VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

BAJONETOVÝ UZÁVĚR DVEŘÍ PŘETLAKOVÉ PECE

BAYONET DOOR OF PRESSURIZED FURNACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. KAREL BRADA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. FRANTIŠEK PROKEŠ
SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Karel Brada

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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 diplomové práce:

Bajonetový uzávěr dveří přetlakové pece

v anglickém jazyce:

Bayonet door of pressurized furnace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza a návrh řešení s těmito parametry:
Přetlak helia 15 bar, dveře, úhel otevření až 180°. Dveře jsou otočně (pootočení max. o 25°). Uzávěr bajonetový. Úhlové pootočení dveří do uzamčené polohy zajistí elektrický aktuátor uložený na rameni.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:
1.Úvod
2.Přehled současného stavu poznání
3.Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4.Vymezení cílů práce
5.Návrh metodického přístupu k řešení
6.Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7.Konstrukční řešení
8.Závěr (konstrukční, technologický rozbor řešení)
Forma diplomové práce: průvodní zpráva, technická dokumentace, výpočty
Typ práce: konstrukční
Účel práce: pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

www
normy ČSN, ISO

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Prokeš

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

V diplomové práci je popsán konstrukční návrh víka přetlakové pece pro kalení do helia. Na základě rešeršní činnosti byly zhodnoceny různé varianty řešení. Výpočty byly prováděny s ohledem na pevnostní požadavky vyplývající z technologie kalení inertním plynem. V závěru práce je popsán postup montáže a hrubý odhad výrobní ceny. Součástí diplomové práce je i 3D model a výkresová dokumentace.

Klíčová slova: Vakuum, Kalení do přetlaku plynu, Bajonetový uzávěr

ABSTRACT

In this master's thesis a design of door for helium quenching furnace is described. Based on background research, several options for the design have been compared. All calculations were carried out based on structural needs resulting from high pressure gas quenching technology. By the ending of this thesis a mounting procedure and rough cost price estimation is described. Part of master's thesis is also a virtual 3D prototype and a drawing documentation.

Key words: Vacuum, High pressure gas quenching, Bayonet mount

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRADA, K.: *Bajonetový uzávěr dveří přetlakové pece*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Prokeš

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval a napsal samostatně pod vedením Ing. Františka Prokeše a Ing. Jiřího Kozáka (Termobit) a veškerou použitou odbornou literaturu jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 23. 5. 2011

.....
Bc. Karel Brada

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Prokešovi a Ing. Jiřímu Kozákovi z firmy Termobit za odborné vedení a veškerou pomoc při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě při psaní diplomové práce a v průběhu studia podporovali.

OBSAH

ÚVOD **13**
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ **14**
1.1 Kalení do přetlaku inertního plynu 14
1.2 Kalení do helia 14
1.3 Shrnutí výhod 15
1.4 Konstrukce kalící pece 16
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA **20**
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE **21**
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ **22**
4.1 Rešeršní činnost 22
4.2 Volba optimální varianty pece 22
4.3 Konstrukční uspořádání víka 22
4.4 Výpočtová činnost 22
4.5 Konstrukční řešení 22
4.6 Software 22
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY **23**
5.1 Pec 23
5.1.1 Druh pece 23
5.1.2 Kalící plyn 24
5.1.3 Teplota a tlak 24
5.2 Víko 24
5.2.1 Materiál 24
5.2.2 Tvar 25
5.2.3 Druh uzamykání 25
5.2.4 Způsob uzamykání 26
5.2.5 Pohonná jednotka uzamykající víko 28
5.2.6 Těsnění 29
5.2.7 Druh chlazení 30
5.2.8 Příruba víka 31
5.2.9 Tepelná izolace 32
5.2.10 Upevnění víka na rameni 33
5.2.11 Průhledítko 35
5.2.12 Další konstrukční prvky 35
5.3 Nosné rameno 37
5.3.1 Polotovar 37
5.3.2 Tvar 37
5.3.3 Zavěšení ramena na peci 38
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ **39**
6.1 Výpočty 39
6.1.1 Tloušťka stěny 39
6.1.2 Návrh bajonetových zámků 42
6.1.3 Návrh příruby 43
6.1.4 Centrální čep 45
6.1.5 Nosné rameno 49
6.1.6 Aktuátor 52

