 14.14)



Obrázek 14.14 – Okrajové podmínky

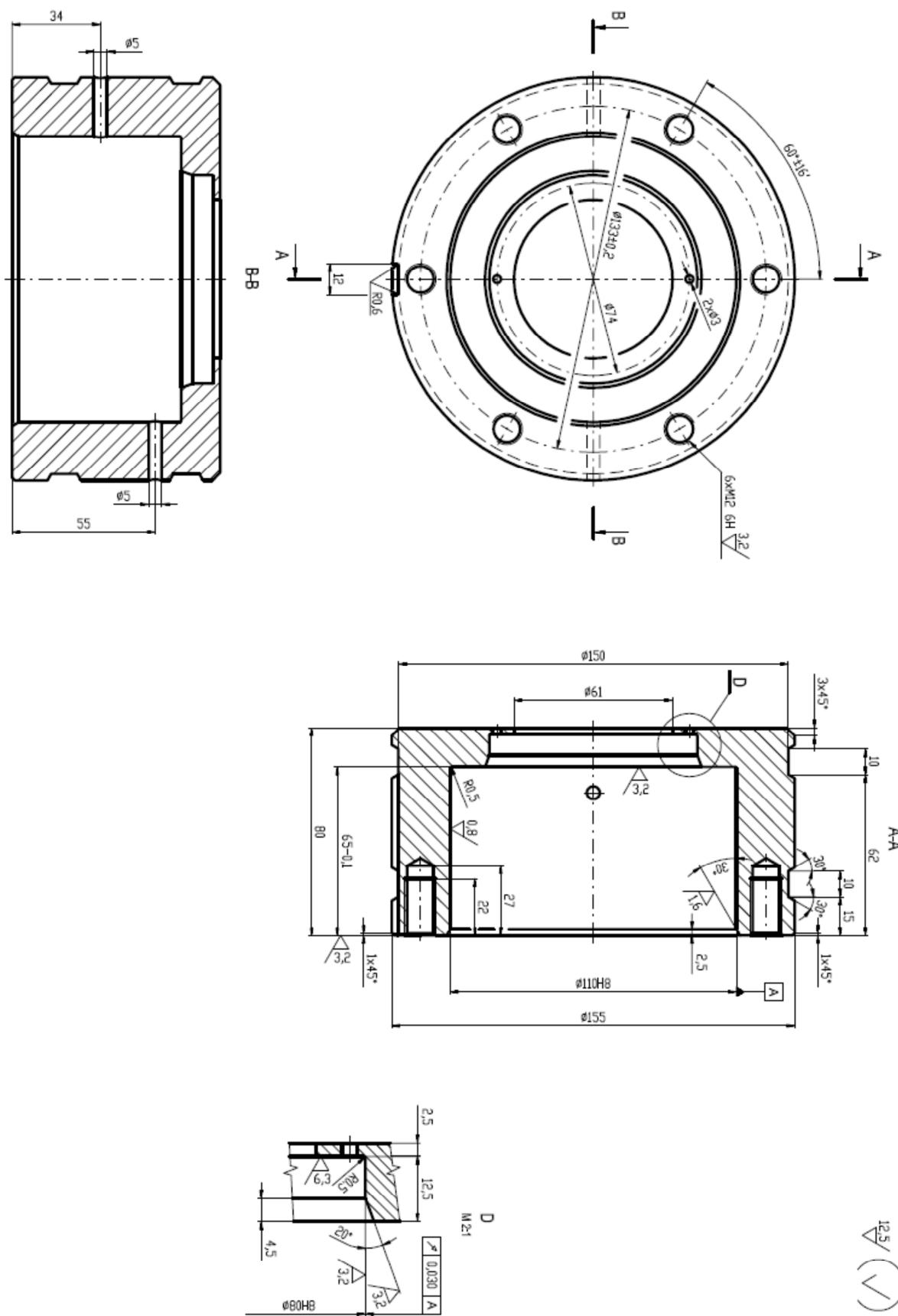
#### 14.4.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsáný případ zatížení, případně navrhněte jiné řešení okrajových podmínek.

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.



