



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## INŽENÝRSKÁ OPTIMALIZACE PROCESU LISOVÁNÍ ROTORU TURBO MOLEKULÁRNÍ VÝVĚVY

ENGINEERING OPTIMIZATION OF THE PRESSING PROCESS OF THE TURBO MOLECULAR PUMP ROTOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Baklík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2023



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Jiří Baklík</b>
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Vosynek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Inženýrská optimalizace procesu lisování rotoru turbo molekulární vývěvy**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Proces výroby rotoru vývěvy se skládá z lisování 3 dílů. Na hliníkovou trubku se lisují hliníkové lopatkové disky a do trubky se dále lisují magnety magnetického ložiska. Trubka je předeřtává a magnety jsou podchlazené. S lopatkami to je naopak.

Do předeřtává trubky se pak vlisuje podchlazená ocelová hřídel. Hřídel je ochlazená v tekutém dusíku a trubka předeřtává v peci. Poté se díly vloží do automatického lisu, který je spoj (podobně jako lopatky a magnety ložiska). Mezi lisováním je vždy čas na vyrovnání teplot a následné chlazení/nahřtání dílů.

Tento proces je značně finančně nákladný a záměrem je jej zlevnit vynecháním tekutého dusíku z procesu výroby.

### **Cíle bakalářské práce:**

Zpracování rešeršní studie problematiky lisovaných spojů. Výpočet deformačně napěťových stavů rotoru vývěvy při současné technologii výroby a analýza výsledků z hlediska ztráty lisovaného spoje vlivem teplotního zatížení a zatížení od otáček. Dále navrzení (inženýrská optimalizace) tolerančního pole a teplot pro lisované součásti v případě eliminace dusíku z procesu výroby opět s ohledem na dané zatížení rotoru vývěvy.

**Seznam doporučené literatury:**

MIČKAL, Karel a Přemysl KOLÁŘ. Strojní montáže: učebnice pro studijní obor 02-11-4strojírenství se zaměřením pro zpracování kovů a montáž strojů a zařízení. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:8274e610-3812-11ee-8f00-5ef3fc9bb22f>

HÖSCHL, Cyril. Kontaktní úlohy a lisované spoje. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1985.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou lisovaných spojů a optimalizací procesu lisování rotoru mechanické turbomolekulární vývěvy nEXT 300T. Lisovaný celek se skládá ze tří hlavních částí (lopatkové disky, dutá hřídel, nosná hřídel). Lopatkové disky jsou nalisovány na dutou hřídel, následně je tento celek nalisován na nosnou hřídel. Optimalizace byla provedena výpočtovým modelováním založeným na metodě konečných prvků, pomocí programu ANSYS Mechanical 2024 R1. Lisovací proces byl optimalizován s požadavkem na snížení výrobních nákladů. Proces kompletace prodražuje tekutý dusík, který se aktuálně používá k ochlazování lisovaných součástí. Byl proveden návrh lisovacích teplot. Pro ohřev byla stanovena teplota 130 °C. Pro ochlazování byla zvolena teplota -65 °C, které lze dosáhnout pomocí průmyslového chladicího zařízení. Kvůli změně lisovacích teplot byl proveden návrh tolerančních polí součástí, které zajistí, že bude sestavu možné zkompletovat a že nedojde při provozním zatížení ke ztrátě lisovaného spoje. U spoje mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí je pro funkčnost potřeba zajistit přesah na poloměru v rozmezí 0,0585–0,0695 mm. U spoje mezi dutou hřídelí a nosnou hřídelí je funkční rozsah přesahů na poloměru 0,01–0,02 mm.

## ABSTRACT

This thesis deals with the issue of press fitted joints and the optimization of the rotor pressing process of the mechanical turbomolecular pump nEXT300T. The press fitted assembly consists of three main parts (blade discs, hollow shaft, main shaft). The blade discs are press-fitted onto the hollow shaft, then this assembly is press fitted onto the main shaft. The optimization was performed by computational modeling based on the finite element method, using ANSYS Mechanical 2024 R1. The pressing process has been optimized to reduce production costs. The assembling process is more expensive due to liquid nitrogen, which is currently used for cooling the press fitted parts. Design of the pressing temperatures was carried out. For heating a temperature of 130 °C was determined. For cooling a temperature of -65 °C was chosen, this can be achieved using an industrial freezer. Due to the change in pressing temperatures, tolerance fields of the components were designed to ensure that the assembly can be assembled and that the press joint will not be lost under operating load. For the connection between the blade discs and the hollow shaft, a radial interference of 0,0585-0,0695 mm is required for functionality. For the connection between the hollow shaft and the main shaft, a radial interference range of 0,01-0,02 mm is functional.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Turbomolekulární vývěva, lisovaný spoj, metoda konečných prvků, deformačně-napěťová analýza

## KEYWORDS

Turbomolecular pump, press fit, shrink-fit, finite element method, stress-strain analysis

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAKLÍK, Jiří. *Inženýrská optimalizace procesu lisování rotoru turbo molekulární vývěvy*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158083>.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce: Ing. Petr Vosynek, Ph.D..

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků.

V Brně dne 24. 5. 2024

.....  
Jiří Baklík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D., Ing. Timkovi Markovi Mateášikovi, Ing. Ladislavu Tománkovi za vedení mé bakalářské práce, za jejich cenné rady a čas. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

Jiří Baklík



# OBSAH

<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>1 Mechanické turbomolekulární vývěvy</b>	<b>12</b>
1.1 Jednostupňové turbomolekulární vývěvy	12
1.1.1 Části jednostupňové turbomolekulární vývěvy	13
1.2 Vícestupňové turbomolekulární vývěvy	14
1.2.1 Odporové turbomolekulární stupně	14
1.2.2 Regenerativní stupeň	15
1.3 Uložení rotoru	16
1.4 Primární vývěvy	17
1.5 Vývěva Edwards nEXT 300T	18
<b>2 Lisované spoje</b>	<b>20</b>
2.1 Lisované spoje beze změny teploty (lisování podélné)	21
2.2 Lisované spoje se změnou teploty (lisování příčné)	22
2.3 Tolerance rozměrů	22
2.4 Analytické vztahy	23
<b>3 Inženýrská optimalizace procesu lisování rotoru turbomolekulární vývěvy</b>	<b>28</b>
3.1 Řešená problematika	28
3.2 Výpočtové modelování	29
3.2.1 Metoda konečných prvků	29
3.3 Výpočtový model - pracovní zatížení	30
3.3.1 Modely materiálů	30
3.3.2 Model geometrie	32
3.3.3 Diskretizace	33
3.3.4 Model vazeb a zatížení	34
3.3.5 Nastavení řešiče	36
3.4 Výpočtový model - ověření nalisovatelnosti	37
3.4.1 Model geometrie	37
3.4.2 Diskretizace	37
3.4.3 Model vazeb a zatížení	38
3.4.4 Nastavení řešiče	38
<b>4 Výsledky</b>	<b>39</b>
4.1 Metodika vyhodnocování	39
4.1.1 Parametrizace	39
4.2 Aktuální způsob montáže	40
4.3 Optimalizovaný proces montáže	43
4.3.1 Minimální hodnoty přesahů	43
4.3.2 Maximální hodnoty přesahů	46

4.3.3 Funkční rozsah přesahů . . . . .	49
<b>ZÁVĚR</b>	<b>50</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>56</b>
<b>A PŘÍLOHY - Aktuální způsob kompletace</b>	<b>57</b>
A.1 Radiální napětí . . . . .	57
A.2 Tečné napětí . . . . .	58
A.3 Osové napětí . . . . .	59
<b>B PŘÍLOHY - Optimalizovaný způsob kompletace</b>	<b>60</b>
B.1 Radiální napětí . . . . .	60
B.2 Tečné napětí . . . . .	62
B.3 Osové napětí . . . . .	64

## ÚVOD

Turbomolekulární vývěvy jsou zařízení, které slouží k vytváření a udržování nízkých pracovních tlaků (až  $10^{-9}$  Pa). V dnešní době se jedná o často využívané zařízení, které díky svým vlastnostem nachází uplatnění ve vědeckých aplikacích, výrobě polovodičů, elektronové mikroskopii a další.

Mezi přední výrobce vakuových pump, kteří aktivně vyvíjí turbomolekulární vývěvy, patří firmy Edwards, Leybold, Pfeiffer Vacuum, Gamma Vacuum, Ulvac a další. Výroba turbomolekulárních vývěv je nákladná a prodražuje se zejména kvůli vysokým požadavkům na přesnost a čistotu obráběných dílů, ale i procesům spojených s kompletací, jako jsou například lisovací procesy, kterými se tato práce bude zabývat.

Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací procesu lisování součástí rotoru turbomolekulární vývěvy. Konkrétně vývěvou of firmy Edwards a označením nEXT 300T. Jedná se o vícestupňovou pumpu s axiálním průtokem, která dosahuje provozních otáček až 60000 ot/min a maximální rychlosti čerpání 340 l/s při práci s héliem. V současnosti firma Edwards využívá k ochlazení dílů turbomolekulárních vývěv, které jsou určeny k lisování tekutý dusík. Tekutý dusík dosahuje při atmosférickém tlaku teploty až  $-196$  °C, což pro bezpečnost pracovníků montáže klade vysoké nároky na dodržování přísných bezpečnostních nařízení. Ohřev protikusů ochlazených součástí se provádí v průmyslových elektrických pecích, které zajišťují plynulý ohřev součástí na požadovaných  $110$  °C.

Cílem této práce je najít toleranční pole lisovaných součástí turbomolekulárního stupně (lopatkové disky, dutá hřídel a hřídel) tak, aby byl celek smontovatelný a vydržel pracovní zatížení, při použití jiné technologie ochlazení. Hlavním cílem je, aby se tekutý dusík z procesu úplně odstranil a nahradil se ochlazením pomocí průmyslového chladicího zařízení, které dokáže součásti ochladit až na teplotu  $-65$  °C. Přejít na bezdusíkový způsob ochlazení součástí by měl pozitivní vliv na snížení výrobních nákladů a zvýšení bezpečnosti na pracovišti. Ochlazení tekutým dusíkem aktuálně firma Edwards používá jen u kompletace turbomolekulárních pump, tudíž by změna způsobu ochlazení zjednodušila celkový chod čisté montáže vakuových pump.

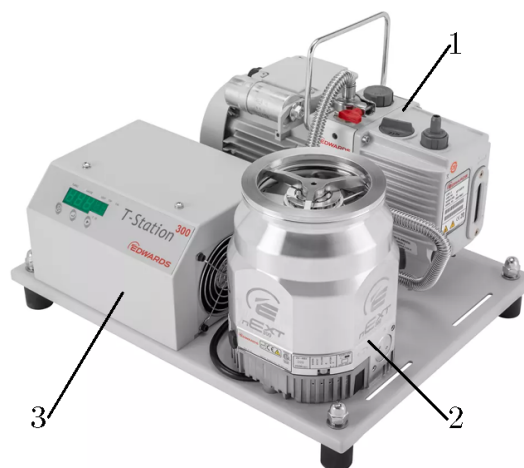
Teoretická část práce se skládá ze dvou kapitol. První kapitola obsahuje popis funkce a konstrukce turbomolekulárních vývěv, včetně vývěvy nEXT 300T. Druhá kapitola obsahuje rešerši lisovaných spojů, včetně analytických vztahů.

Praktická část práce se zabývá tvorbou výpočtových modelů pro návrh optimalizovaného tolerančního pole lisovaných dílů. Funkčnost výpočtového modelu je ověřena použitím aktuálních lisovacích teplot a přesahů náležitých do aktuálních tolerančních polí. Návrh tolerančního pole je prováděn pomocí výpočtových modelů založených na metodě konečných prvků, pomocí programu Ansys Mechanical 2024 R1. Součástí výpočtového modelu je tvorba zjednodušené geometrie, která bude dostatečně reprezentovat reálné součásti, nastavení modelů použitých materiálů, diskretizace modelů geometrie, tvorba modelů vazeb a zatížení a výpočet za pomoci nástroje Static Structural. Očekávaným výsledkem je přesný rozsah přesahů mezi součástmi tak, aby byla zajištěna plná funkčnost sestavy po změně technologie lisování.

# 1 MECHANICKÉ TURBOMOLEKULÁRNÍ VÝVĚVY

Turbomolekulární vývěvy jsou zařízení sloužící k vytváření a udržování vysokého vakua v prostředí systémů, ke kterým jsou pumpy připojeny. Vývěvy tohoto typu musí fungovat společně s primární vývěvou viz obr. 1. Výhodou turbomolekulárních vývěv je čistota vytvářeného vakua, protože pracovní prostor vývěvy neobsahuje žádné mazivo, tudíž nemůže dojít ke kontaminaci pracovního prostoru zpětným prouděním. Vývěvy tohoto typu dosahují své maximální čerpací rychlosti (až 7000 l/s [27]) rychleji ve srovnání s ostatními typy vývěv pro vytváření vysokého vakua, mezi které patří např. <sup>1</sup>kryogenní vývěvy. [24]

- 1 Primární vývěvy  
(rotační lamelová vývěva E2M1.5)
- 2 Turbomolekulární vývěva  
(nEXT 300)
- 3 Řídící jednotka



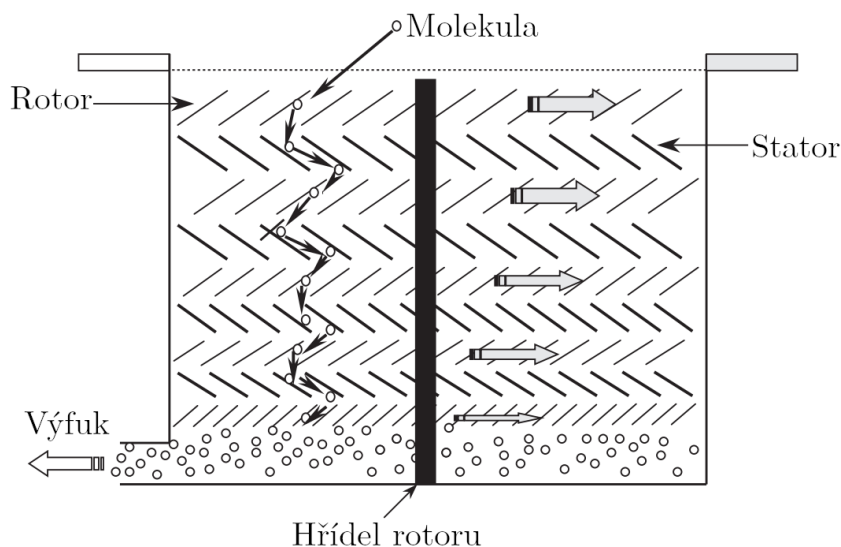
Obrázek 1: T-Station nEXT 300T. [14] - upraveno

## 1.1 Jednostupňové turbomolekulární vývěvy

Vývěvy tohoto typu stlačují plyny přenosem kinetické energie rychle rotujících lopatek rotoru na molekuly pracovního plynu, tento proces se odehrává v oblasti molekulárního toku plynu. Pro dosažení molekulárního toku je turbomolekulární vývěva připojena k primární vakuové pumpě. Impuls síly od rotoru se přenáší na molekuly plynu pomocí superpozice <sup>2</sup>střední kvadratické rychlosti molekuly a rychlosti povrchu rotoru. Ke zvýšení kinetické energie molekul je pumpa vybavena několika stupni lopatkových disků (obvykle v počtu 7-20), každý disk se skládá z natočených lopatek (obvykle v počtu 20-60), které spolu s lopatkami statoru zajišťují tuto funkci [27]. Každá molekula plynu, která projde pumpou, přijde do styku se všemi stupni lopatkových disků rotoru a statoru. Molekula se postupně odráží od lopatek statoru, zpět na lopatky rotoru, které ji dále posunou na další stupeň [23], tento proces je zobrazen na obr. 2. Lopatky rotoru se točí rychlostí, která je výrazně vyšší než střední kvadratická rychlost molekul plynu, tím se zvyšuje pravděpodobnost, že se molekuly budou pohybovat z místa s nízkým tlakem (sání) do místa s vysokým tlakem [25].

<sup>1</sup>Kryogenní vývěva - jedná se o vývěvu, která funguje na principu absorpce a kondenzace plynu na povrchu s velmi nízkou teplotou.

<sup>2</sup>Střední kvadratická rychlost molekuly - je to veličina popisující rychlost souboru molekul v závislosti na teplotě, liší se pro různé plyny.



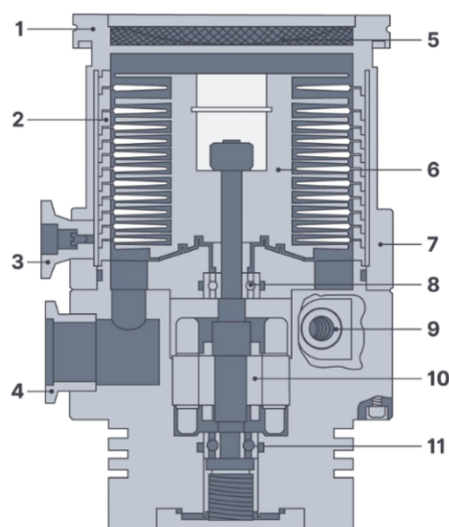
Obrázek 2: Schéma pohybu molekul. [16] - upraveno

### 1.1.1 Části jednostupňové turbomolekulární vývěvy

Pro popsání jednotlivých částí, ze kterých se turbomolekulární vývěvy skládají, byla zvolena axiální vývěva TURBOVAC 151 (viz obr. 3) od německého výrobce Leybold GmbH, který je součástí vakuové divize skupiny Atlas Copco group.

Čerpaný plyn proudí do pracovní části vývěvy sací přírubou ISO-100. Turbomolekulární část se skládá z rotoru (6) a statoru (2). Rotor se skládá z hřídele a nalisovaných lopatek, stator se skládá ze statorových lopatek, které jsou osazeny v obálce. Každá dvojice lopatek rotoru a statoru tvoří jeden stupeň. Turbomolekulární část vývěvy tvoří 11 stupňů lopatek osazených v sérii. Každý stupeň má unikátní geometrii, parametry lopatek se dimenzují pro každý stupeň. Rotor osazený lopatkami je uložený na hřídeli, která je poháněna elektromotorem (10), hřídel rotoru je uložena ve skříni pomocí dvojice keramických kuličkových ložisek (8, 11).

- 1 Příruba sání ISO-100
- 2 Stator
- 3 Mezistupňový vstup
- 4 Příruba primární pumpy
- 5 Ochranný kryt
- 6 Rotor
- 7 Envelopa (obálka)
- 8 Keramické kuličkové ložisko
- 9 Chlazení
- 10 Elektromotor
- 11 Keramické kuličkové ložisko



Obrázek 3: Schéma vývěvy Leybold TURBOVAC 151. [4]

## 1.2 Vícetupňové turbomolekulární vývěvy

Rotory turbomolekulárních pump se obvykle skládají z více částí, hlavní prvek je nosná hřídel, na kterou jsou osazeny jednotlivé čerpací stupně. Základní část všech mechanických turbomolekulárních vývěv je turbomolekulární stupeň (princip funkce je detailně popsán v kapitole 1.1). Druhý stupeň je obvykle odporový, Holweckův nebo Siegbahnův. Třetí stupeň bývá regenerativní. Nejčastěji se využívá dvoustupňová varianta, která se skládá z turbomolekulárního a odporového stupně (Holweckův nebo Siegbahnův).

Vyvažování rotorů se obvykle provádí dynamicky, za použití minimálně dvou vyvažovacích rovin. Cílem dynamického vyvažování je docílit, aby osa rotace byla totožná s hlavní osou setrvačnosti. Vyvažování minimalizuje vibrace a hluk, maximalizuje životnost ložisek. [20]

### 1.2.1 Odporové turbomolekulární stupně

Odporové stupně pracují při nízkých tlacích a fungují na podobném principu jako turbomolekulární stupně. Při nízkých tlacích se molekulám čerpaného plynu při nárazu na rychle rotující povrchy udělí složka rychlosti. Molekuly potom mají tendenci se pohybovat ve stejném směru jako povrch do kterého narazily (změní se směr pohybu molekuly). Tento proces způsobuje postupné stlačování plynu, který prochází přes všechny stupně odporové části. [21] V současnosti se nejvíce využívá Holweckův (viz obr. 4) a Siegbahnův stupeň (viz obr.5).

#### Holweckův stupeň

Holweckův stupeň se skládá ze satoru a rotoru. Sator je tvořen několika stupni šroubovitých drážek, rotor je karbonový ve tvaru válcové tenkostěnné trubky.

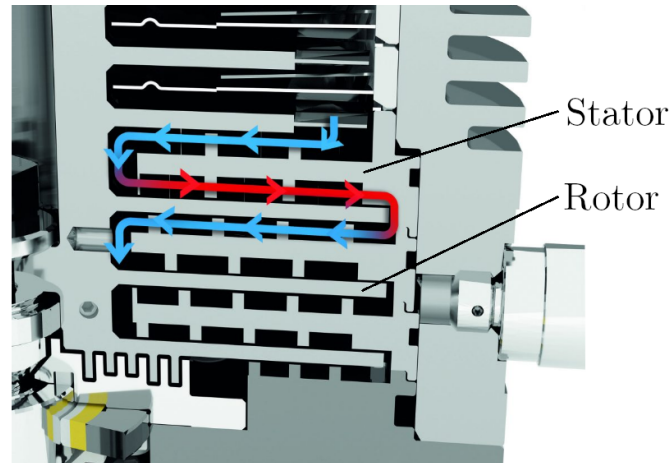
Rotor turbomolekulárního stupně



Obrázek 4: Holweckův stupeň. [30] - upraveno

## Siegbahnův stupeň

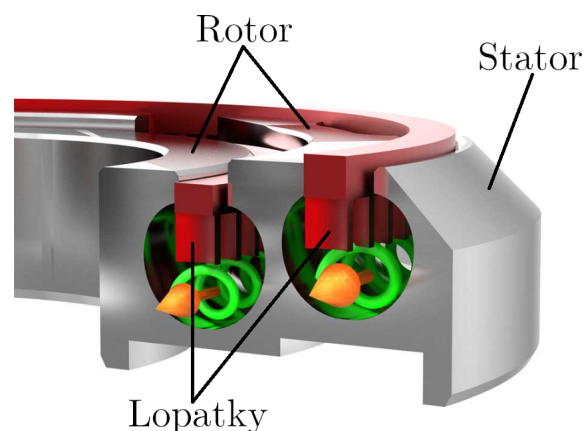
Siegbahnův stupeň se skládá ze statoru a rotoru. Rotor je tvořen diskem a stator diskem se spirálovitými drážkami. Na obr. 5 je zobrazen směr pohybu plynu procházející tímto stupněm.



Obrázek 5: Siegbahnův stupeň. [6] - upraveno

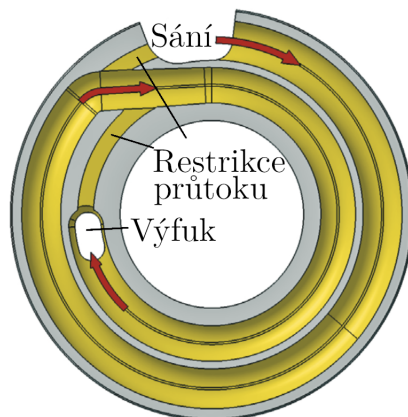
### 1.2.2 Regenerativní stupeň

Mechanismus regenerativního stupně funguje na principu předávání kinetické energie lopatek molekulám plynu, což způsobuje nárůst tlaku. Název „regenerativní“ je odvozen od způsobu pohybu plynu v drážkách statoru, plyn každou drážkou prochází opakovaně. Regenerativní stupeň se skládá z rotoru v podobě disku s lopatkami a statoru, který je tvořen drážkou výrazně větší, než jsou samotné lopatky. Rychle pohybující se lopatky (obvykle v rozmezí 100 až 250 m/s) vytváří v drážce spirálovité proudění (viz obr. 6), díky kterému molekuly plynu opakovaně naráží do lopatek, které je pohánějí vpřed. Lopatky jsou tvarovány tak, aby zachytily dopadající molekuly co nejplynuleji a vychýlily je směrem dopředu do kanálu. [30]



Obrázek 6: Řez regenerativním stupněm. [12] - upraveno

Plyn vstupuje do drážky sání a pohybuje se ní dokud není odkloněn do výfuku. Stator je vybaven restričními kanály, které jsou navrženy tak aby upravovali kompresní poměr. Restriční kanály vrací plyn zpět do oběhu, buď do sání nebo před výfuk, tento proces je zobrazen na obr. 7. [30]



Obrázek 7: Schéma regenerativního stupně. [30] - upraveno

### 1.3 Uložení rotoru

Uložení rotoru v těle pumpy se provádí pomocí ložisek, nejčastěji se využívají následující typy.