6.1.7 Průchozí čep 58
6.1.8 Uchycení na peci 60
6.2 Sestavení 60
6.3 Výrobní a montážní postup 62
6.4 Odhad výrobní ceny 64
7 ZÁVĚR – KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ 66
7.1 Konstrukční rozbor 66
7.2 Technologický rozbor 66
7.3 Ekonomický rozbor 67
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 68
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 70
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 71
11 SEZNAM TABULEK 73
12 SEZNAM PŘÍLOH 74

ÚVOD

Kalení do helia je moderním druhem tepelného zpracování, který využívá vysoké tepelné vodivosti zmíněného inertního plynu. Austenitizace probíhá ve vakuu, aby nebyl povrch kalené součásti zoxidován atmosférickým kyslíkem. Kalící účinnost je navyšována pohybem plynu a navýšením tlaku. Součásti kalené tímto způsobem se vykazují vynikajícím stavem povrchu, který nevyžaduje další úpravy a mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s kalením do oleje. Souhrnně se tato technologie označuje jako *High pressure gas quenching* (HPGQ).

Diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou Termobit, která se zabývá nejen výrobou zařízení na tepelné zpracování kovů. Novým produktem v této oblasti má být jednokomorová kalící pec, která bude využívat výše zmíněnou technologii.

Pec sestává z několika konstrukčních celků. Cílem diplomové práce bylo vytvořit konstrukční návrh víka, jakožto první části, na kterou bude navazovat tělo pece s izolací, výměníkem tepla, pohonem ventilátoru a dalšími prvky.

Diplomová práce je zaměřená především na mechanickou stránku problému. Konkrétní volba koncových spínačů či rozvod chladící kapaliny od víka nebylo předmětem řešení této práce.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Kalení do přetlaku inertního plynu

Kalení je způsob tepelného zpracování, jehož cílem je dosažení nerovnovážného stavu oceli [1]. Většinou je cílem kalení zajistit vznik martenzitické struktury pomocí ohřátí součástí nad austenitizační teplotu a následným prudkým ochlazením.

Zatímco obvykle je kalícím prostředím voda nebo olej, od přelomu 70. a 80. let minulého století se začíná využívat jako kalící prostředí inertní plyn, většinou dusík [2, 3]. Austenitizace v takovém případě probíhá prakticky výlučně ve vakuu. Hlavní výhodou ohřevu ve vakuu a použití inertního plynu jako kalícího média je nepřítomnost kyslíku, čímž je zamezeno oxidaci.

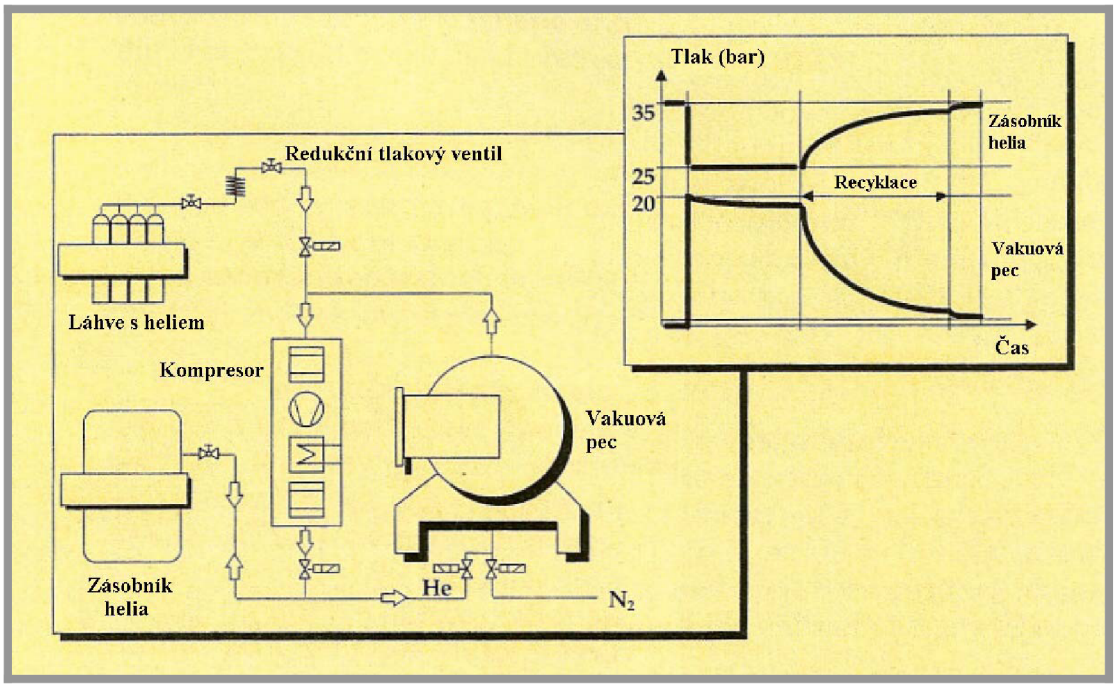
Ochlazovací účinnost, která má vliv na výslednou strukturu v materiálu je u plynů závislá především na jejich tepelné vodivosti. Z tohoto důvodu se kromě levnějšího dusíku s vodivostí λ = 0,026 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, používá i dražší helium s vodivostí λ = 0,150 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$[4].