Obrázek 14.15 – Výkres pouzdra hlavy

## 14.5 Šroub hlavy

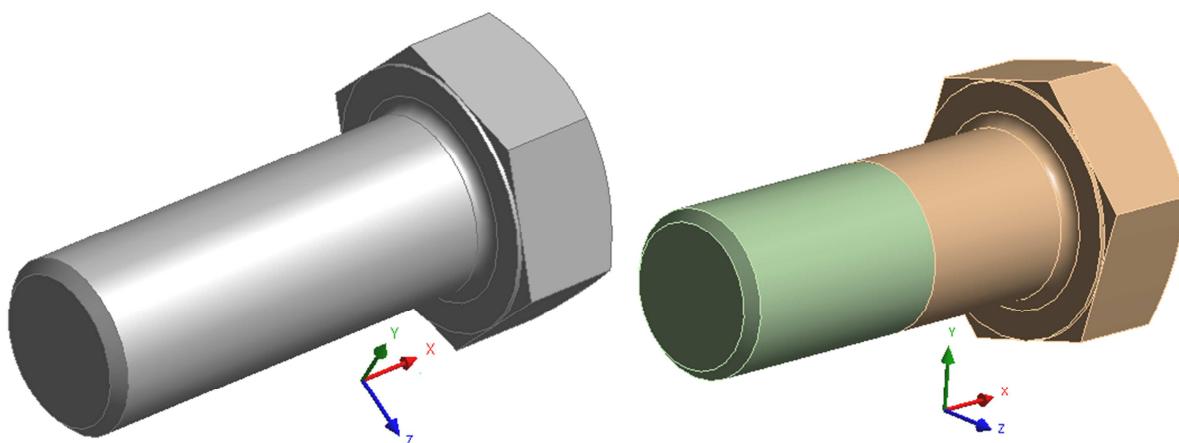


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model šroubu hlavy vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu šroubu hlavy. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.5.1 Tvorba modelu

Na základě technické dokumentace a doporučení normy ČSN 02 1101.50 vytvořte 3D model šroubu víka spojky M16 x 45. 3D model šroubu vytvořený dle technické dokumentace je uvedený v levé části Obrázku 14.16. Zjednodušený model vhodný pro napěťově deformační analýzu je uvedený v pravé části Obrázku 14.16. Dřík šroubu modelujte na minimální průměr závitu a ve vzdálenosti 22mm od hlavy šroubu rozdělte model dělící rovinou vymezující aplikace okrajových podmínek.



Obrázek 14.16 – 3D model šroubu hlavy

Šroub víka spojky je dle uvedené normy vyrobený pro třídu pevnosti 8.8 což odpovídá materiálovým parametrům uvedeným v tabulce 14.5.

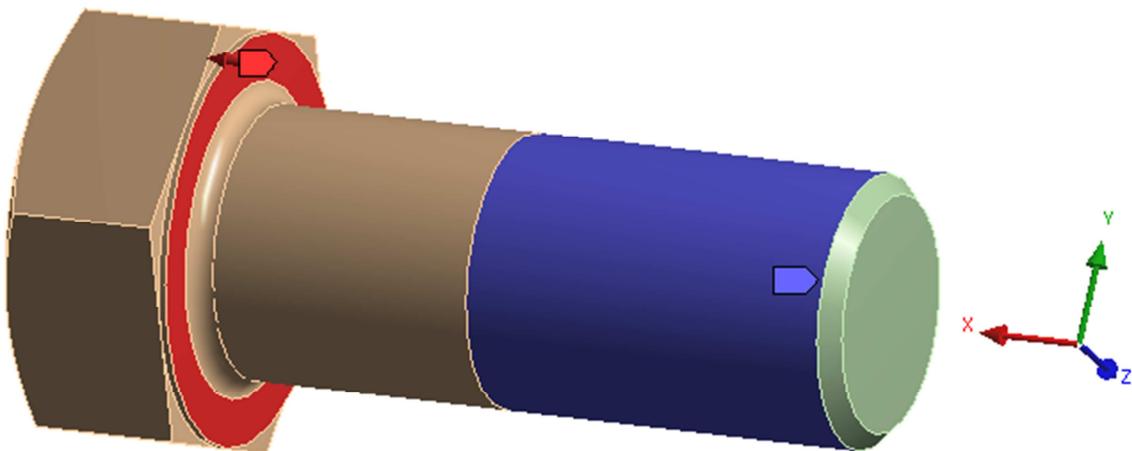
Tabulka 14.5 – Materiálové vlastnosti oceli třídy pevnosti 8.8

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
8.8	210000	0,3	800	640

#### 14.5.2 Okrajové podmínky

Všechny šrouby hlavy umístěné na čelní ploše (5 kusů) přenáší celkovou osovou sílu 30000kN. Vzhledem k zachování předpětí šroubového spoje zvolíme 34000N. Na jeden šroub připadá síla 6800N. Na Obrázku 14.17 jsou uvedeny aplikované okrajové podmínky.