#### Výhody a nevýhody

##### Ocelová kuličková ložiska mazaná olejem

- |              |                                |
|--------------|--------------------------------|
| + Nízká cena | - Vysoká údržbovost            |
|              | - Pouze pro vertikální uložení |
|              | - Hlučnost                     |

##### Keramická kuličková ložiska

- |   |  |
|---|--|
| + Vhodné pro mobilní systémy                                  | - Cena (oproti ocelovým kuličkovým ložiskům) |
| + Uložení v libovolné orientaci                               | - Citlivost na změny teplot                  |
| + Mazané na životnost ložiska (při použití plastických maziv) |  |

##### Pasivní magnetická ložiska

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| + Bez opotřebení                | - Cena   |
| + Bez údržby                    | - Citlivost na vnější magnetická pole              |
| + Nízká hlučnost a vibrace      | - Magnetická pole mohou ovlivňovat okolní součásti |
| + Uložení v libovolné orientaci |  |

V dnešní době se nejvíce používají keramická a magnetická ložiska. Ocelová kuličková ložiska se v turbomolekulárních pumpách používají jenom jako pojistný prvek magnetických ložisek (v záběru jsou pouze při vychýlení rotoru), protože jsou náchylná na únavová poškození, kterým by se muselo předcházet častými servisními intervaly. [4]

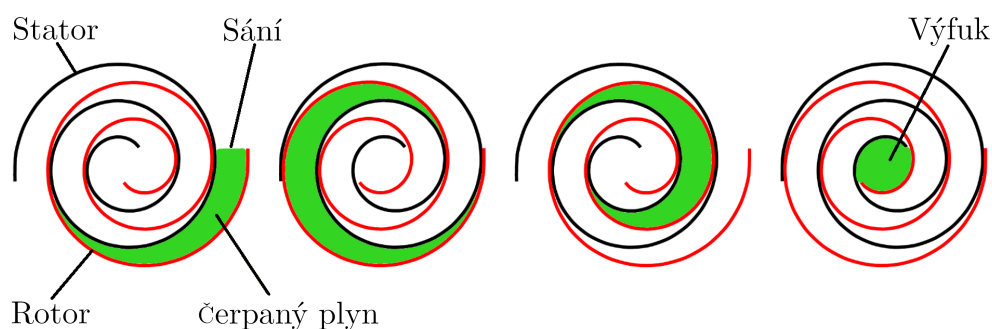


## 1.4 Primární vývěvy

Primární vývěva slouží k dosažení molekulárního toku, při kterém turbomolekulární vývěvy pracují. Proces, než se dosáhne molekulárního toku obvykle trvá přibližně 1 minutu, v závislosti na pracovním plynu a konkrétní vakuové pumpě. Nejčastěji se využívají suchoběžné spirálové, rotační lamelové a suchoběžné membránové vývěvy, které jsou dále podrobněji popsány. [27]

### Suchoběžné spirálové vývěvy

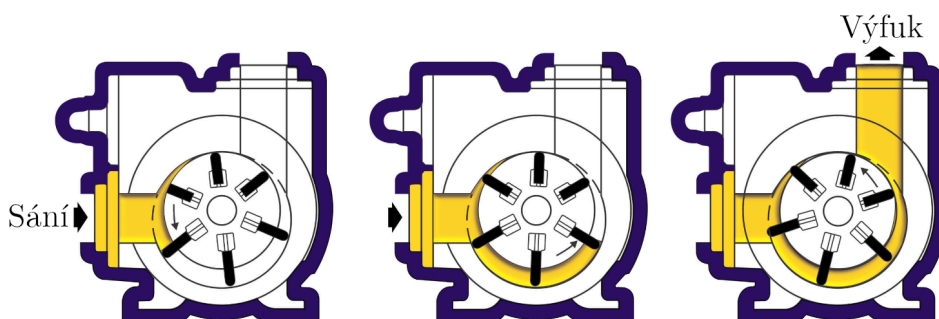
Suchoběžná spirálová vývěva („*dry scroll pump*“) může pracovat od atmosférického tlaku, proto se může využívat samostatně nebo jako primární vývěva pro jiné druhy vývěv. Tato vývěva nepoužívá žádnou pracovní kapalinu, tudíž nemůže dojít ke kontaminaci čerpaného prostoru zpětným prouděním. Pracovní část vývěvy je tvořena rotorem a statorem ve tvaru spirály (viz obr. 8), rotor koná excentrický pohyb, komprese plynu probíhá od kraje (sání) do středu (výfuk). [32].



Obrázek 8: Schéma suchoběžné spirálové vývěvy. [32] - upraveno

### Rotační lamelové vývěvy

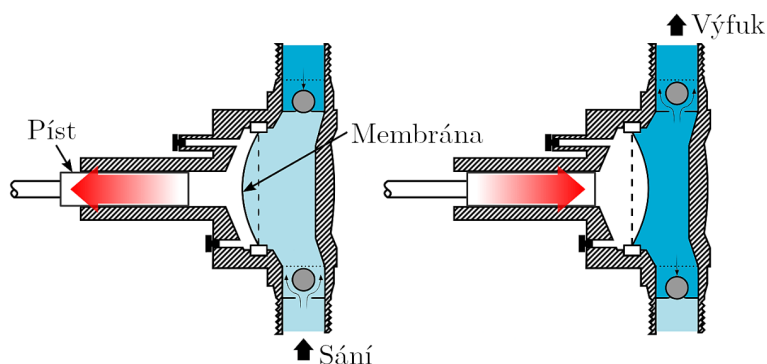
Rotační lamelová vývěva („*rotary vane pump*“) může pracovat od atmosférického tlaku, proto se může využívat samostatně nebo jako primární vývěva pro jiné druhy vývěv. Tato vývěva má lamely mazané olejem, tudíž může dojít ke kontaminaci čerpaného prostoru zpětným prouděním. Pracovní prostor je tvořen excentricky uloženým rotorem a lamelami ve válcovém statoru. Komprese plynu je zobrazena na obr. 9. [32]



Obrázek 9: Schéma rotační lamelové vývěvy. [15] - upraveno

### Suchoběžné membránové vývěvy

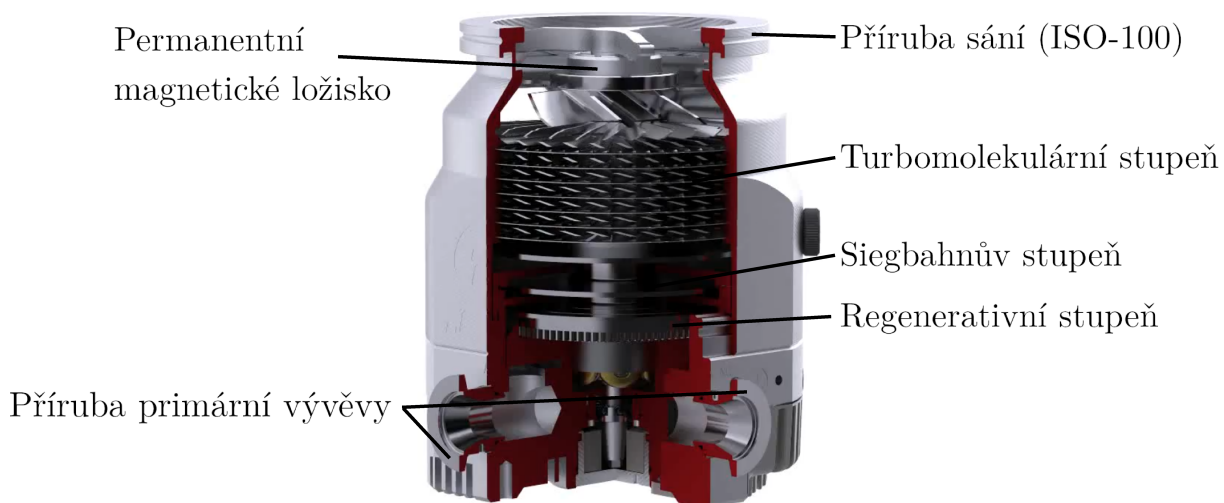
Suchoběžná membránová vývěva („*dry diaphragm pump*“) pracuje na principu podtlaku, který je vytvářen pístem a membránou. Plyn je nasáván sacím ventilem a je vypouštěn výpustním ventilem. Membrána je poháněna pneumatickým pístem, který mění její tvar. Tato vývěva nepracuje s žádnou kapalinou, nemůže dojít ke kontaminaci vlivem zpětného proudění. Vývěvy tohoto typu jsou schopné pracovat od atmosférického tlaku, jsou vhodné pro čerpání nebezpečných plynů nebo kapalin. Na obr. 10 je zobrazen pracovní cyklus jednostupňové membránové vývěvy. [32]



Obrázek 10: Schéma suchoběžné membránové vývěvy. [10] - upraveno

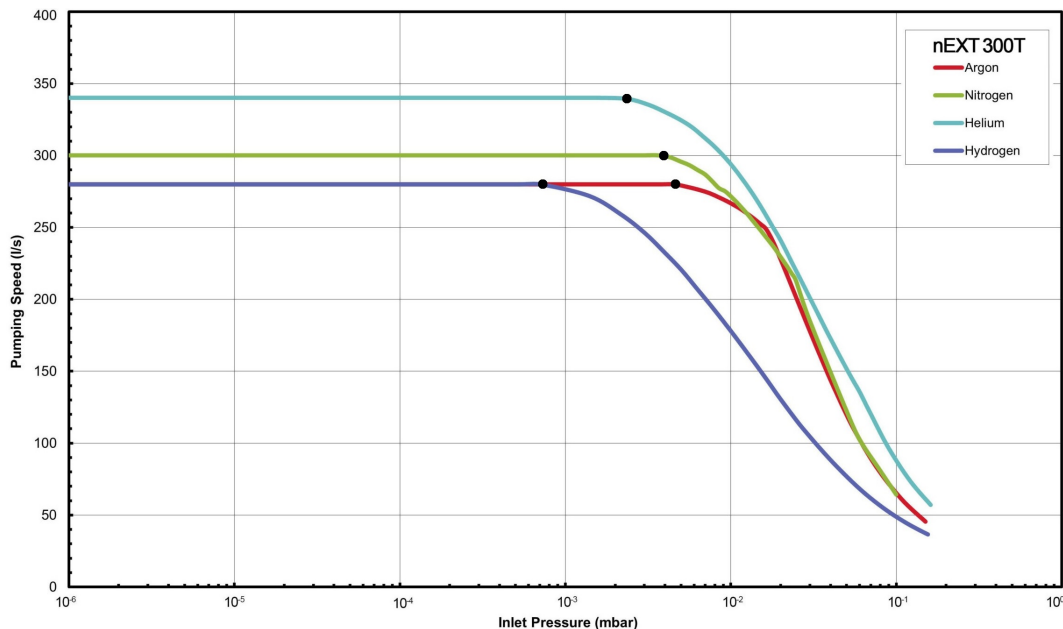
### 1.5 Vývěva Edwards nEXT 300T

Tato práce se zabývá konkrétně turbomolekulární vývěvou nEXT 300T od firmy Edwards. Jedná se o vícestupňovou vývěvu s axiálním průtokem, která dosahuje provozních otáček až 60000 ot/min a maximální rychlosti čerpání 340 l/s při práci s heliem. Vývěva je vybavena třemi pracovními stupni, první stupeň je turbomolekulární, druhý je Siegbahnův a třetí je regenerativní. Funkce jednotlivých stupňů jsou popsány v kapitole 1.2. Jako primární vývěva se nejčastěji využívá suchoběžná rotační spirálová Edwards mXDS3s, rotační lamelová Edwards E2M1.5, nebo suchoběžná membránová Edwards XDD1. [12]



Obrázek 11: Řez vývěvou nEXT 300T. [12] - upraveno

Na Obr. 12 jsou zobrazeny čerpací rychlosti vývěvy pro různé plyny. Lze zde pozorovat jev při kterém primární vývěva dosahuje molekulárního toku (černé body v grafu). Vývěva pracující s lehkými plyny dosahuje menších čerpacích rychlostí, protože rychlost lopatek je vůči střední kvadratické rychlosti molekul plynu nižší.



Obrázek 12: Čerpací rychlosti vývěvy nEXT 300T. [8]

### Společnost Edwards s.r.o.

Edwards s.r.o. je původně britská společnost, kterou v roce 1919 založil fyzik F. D. Edwards. V roce 1939 firma začala s vlastním vývojem a výrobou vakuových systémů. Od roku 1953 začala firma expandovat do světa, v současnosti má pobočky v Číně, Japonsku, Koreji, USA, Izraeli a od roku 2011 v České republice. Aktuálně společnost patří do vakuové divize švédské skupiny Atlas Copco group, firmy ve vakuové divizi zaměstnávají více než 45 000 zaměstnanců. [5]

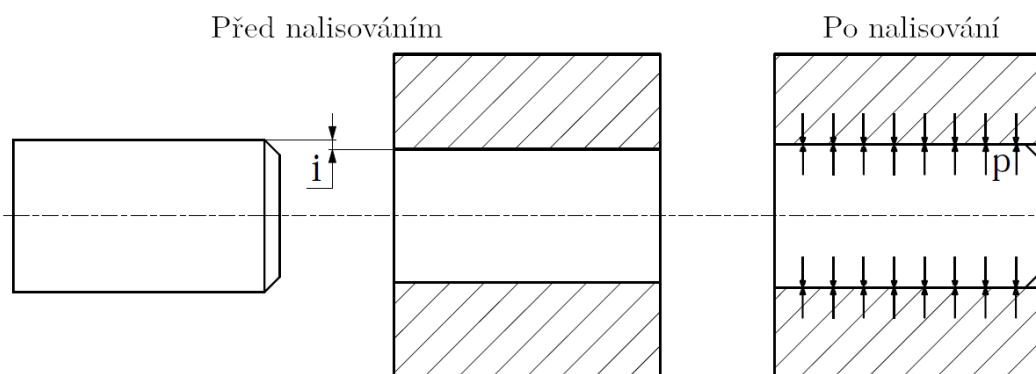
Společnost vyrábí vakuové pumpy různých konstrukcí, mezi které patří turbomolekulární vývěvy, olejové vývěvy, suché šnekové pumpy, mechanické Rootsovy pumpy a další. Firma se zabývá i realizací celých systémů, ve kterých se používají buď jednotlivé pumpy, nebo jejich kombinace. Produkty od firmy Edwards nacházejí uplatnění v metalurgii, vědeckých aplikacích, elektrotechnickém průmyslu, farmaceutickém průmyslu a dalších odvětví vyžadující vakuové pumpy. [13]

## 2 LISOVANÉ SPOJE

Jelikož se tato práce zabývá lisovanými spoji v turbomolekulární vývěvě nEXT 300T, tak je v této kapitole jejich problematika popsána.

Lisované spoje se řadí do kategorie nerozebíratelných, nebo obtížně rozebíratelných spojů hřídele s nábojem. Spojení je pevné, nepohyblivé a předepjaté. Předpětí ve spoji vzniká pružnou, případně plastickou deformací spojovaných součástí, která vzniká nalisováním. Jejich podstatou funkce je tření, které vzniká kontaktním tlakem mezi spojovanými součástmi. [18] [9]

Charakteristický znak lisovaných spojů je přesah  $i$ , který je daný rozdílem poloměrů (přesah na poloměru) spojovaných součástí před kompletací. Velikost přesahu má vliv na velikost kontaktního tlaku ( $p$ ) ve spoji, tudíž i maximální možné zatížení spoje. Kontaktní tlak ( $p$ ) a přesah ( $i$ ) je zobrazen na obr. 13.



Obrázek 13: Schéma lisovaného spoje.

Únosnost spojení ovlivňují i další faktory, mezi které patří např. součinitel tření mezi spojovanými součástmi. Velikost součinitele tření závisí na materiálu spojovaných částí, drsnosti a čistotě povrchů a na způsobu lisování. V tab. 1 jsou vyobrazeny doporučené hodnoty drsnosti  $R_a$  náboje a hřídele v závislosti na průměru kontaktní plochy.

Průměr hřídele [mm]	Hodnota drsnosti kontaktních ploch $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	
	Hřídel	Náboj
do 10	0,2	0,4
10 - 50	0,4	0,8
50 - 120	0,8	1,6
120 - 250	1,6	1,6
250 - 500	1,6	3,2
500 - 1000	3,2	6,3
1000 - 2500	6,3	12,5
přes 2500	12,5	25

Tabulka 1. Doporučené drsnosti spojovaných součástí. [9]

Velikost součinitele tření lze zvýšit odmaštěním stykových ploch. U spojů s požadavkem na vysokou únosnost se součinitel tření styčných ploch může zvýšit jejich galvanickým pokovením (orientační součinitele tření viz tab. 2).

Typ povlaku	Lisování podélné [ - ]	Lisování příčné [ - ]
Měkké povlaky (Cd, Cu, Zn)	0.45 - 0.55	0.65 - 0.80
Tvrdé povlaky (Cr, Ni)	0.70 - 0.85	0.65 - 0.80

Tabulka 2. Orientační hodnoty součinitele tření pro pokovené stykové plochy. [9]

## Využití

Lisované spoje se využívají pro spojení součástí, u kterých dochází k přenosu velkých kroutících momentů a axiálních sil při střídavém nebo rázovém zatížení. Ve strojírenství se lisované spoje využívají pro upevnění ložisek, ozubených kol, řemenic, setrvačnicků, lopatek rotorů, tenkostěnných součástí a další aplikacích, u kterých je výhodné tuto metodu spojování využít.

## Výhody a nevýhody lisovaných spojů

- |   |   |
|---|---|
| + Přenos velkých kroutících momentů a axiálních sil | - Spojování součástí pouze s kruhovým průřezem                              |
| + Jednoduchá a levná výroba                         | - Obtížná montáž  |
| + Nedochozí k zeslabení součásti drážkou            | - Vysoké nároky na přesnost spojovaných součástí                            |
| + Dobrá souosost součástí                           | - U větších přesahů může dojít k nebezpečné deformaci, nebo iniciace trhlin |
| + Možnost spojení tenkostěnných součástí            | - Obtížné (někdy nemožné) rozebírání spojů                                  |
| + Spoj je axiálně zajištěný                         |   |
| + Vhodné pro rozměrné součásti                      |   |

## 2.1 Lisované spoje beze změny teploty (lisování podélné)

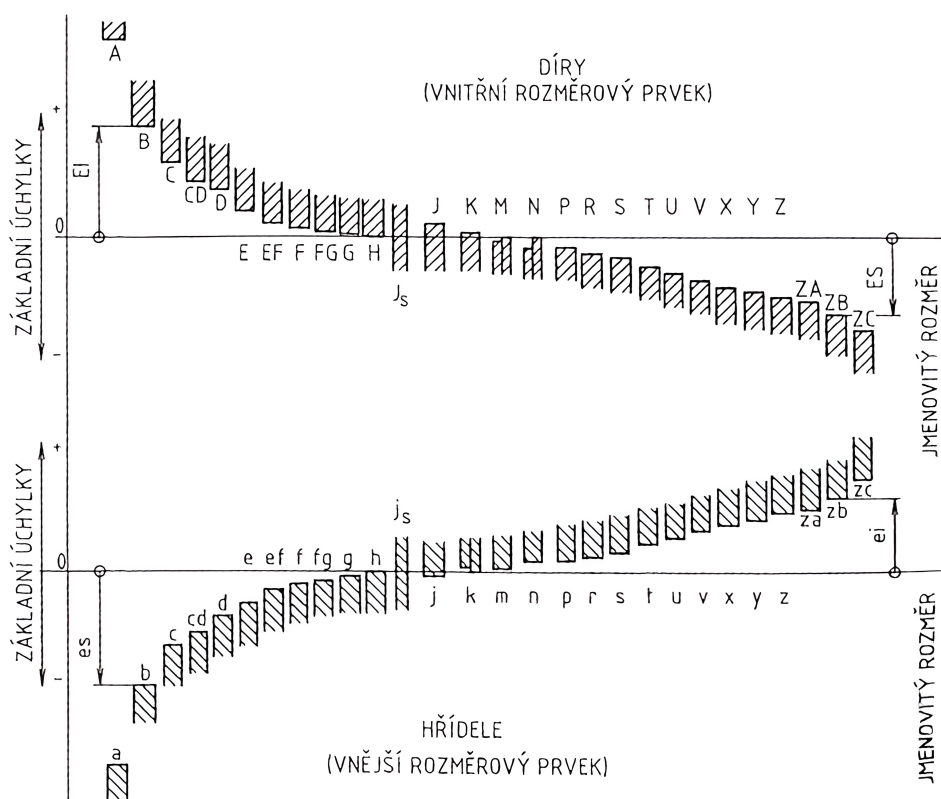
Montáž se u malých součástí provádí i bez změny teplot, většinou se za studena lisují součásti do průměru 50 mm, které nejsou určené k přenosu velkých osových sil a kroutících momentů. Spojované součásti se do sebe za pomoci lisů násilně zalisují. U tohoto druhu spojení dochází k částečné ztrátě přesahu, kvůli deformaci součástí, u návrhu je potřeba s touto ztrátou počítat (kontaktní tlak ve spoji se sníží přibližně o 35 % oproti vypočítané hodnotě). Pro snadné nalisování je vhodné aplikovat mazivo na stykové plochy, používají se plastická maziva s aditivy, které se liší pro různé materiály spojovaných součástí, mazání styčných ploch snižuje sílu potřebnou k nalisování a výslednou únosnost spojení. U spojovaných součástí se provádí zkosení hran, alespoň na jedné ze součástí, na náboji se zpravidla vyrábí náběh o délce 2-5 mm s kuželovým osazením, úhel osazení do 5°. [9]

## 2.2 Lisované spoje se změnou teploty (lisování příčné)

Častěji využívanou variantou lisovaných spojů jsou spojení, u kterých se využívá tepelné roztažnosti spojovaných součástí, která se liší pro různé materiály (viz tab. 3). Využívá se dilatace (ohřev) náboje, při kterém dojde k zvětšení průměru náboje a restrikce (ochlazení) hřídele, při kterém se průměr hřídele zmenší. Využívají se kombinace ochlazování a ohřevu, pro aplikace s menšími přesahy se využívá buď ohřev náboje nebo ochlazení hřídele, pro velké přesahy se provádí ochlazení hřídele a ohřátí náboje. U ohřevu je potřeba uvažovat materiálové vlastnosti, aby vlivem vysoké teploty nedošlo ke změnám vlastností materiálu. Proces lisování se provádí když mezi díly není přesah, ten se utvoří až po vyrovnání teplot. Ohřev se nejčastěji provádí pomocí elektrické pece nebo olejové lázně, ochlazení pomocí průmyslových mrazáků a zkapalněných plynů (např. dusík a oxid uhličitý). Spoje tohoto typu dosahují větších kontaktních tlaků, tudíž mají i větší únosnost. [9]

## 2.3 Tolerance rozměrů

Při návrhu lisovaných spojů se využívají z pravidla normalizované toleranční pole průměrů hřídele a náboje, protože spojované součásti nejsou nikdy vyrobené úplně přesně, je potřeba předepsat polohu tolerančního pole vzhledem k jmenovitému rozměru hřídele a náboje. Na obr. 14 jsou vyznačené typy tolerančních polí dle ČSN EN ISO 286-1.



Obrázek 14: Polohy tolerančních polí vzhledem k jmenovitému rozměru. [33] - upraveno

## 2.4 Analytické vztahy

Vztahy v této kapitole jsou odvozeny z teorie tlustostěnných válcových těles zatížených tlakem (pro případ spojení s přesahem se jedná o kontaktní tlak). [34] [31] [36]

### Předpoklad tlustostěnných válcových těles

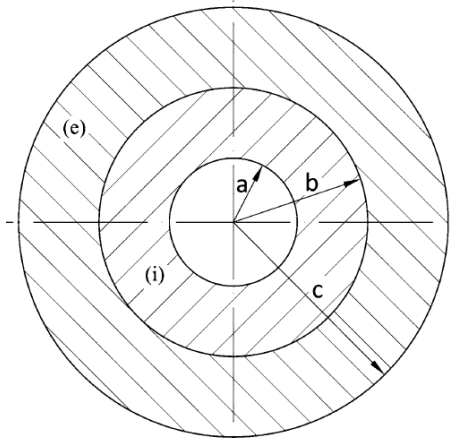
Za tlustostěnná válcová tělesa se považují ta, která splňují alespoň jedno z následujících tří kritérií:

$$\frac{s}{d_i} > \frac{1}{20}; \quad \delta = \frac{d_e}{d_i} = \frac{r_e}{r_i} > 1,1; \quad \beta = \frac{d_i}{d_e} = \frac{r_i}{r_e} = \frac{1}{\delta} < 0,91 \quad (1)$$

Kde  $s = (d_e - d_i)/2 = r_e - r_i$  je tloušťka stěny válcového tělesa,  $d$  je průměr a  $r$  poloměr. Indexy  $i$  a  $e$  značí vnitřní („*internal*“) a vnější („*external*“) parametry těles.