Dříve se používal také argon, který je však drahý a méně účinný než dusík. Vodík, který má naopak vyšší tepelnou vodivost než helium se pro tyto aplikace nepoužívá kvůli své výbušnosti a schopnosti jeho malých atomů projít stěnou nádoby.

Ochlazovací účinnost závisí i na dalších faktorech nesouvisejících s druhem plynu, ale konstrukcí pece. Největší význam mají přitom tlak kalícího plynu a jeho rychlost [3]. Přestože se studie Pritcharda [3] a Toniniho [5] shodly na tom, že není ekonomické zvyšovat tlak plynu nad 5, resp. 6 bar, protože je nárůst ochlazovací účinnosti nad těmito hodnotami malý, běžně se používá tlak nad 15 bar. V práci Minarskiho a kolektivu [4] byl například poznat velký rozdíl v ochlazovací účinnosti při navýšení tlaku z 10 na 20 bar. Levnější alternativu za helium se snažil najít Stratton [6], který porovnával vliv obsahu vodíku ve směsi vodíku a dusíku. Přestože i 5% vodíku v této směsi má určitý vliv na ochlazovací účinnost, pro obdobnou účinnost, jako má helium, by bylo za potřebí alespoň 25%. Limitní množství je ale pouze 5,7%, neboť nad touto hranicí je směs výbušná.

1.2 Kalení do helia

Kalení do helia je relativně nová technologie, která vychází z kalení do dusíku. Oproti dusíku má helium vyšší tepelnou vodivost (jak je popsáno výše) a nižší hustotu. Ta usnadňuje jeho cirkulaci v peci a při stejném výkonu motoru ventilátoru je možno dosáhnout vyšších rychlostí proudění. Hlavní nevýhodou helia je cena. Jeden cyklus kalení je za normálních okolností až 30x dražší oproti dusíku [3].