V místě čelní plochy hlavy šroubu (červená plocha na Obrázku 14.17) zadejte osovou tlakovou sílu 6800N, tato síla odpovídá předpětí ve šroubu, které je vyvolané vhodným utahovacím momentem. Na válcovou plochu dříku šroubu (modrá plocha na Obrázku 14.17) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v osách x, y, z uvedeného souřadného systému, která nahrazuje závitový spoj. Délka plochy odpovídá délce závitů, který je zašroubovaný v pouzdře spojky. V tomto případě je délka zašroubované části dříku šroubu rovna 23mm.



Obrázek 14.17 – Okrajové podmínky

#### 14.5.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu šroubu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsáný případ zatížení osovou tlakovou silou na příslušné ploše hlavy šroubu (červená plocha na Obrázku 14.17).

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.

## 14.6 Vložka ložiska

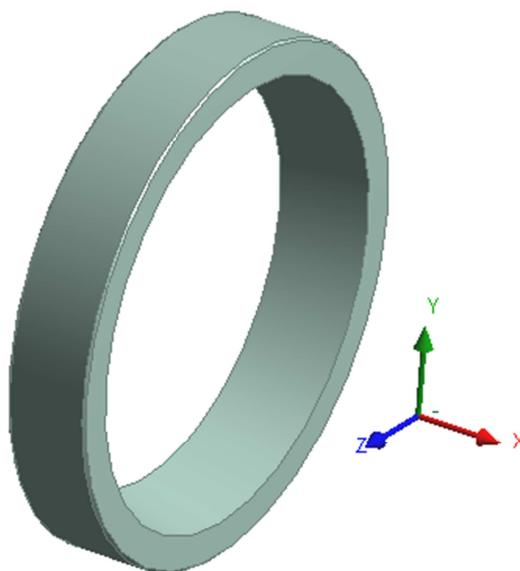


### Úkol

Na základě technické dokumentace vytvořte 3D model vložky ložiska vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Zadejte vhodné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu vložky ložiska. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.6.1 Tvorba modelu

Na základě výkresové dokumentace uvedené na Obrázku 14.20 vytvořte 3D model vložky ložiska. 3D model vložky ložiska vytvořený dle technické dokumentace je uvedený na Obrázku 14.18. Při tvorbě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie součástky s ohledem na snížení počtu elementů a uzlů MKP modelu. Z modelu odstraňte přebytečné zaoblení a sražení hran. Při tvorbě MKP modelu zvažte použití symetrických nebo axi-symetrických okrajových podmínek.



Obrázek 14.18 – 3D model vložky ložiska

Vložka ložiska je vyrobeno běžné konstrukční oceli 11 600. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.6.

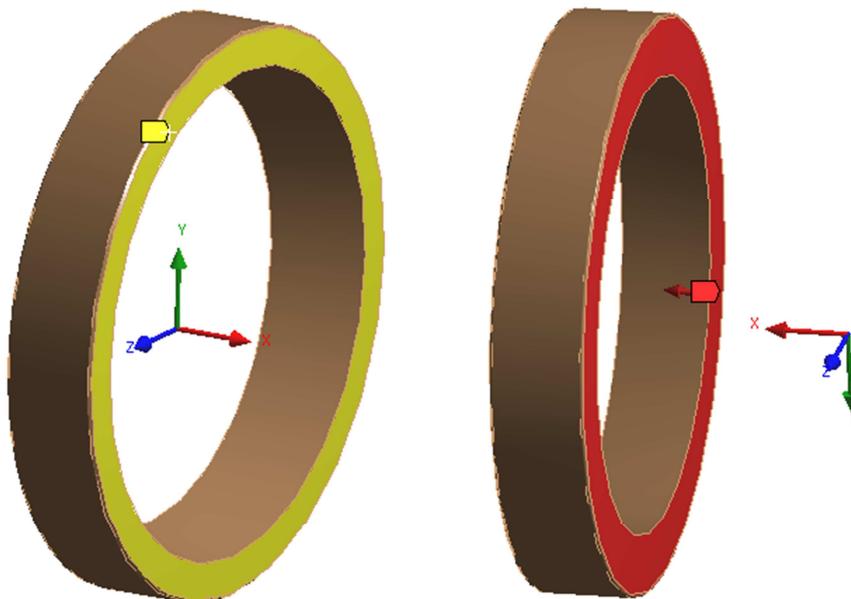
Tabulka 14.6 – Materiálové vlastnosti oceli 11 600