Další předpoklady jsou, že spojovaná tělesa mají stejnou délku a kontaktní tlak je na ploše styku spojovaných těles rovnoměrně rozložen a že obě tělesa jsou namáhána v oblasti pružné deformace. [34]

Na obr. 15 je schéma spojených válcových těles, na kterém jsou zobrazené rozměry použité v následujících vztazích.



Obrázek 15: Výpočetní schéma lisovaného spoje. [34]

### Kontaktní tlak

Kontaktní tlak  $p$  [MPa] vzniká po nalisování na poloměru  $b$  (uvažuje se jmenovitý rozměr), důsledkem kontaktního tlaku je radiální napětí  $\sigma_r = -p$  na kontaktní ploše náboje a hřídele. U spojení hřídele bez otvoru a náboje lze použít stejné rovnice jako pro spojení dvou válcových součástí, v tomto případě bude poloměr  $a = 0$ .

$i$  [mm] - Přesah na poloměru součástí. ( $2i$  - přesah na průměru)

$E_i, E_e$  [MPa] - Modul pružnosti v tahu (tlaku).

$\mu_i, \mu_e$  [-] - Poissonovo číslo.

Indexy  $i$  a  $e$  označují vnitřní („*internal*“) a vnější („*external*“) součásti viz obr. 15.

$$p = \frac{i}{b \left[ \frac{1}{E_e} \left( \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \mu_e \right) + \frac{1}{E_i} \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu_i \right) \right]} = \frac{i}{bk}, \quad (2)$$

kde je parametr  $k$  dán následujícím vztahem:

$$k = \frac{1}{E_e} \left( \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \mu_e \right) + \frac{1}{E_i} \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu_i \right) \quad (3)$$

Tento parametr popisuje geometrii a materiálové vlastnosti válcových těles spojených nalisováním.

V případě, že jsou spojované součásti ze stejných materiálů, lze rovnici (2) zjednodušit, v tomto případě platí, že  $E_e = E_i = E$  a  $\mu_e = \mu_i = \mu$

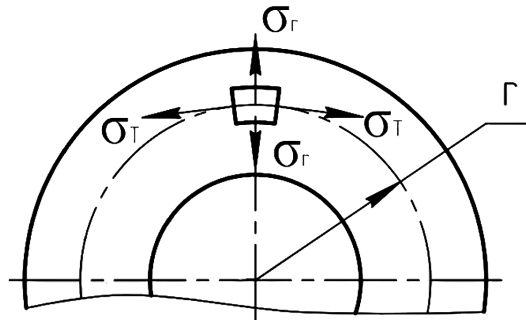
$$p = \frac{iE(c^2 - b^2)(b^2 - a^2)}{2b^3(c^2 - a^2)} \quad (4)$$

### Radiální a tečné napětí

V lisovaném spoji po kompletaci vzniká dvouosá rovinná napjatost ( $\sigma_z = 0$ ) definovaná radiální a tečnou složkou napětí. Velikost napětí stoupá s rostoucím kontaktním tlakem, který je způsobený přesahem.

$r$  [mm] - Poloměr, na kterém se vyhodnocuje napětí

Na obr. 16 jsou na elementárním prvku vyobrazeny směry radiálního a tečného napětí.



Obrázek 16: Směry radiálního a tečného napětí. [2] - upraveno

Pro vnitřní válcové těleso s otvorem, na které působí vnější tlak (kontaktní tlak), jsou vztahy pro radiální ( $\sigma_r$ ) a tečné ( $\sigma_t$ ) napětí následující:

$$\sigma_{r,i} = -\frac{pb^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{t,i} = -\frac{pb^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

Pro vnitřní válcové těleso s plným průřezem (poloměr  $a=0$ ) budou hodnoty radiálního a tečného napětí konstantní po celém poloměru, hodnoty odpovídají velikosti kontaktního tlaku:

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{t,i} = -p = konst. \quad (7)$$

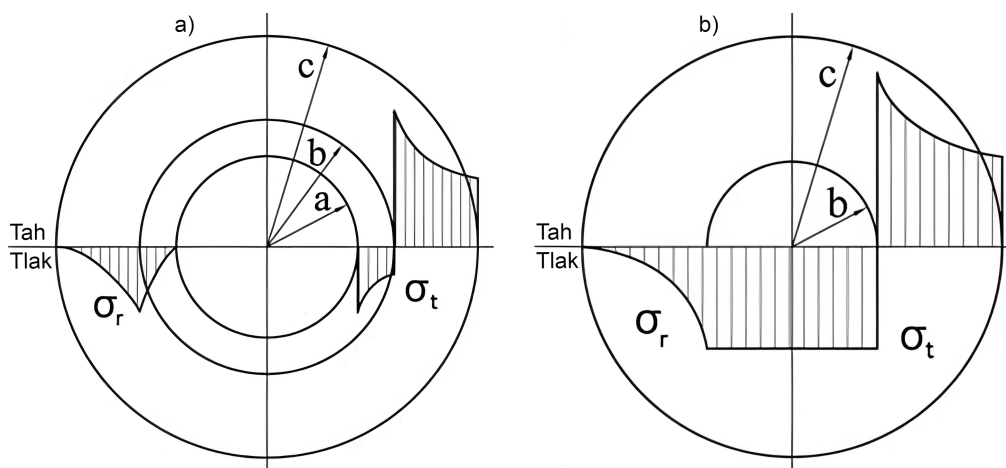


Pro vnější válcové těleso, které je zatíženo vnitřním tlakem (kontaktní tlak), budou vztahy pro radiální a tečné napětí následující:

$$\sigma_{r,e} = -\frac{pb^2}{c^2 - b^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2}\right) \quad (8)$$

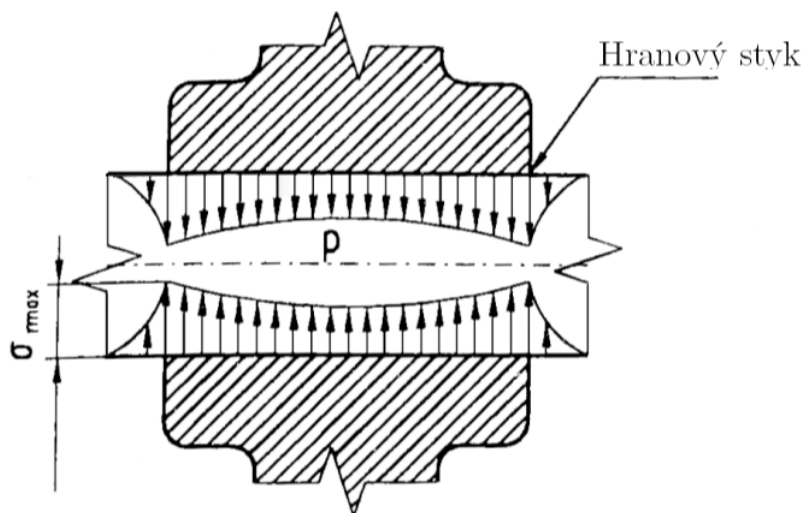
$$\sigma_{t,e} = -\frac{pb^2}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2}\right) \quad (9)$$

Na obr.17 jsou zobrazeny průběhy radiálních a tečných napětí lisovaných součástí.



Obrázek 17: Průběhy  $\sigma_r$  a  $\sigma_t$  lisovaných spojů: a) spojení dvou válců s otvorem, b) spojení válce s otvorem a válce s plným průřezem. [34] - upraveno

U reálného spojení není radiální napětí  $\sigma_r$  po délce spoje konstantní, vzniká tzv. hranový styk, jedná se o lokální zvýšení  $\sigma_r$  u hrany náboje způsobené tuhostí hřídele. Průběh radiálního napětí  $\sigma_r$  po délce spoje je zobrazen na obr. 18.



Obrázek 18: Hranový styk. [22] - upraveno

### Pevnostní kontrola součástí

Z obr. 17 vyplývá, že k největší napjatosti dochází právě na kontaktním povrchu těles (poloměr  $b$ ). Pevnostní kontrola se provádí srovnáním redukovaného napětí  $\sigma_{red}$  s dovoleným napětím  $\sigma_D$  (mez kluzu). Redukované napětí je fiktivní jednoosé napětí, které lze pro houževnaté materiály určit na základě Misesovy hypotézy měrné energie (HMH), nebo podle Trescovy podmínky plasticity ( $max\tau$ ). [17] [19]

$\sigma_{1,2,3}[MPa]$  - složky hlavních napětí, resp. hodnoty  $\sigma_{t,z,r}$  seřazené podle velikosti.

Redukované napětí HMH lze určit ze vztahu:

$$\sigma_D \geq \sigma_{Red}^{HMH} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}, \quad (10)$$

po dosazení:

$$\sigma_D \geq \sigma_{Red}^{HMH} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_r \sigma_t}, \quad (11)$$

nebo redukované napětí  $max\tau$  ze vztahu:

$$\sigma_D \geq \sigma_{Red}^{max\tau} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (12)$$

po dosazení:

$$\sigma_D \geq \sigma_{Red}^{max\tau} = \sigma_t - \sigma_r, \quad (13)$$

### Únosnost lisovaného spoje

Lisované spoje jsou nejčastěji zatíženy silou v osové směru axiální silou, nebo kroutícím momentem, nebo jejich kombinací.

$f [-]$  - Součinitel tření

$l [mm]$  - Délka spoje

$S [mm^2]$  - Kontaktní plocha

$F_T [N]$  - Třecí síla

$F_N [N]$  - Normálová síla od kontaktního tlaku

Maximální přípustná axiální síla  $F_a [N]$ , kterou je možné spoj zatížit, musí být menší než třecí síla, která vzniká normálovou silou od kontaktního tlaku:

$$F_a \leq F_T = F_N f = p S f = 2\pi b l p f \quad (14)$$

Maximální kroutící moment  $M_K [Nmm]$ , který dokáže spoj přenést musí být menší než třecí moment, který vzniká normálovou silou od kontaktního tlaku:

$$M_K \leq M_T = F_T b = F_N f b = p S f b = 2\pi b^2 l p f \quad (15)$$

Zatížení axiální silou a kroutícím momentem se kontroluje vektorovým součtem složek zatížení:

$$\sqrt{F_a^2 + \left(\frac{M_K}{b}\right)^2} \leq \pi l p f \quad (16)$$

## Teplotní roztažnost

Pro určení maximálního přesahu  $i_{max}$ , který lze teoreticky volně zkompletovat lze využít vztah pro lineární teplotní roztažnost.

$\Delta b$  [mm] - Změna poloměru  $b$  (stykové plochy)

$\alpha$  [ $K^{-1}$ ] - Lineární teplotní roztažnost

$\Delta T$  [K] - Změna teploty

Za předpokladu, že dojde k vytvoření vůle ( $b \neq b_i \neq b_e$ ), bude vztah pro maximální přesah, který lze volně zkompletovat:

$$i_{max} = \Delta b_e - \Delta b_i, \quad (17)$$

kde platí:

$$\Delta b_{i,e} = b_{i,e} \alpha_{i,e} \Delta T_{i,e} \quad (18)$$

V tab. 3 jsou průměrné hodnoty teplotních roztažností často využívaných materiálů.

Materiál	Roztažnost $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]	Materiál	Roztažnost $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]
Ocel chromová	$11 \cdot 10^{-6}$	Hliník	$23,9 \cdot 10^{-6}$
Ocel niklová	$18 \cdot 10^{-6}$	Měď	$17 \cdot 10^{-6}$
Ocel uhlíková	$10,8 \cdot 10^{-6}$	Bronz	$17,5 \cdot 10^{-6}$
Nerezová ocel	$17,3 \cdot 10^{-6}$	Zinek	$29 \cdot 10^{-6}$
Litina	$10,6 \cdot 10^{-6}$	Nikl	$14,5 \cdot 10^{-6}$
Dural	$23 \cdot 10^{-6}$	Wolfram	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Cín	$26,7 \cdot 10^{-6}$	Chrom	$8,4 \cdot 10^{-6}$
Hořčík	$25,2 \cdot 10^{-6}$	Mosaz	$18,7 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 3. Orientační teplotní roztažnosti materiálů. [29] [18]

### 3 INŽENÝRSKÁ OPTIMALIZACE PROCESU LISOVÁNÍ ROTORU TURBOMOLEKULÁRNÍ VÝVĚVY

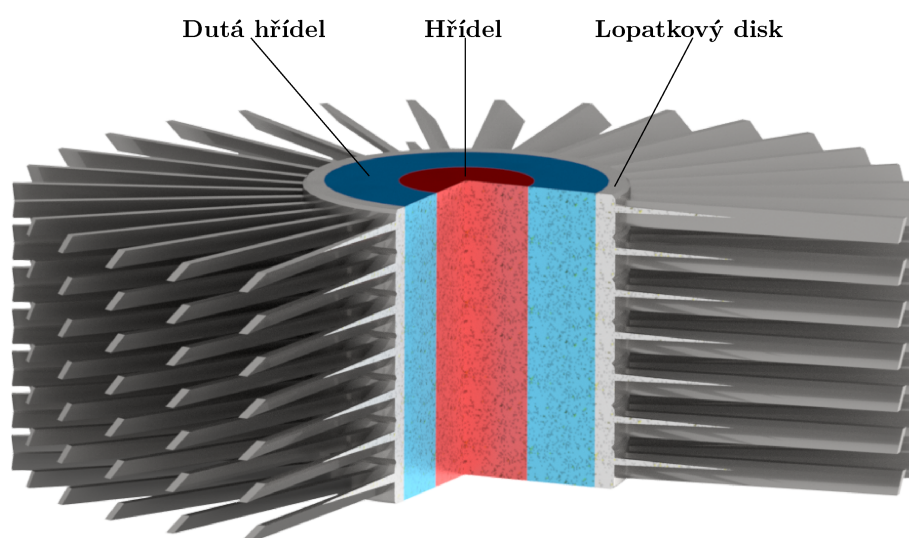
#### 3.1 Řešená problematika

Při kompletaci rotoru vývěvy Edwards nEXT 300T se využívají především lisované spoje. Spojované součásti by kvůli rozměrům nebylo možné efektivně zkompletovat jinou aktuálně dostupnou technologií. Vzhledem k charakteru zatížení se části rotoru lisují se změnou teplot.

Lisovací proces se skládá z několika částí. Jako první se kompletuje turbomolekulární stupeň a magnetická ložiska. Turbomolekulární stupeň se skládá z duté hřídele a sedmi lopatkových disků. Kompletace se provádí v následujícím pořadí: nahřáté lopatkové disky se nalisují na podchlazenou dutou hřídel, po vyrovnání teplot se tento celek ohřeje a nalisují se do něj podchlazené magnety magnetických ložisek a jejich pojistný kroužek, poté je celek nalisován na ochlazenou nosnou hřídel (dále jen hřídel). Po kompletaci turbomolekulárního stupně s magnety se na hřídel lisuje nahřátý Siegbahnův a regenerativní stupeň (jedná se o celek, oba stupně tvoří jednu součást).

Tato práce se zabývá lisovacími procesy u kompletace turbomolekulárního stupně, který bude dále nazýván pouze jako rotor. Aktuálně se k ochlazení součástí používá tekutý dusík, který je nákladný a je snaha ho z procesu vyřadit. Cílem této práce je navržení funkčních přesahů a lisovacích teplot, aby bylo možné rotor zkompletovat bez použití dusíku, aby nedošlo ke ztrátě spoje pracovním zatížením.

Návrh funkčních přesahů mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí, a mezi hřídelí a dutou hřídelí bude proveden za pomoci výpočtového modelování, pro které bude uvažovaná pouze část rotoru viz obr. 19.



Obrázek 19: Model turbomolekulárního stupně.

## 3.2 Výpočtové modelování

Výpočtové modely byly vytvořeny v programu Ansys Mechanical 2024 R1, který pro řešení analýz využívá metodu konečných prvků. Pro řešení byla použita statická strukturní analýza. Pro snížení výpočetní náročnosti byla řešená problematika rozdělena do dvou samostatných analýz. V první analýze je rotor zatížen pouze pracovním zatížením, druhá analýza slouží ke stanovení maximálních přesahů, se kterými lze rotor zkompletovat.

Výpočtové modelování bylo provedeno na počítači s následujícími specifikacemi:

- Operační systém: Windows 11 Home 64bit ve verzi 23H2
- Procesor: AMD Ryzen 5 5600H
- Operační paměť: 64 GB

### 3.2.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále jen MKP), anglicky „*Finite Element Method*“ je výpočetní metoda, která se využívá k řešení úloh statiky a dynamiky pevných těles, lomové mechaniky, vedení tepla a další inženýrské aplikace. Používá se pro řešení komplikovaných a rozsáhlých problémů, které by bylo takřka nemožné vyřešit analyticky, např. kvůli složité geometrii. [26]

MKP je založena na variačním počtu, u kterého program hledá minimum celkové potenciální energie soustavy, která je definovaná jako rozdíl energie napjatosti tělesa a potenciální energie vnějšího zatížení. Pro výpočty se spojitá oblast rozdělí na malé, konečně velké oblasti (prvky), tento proces nazýváme diskretizace nebo síťování. Prvky jsou spojeny pomocí uzlů, což jsou body v rozích jednotlivých prvků, někdy i ve středu hran prvků (kvadratické prvky), ve kterých se určují posuvy a program následně dopočítá napětí a další neznámé veličiny. [18] Problém, který byl původně definovaný pomocí diferenciálních rovnic, se v jednotlivých uzlech popíše pomocí soustavy lineárních algebraických rovnic. [19]

Počet uzlů je klíčový pro dosažení přesných výsledků, proto je vhodné jejich hustotu lokálně zvětšovat v místech, které nejsou primárně zkoumány a v místech kde dochází ke koncentraci napětí. Počet uzlů má vliv na výpočetní náročnost. Program musí dopočítat více neznámých veličin, proto je vhodné jejich počet snížit v místech které nejsou primárně zkoumány. [35]

Zatížení se aplikuje na jednotlivé uzly. V případech, kde je zatížení aplikováno na celý objem prvku (např. tíhové zrychlení, teplotní zatížení, setrvačné síly), plochu, hranu je se zatížení distribuováno na přilehlé uzly.

### 3.3 Výpočtový model - pracovní zatížení

Výpočtový model popsáný v této kapitole slouží ke stanovení deformačně napětových stavů rotoru vývěvy nEXT 300T po kompletaci a při pracovním zatížení. Tvorba výpočtového modelu se skládá ze čtyř základních částí, mezi které patří model materiálů, model geometrie, diskretizace, model vazeb a zatížení.

#### 3.3.1 Modely materiálů

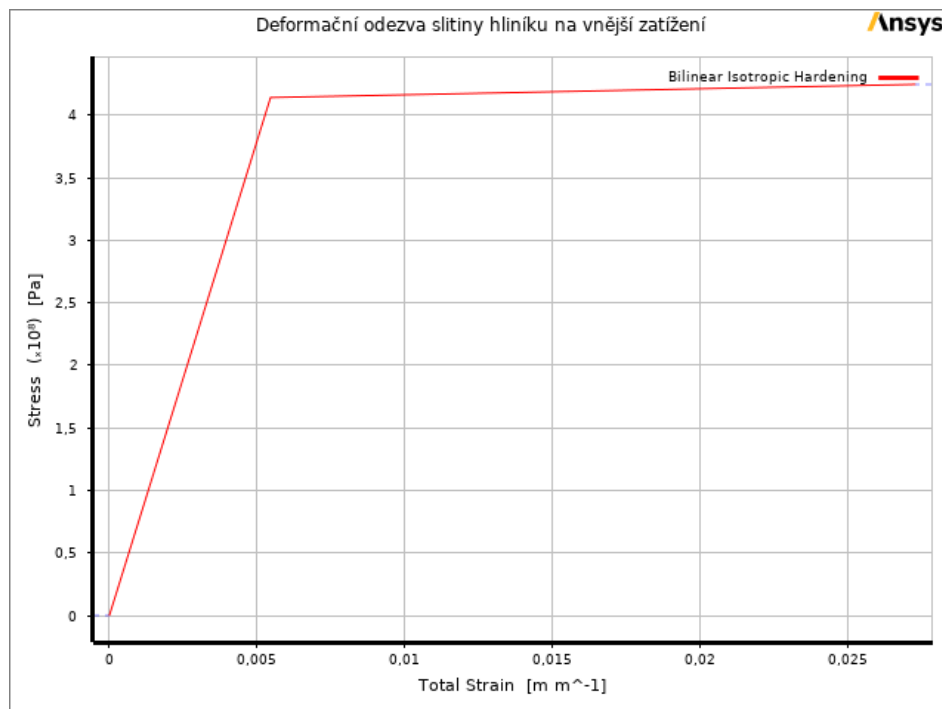
Pro výpočtový model byli vytvořeny dva <sup>1</sup>bilineární modely použitých materiálů. Pro lopatkové disky a dutou hřídel byla použita slitina hliníku, pro hřídel chromová ocel. Následující vlastnosti materiálů byli poskytnuty firmou Edwards.

##### Slitina hliníku

Jedná se o tepelně zpracovanou vysokopevnostní slitinu hliníku, která má následující vlastnosti:

- Hustota:  $2796 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Mez kluzu:  $375 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti:  $435 \text{ MPa}$
- Youngův modul:  $75,87 \text{ GPa}$
- Poissonovo číslo:  $0.3367$
- Koeficient lineární teplotní roztažnosti:  $23,62 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Na obr. 20 je zobrazený graf deformační odezvy slitiny hliníku na vnější zatížení.



Obrázek 20: Graf deformační odezvy slitiny hliníku na vnější zatížení

<sup>1</sup>Bilineární model - jedná se o aproximaci tahového diagramu, pomocí dvou lineárních částí, které popisují elastické a plastické chování materiálu.

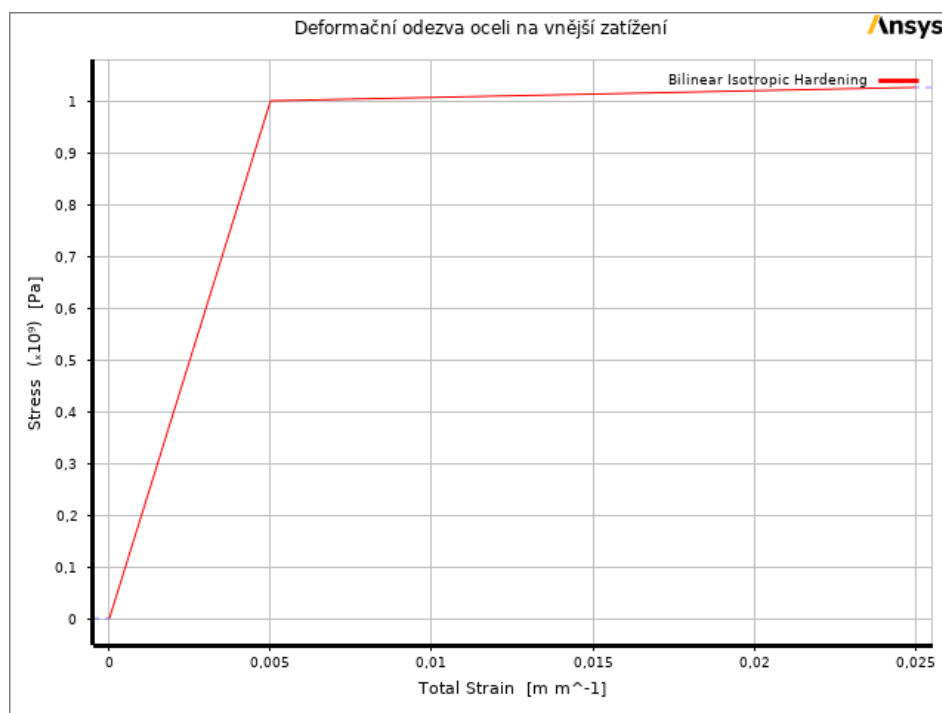
## Chromová ocel

Jedná se o středně legovanou ušlechtilou konstrukční ocel podle normy BS EN 10083-3:2006.

Ocel má následující vlastnosti:

- Hustota:  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Mez kluzu:  $1000 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti:  $1300 \text{ MPa}$
- Youngův modul:  $200 \text{ GPa}$
- Poissonovo číslo: 0.29
- Koeficient lineární teplotní roztažnosti:  $12,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Na obr. 21 je zobrazený graf deformační odezvy oceli na vnější zatížení.