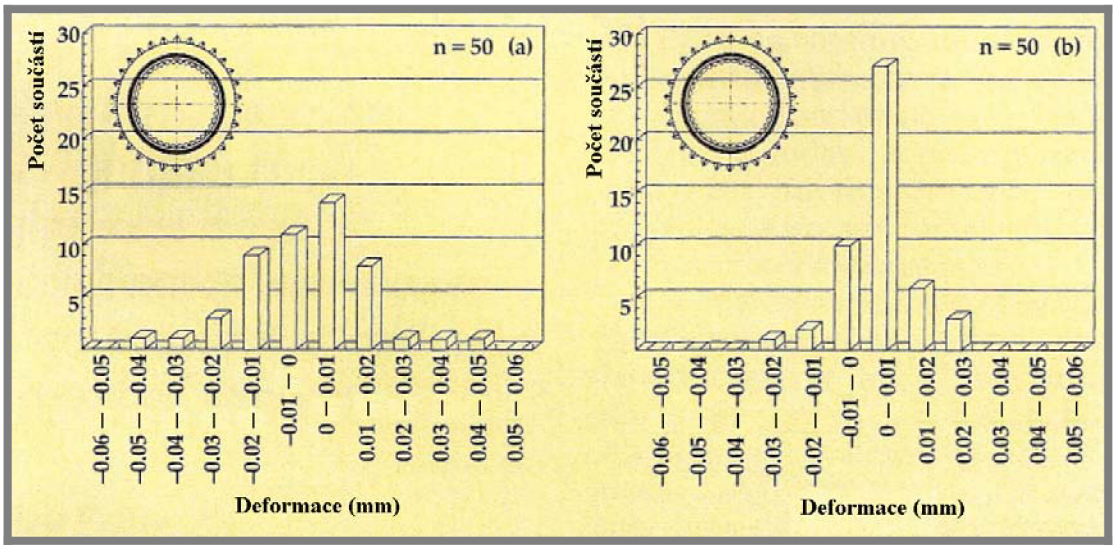
Obr. 1 Recyklační systém helia pro použití při HPGQ [4]

Kvůli tomuto faktu byl vyvinut systém recyklace helia (obr. 1) [4]. To se tedy narozdíl od dusíku, který je po pracovním cyklu vypuštěn do atmosféry, natlakuje zpět do akumulační nádoby [4]. Průběh vývoje tlaku během pracovního cyklu vakuové pece je rovněž znázorněn na obr. 1. Tímto způsobem lze získat zpět až 99,5% He během jednoho cyklu kalení, což výrazně zvyšuje efektivitu použití tohoto plynu [7].

1.3 Shrnutí výhod

Přestože je kalení do vody zcela nejefektivnějším způsobem ochlazování austenitizovaných součástí a kalení do oleje je stále v mnoha případech efektivnější než ochlazování pomocí plynů, má technologie HPGQ mnoho nesporných výhod.

Mezi tyto výhody patří především vysoká kvalita povrchů s minimálními deformacemi a rovnoměrnými vlastnostmi. Tyto povrchy jsou navíc suché a čisté a není potřeba je dále čistit či jinak upravovat [2]. Kapalná média obecně prodělávají během kalení fázové změny, které mají negativní dopad na rovnoměrnost ochlazování. Inertní plyny jsou naopak stabilní během celého procesu a navíc chrání povrch součástí před oxidací [4].



Obr. 2 Srovnání deformací při kalení do oleje (a) a do inertního plynu (b) [4]

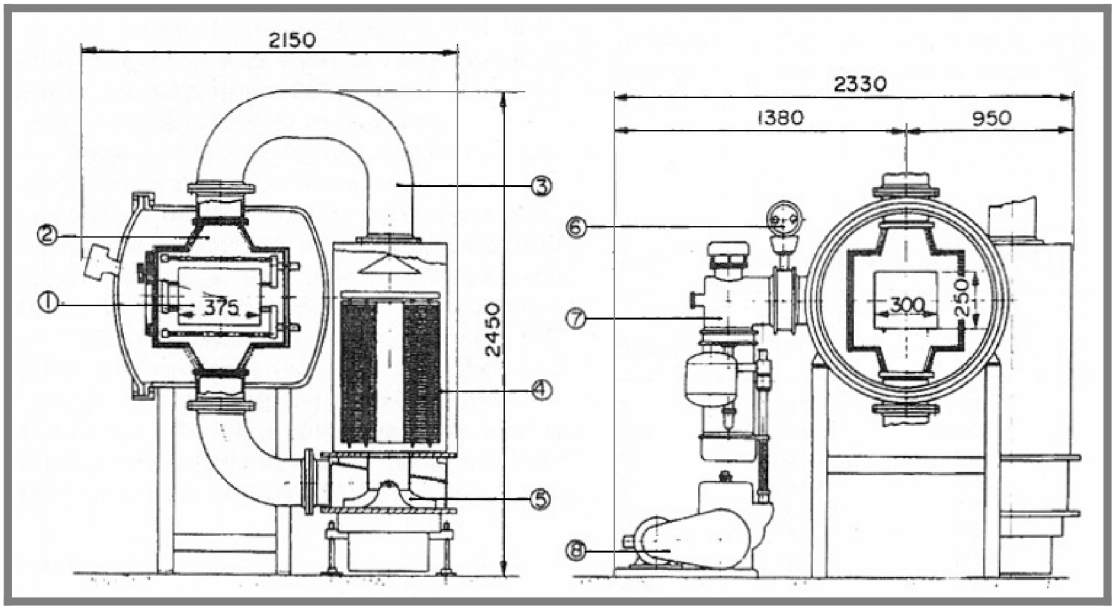
V práci Petera Minarskiho [4] se objevuje kompletní srovnání výhod při použití oleje nebo plynu. Technologie HPGQ je podle této práce lepší v kategoriích rovnoměrnost ochlazování, kontrolovatelnost procesu, deformace součástí (obr. 2), zbytková napětí, stabilita kalícího média, údržba kalícího média, zdravotní a bezpečnostní rizika, dopad na životní prostředí a náklady na provoz. Horší vlastnosti než kalení do oleje má tato technologie v kategoriích intenzita ochlazování a náklady na pořízení pece. Podle Koreckiho a kol. [8] (podpořeno srovnáním koeficientu přestupu tepla a výsledných tvrdostí) je již navíc možno dostupnými technologiemi kalit pomocí plynů minimálně se srovnatelnou intenzitou jako u oleje.