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
11 600	210000	0,3	570	295

### 14.6.2 Okrajové podmínky

Vložka ložiska slouží v upínací hlavě k vymezení vůle mezi víkem hlavy a kroužkem axiálního ložiska. Přes vložku ložiska se zároveň přenáší axiální zatížení kroužku ložiska na víko hlavy. Přenášená síla je rovna 30000N. Na Obrázku 14.19 jsou uvedeny okrajové podmínky.

V místě, kde vložka ložiska dosedá na ložiskový kroužek, na příslušné čelní ploše (červená plocha na pravé části Obrázku 14.19) zadejte osovou tlakovou sílu 30000N. Na druhé dosedací ploše vložky ložiska v místě kontaktu s víkem hlavy (žlutá plocha na levé části Obrázku 14.19) aplikujte deformační okrajovou podmínky pro zamezení posuvu v ose x uvedeného souřadného systému, nebo použijte tlakovou vazbu.



Obrázek 14.19 – Okrajové podmínky

### 14.6.3 Analýza

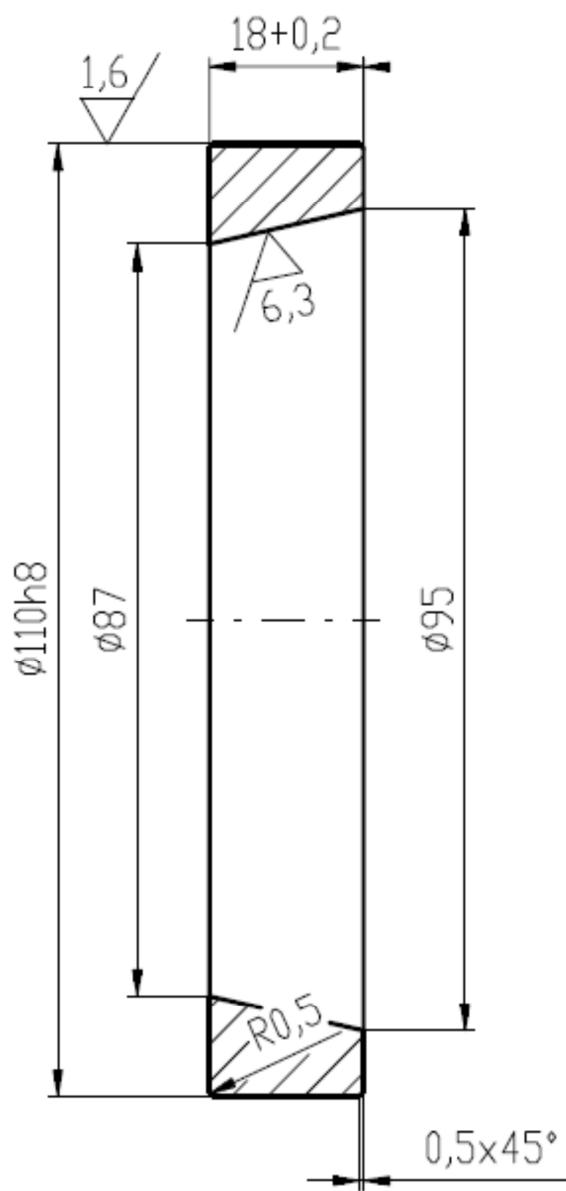
Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu příložky metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsaný případ zatížení osovou tlakovou silou na čelní plochu vložky ložiska (červená plocha na pravé části Obrázku 14.19).

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických případně axi-symetrických okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.