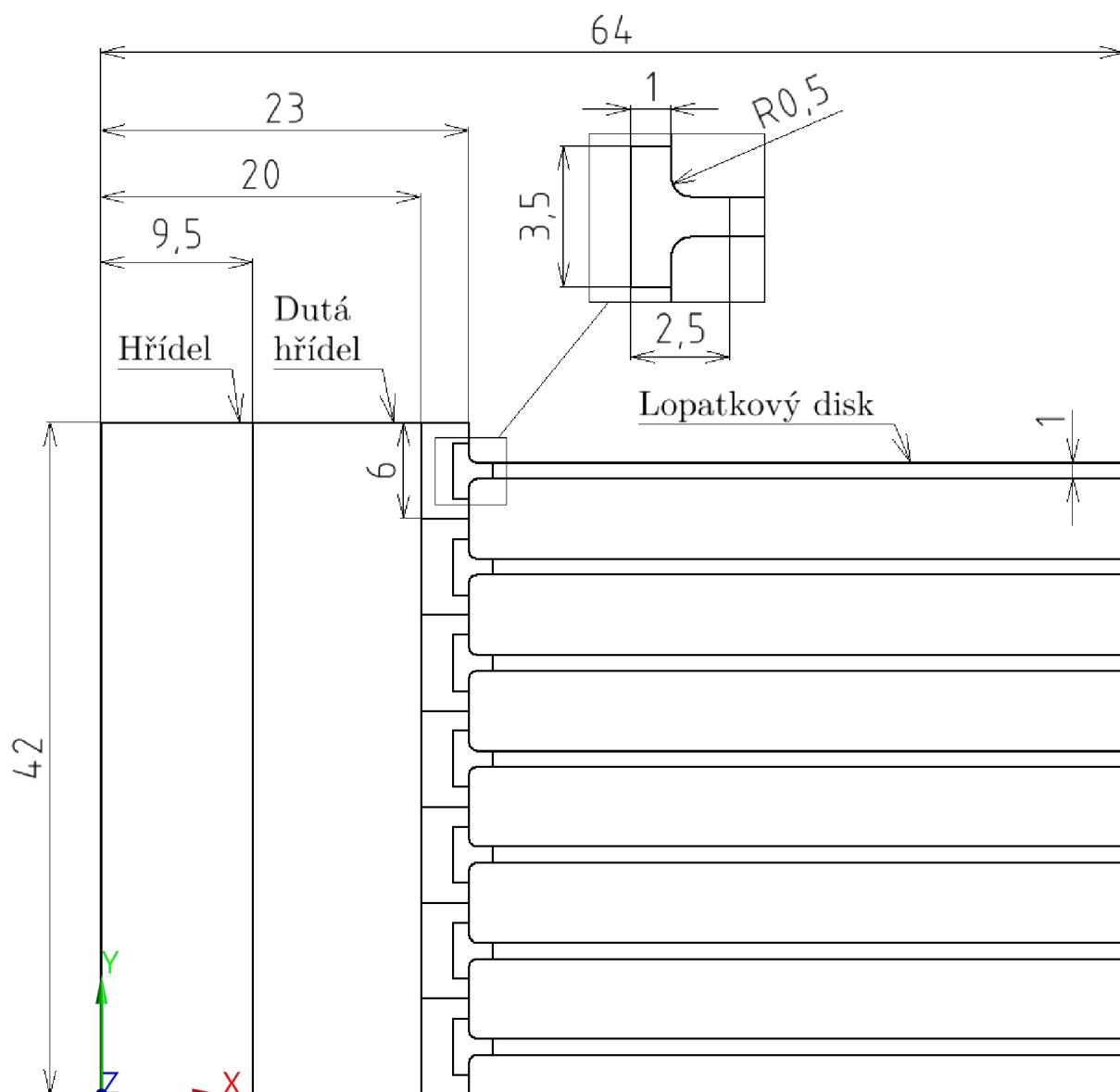


Obrázek 21: Graf deformační odezvy oceli na vnější zatížení.

### 3.3.2 Model geometrie

Pro výpočtový model bylo potřeba vytvořit zjednodušenou geometrii reálného rotoru. Protože analyzovaný rotor je osově symetrický z pohledu geometrie i zatížení, bylo vhodné geometrii vytvořit v podobě meridiánového řezu (viz obr. 22), což umožnilo úlohu řešit jako 2D rotačně osově symetrickou kolem osy Y „*2D Axisymmetric*“. Lopatkové disky byly vymodelovány jako prstence, tato metoda se využívá i pro testování reálných vývív, kvůli nákladné výrobě lopatek.

Geometrie byla vytvořena pomocí modeláře DesignModeler, který je součástí programu Ansys Workbench. Lopatkový disk byl vymodelován ze tří částí, které byly následně spojeny do jedné součásti, což umožnilo vytvoření sítě konečných prvků s větším počtem prvků s ideálním tvarem.



Obrázek 22: Okótovaný řez kompletním rotorem.

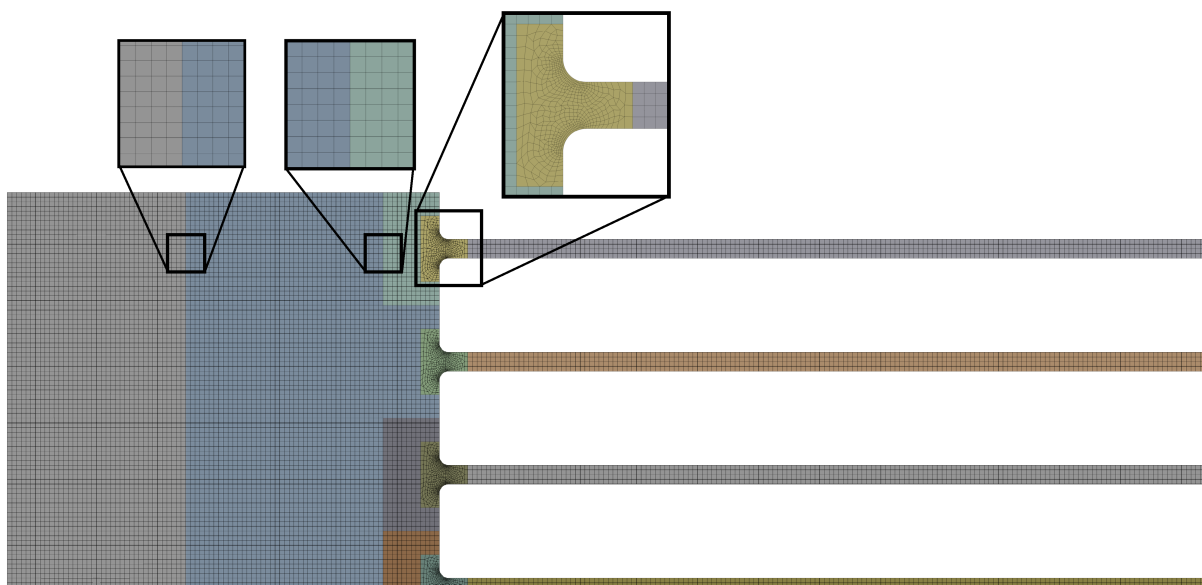


### 3.3.3 Diskretizace

Po naimportování modelu geometrie a modelů materiálů do nástroje Static Structural byla provedena diskretizace (tvorba sítě konečných prvků). Síť konečných prvků byla vytvořena pomocí prvků typu PLANE182. Základní velikost hrany prvku byla nastavena na 0,25 mm. Hodnota byla zvolena na základě postupného zmenšování velikosti dokud se požadované výsledky ustálili, další uvažovaný faktor při volbě velikosti hrany prvku byl nástroj „*Contact Tool - Initial Information*“, který slouží k ověření vlastností kontaktů. Všechny parametry které lze tímto nástrojem kontrolovat, odpovídali přednastaveným kritériím.

V oblasti kontaktních povrchů byla síť konečných prvků nastavena tak, aby uzly interagujících těles ležely na sobě, což pomáhá k zajištění konzistentních výsledků. Pro zamezení napěťových<sup>2</sup> singularit v oblasti zaoblení lopatkového disku, bylo použito lokální zjemnění sítě o velikosti hrany prvku 0,025 mm. Síť konečných prvků tvoří 24486 prvků a 26398 uzlů.

Na obr. 23 je zobrazena síť konečných prvků (pro přehlednost zobrazena pouze horní polovina rotoru) včetně detailů kontaktů a zjemněné sítě v oblasti zaoblení u lopatkového disku.



Obrázek 23: Síť konečných prvků kompletního rotoru.

<sup>2</sup>Singularita - skokový nárůst napětí, které se projeví na jednom uzlu, zpravidla vzniká v místě, kde dochází k prudké změně geometrie, popřípadě v důsledku nevhodně definovaného modelu vazeb a zatížení, nebo v místě, kde je síť konečných prvků tvořena prvky s nedostatečnou kvalitou (jedná se o prvky které se výrazně liší od ideálního tvaru prvku).

### 3.3.4 Model vazeb a zatížení

#### Kontakty

Lisovaný spoj se pomocí MKP řeší jako kontaktní úloha, proto bylo potřeba samotné kontaktní páry nastavit tak, aby poskytovaly výsledky, které se svým průběhem blíží reálnému spoji. V ANSYS Mechanical byly kontakty nastaveny následovně, nezmíněné parametry byly ponechány ve výchozím nastavení „*Program Controlled*“.

U kontaktu mezi hřídelí a dutou hřídelí, byla hřídel nastavena jako „<sup>3</sup>*Target*“ a dutá hřídel jako „<sup>4</sup>*Contact*“. U kontaktu mezi dutou hřídelí a lopatkovým diskem, byla hřídel nastavena jako „*Target*“ a lopatkový disk jako „*Contact*“.

#### Typ kontaktu

Pro výpočtový model byly použity <sup>5</sup>nelineární kontakty třecího typu („*Frictional*“). Hodnota součinitele tření v kontaktech byla nastavena na 0,2.

#### Vlastnost kontaktu

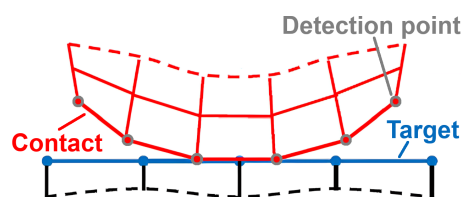
Po kontrole deformovaných tvarů byla provedena úprava vlastností kontaktů. Kontakt mezi lopatkovým diskem a dutou hřídelí byl nastaven jako <sup>6</sup>asymetrický. Kontakt mezi hřídelí a dutou hřídelí byl nastaven jako <sup>7</sup>symetrický.

#### Formulace kontaktu

Pro výpočtový model byla použita formulace založená na metodě Lagrangeových multiplikátorů („*Normal Lagrange*“). Tato metoda je založena na nulové prostupnosti (penetraci) kontaktních povrchů. Jedná se o nejpřesnější metodu formulace kontaktů. Z důvodu vysoké výpočetní náročnosti je výhodné úlohu řešit jako 2D. [3]

#### Detekční metoda

Pro výpočtový model byla použita detekční uzlová metoda („*Nodal-normal to target*“). Tato metoda kontakt detekuje v uzlech, je vhodná pro použití s formulací Normal Lagrange a pro kontakty s přímou geometrií. Schéma detekční uzlové metody kontaktu je zobrazeno na obr. 24.



Obrázek 24: Schéma detekční uzlové metody kontaktu. [28] - upraveno

<sup>3</sup>Target - jedná se o stranu kontaktu, která náleží tělesu které je z tužšího materiálu než Contact, tvar kontaktní plochy bývá obvykle konkávní nebo plochý, Target může mít hrubší síť než Contact.

<sup>4</sup>Contact - jedná se o stranu kontaktu, která náleží tělesu, které je z méně tuhého materiálu než Target, tvar kontaktní plochy bývá obvykle konvexní nebo plochý, Contact by měl mít alespoň stejně hrubou síť jako Target, nebo jemnější.

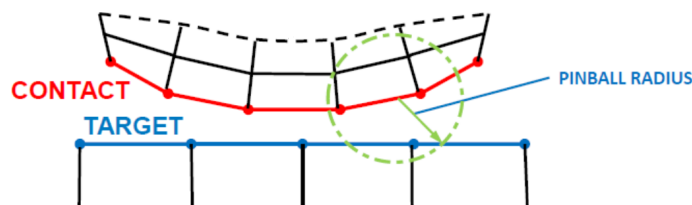
<sup>5</sup>Nelineární kontakt - typ kontaktu, u kterého může dojít k částečnému, nebo úplnému oddělení zatížením.

<sup>6</sup>Asymetrický kontakt - zajišťuje, že uzly tělesa „*Contact*“ nemohou prostupovat do těles „*Target*“

<sup>7</sup>Symetrický kontakt - zamezuje vzájemné prostupnosti uzlů těles „*Contact*“ a „*Target*“. Program kontaktní dvojici řeší jako dva asymetrické kontakty.

### Oblast vyhodnocení kontaktu

Pro výpočtový model bylo zvoleno manuální nastavení oblasti iniciace kontaktu („Pinball region“) o velikosti poloměru („Pinball Radius“) 0,3 mm pro kontakt mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí, pro kontakt mezi hřídelí a dutou hřídelí 0,2 mm. Oblast byla nastavena tak, aby se kontaktní plochy v každém zátěžném cyklu nacházely v oblasti Pinball Region. Schématické zobrazení oblasti vyhodnocení je zobrazeno na obr. 25.



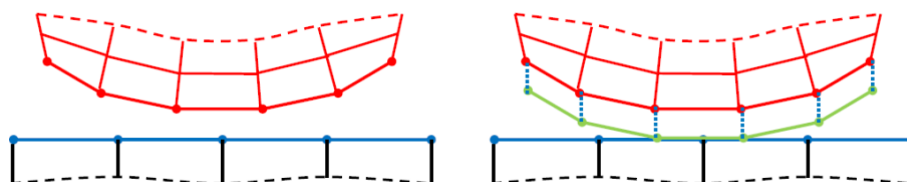
Obrázek 25: Schéma oblast vyhodnocení kontaktu. [7]

### Nastavení přesahu

Přesah byl nastaven přímo ve vlastnostech kontaktu, metodou, která kontaktní plochy posune o zadanou hodnotu, jedná se pouze o nastavení samotných kontaktů, síť (uzly a prvky) ani geometrie se nemění. Metoda utváření přesahu byla zvolená postupná („Add offset, ramped effects“), která přesah utváří postupně s mezikroky. Použití této metody je vhodné pro nelineární kontakty, pro snadnější dosažení konvergence. [7]

Protože se úloha řeší jako 2D osově rotačně symetrická, odpovídá zadávaná hodnota přesahu na poloměru.

Na obr. 26 je schématicky zobrazeno posunutí kontaktní plochy. Na levé straně jsou tělesa bez posunutí, na pravé straně je posunutá kontaktní plocha vyobrazena zelenou barvou.



Obrázek 26: Schéma posunutí kontaktní plochy. [7]

### Frictionless Support

Na spodní hraně hřídele byla použita vazba „Frictionless support“ (viz obr.27), která zamezuje posuvy v normálovém směru.



Obrázek 27: Použití Frictionless support.

### Teplotní zatížení

Na zkoumané součásti bylo použito teplotní zatížení o velikosti 80 °C (ohřev o 58 °C z klimatické teploty), jedná se o teplotu rotoru, při které začne řídicí jednotka vývěvy omezovat pracovní otáčky, při standardním provozu se této teploty nedosahuje. [1]

### Úhlová rychlost

Na zkoumané součásti bylo aplikované zatížení od úhlové rychlosti o velikosti 6283 rad/s, jedná se o maximální úhlovou rychlost, kterou může rotor dosáhnout. [1]

#### 3.3.5 Nastavení řešiče

V nastavení řešiče byly provedeny níže uvedené změny, nezměněné parametry byly ponechány na základním nastavení.

Řešená úloha byla rozdělena na dva zátěžné kroky, se základním nastavením mezikroků. V prvním kroku není aplikované žádné zatížení, dochází zde pouze k vytvoření přesahů. V druhém kroku je na zkoumané součásti aplikované provozní zatížení (teplotní a odstředivé účinky).

#### Solver type

V nastavení byl zvolen řešič typu „*Direct*“, který je vhodný pro použití u nelineárních úloh.

#### Large deflection

Funkce „*Large deflection*“ byla aktivována, jedná se o funkci, která zahrnuje do výpočtového modelu nelinearity.

#### Weak springs

Funkce „*Weak Springs*“ byla deaktivována. Chování modelu bylo stabilní, proto model nebylo potřeba touto funkcí dodatečně stabilizovat.

---

<sup>8</sup>Weak Springs - jedná se o funkci, která k modelu připojí umělé lineární pružiny, které stabilizují pohyby modelu. Tato funkce může usnadnit dosažení konvergence za cenu možných nepřesností.

### 3.4 Výpočtový model - ověření nalisovatelnosti

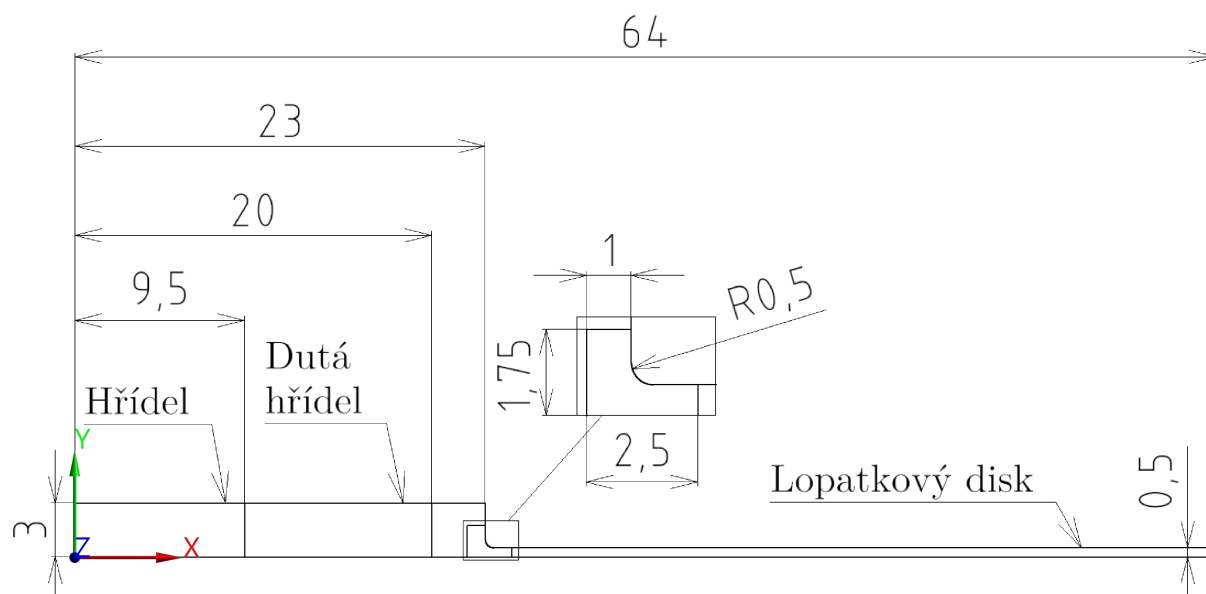
Výpočtový model popsáný v této kapitole slouží k ověření nalisovatelnosti součástí a především ke stanovení maximálních velikostí přesahů, se kterými lze součásti se změnou teploty zkompletovat.

#### Modely materiálů

Pro výpočtový model byly použity modely materiálu popsány v kapitole 3.3.1

#### 3.4.1 Model geometrie

Pro výpočtový model byla vytvořena geometrie v podobě meridiánového řezu, což umožňuje úlohu řešit jako 2D rotačně osově symetrickou podle osy Y. Při použití geometrie kompletního rotoru (viz kapitola 3.3.2) docházelo ke ztrátě stability, která byla způsobena oddělením kontaktních ploch vlivem teplotního zatížení, proto byla geometrie zjednodušená. Zjednodušenou geometrii tvoří polovina jednoho stupně lopatek (viz obr. 28).

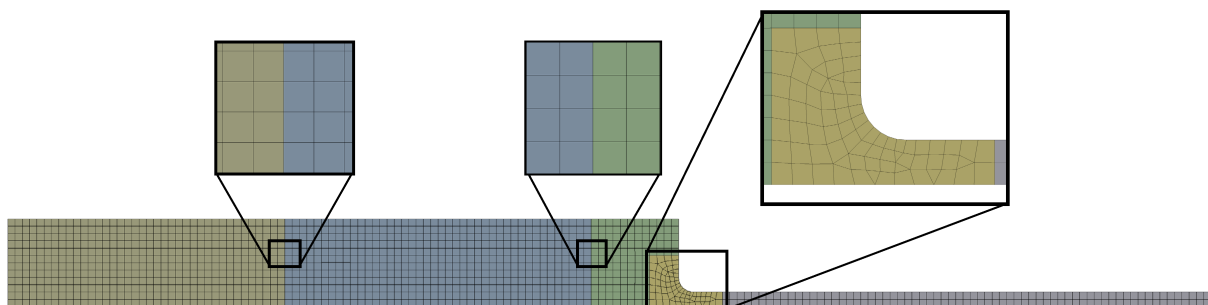


Obrázek 28: Okótovaný řez polovinou lopatky.

#### 3.4.2 Diskretizace

Po naimportování modelu geometrie a modelů materiálů do nástroje Static Structural byla provedena diskretizace (tvorba sítě konečných prvků). Síť konečných prvků byla vytvořena pomocí prvků typu PLANE182. Základní velikost hrany prvku byla nastavena na hodnotu 0,25 mm (důvod popsán v kapitole 3.3.3). V oblasti kontaktních povrchů byla síť konečných prvků nastavena tak, aby uzly interagujících těles ležely na sobě, což pomáhá k zajištění konzistentních výsledků. V oblasti zaoblení lopatkového disku, bylo použito lokální zjemnění sítě o velikosti hrany prvku 0,1 mm. Síť konečných prvků tvoří 1484 prvků a 1779 uzlů.

Na obr. 29 je zobrazena síť konečných prvků, včetně detailů sítě v oblasti kontaktů a zjemněné sítě v oblasti zaoblení lopatky.



Obrázek 29: Síť konečných prvků poloviny lopatky.

### 3.4.3 Model vazeb a zatížení

#### Kontakty

Pro výpočtový model byly použity kontakty s parametry, které jsou detailně popsány v kapitole 3.3.4.

#### Symetrická vazba

Na spodní straně geometrie (viz obr. 30) použita symetrická vazba („Symmetry Region“), která zamezuje posuvy v normálovém směru a tím stabilizuje model. Tato vazba umožnila použití poloviční geometrie lopatkového stupně.



Obrázek 30: Použití symetrické vazby.

#### Teplotní zatížení

Pro ohřev byla zvolena teplota 130 °C. Jedná se o teplotu, která je pro ohřev hliníkových dílů bezpečná vzhledem k vlastnostem materiálu.

Pro ochlazování byla zvolena teplota -65 °C. Jedná se o teplotu, které je možné dosáhnout při použití průmyslového chladicího zařízení.

Hodnoty byly zvoleny inženýry z Edwards. [11]

### 3.4.4 Nastavení řešiče

Řešená úloha byla rozdělena na dva zátěžné kroky, se základním nastavením mezikroků. V prvním kroku je na lopatkový disk a dutou hřídel aplikováno teplotní zatížení, lopatkový disk je ohřátý a dutá hřídel ochlazena. Hřídel je v tomto kroku deaktivována pomocí funkce „Element Birth and Death“ a kontakt mezi hřídelí a dutou hřídelí je deaktivován funkcí „Contact Step Control“. V druhém kroku dojde k aktivaci hřídele a kontaktu mezi hřídelí a dutou hřídelí, hřídel je ochlazena, dutá hřídel a lopatkový disk jsou ohřáté.

Nezmíněné nastavení řešiče bylo použito stejné, jako v kapitole 3.3.5.

## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 Metodika vyhodnocování

Pro vyhodnocení výsledků byla zvolena metoda, při které se zkoumají průměrné velikosti kontaktních tlaků (dále jen kontaktní tlak) mezi nalisovanými součástmi, které jsou závislé na velikostech přesahů.

Při lisování je požadovaný nulový kontaktní tlak. Což zaručuje, že mezi součástmi je vůle a bude je možné volně, nebo za použití malé lisovací síly zkompletovat, která je potřebná pro překonání odporu, které součásti kladou kvůli geometrickým nepřesnostem.

Při zatížení zkompletovaného rotoru odstředivými silami a maximální přípustnou teplotou je požadavek, aby hodnota průměrného kontaktního tlaku byla větší než 1 MPa, jedná se o hodnotu zvolenou inženýry z Edwards. [11]

U hledaných velikostí přesahů je kladen požadavek na minimální velikost rozsahu hodnot 0,01 mm. Hodnota zvolena inženýry z Edwards, vzhledem k aktuální technologii výroby. [11]

Další kontrolovaný parametr bylo redukované napětí dle HMH, jehož velikost nemůže překročit mez kluzu použitých materiálů.