1.4 Konstrukce kalící pece

Pece pro kalení za použití vysokého tlaku inertního plynu se používají asi 30 let. Jejich konstrukce se může lišit v závislosti na typu zvoleného kalícího plynu, tlaku, kterému musí odolat a také na dalších faktorech, jako je výkon ventilátoru či kapacita výměníku tepla [3]. Tyto aspekty jsou poté promítnuty na komplikovanosti konstrukce a výrobních nákladech.

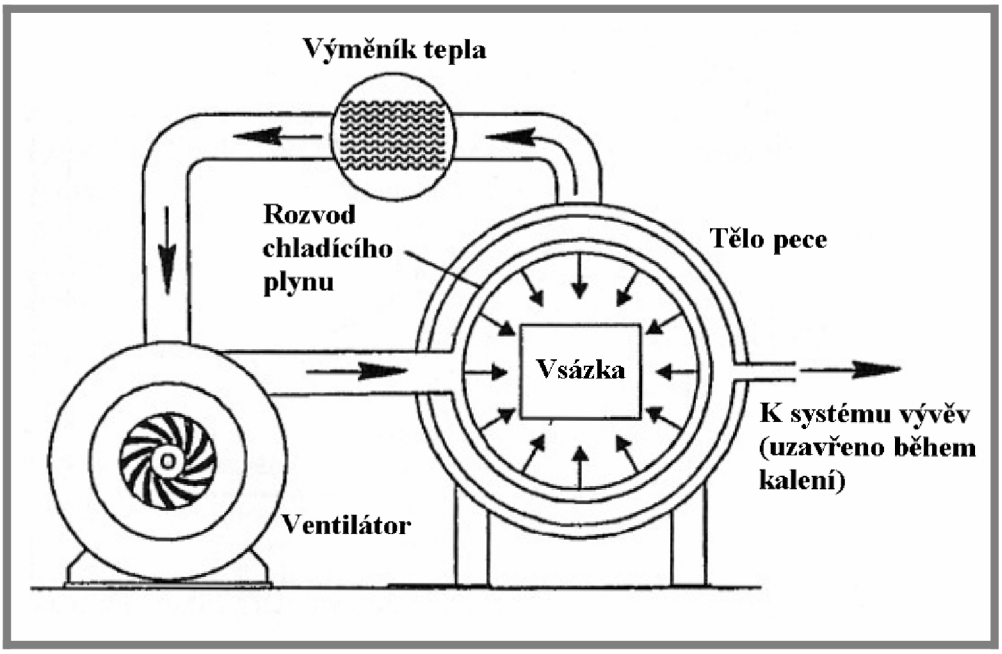
Základní prvky se rovněž za posledních 30 let nezměnily. Mezi tyto prvky patří samotné tělo pece, vývěvy pro dosažení vysokého vakua, topná tělesa, zařízení pro přívod a distribuci inertního kalícího plynu, systém ochlazování tohoto plynu a řídicí panel [2].