3,2/ (✓)



Obrázek 14.20 – Výkres vložky ložiska

## 14.7 Páka mechanismu

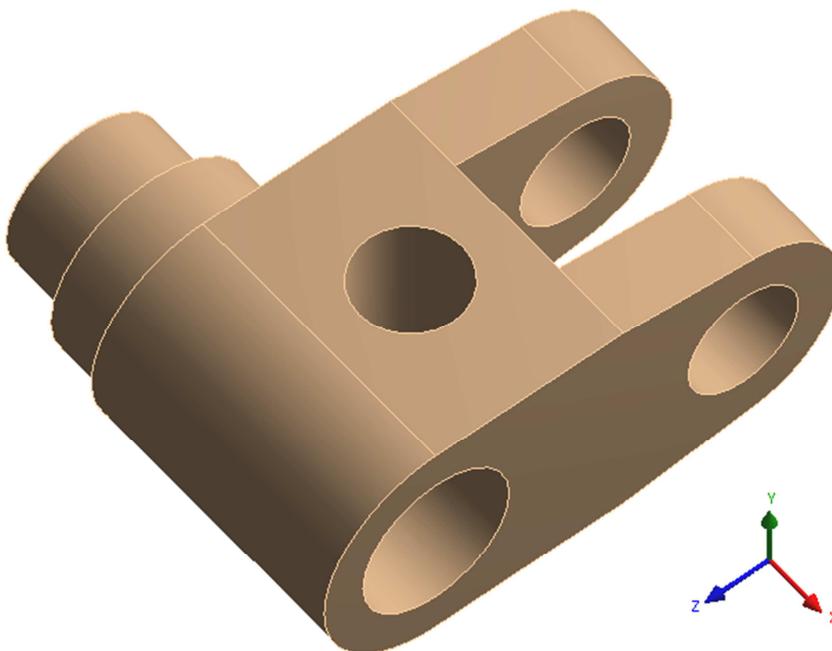


### Úkol

Z přiloženého CD disku načtěte do MKP software 3D model páky mechanismu. Tento model je vytvořený v jiném CAD software a exportovaný jako parasolid s příponou x\_t. Model je uložený v tomto formátu Paka\_mechanismu.x\_t. V MKP programu model vhodně upravte. Zadejte příslušné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu páky mechanismu na zadáné zatížení. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.7.1 Tvorba modelu

Na Obrázku 14.21 je uvedený 3D model páky mechanismu vytvořený ve standardním CAD software. Model upravte tak, aby byl vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Při úpravě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie páky mechanismu s ohledem na snížení počtu elementů a uzelů MKP modelu. Z modelu odstraňte přebytečné zaoblení a sražení hran.



Obrázek 14.21 – 3D model páky mechanismu

Páka mechanismu je vyrobena z nízkolegované konstrukční oceli 15 240.7 zušlechtěná na střední pevnost. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.7.

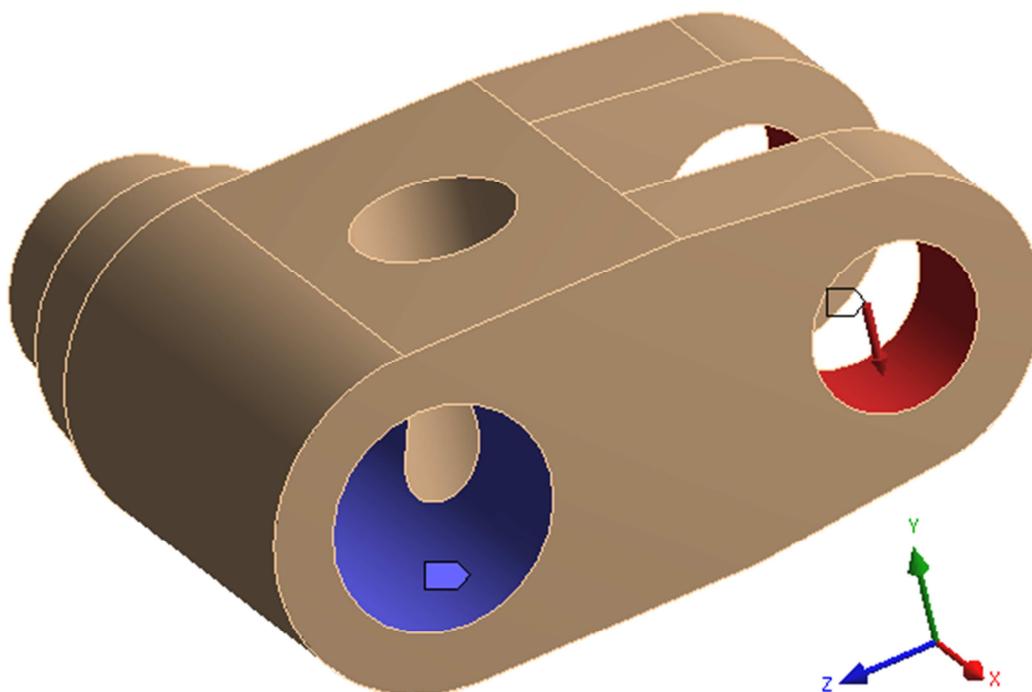
Tabulka 14.7 – Materiálové vlastnosti oceli 15 240.7