#### 4.1.1 Parametrizace

Pro efektivní vyhodnocení výsledků byly použity tzv. parametry, které umožňují vyhodnocení velkého množství různých variant přesahů.

##### Vstupní parametry

- Velikost přesahu mezi dutou hřídelí a lopatkovým diskem
- Velikost přesahu mezi hřídelí a dutou hřídelí

##### Výstupní parametry

- Kontaktní tlak při lisování lopatkových disků na dutou hřídel
- Kontaktní tlak při lisování lopatkových disků a duté hřídele na hřídel
- Kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí při pracovním zatížení
- Kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí při pracovním zatížení
- Maximální redukované napětí dle HMH po kompletaci
- Maximální redukované napětí dle HMH při pracovním zatížení

## 4.2 Aktuální způsob montáže

Pro ověření správné funkce výpočtových modelů byl proveden výpočet aktuálního způsobu montáže, za použití výpočtových modelů, které jsou popsány v kapitole 3.2. Byly použity s následující vstupní parametry:

- Lisovací teplota ohříváných součástí: 110 °C
- Lisovací teplota ochlazovaných součástí: -196 °C
- Přesah mezi lopatkovým diskem a dutou hřídelí: 0,065 mm
- Přesah mezi hřídelí a dutou hřídelí: 0,01 mm

Hodnoty použitých přesahů spadají do tolerančních polí součástí pro aktuální způsob výroby.

### Kontaktní tlaky

Na obr. 31 jsou vyobrazeny průběhy kontaktních tlaků po kompletaci a při pracovním zatížení, lze zde pozorovat značný pokles kontaktních tlaků především u kontaktu mezi hřídelí a dutou hřídelí, který je vzhledem k charakteru zatížení a rozdílným vlastnostem materiálů očekávaný.

Hodnoty kontaktních tlaků jsou následující:

Po kompletaci:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 52 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 98,6 MPa

Při pracovním zatížení:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 7,9 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 6,7 MPa

Spojení při provozním zatížení zůstane funkční, nedojde k oddělení součástí.



Obrázek 31: Průběhy kontaktní tlaků - aktuální způsob montáže: a) po kompletaci, b) pracovní zatížení.

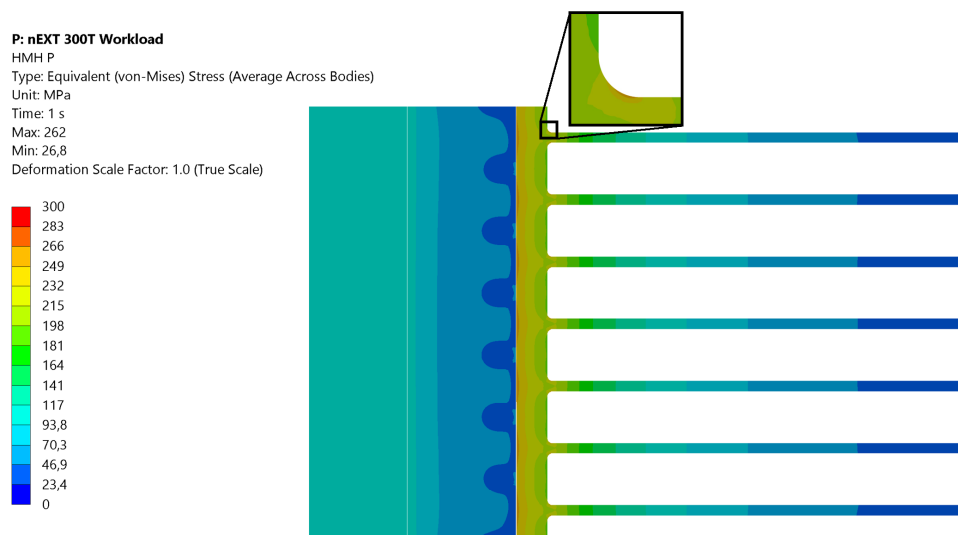


## Redukované napětí

Na obr. 32 a obr. 33 jsou vyobrazeny průběhy redukovaných napětí po kompletaci a při pracovním zatížení.

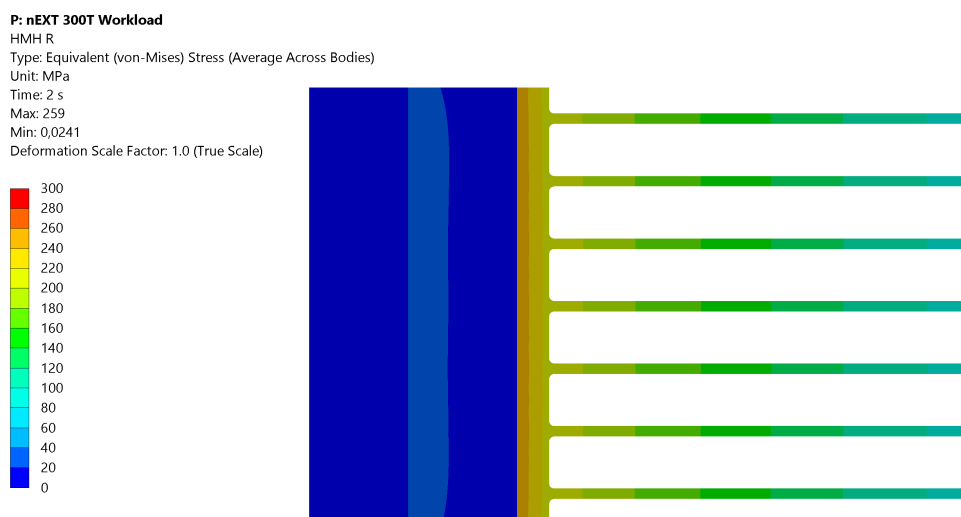
Průběhy hlavních napětí, ze kterých program dopočítává redukované napětí, jsou vyobrazeny v kapitole A.

Po kompletaci je dosaženo maxima v oblasti zaoblení lopatkového disku.



Obrázek 32: Redukované napětí dle HMH po kompletaci - aktuální způsob montáže.

Při pracovním zatížení redukované napětí dosahuje svých maximálních hodnot na lopatkovém disku v oblasti kontaktní plochy.

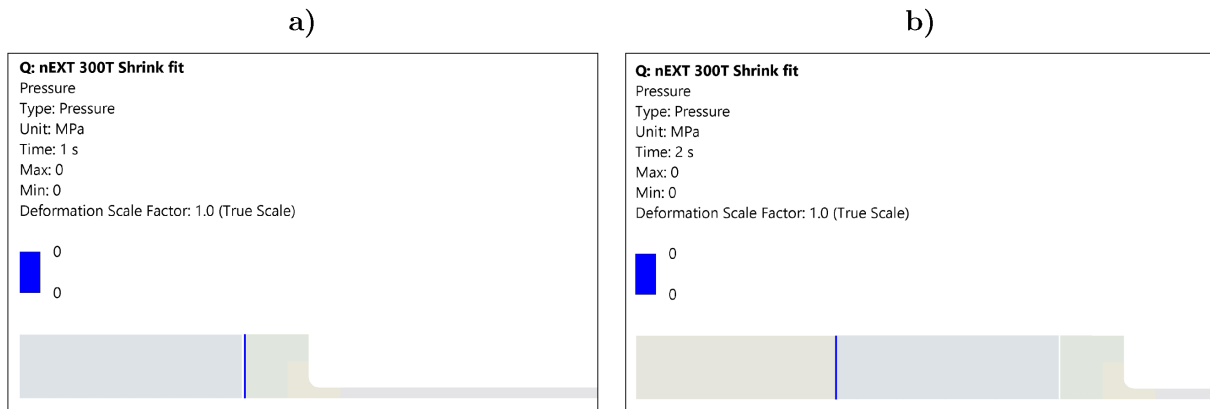


Obrázek 33: Redukované napětí dle HMH při pracovním zatížení - aktuální způsob montáže.

Po kompletaci a při zatížení nedojde k překročení meze kluzu.

### Ověření nalisovatelnosti

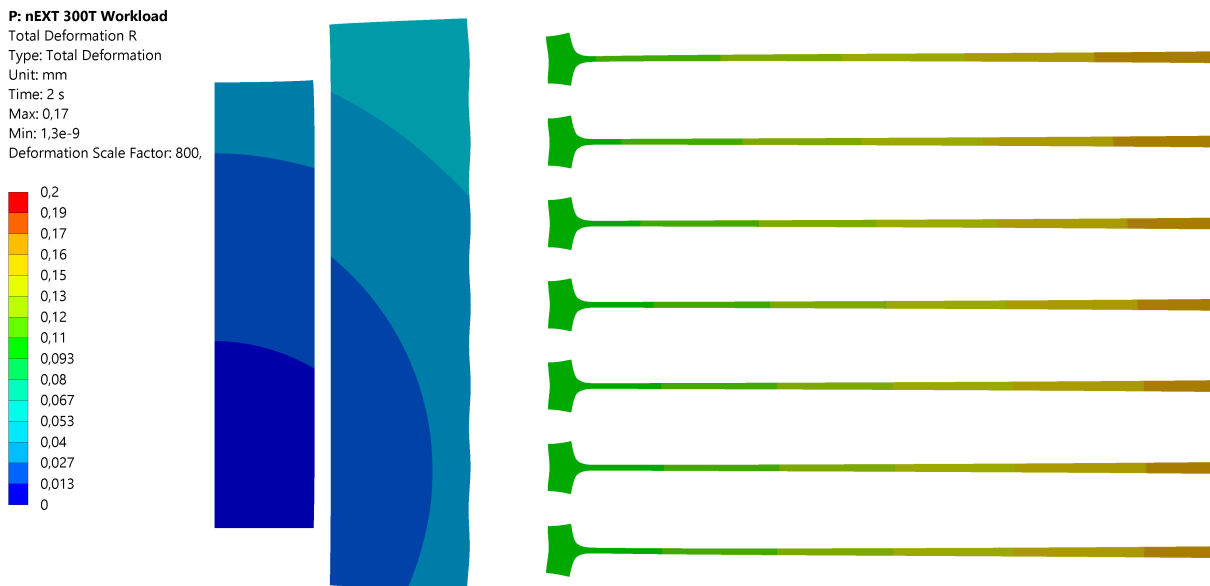
Při kontrole nalisovatelnosti vyšly hodnoty kontaktních tlaků dle očekávání 0 MPa viz obr. 34, rotor lze zkompletovat.



Obrázek 34: Ověření nalisovatelnosti - aktuální způsob montáže: a) lisování lopatkového disku na dutou hřídel, b) lisování lopatkového disku s dutou hřídelí na hřídel.

### Deformovaný tvar

Na obr. 35 je zobrazena deformace rotoru vývěvy při pracovním zatížení. Deformace jsou v porovnání s velikostí dílů velmi malé, proto bylo jejich měřítko pro vizualizaci 800x zvětšeno.



Obrázek 35: Deformovaný tvar (měřítko 800x) - aktuální způsob montáže.

## 4.3 Optimalizovaný proces montáže

Po nastavení výpočtových modelů a ověření jejich funkčnosti, byla provedena optimalizace. Jako referenční hodnoty byly zvoleny přesahy z kapitoly 4.2.

### 4.3.1 Minimální hodnoty přesahů

Postupným zmenšováním referenčních přesahů a kontrolování kontaktních tlaků, došlo ke splnění požadovaných podmínek při následujícím nastavení:

- Přesah mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 0,0585 mm
- Přesah mezi hřídelí a dutou hřídelí: 0,01 mm

### Kontaktní tlaky

Na obr. 36 jsou vyobrazeny průběhy kontaktních tlaků po kompletaci a při pracovním zatížení, vzhledem k poklesu velikostí kontaktních tlaků byl zvolen odlišný rozsah legendy. Pro nastavené minimální přesahy vyšly následující hodnoty kontaktních tlaků:

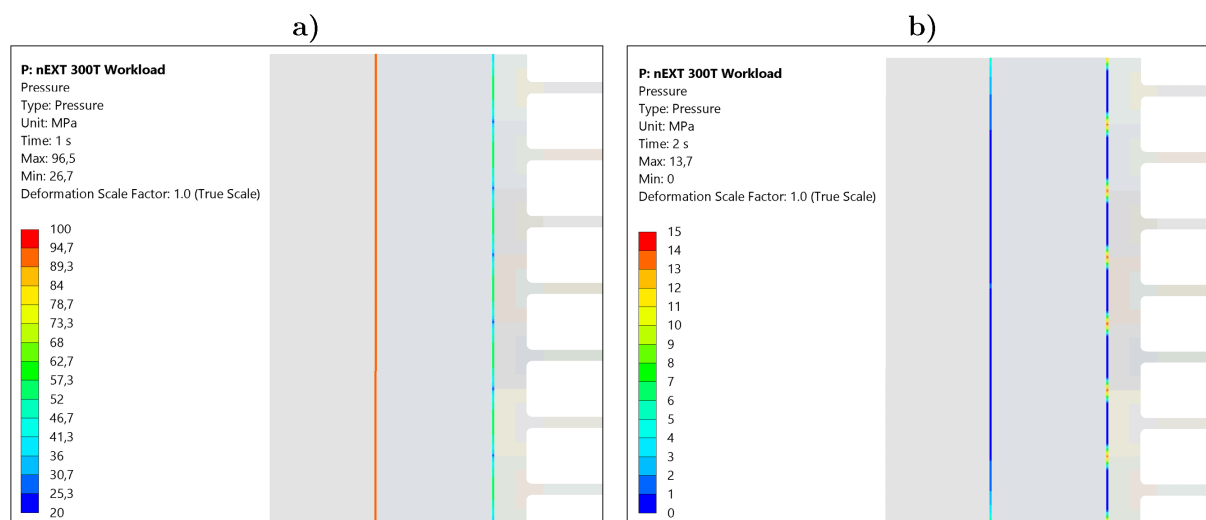
Po kompletaci:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 47,2 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 93 MPa

Při pracovním zatížení:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 3,3 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 1,3 MPa

Spojení při provozním zatížení zůstane funkční, nedojde k oddělení součástí. Při porovnání výsledků s aktuálním způsobem kompletace (kapitola 4.2) lze pozorovat, že únosnost spoje mezi hřídelemi je značně ovlivněna velikostí přesahu mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí. Pro zmenšení velikosti přesahu mezi hřídelí a dutou hřídelí bylo potřeba výrazně zvětšit přesah u druhého spoje, což vedlo k nedodržení požadavku na velikost rozsahu přesahů.

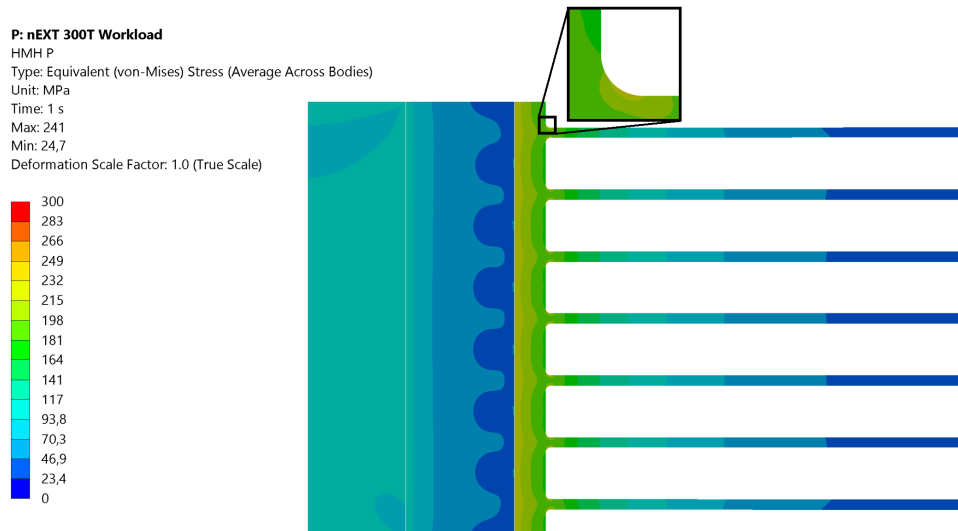


Obrázek 36: Průběhy kontaktní tlaků - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů: a) po kompletaci, b) pracovní zatížení.

## Redukované napětí

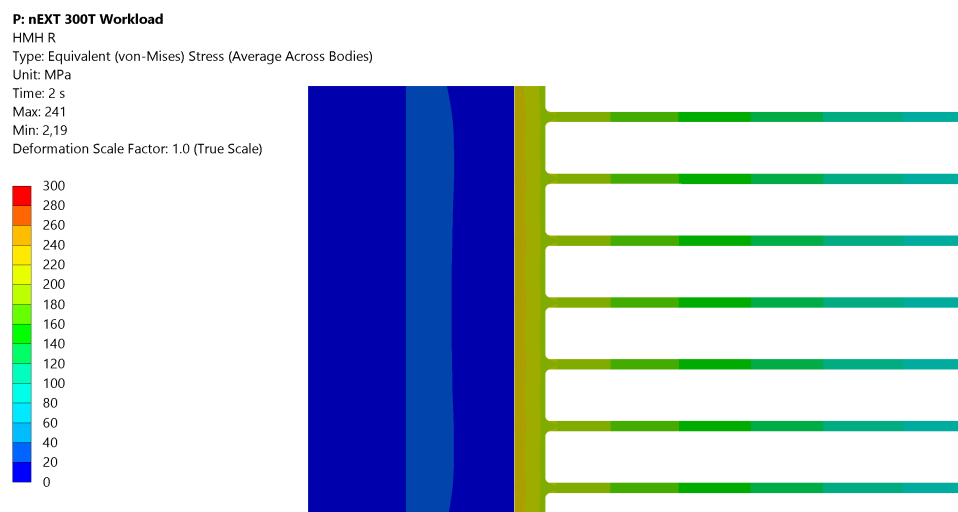
Na obr. 37 a obr. 38 jsou vyobrazeny průběhy redukovaných napětí po kompletaci a při pracovním zatížení. Průběhy hlavních napětí, ze kterých program dopočítává redukované napětí jsou vyobrazeny v kapitole B.

Po kompletaci je dosaženo maxima v oblasti zaoblení lopatkového disku.



Obrázek 37: Redukované napětí dle HMH po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů.

Při pracovním zatížení redukované napětí dosahuje svých maximálních hodnot na lopatkovém disku v oblasti kontaktní plochy.

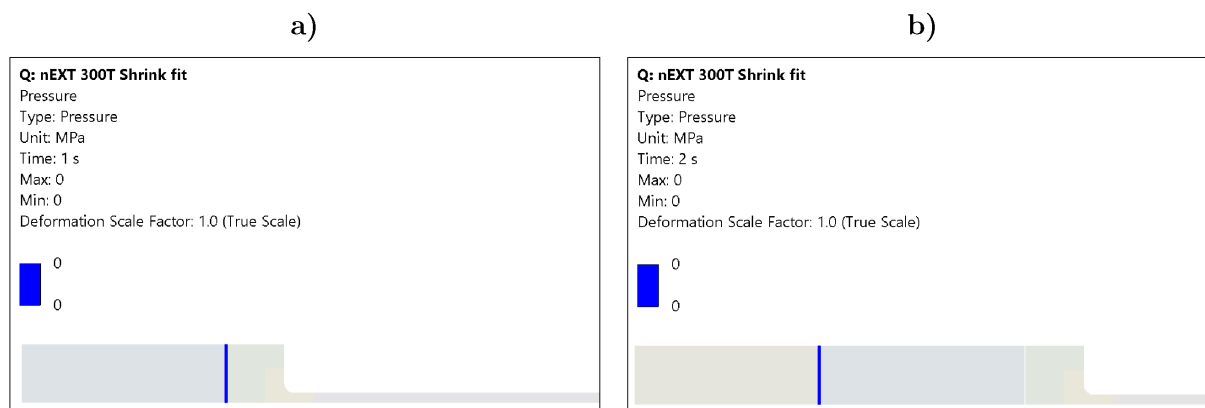


Obrázek 38: Redukované napětí dle HMH po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů.

Po kompletaci a při zatížení nedojde k překročení meze kluzu.

## Ověření nalisovatelnosti

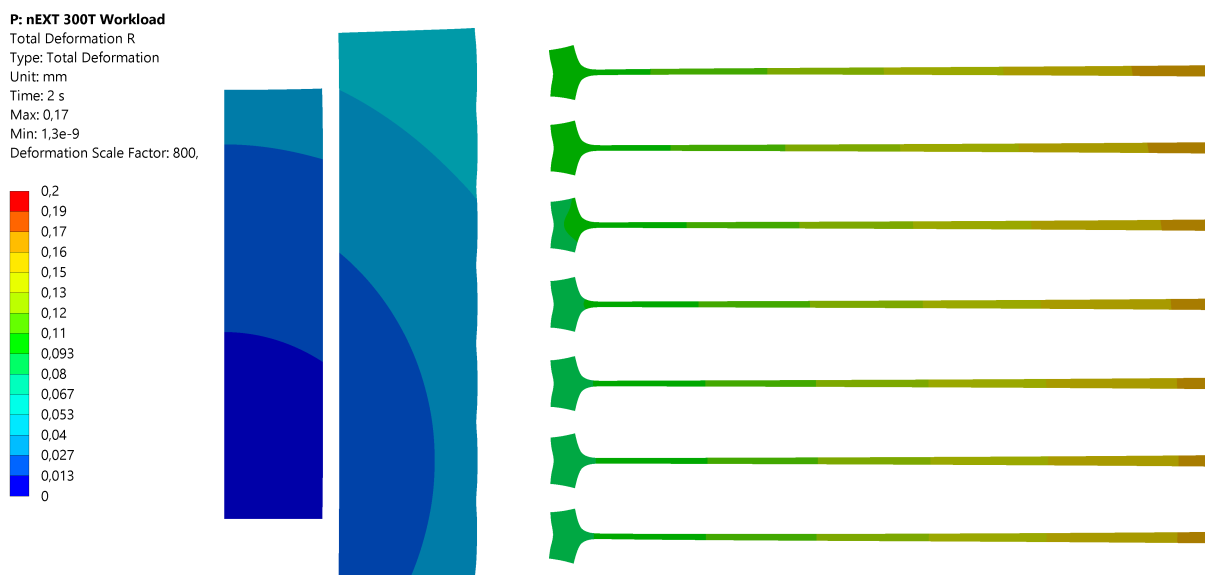
Při kontrole nalisovatelnosti vyšly hodnoty kontaktních tlaků vzhledem k velikostem přesahů dle očekávání 0 MPa viz obr. 39, rotor lze zkompletovat.



Obrázek 39: Ověření nalisovatelnosti - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů: a) lisování lopatkového disku na dutou hřídel, b) lisování lopatkového disku s dutou hřídelí na hřídel.

## Deformovaný tvar

Na obr. 40 je zobrazena deformace rotoru vývěvy při pracovním zatížení. Deformace jsou v porovnání s velikostí dílů velmi malé, proto bylo jejich měřítko pro vizualizaci 800x zvětšeno.



Obrázek 40: Deformovaný tvar (měřítko 800x) - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů.

### 4.3.2 Maximální hodnoty přesahů

U hledání maximálních hodnot přesahů se vycházelo z požadavku na minimální rozsah velikostí přesahů. Hodnota přesahu mezi hřídelí a dutou hřídelí byla nastavena na minimální přípustnou hodnotu (0,02 mm), ke kterému se hledal maximální přesah mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí umožňující teoreticky volnou kompletaci. Požadavky splňují následující hodnoty přesahů:

- Přesah mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 0,0695 mm
- Přesah mezi hřídelí a dutou hřídelí: 0,02 mm

Rozsah velikostí přesahů mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí je pro určené přesahy 0,011, což je vzhledem k většímu počtu vyráběných lopatkových disků oproti ostatním dílům žádoucí.

#### Kontaktní tlaky

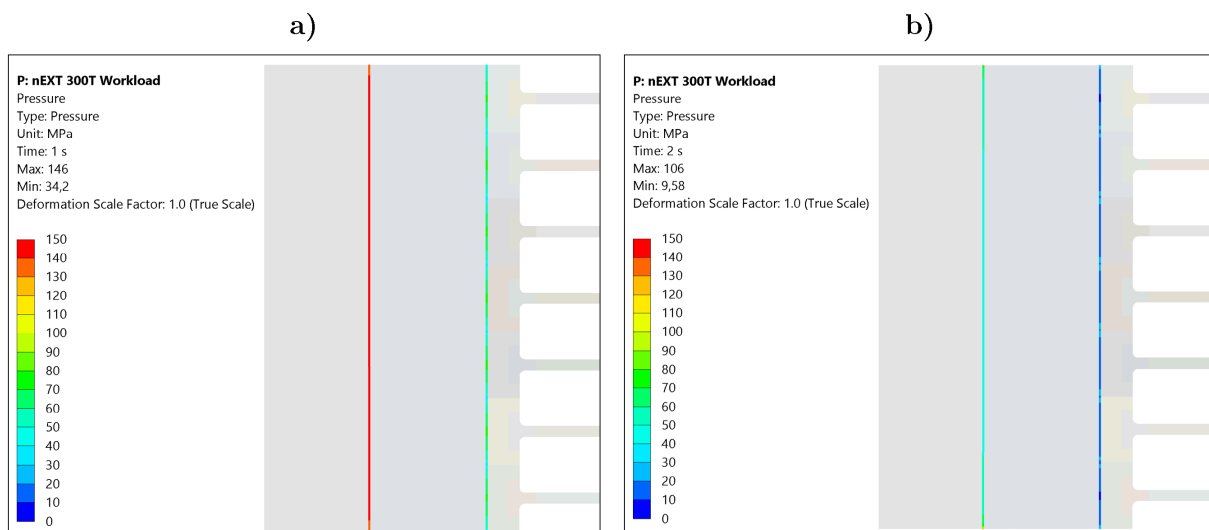
Na obr. 41 jsou vyobrazeny průběhy kontaktních tlaků po kompletaci a při pracovním zatížení, vzhledem k poklesu velikostí kontaktních tlaků zvolen odlišný rozsah legendy. Pro nastavené maximální přesahy vyšly následující hodnoty kontaktních tlaků:

Po kompletaci:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 59,4 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 144,7 MPa

Při pracovním zatížení:

- Průměrný kontaktní tlak mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí: 15,4 MPa
- Průměrný kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí: 51 MPa

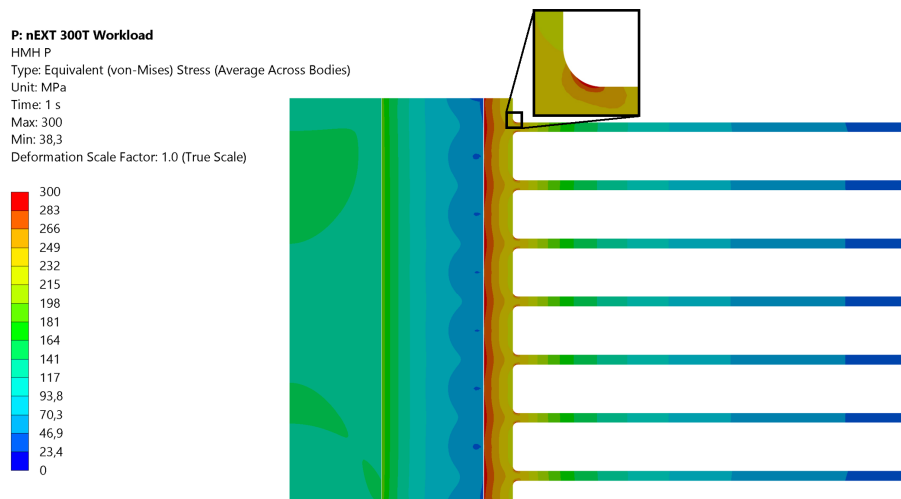


Obrázek 41: Průběhy kontaktní tlaků - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů: a) po kompletaci, b) pracovní zatížení.

## Redukované napětí

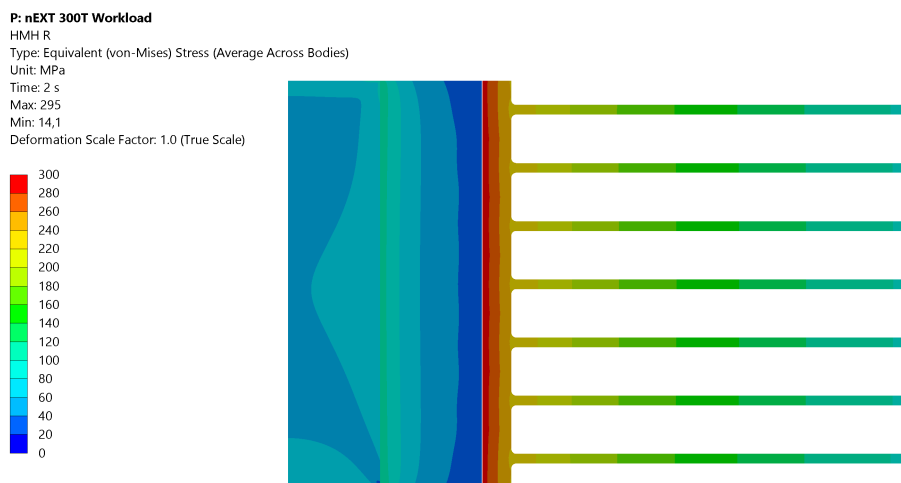
Na obr. 42 a obr. 43 jsou vyobrazeny průběhy redukovaných napětí po kompletaci a při pracovním zatížení. Průběhy hlavních napětí, ze kterých program dopočítává redukované napětí, jsou vyobrazeny v kapitole B.

Po kompletaci je dosaženo maxima v oblasti zaoblení lopatkového disku.



Obrázek 42: Redukované napětí dle HMH po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů.

Při pracovním zatížení redukované napětí dosahuje svých maximálních hodnot na lopatkovém disku v oblasti kontaktní plochy.

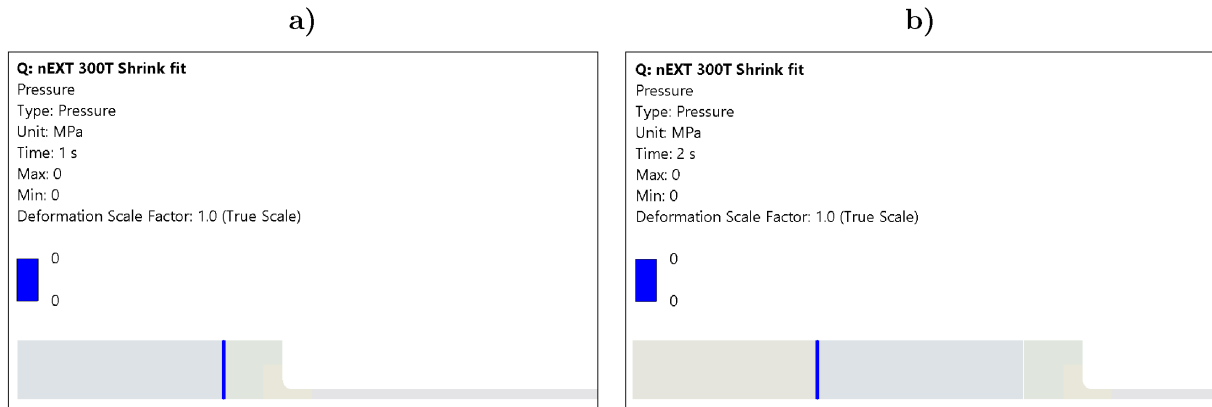


Obrázek 43: Redukované napětí dle HMH po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů.

Po kompletaci a při zatížení nedojde k překročení meze kluzu.

## Ověření nalisovatelnosti

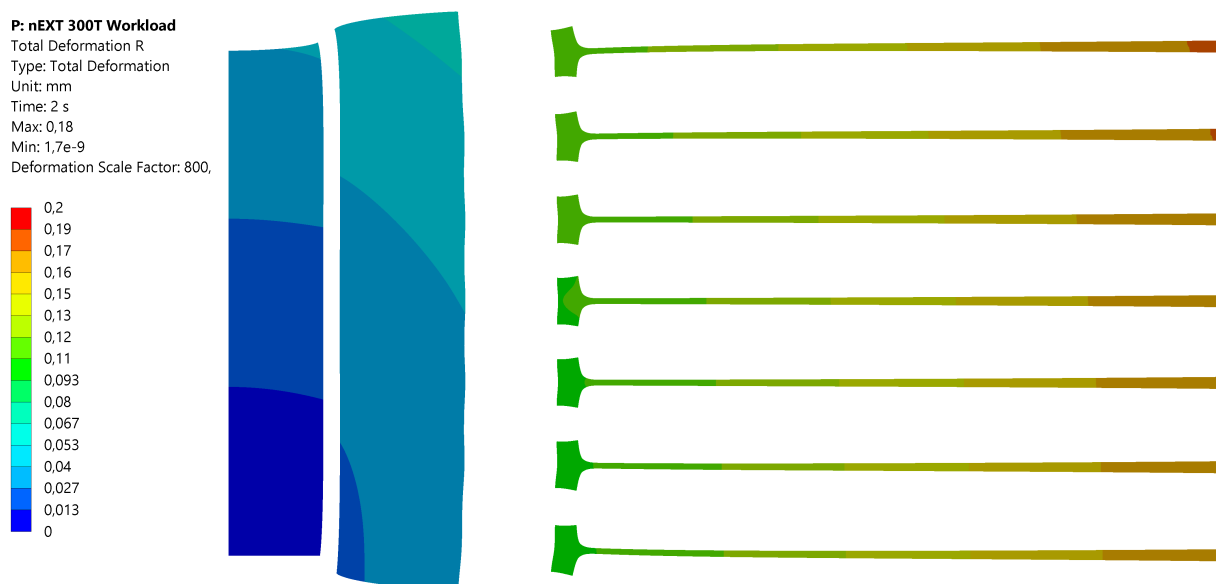
Pro nastavenou hodnotu přesahu mezi hřídelí a dutou hřídelí 0,02 mm byla splněna podmínka nulových kontaktních tlaků pro maximální velikost přesahu mezi lopatkovými disky a dutou hřídelí při hodnotě přesahu 0,0695 mm viz obr. 44.



Obrázek 44: Ověření nalisovatelnosti - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů: a) lisování lopatkového disku na dutou hřídel, b) lisování lopatkového disku s dutou hřídelí na hřídel.

## Deformovaný tvar

Na obr. 45 je zobrazena deformace rotoru vývěvy při pracovním zatížení. Deformace jsou v porovnání s velikostí dílů velmi malé, proto bylo jejich měřítko pro vizualizaci 800x zvětšeno.

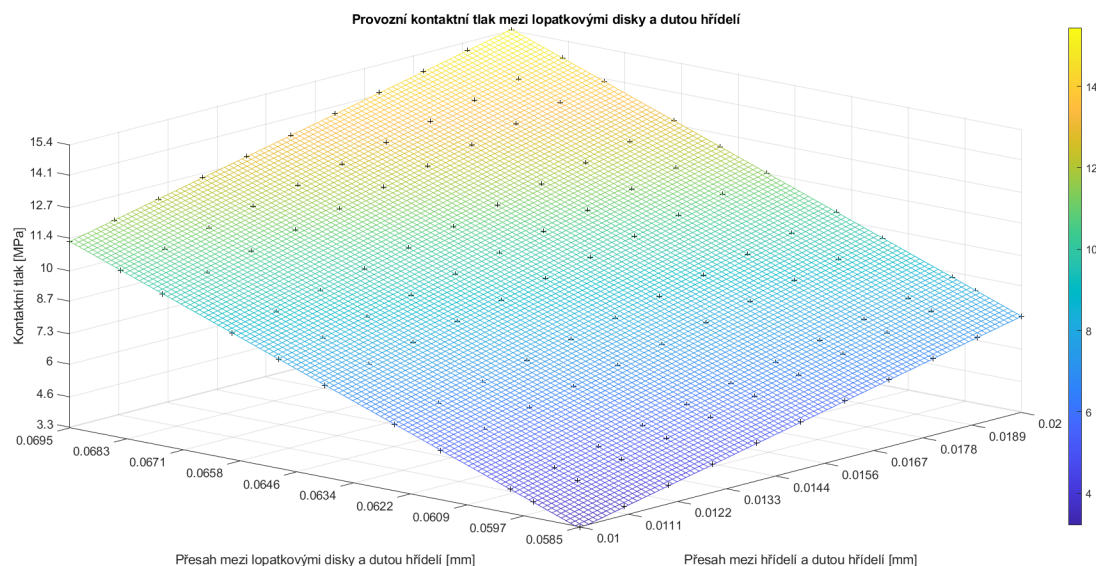


Obrázek 45: Deformovaný tvar (měřítko 800x)- optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů.

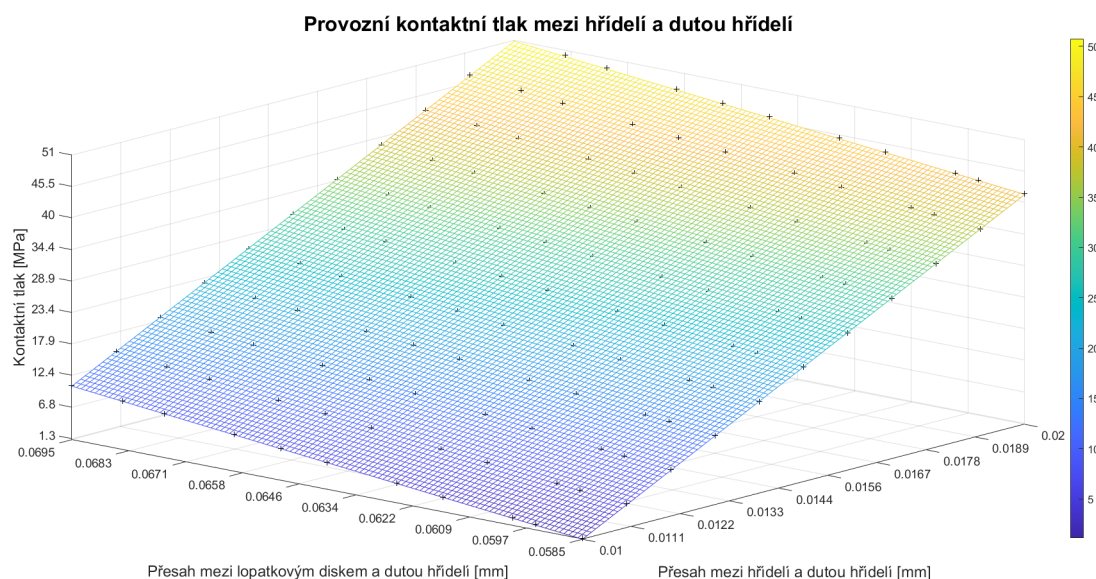


### 4.3.3 Funkční rozsah přesahů

Na obr. 46 a na obr. 47 jsou vyobrazeny odezвовé plochy, které tvoří provozní kontaktní tlaky v závislosti na přesazích. Odezвовé plochy tvoří 121 variant přesahů z navrženého funkčního rozsahu. Body (hodnoty kontaktních tlaků) jsou proloženy obecnou plochou. Na obr. 46 a na obr. 47 lze pozorovat, že všechny body leží podle očekávání na ploše. Výpočtový model pracovního zatížení poskytuje stabilní výsledky, nedochází k náhlým odchylkám.



Obrázek 46: Odezвовá plocha funkčních přesahů - provozní kontaktní tlak mezi lopatkovým diskem a dutou hřídelí.



Obrázek 47: Odezвовá plocha funkčních přesahů - provozní kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá optimalizací procesu lisování rotoru turbomolekulární vývěvy nEXT 300T. Optimalizací se rozumí návrh lisovacích teplot a tolerančních polí spojovaných součástí. Hlavním cílem práce bylo z lisovacího procesu odstranit tekutý dusík. Tekutý dusík se aktuálně používá k ochlazení lisovaných dílů, jeho nahrazení by mohlo výrazně snížit výrobní náklady.

Zkoumaný rotor se skládá ze tří hlavních částí: lopatkové disky, dutá hřídel a nosná hřídel. Proces kompletace rotoru se provádí v následujícím pořadí. Nahřáté lopatkové disky jsou nalisovány na ochlazenou dutou hřídel. Po vyrovnání teplot se tento celek nahřeje a nalisuje na ochlazenou nosnou hřídel.

Optimalizace byla provedena výpočtovým modelováním pomocí programu ANSYS Mechanical 2024 R1, který pro řešení využívá metodu konečných prvků. Pro snížení výpočetní náročnosti byla řešená problematika rozdělena do dvou statických strukturních analýz. V první analýze je rotor zatížen pouze pracovním zatížením, druhá analýza slouží ke stanovení maximálních přesahů, se kterými lze rotor zkompletovat.

Tvorba výpočtových modelů obnášela vytvoření modelů geometrie. Pro snížení výpočetní náročnosti byly geometrie vytvořeny v podobě meridiánového řezu. Lopatky byly vymodelovány v podobě disků s konstantním průřezem. Model geometrie byl následně diskretizován.

Součástí tvorby výpočtových modelů bylo nastavení modelů použitých materiálů, modelů vazeb a zatížení, včetně nastavení kontaktních párů.

Vzhledem k vlastnostem použitých materiálů a dostupné technologii byl proveden návrh lisovacích teplot. Pro ohřev byla zvolena elektrická průmyslová pec. Pro ochlazení bylo zvoleno průmyslové chladicí zařízení. Pro optimalizovaný lisovací proces byly zvoleny následující lisovací teploty:

- Lisovací teplota ohřívání součástí: 130 °C
- Lisovací teplota ochlazení součástí: -65 °C

Na základě získaných výsledků byl proveden návrh tolerančních polí lisovaných součástí. Jako optimální byly zvoleny následující parametry:

- Přesah na poloměru mezi lopatkovým diskem a dutou hřídelí: 0,0585-0,0695 mm
- Přesah na poloměru mezi hřídelí a dutou hřídelí: 0,01-0,02 mm

Hlavní cíl práce byl splněn, navržené parametry odpovídají stanoveným požadavkům. Pro ověření parametrů získaných výpočtovým modelováním bude provedena zkušební montáž rotoru ve výrobním závodě Edwards Lutín. Po vyhodnocení poznatků získaných zkušební montáží bude následovat další vývoj a testování. Na bakalářskou práci by bylo možné dále navázat v magisterském studiu. Výpočtové modelování by bylo možné vylepšit tvorbou modelů geometrie, které by zahrnovali kompletní geometrii lopatek a další části rotoru.

## LITERATURA

- [1] *Edwards nEXT Turbomolecular Pumps: INSTRUCTION MANUAL*. Dostupné z: [https://ravescientific.com/images/pdf/nEXT\\_240\\_300\\_400.pdf](https://ravescientific.com/images/pdf/nEXT_240_300_400.pdf). [Citováno 2024-04-27].
- [2] *Thick-walled Pipes Under Pressure and Axial Load*. Dostupné z: <https://calcdevice.com/thick-walled-pipe-id38.html>. [Citováno 2024-05-21].
- [3] *MKP a MHP - interaktivní studijní materiál*. 2012. Dostupné z: [https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmhp\\_obr.pdf](https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmhp_obr.pdf). [Citováno 2024-03-24].
- [4] *Fundamentals of Vacuum Technology*. 2016. Dostupné z: [https://www.leybold.com/content/dam/brands/leybold/web-only/knowledge/vacuum-fundamentals/Fundamentals\\_of\\_Vacuum\\_Technology\\_EN.pdf](https://www.leybold.com/content/dam/brands/leybold/web-only/knowledge/vacuum-fundamentals/Fundamentals_of_Vacuum_Technology_EN.pdf). [Citováno 2024-02-12].
- [5] *Historie firmy*. 2019. Dostupné z: <https://www.edwardsvacuum.com/cs-cz/about-us/history>. [Citováno 2024-01-31].
- [6] *An overview on high vacuum technology*. 2021. Dostupné z: <https://techbullion.com/vacuum-technologies/>. [Citováno 2024-03-21].
- [7] *Advanced Contacts in Ansys Workbench-1*. 2022. Dostupné z: <https://www.mechead.com/advanced-contacts-in-ansys-workbench-1/>. [Citováno 2024-04-07].
- [8] *Mechanické turbomolekulární vývěvy*. 2023. Dostupné z: <https://www.edwardsvacuum.com/cs-cz/our-products/turbomolecular-pumps/next-mechanical-turbomolecular-pumps>. [Citováno 2023-12-21].
- [9] *Silové spoje hřídele s nábojem*. 2023. Dostupné z: [https://www.mitcalc.com/doc/shaftconf/help/cz/shaftconf.htm#Header\\_A](https://www.mitcalc.com/doc/shaftconf/help/cz/shaftconf.htm#Header_A). [Citováno 2024-02-26].
- [10] *Diaphragm Pump*. 2024. Dostupné z: <https://savree.com/en/encyclopedia/diaphragm-pump>. [Citováno 2024-02-14].
- [11] Ing. Ladislav Tománek, Inženýr výzkumu a vývoje ve společnosti Edwards [ústní sdělení]. *Brno*. 2024.
- [12] *NEXT - Digital brochure*. 2024. Dostupné z: <https://www.edwardsvacuum.com/en-uk/our-products/turbomolecular-pumps/next-mechanical-turbomolecular-pumps>. [Citováno 2024-02-14].
- [13] *Produkty Edwards*. 2024. Dostupné z: <https://www.edwardsvacuum.com/cs-cz/our-products>. [Citováno 2023-12-22].
- [14] *T-Station turbomolecular pumping stations - Digital brochure*. 2024. Dostupné z: <https://www.edwardsvacuum.com/en-uk/our-products/turbomolecular-pumping-stations/t-station-pumps-stations.html#t-station85>. [Citováno 2024-02-14].

- [15] *Vane pumps*. 2024. Dostupné z: [https://www.northridgepumps.com/article-93\\_what-are-vane-pumps](https://www.northridgepumps.com/article-93_what-are-vane-pumps). [Citováno 2024-02-19].
- [16] BISHOP, C. A. 4 - Pumping. In: BISHOP, C. A., ed. *Vacuum Deposition onto Webs, Films and Foils (Second Edition)*. Second Edition. Oxford: William Andrew Publishing, 2011, s. 63–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7867-0.00004-0>. ISBN 978-1-4377-7867-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781437778670000040>.
- [17] BOHÁČEK, F. *Části a mechanismy strojů*. Vydání třetí. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0406-X.
- [18] BUDYNAS, R. G. a NISBETT, J. K. *Shigleyho konstruování strojních součástí*. Vydání druhé. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUUM, 2023. ISBN 978-80-214-5471-2.
- [19] BURŠA, J., HORNÍKOVÁ, J. a JANÍČEK, P. *Pružnost a pevnost*. Vydání první. CERM, s.r.o., 2003 [Citováno 2024-02-13]. ISBN 80-7204-268-8. Dostupné z: <http://beta.fme.vutbr.cz/cpp/>.
- [20] CHEW, A., BREWSTER, B., OLSEN, I. a ORMROD, S. Developments in nEXT turbomolecular pumps based on compact metal spring damping. *Vacuum*. 2011, sv. 85, č. 12, s. 1156–1160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2010.12.029>. ISSN 0042-207X. Selected Papers from the 11th European Vacuum Conference, EVC-11 8th Iberian Vacuum Meeting, IVM-8 6th European Topical Conference on Hard Coatings, ETCHC-6, 20-24 September 2010, Salamanca, Spain. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X11000923>.
- [21] CHEW, A., BREWSTER, B., OLSEN, I. a ORMROD, S. Improvements in the performance of turbomolecular pumps. *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2011, sv. 23, č. 3, s. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.1002/vipr.201100458>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/vipr.201100458>.
- [22] DEJL, Z. *Konstrukce strojů a zařízení I. : spojovací části strojů : návrh, výpočet, konstrukce*. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-7225-018-3.
- [23] HENNING, H. Chapter 2.6 - Turbomolecular Pumps. In: HOFFMAN, D. M., SINGH, B., THOMAS, J. H. a THOMAS, J. H., ed. *Handbook of Vacuum Science and Technology*. San Diego: Academic Press, 1998, s. 183–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12352065-4/50056-0>. ISBN 978-0-12-352065-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123520654500560>.
- [24] HEO, J.-S. a HWANG, Y.-K. DSMC calculations of blade rows of a turbomolecular pump in the molecular and transition flow regions. *Vacuum*. 2000, sv. 56, č. 2, s. 133–142. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00181-5). ISSN 0042-207X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X99001815>.