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 240.7	214000	0,3	1170	981

### 14.7.2 Okrajové podmínky

Páka mechanismu je součástí čtyřkloubového mechanismu převodové skříně, která přenáší krouticí moment na hřídel hlavy. Z rozboru zatížení převodového mechanismu lze vypočítat sílu, kterou páka mechanismu přenáší. Tato síla je rovna 8000N. Na Obrázku 14.22 jsou uvedeny navržené okrajové podmínky.

V místě, kde je páka mechanismu nasazena na hřídel hlavy aplikujte cylindrickou deformační okrajovou podmínku pro zamezení posuvu v radiální směru (modrá plocha na Obrázku 14.22). Na druhé straně jsou v příslušných otvorech nasazeny ložiskové kroužky, které přenáší osovou sílu 8000N vyvozenou ojnicí klikového mechanismu (červená plocha na pravé části Obrázku 14.22). K zadání této síly využijte okrajovou podmínku imitující ložiskové zatížení v příslušném směru (bearing load).



Obrázek 14.22 – Okrajové podmínky

### 14.7.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky proveděte napěťově deformační analýzu páky mechanismu metodou konečných prvků. Analýzu proveděte pro popsáný případ zatížení tlakovou silou (ložiskové zatížení) na vnitřní plochy páky mechanismu (červená plocha na pravé části Obrázku 14.22).

Řešení proveděte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických případně okrajových podmínek.

Výsledný stav napjatosti v kritických místech součásti porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající statickou bezpečnost.

## 14.8 Čep páky

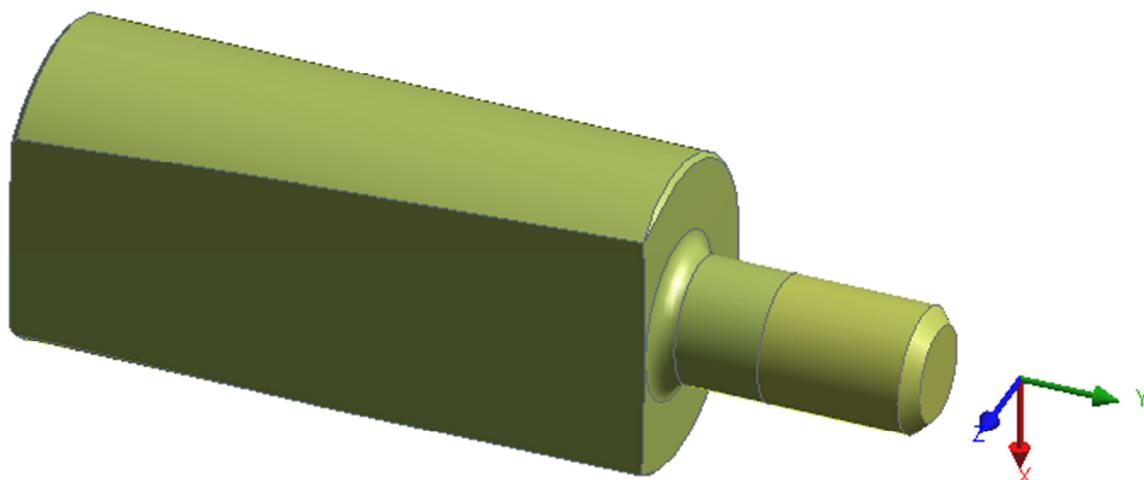


### Úkol

Z přiloženého CD disku načtěte do MKP software 3D model čepu páky. Tento model je vytvořený v jiném CAD software a je exportovaný jako soubor typu STEP s příponou stp. Model je uložený v tomto formátu cep\_paky.stp. V MKP programu model vhodně upravte. Zadejte příslušné okrajové podmínky a vypočítejte napěťově deformační odezvu čepu páky na zadané zatížení. Získané výsledky napětí a deformace podrobte kritické analýze a stanovte bezpečnost vzhledem k zadaným materiálovým parametrům.