- [25] HUCKNALL, D. a GOETZ, D. Turbomolecular pumps. *Vacuum*. 1987, sv. 37, č. 8, s. 615–620. DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(87\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0042-207X(87)90046-7). ISSN 0042-207X. Special Issue Modern Vacuum Practice. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042207X87900467>.
- [26] HUEBNER, K. H., DEWHIRST, D. L., SMITH, D. E. a BYROM, T. G. *The finite element method for engineers*. John Wiley & Sons, 2001.
- [27] INTRODUCTION. 1 - *Vacuum Techniques*. Oxford: Elsevier, 2008. 3-33 s. ISBN 978-0-08-044479-6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080444796500029>.
- [28] KHIZER, M., CHEN, J.-W., YANG, G.-W., WU, Q.-S., SONG, Y. et al. Seismic and stress qualification of LMFR fuel rod and simple method for the determination of LBE added mass effect. *Nuclear Science and Techniques*. Springer. 2020, sv. 31, č. 1, s. 5.
- [29] LEINVEBER, J. a VÁVRA, P. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Vydání šesté. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [30] LEITER, F. Molecular and Turbomolecular Pumps. In: *Handbook of Vacuum Technology*. John Wiley & Sons, Ltd, 2016, kap. 10, s. 419–462. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527688265.ch10>. ISBN 9783527688265. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527688265.ch10>.
- [31] MIČKAL, K. a KOLÁŘ, P. *Strojní montáže*. Vydání druhé. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN Neuvedeno.
- [32] SLAVÍČEK, P., ŠTĚPÁNKOVÁ, V. a KELAR, J. *Vakuová fyzika 1*. Vydání první. Brno: Masarykova univerzita, 2016 [Citováno 2024-02-19]. ISBN 978-80-210-8473-5. Dostupné z: [https://munishop.muni.cz/obchod/e-knihy-zdarma/vakuova-fyzika-1-munispace\\_855](https://munishop.muni.cz/obchod/e-knihy-zdarma/vakuova-fyzika-1-munispace_855).
- [33] SVOBODA, P. a BRANDEJS, J. *Základy konstruování*. Vydání osmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020. ISBN 978-80-7623-034-7.
- [34] VULLO, V. a VULLO, V. Thick-walled circular cylinders under internal and/or external pressure stressed in the linear elastic range. In: Springer, 2014, s. 73–108. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00690-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00690-1_4).
- [35] ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. a ZHU, J. Z. *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier, 2005.
- [36] ŠVEC, V. *Části a mechanismy strojů : spoje a části spojovací*. Vydání třetí. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1	T-Station nEXT 300T . . . . .	12
2	Schéma pohybu molekul. . . . .	13
3	Schéma vývěvy Leybold TURBOVAC 151. . . . .	13
4	Holweckův stupeň. . . . .	14
5	Siegbahnův stupeň. . . . .	15
6	Řez regenerativním stupněm. . . . .	15
7	Schéma regenerativního stupně. . . . .	16
8	Schéma suchoběžné spirálové vývěvy. . . . .	17
9	Schéma rotační lamelové vývěvy. . . . .	17
10	Schéma suchoběžné membránové vývěvy. . . . .	18
11	Řez vývěvou nEXT 300T. . . . .	18
12	Čerpací rychlosti vývěvy nEXT 300T. . . . .	19
13	Schéma lisovaného spoje. . . . .	20
14	Polohy tolerančních polí vzhledem k jmenovitému rozměru. . . . .	22
15	Výpočetní schéma lisovaného spoje. . . . .	23
16	Směry radiálního a tečného napětí. . . . .	24
17	Průběhy radiálních a tečných napětí. . . . .	25
18	Hranový styk. . . . .	25
19	Model turbomolekulárního stupně. . . . .	28
20	Graf deformační odezvy slitiny hliníku na vnější zatížení . . . . .	30
21	Graf deformační odezvy oceli na vnější zatížení. . . . .	31
22	Okótovaný řez kompletním rotorem. . . . .	32
23	Sít konečných kompletního rotoru. . . . .	33
24	Schéma detekční uzlové metody kontaktu. . . . .	34
25	Schéma oblast vyhodnocení kontaktu. . . . .	35
26	Schéma posunutí kontaktní plochy. . . . .	35
27	Použití Frictionless support. . . . .	35
28	Okótovaný řez polovinou lopatky. . . . .	37
29	Sít konečných prvků poloviny lopatky. . . . .	38
30	Použití symetrické vazby. . . . .	38

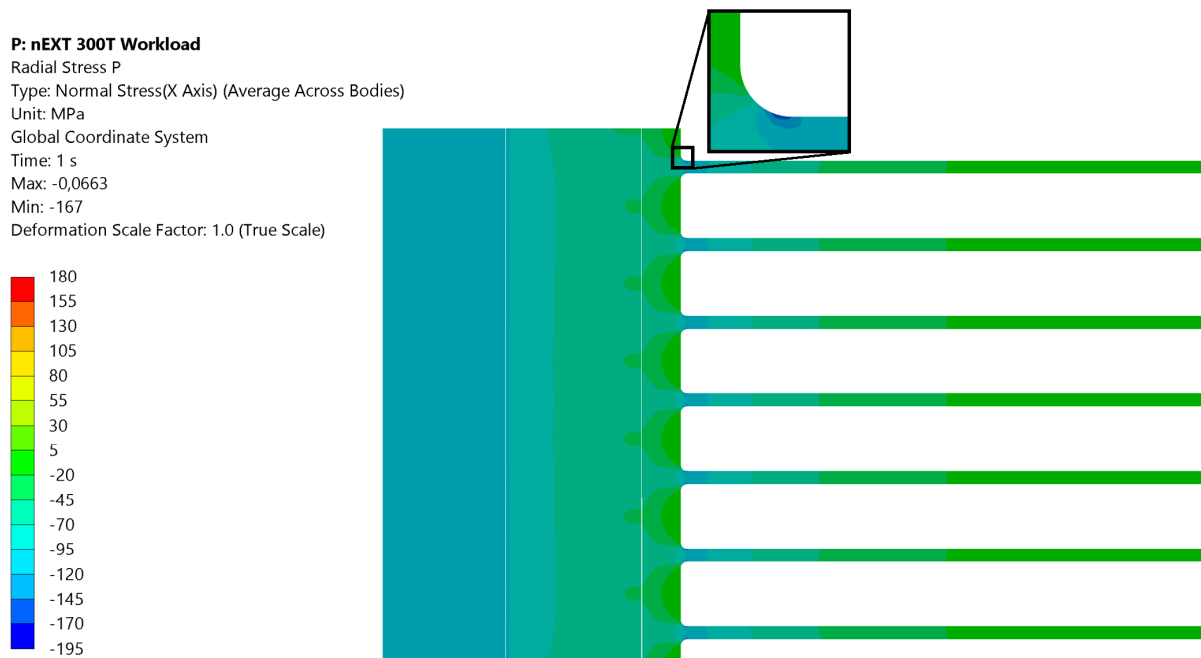
31	Průběhy kontaktní tlaků - aktuální způsob montáže. . . . .	40
32	Redukované napětí dle HMM po kompletaci - aktuální způsob montáže. . .	41
33	Redukované napětí dle HMM při pracovním zatížení - aktuální způsob montáže. . . . .	41
34	Ověření nalisovatelnosti - aktuální způsob montáže. . . . .	42
35	Deformovaný tvar - aktuální způsob montáže. . . . .	42
36	Průběhy kontaktních tlaků - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů. . . . .	43
37	Redukované napětí dle HMM po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů. . . . .	44
38	Redukované napětí dle HMM po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů. . . . .	44
39	Ověření nalisovatelnosti - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů. . . . .	45
40	Deformovaný tvar - optimalizovaný způsob montáže - minimální velikosti přesahů. . . . .	45
41	Průběhy kontaktní tlaků - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů. . . . .	46
42	Redukované napětí dle HMM po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů. . . . .	47
43	Redukované napětí dle HMM po kompletaci - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů. . . . .	47
44	Ověření nalisovatelnosti - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů. . . . .	48
45	Deformovaný tvar - optimalizovaný způsob montáže - maximální velikosti přesahů. . . . .	48
46	Odezvová plocha funkčních přesahů - provozní kontaktní tlak mezi lopatkovým diskem a dutou hřídelí. . . . .	49
47	Odezvová plocha funkčních přesahů - provozní kontaktní tlak mezi hřídelí a dutou hřídelí. . . . .	49
48	Radiální napětí po kompletaci. . . . .	57
49	Radiální napětí při provozním zatížení. . . . .	57
50	Tečné napětí po kompletaci. . . . .	58
51	Tečné napětí při provozním zatížení. . . . .	58
52	Osové napětí po kompletaci. . . . .	59
53	Osové napětí při provozním zatížení. . . . .	59

54	Radiální napětí po kompletaci - minimální přesahy. . . . .	60
55	Radiální napětí při provozním zatížení - minimální přesahy. . . . .	60
56	Radiální napětí po kompletaci - maximální přesahy. . . . .	61
57	Radiální napětí při provozním zatížení - maximální přesahy. . . . .	61
58	Tečné napětí po kompletaci - minimální přesahy. . . . .	62
59	Tečné napětí při provozním zatížení - minimální přesahy. . . . .	62
60	Tečné napětí po kompletaci - maximální přesahy. . . . .	63
61	Tečné napětí při provozním zatížení - maximální přesahy. . . . .	63
62	Osové napětí po kompletaci - minimální přesahy. . . . .	64
63	Osové napětí při provozním zatížení - minimální přesahy. . . . .	64
64	Osové napětí po kompletaci - maximální přesahy. . . . .	65
65	Osové napětí při provozním zatížení - maximální přesahy. . . . .	65

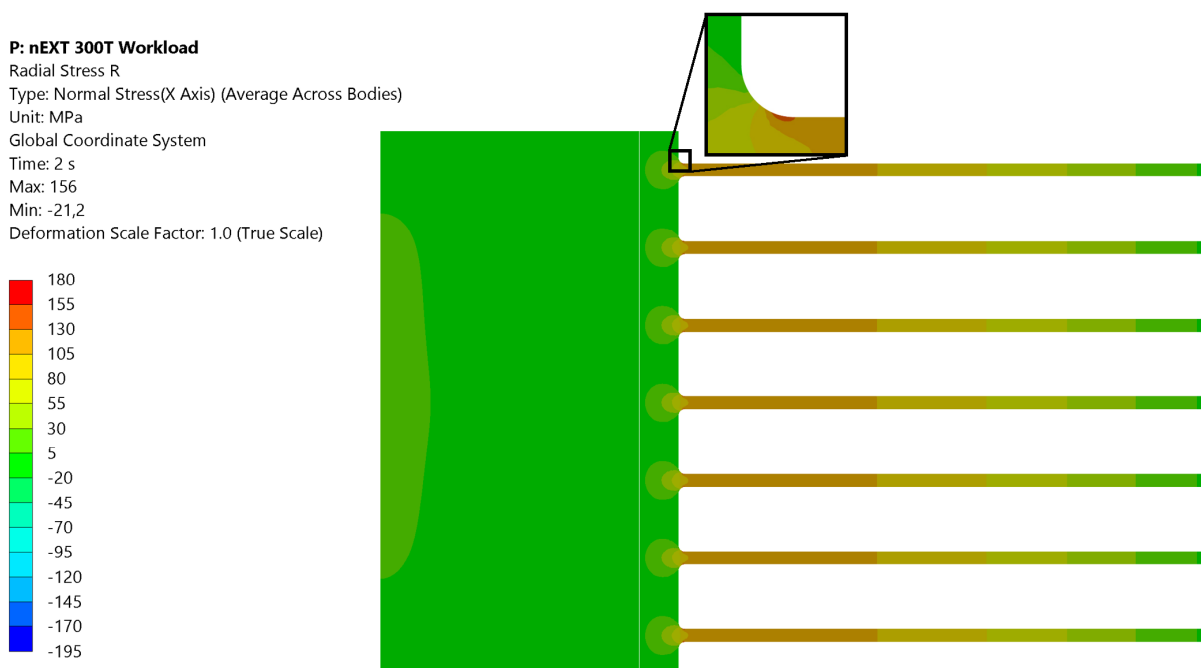


# A PŘÍLOHY - AKTUÁLNÍ ZPŮSOB KOMPLETACE

## A.1 Radiální napětí



Obrázek 48: Radiální napětí po kompletaci.



Obrázek 49: Radiální napětí při provozním zatížení.

## A.2 Tečné napětí

**P: nEXT 300T Workload**

Hoop Stress P

Type: Normal Stress(Z Axis) (Average Across Bodies)

Unit: MPa

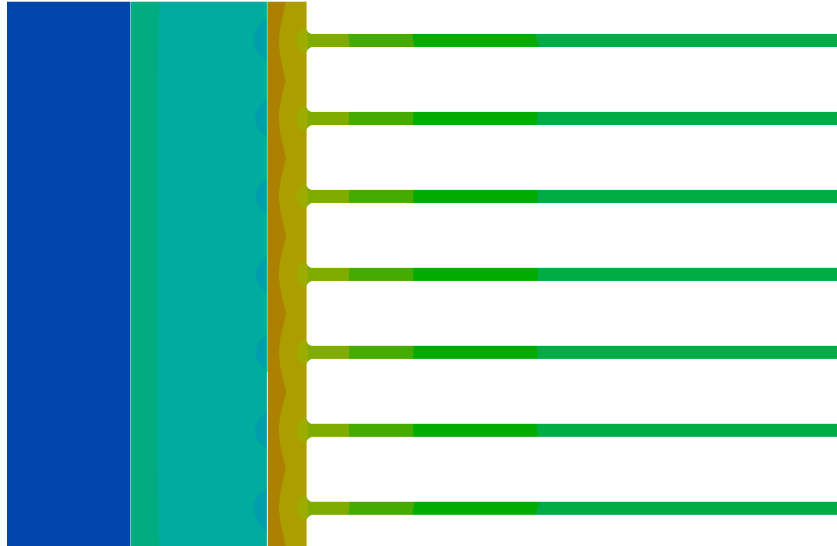
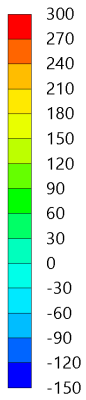
Global Coordinate System

Time: 1 s

Max: 230

Min: -107

Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)



Obrázek 50: Tečné napětí po kompletaci.

**P: nEXT 300T Workload**

Hoop Stress R

Type: Normal Stress(Z Axis) (Average Across Bodies)

Unit: MPa

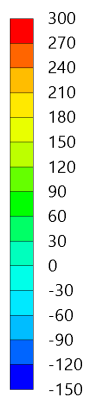
Global Coordinate System

Time: 2 s

Max: 270

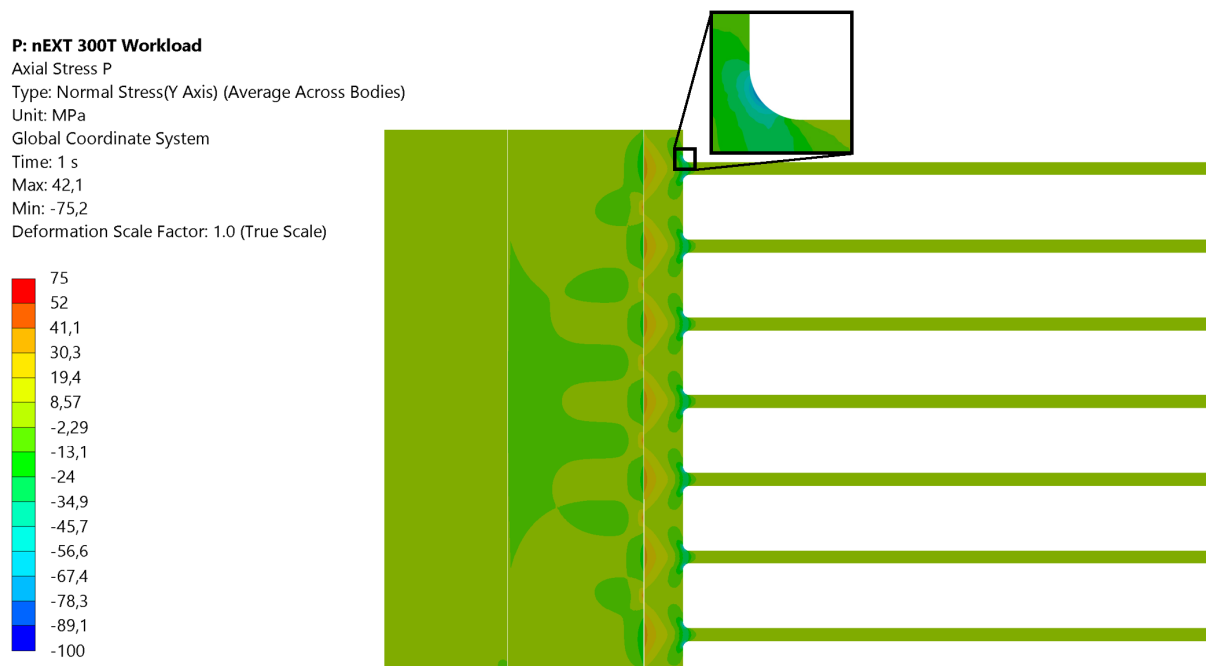
Min: -16,5

Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)

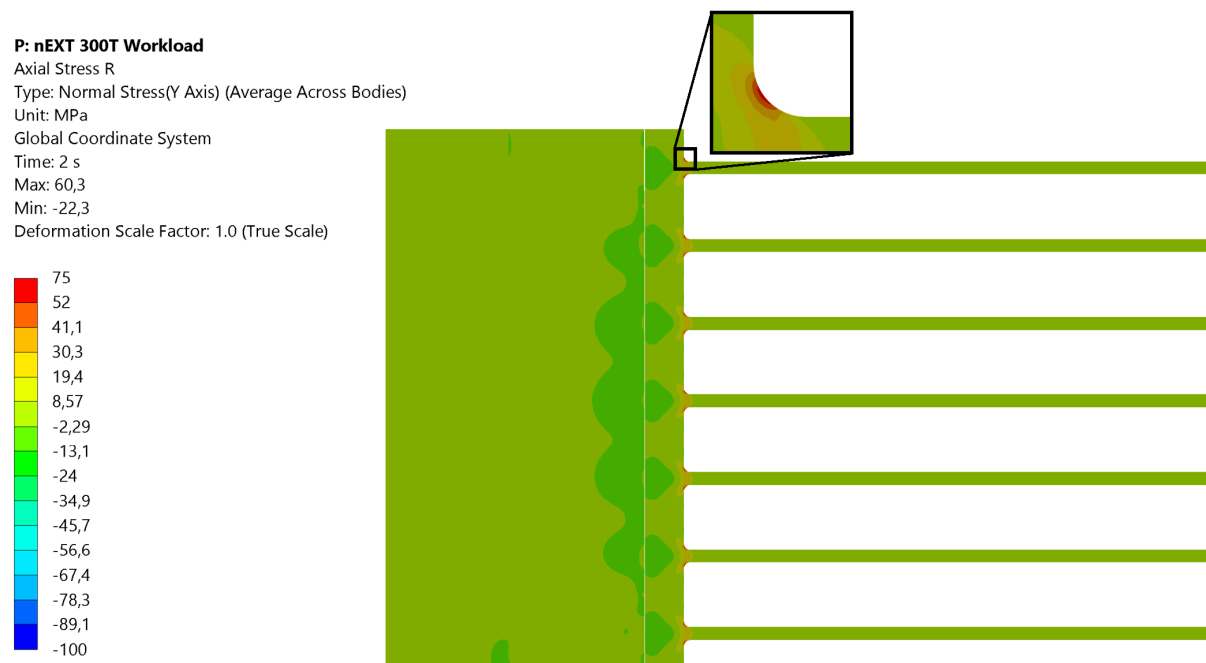


Obrázek 51: Tečné napětí při provozním zatížení.

### A.3 Osově napětí



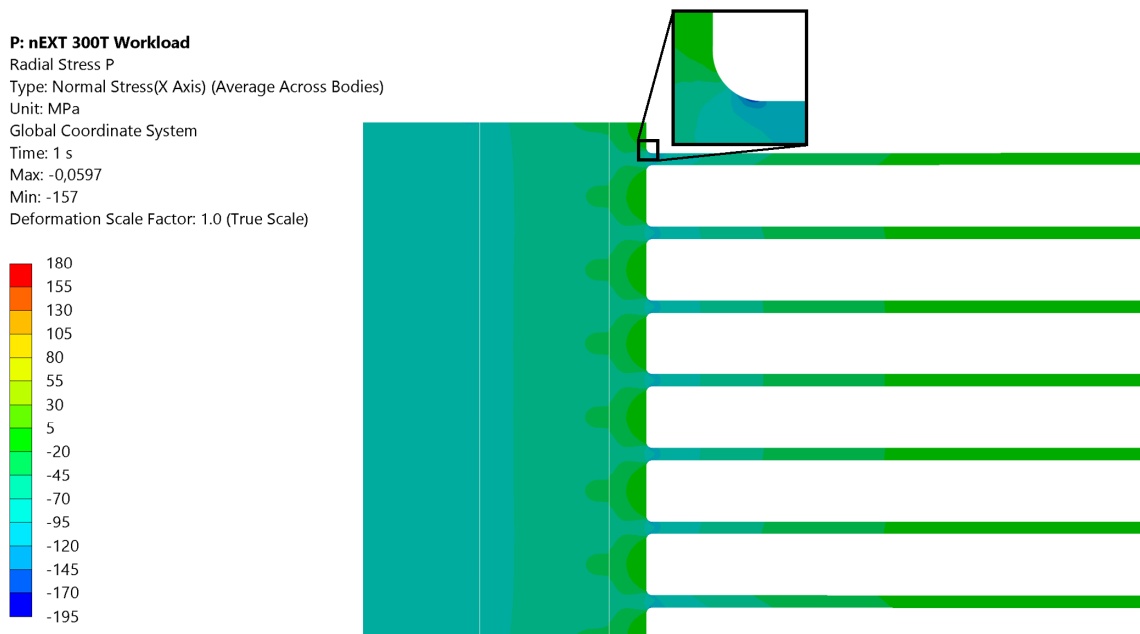
Obrázek 52: Osově napětí po kompletaci.



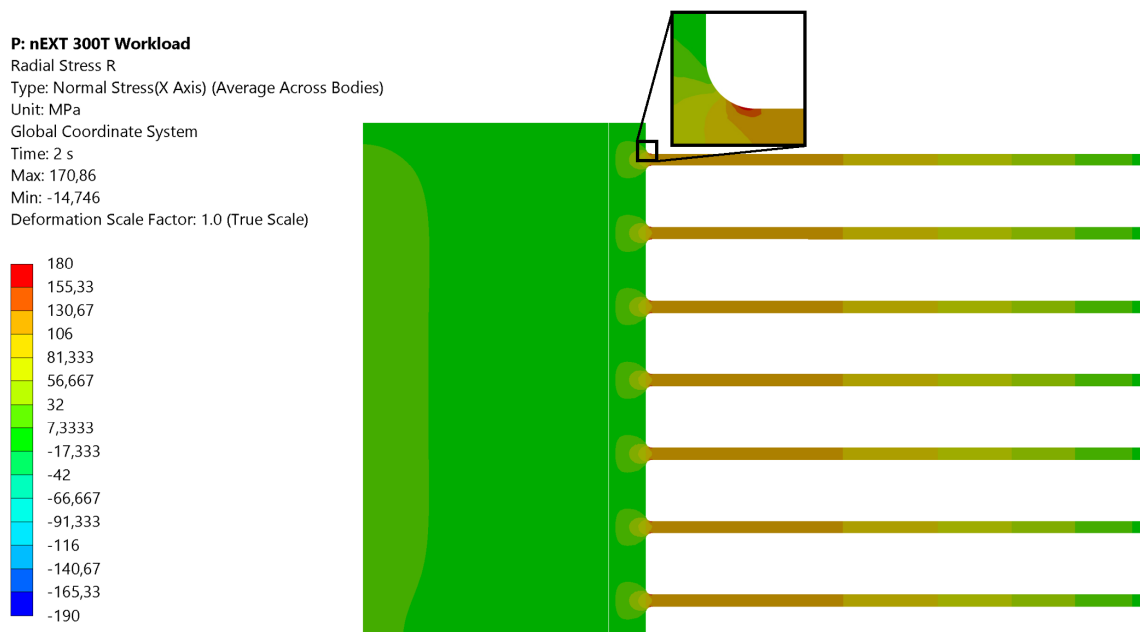
Obrázek 53: Osově napětí při provozním zatížení.

## B PŘÍLOHY - OPTIMALIZOVANÝ ZPŮSOB KOMPLETE- TACE

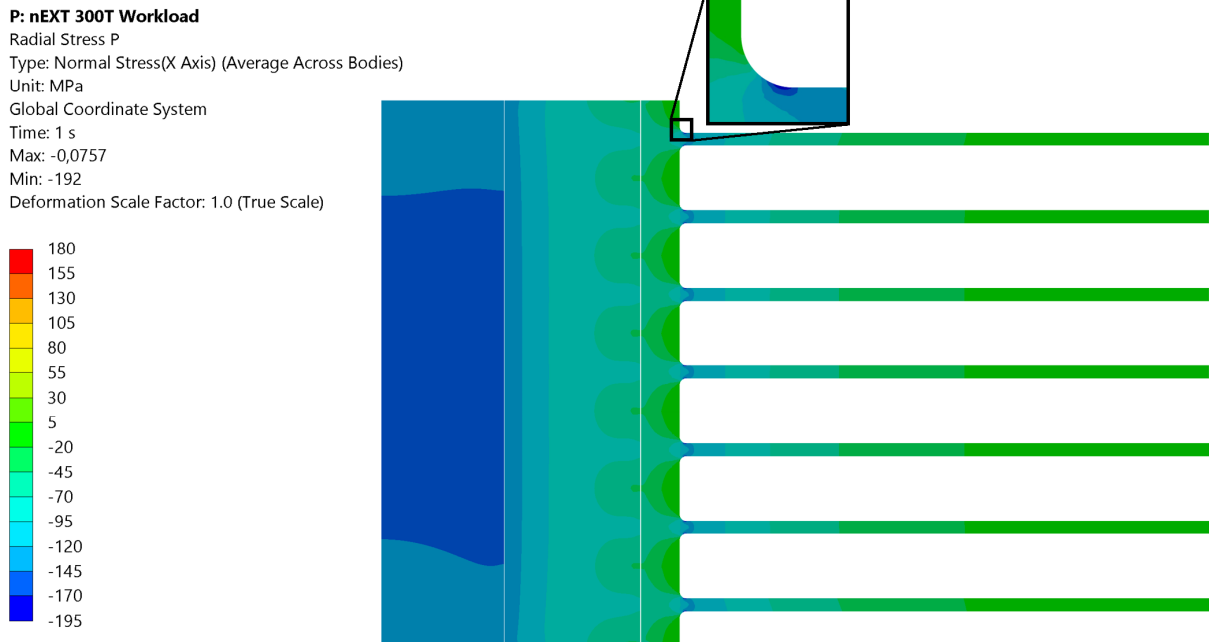
### B.1 Radiální napětí



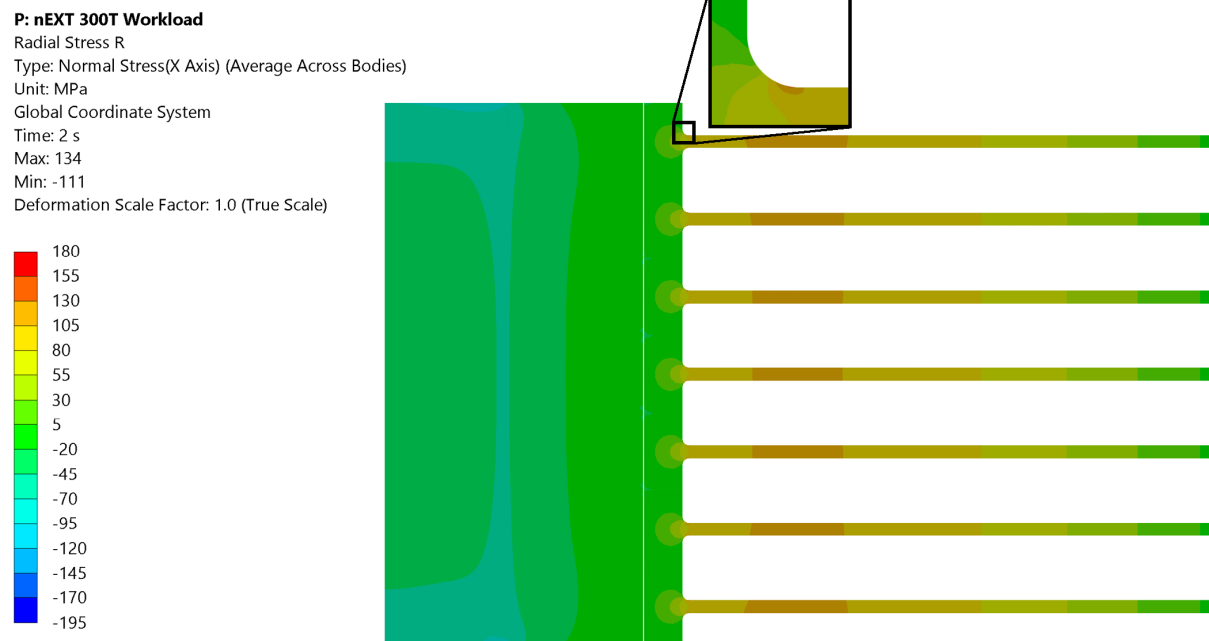
Obrázek 54: Radiální napětí po kompletaci - minimální přesahy.



Obrázek 55: Radiální napětí při provozním zatížení - minimální přesahy.

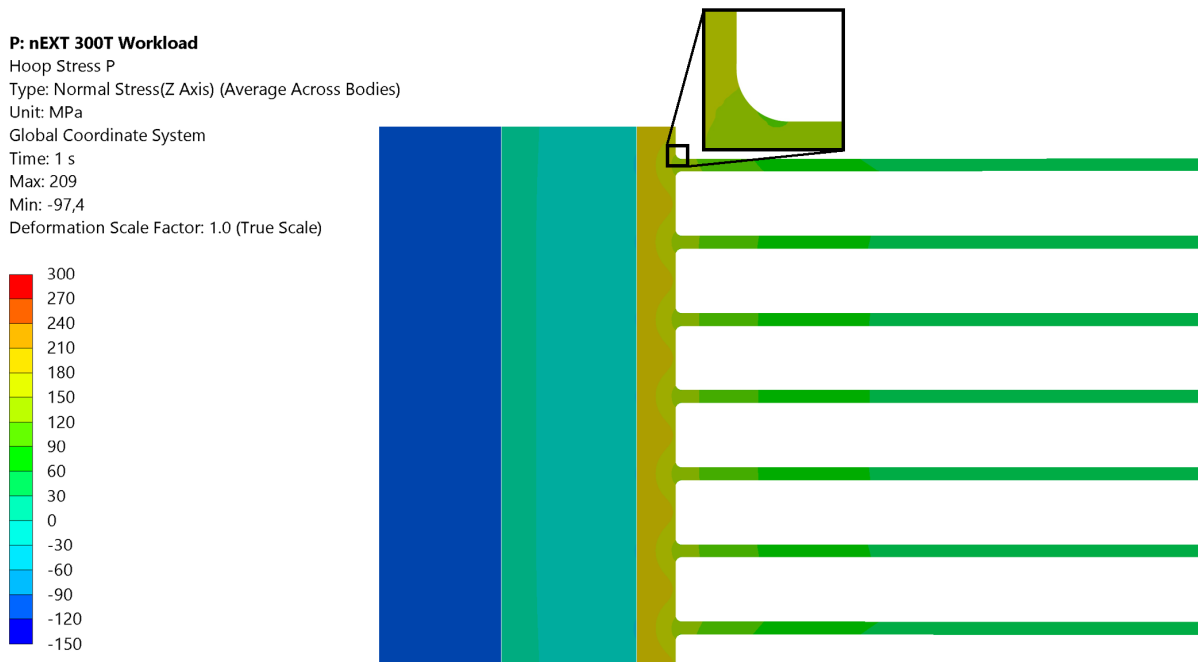


Obrázek 56: Radiální napětí po kompletaci - maximální přesahy.

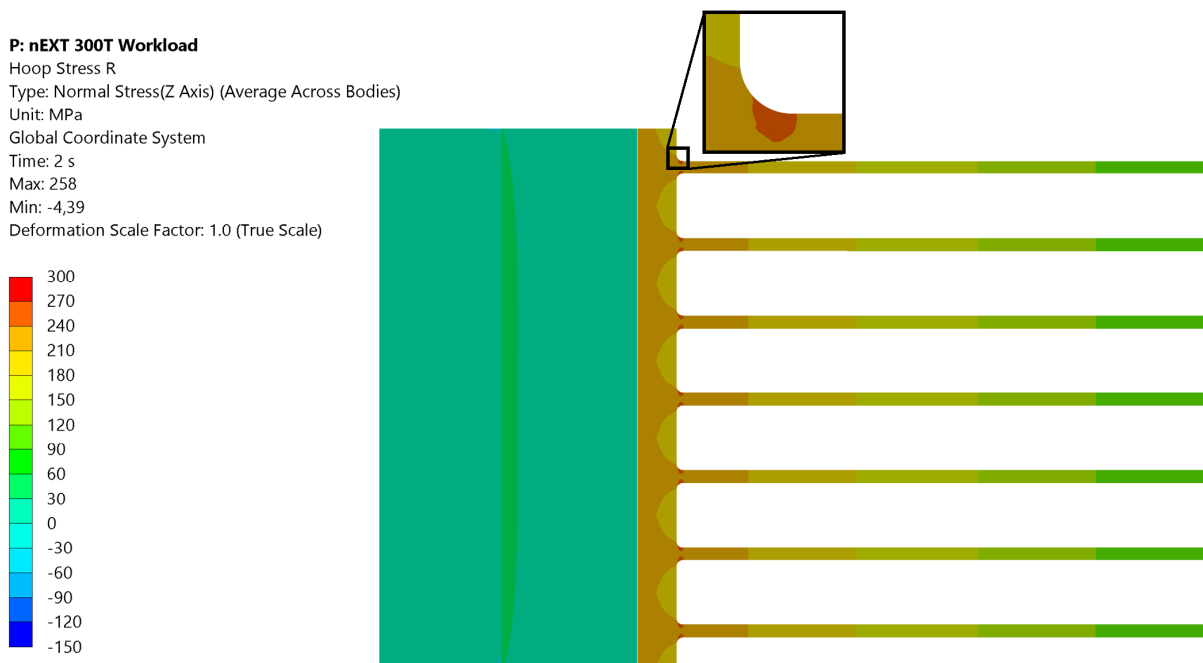


Obrázek 57: Radiální napětí při provozním zatížení - maximální přesahy.

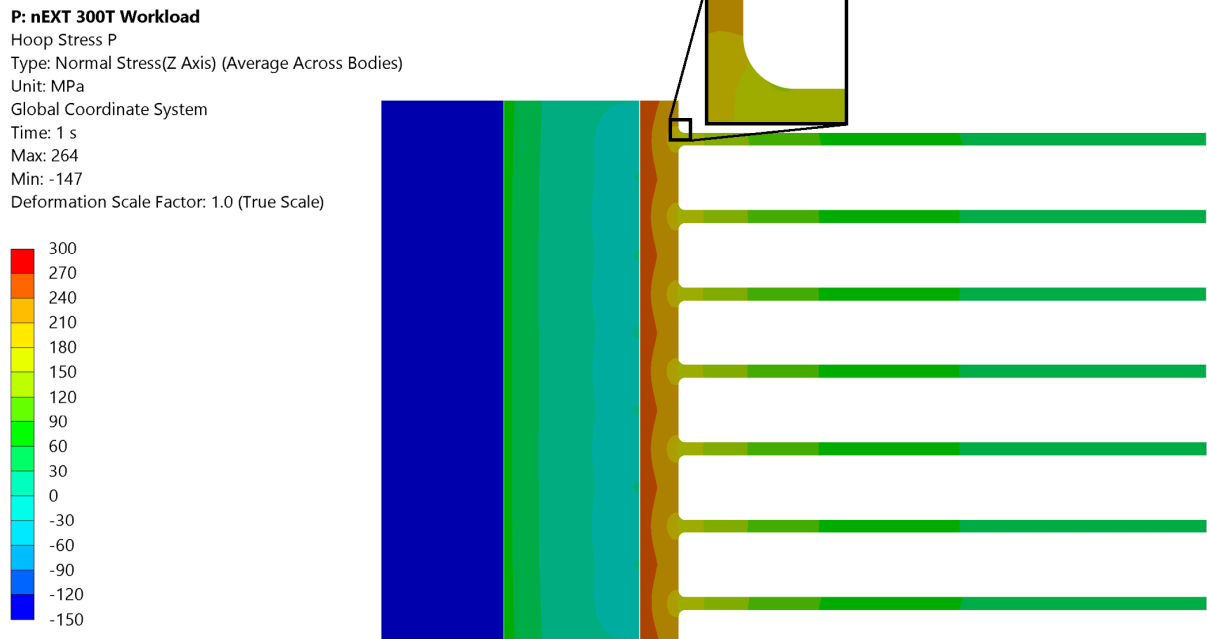
## B.2 Tečné napětí



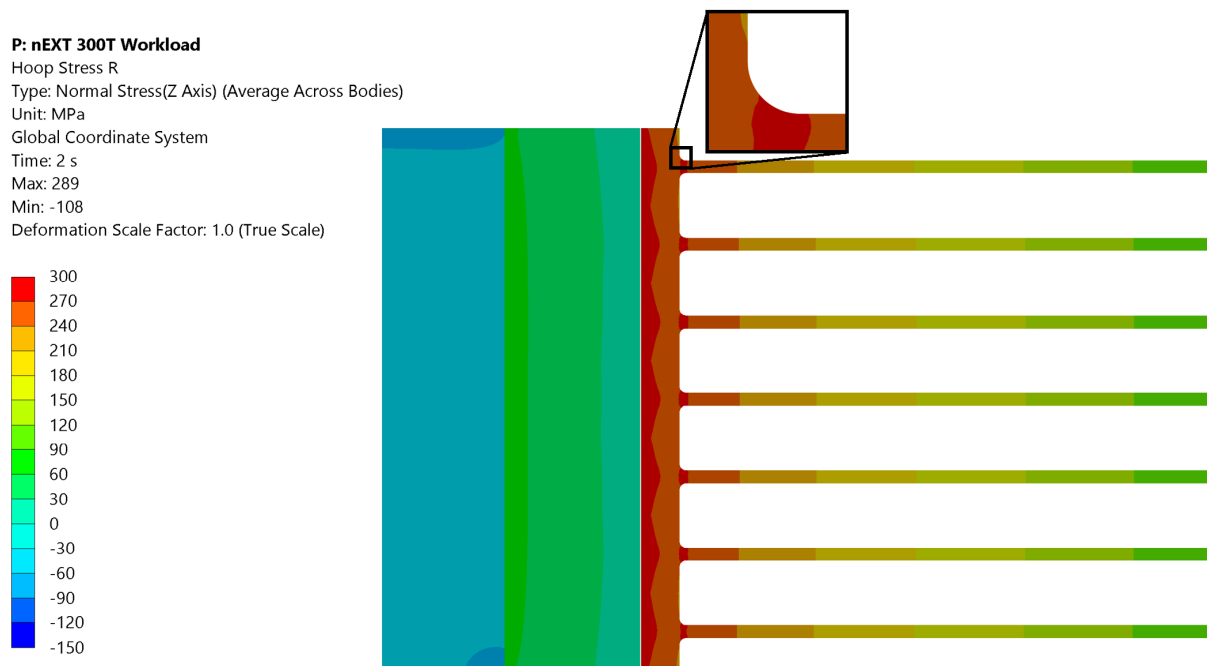
Obrázek 58: Tečné napětí po kompletaci - minimální přesahy.



Obrázek 59: Tečné napětí při provozním zatížení - minimální přesahy.

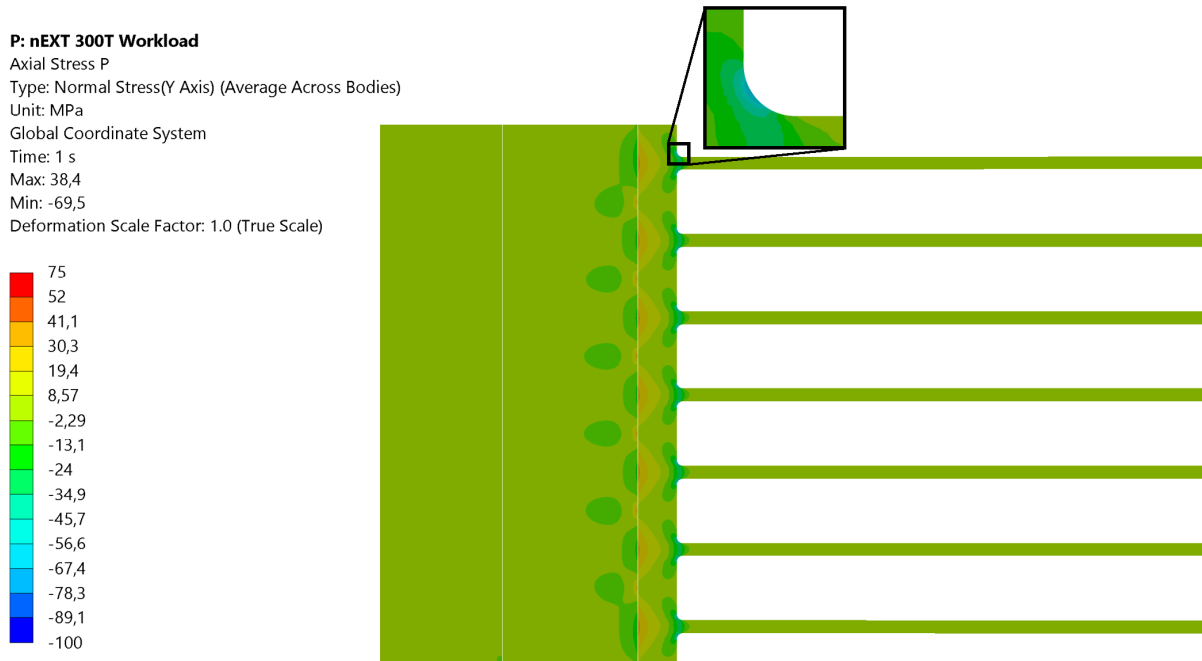


Obrázek 60: Tečné napětí po kompletaci - maximální přesahy.

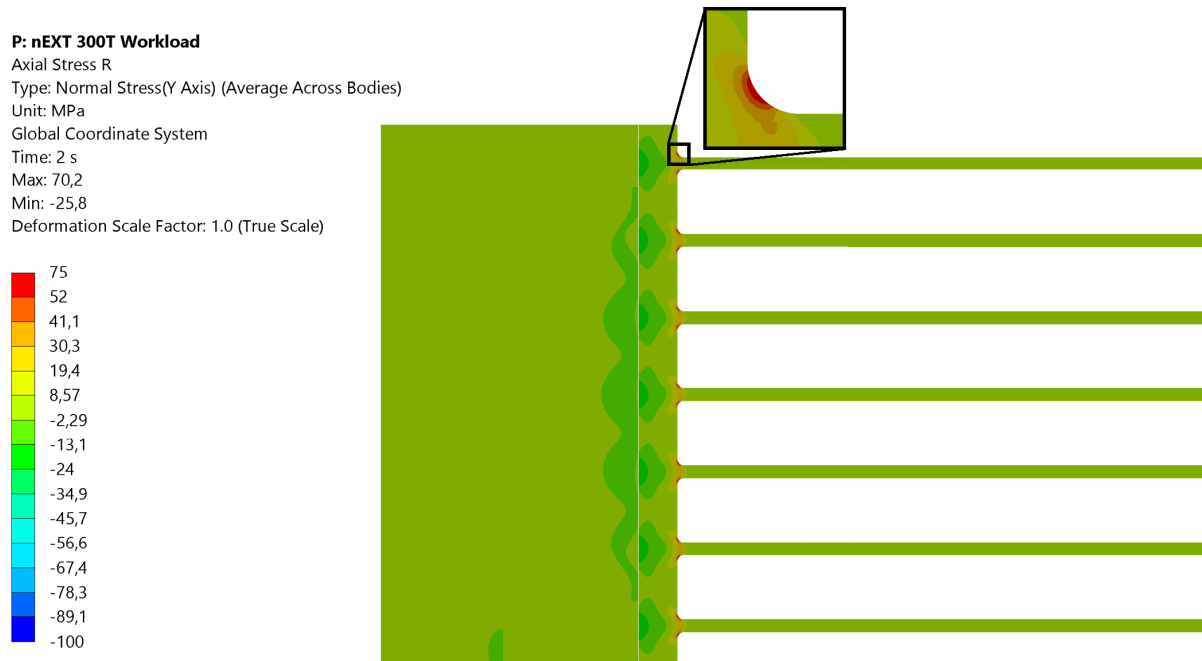


Obrázek 61: Tečné napětí při provozním zatížení - maximální přesahy.

### B.3 Osově napětí



Obrázek 62: Osově napětí po kompletaci - minimální přesahy.



Obrázek 63: Osově napětí při provozním zatížení - minimální přesahy.



**P: nEXT 300T Workload**

Axial Stress P

Type: Normal Stress(Y Axis) (Average Across Bodies)

Unit: MPa

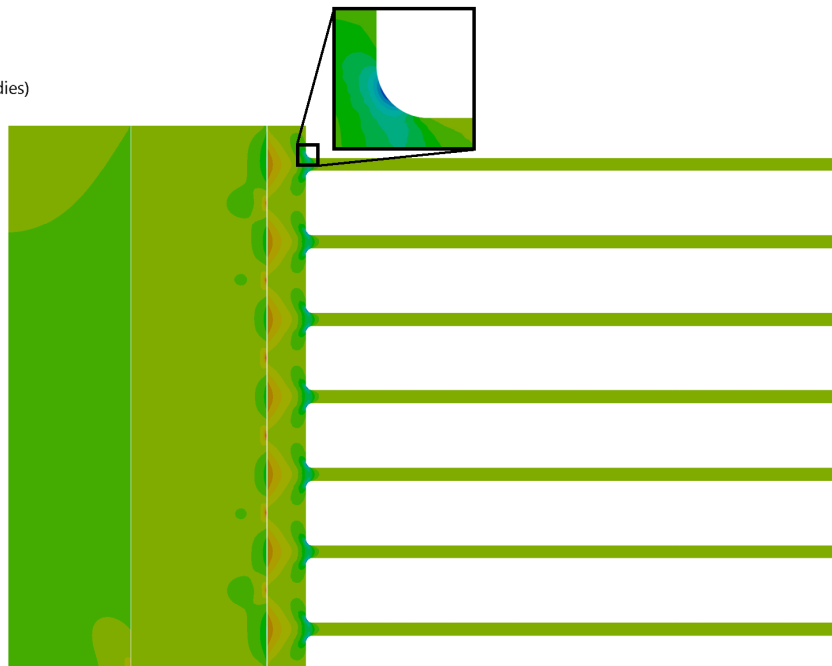
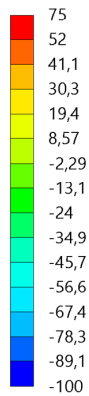
Global Coordinate System

Time: 1 s

Max: 49,7

Min: -85,9

Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)



Obrázek 64: Osově napětí po kompletaci - maximální přesahy.

**P: nEXT 300T Workload**

Axial Stress R

Type: Normal Stress(Y Axis) (Average Across Bodies)

Unit: MPa

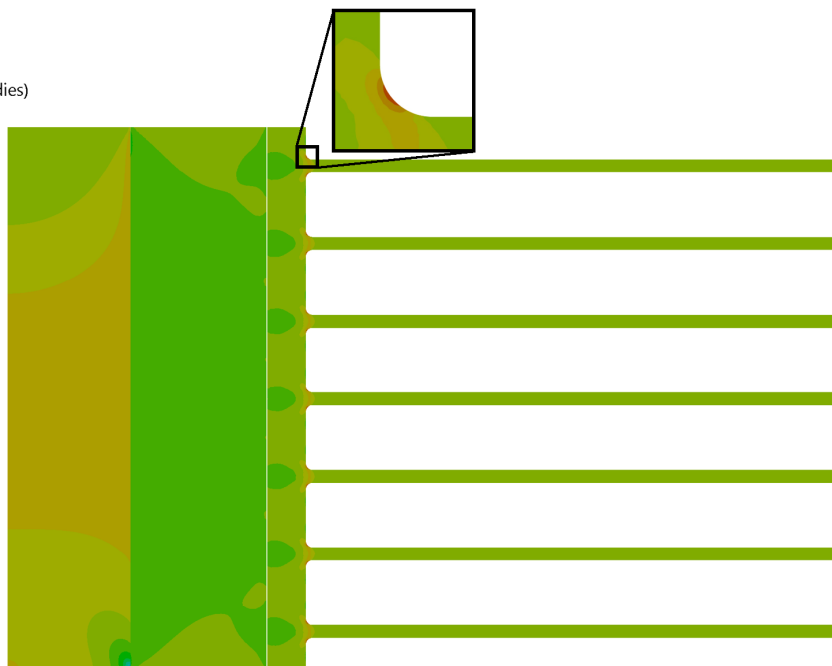
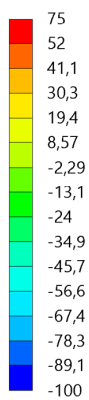
Global Coordinate System

Time: 2 s

Max: 49,6

Min: -97,4

Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)



Obrázek 65: Osově napětí při provozním zatížení - maximální přesahy.