#### 14.8.1 Tvorba modelu

Na Obrázku 14.23 je uvedený 3D model čepu páky vytvořený ve standardním CAD software. Model upravte tak, aby byl vhodný pro napěťově deformační analýzu metodou konečných prvků. Při úpravě modelu zvažte vhodné zjednodušení geometrie příložky s ohledem na snížení počtu elementů a uzelů MKP modelu. Z modelu odstraňte přebytečné zaoblení a sražení hran.



Obrázek 14.23 - 3D model čepu páky

Čep páky je vyrobený z nízkolegované konstrukční oceli 15 240.7 zušlechtěná na střední pevnost. Základní materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.8.

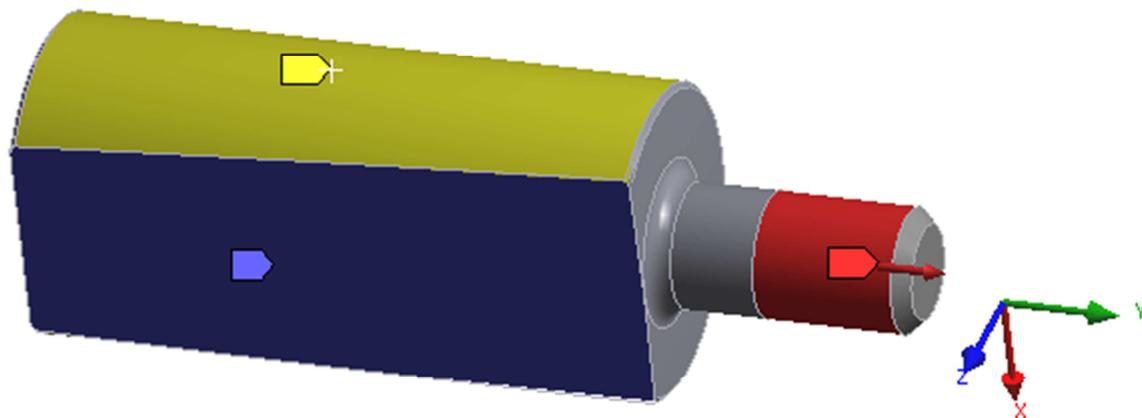
Tabulka 14.8 – Materiálové vlastnosti oceli 15 240.7

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]
15 240.7	214000	0,3	1170	981

#### 14.8.2 Okrajové podmínky

Čep páky je součástí čtyřkloubového mechanismu převodové skříně. Slouží k fixaci hřídele hlavy v páce mechanismu a tvoří pevný svěrný spoj pro přenos krouticího momentu.

V místě, kde je čep páky nasazený v páce mechanismu nasazena aplikujte cylindrickou deformační okrajovou podmínsku pro zamezení posuvu v radiální směru (žlutá plocha na Obrázku 14.24). V místě, kde je čep páky v kontaktu s hřídelí hlavy aplikujte deformační okrajovou podmínky tzv. tlakovou vazbu (compression only support) pro zamezení posuvu v ose z uvedeného souřadného systému v tlakové oblasti. Na osazení dříku šroubu čepu páky ve vzdálenosti 10mm aplikujte osovou tahovou sílu. (červená plocha na Obrázku 14.24).



Obrázek 14.24 – Okrajové podmínky

#### 14.8.3 Analýza

Pro zadané materiálové parametry a uvedené okrajové podmínky provedte napěťově deformační analýzu páky mechanismu metodou konečných prvků. Analýzu provedte pro popsaný případ zatížení tahovou silou. Cílem je stanovit odpovídající velikost předepínací osové tahové síly působící na dřík šroubu tak aby nebyla překročena pevnostní podmínka v kritickém místě součásti. Při analýze uvažujte s koeficientem bezpečnosti 2 vzhledem k mezi kluzu daného materiálu.

Řešení provedte pro několik typů a velikostí sítě prvků a diskutujte nad její použitelností v kritických místech součásti.

Při modelování zvažte možnost použití symetrických okrajových podmínek.

Výsledně redukované napětí porovnejte s materiálovými parametry a stanovte odpovídající bezpečnost.