Schéma jedné z nejstarších pecí tohoto druhu je na obr. 3, kde: 1 je vsázka, 2 – prostor pro ohřev, 3 – potrubí, 4 – výměník tepla, 5 – ventilátor, 6 – ventil, 7 – difúzní vývěva, 8 – mechanická vývěva.



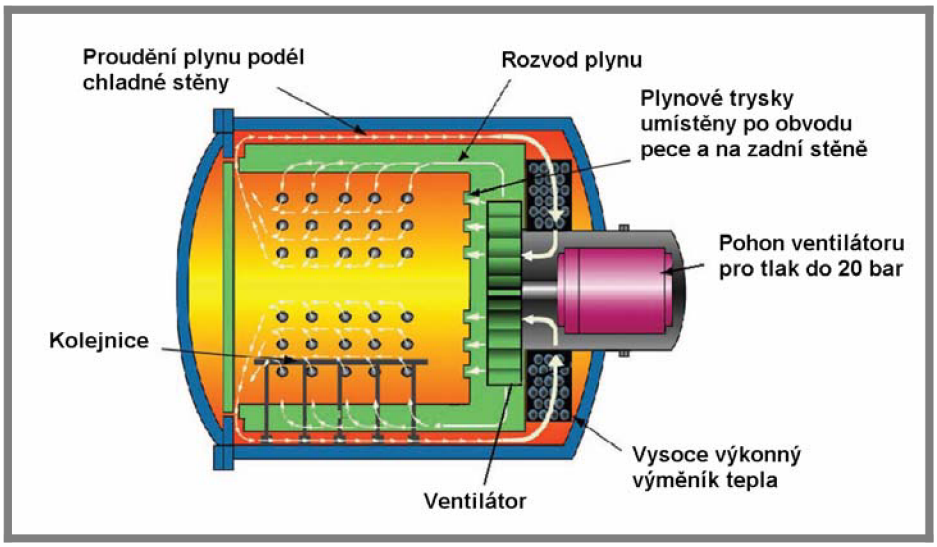
Obr. 3 Diagram kalící pece [5]

Každá takováto pec je vybavena chladící smyčkou (obr. 4 a 5), která sestává z ventilátoru, výměníku tepla a rozvodem chladícího plynu pro rovnoměrné ochlazování vsázky [3].



Obr. 4 Diagram vnější chladící smyčky [3]

V novějších provedeních se chladící smyčka objevuje uvnitř vlastní nádoby pece. Plyn se částečně ochladí o stěnu pece, když se kolem ní vrací zpět k ventilátoru. Před ním je ještě umístěn vysoce výkonný výměník tepla. Toto opatření umožňuje výrazně zredukovat rozměry celého kalícího zařízení. Příklad použití vnitřní chladící smyčky je na obr. 5.



Obr. 5 Diagram vnitřní chladící smyčky [9]

V běžném pracovním cyklu je vsázka umístěna do pece a je spuštěn systém vývěv k odsání vzduchu [3]. Je nezbytné snížit tlak pod hranici 13 Pa, aby nedošlo ke zoxidování součástí působením atmosférického kyslíku. Hodnoty absolutního tlaku se běžně pohybují okolo 0,1 až 1 Pa (např. [8]). Vsázka se následně ohřeje (pomocí grafitových topných těles [5]) až na austenitizační teplotu (v závislosti na materiálu 800 - 1300°C i víc). Ohřev probíhá určitou dobu v závislosti na prováděné operaci a velikosti součástí. Na konci tohoto časového úseku je uzavřen ventil, aby oddělil systém vývěv od ohřívací komory pece. Ta je poté natlakována ochlazovacím plynem. Následně je spuštěn ventilátor, který žene plyn skrz rozvod a trysky až ke kaleným součástem. Rychlost plynu a tím i ochlazovací účinnost závisí z velké části na výkonu motoru a kapacitě ventilátoru. Horký plyn následně míří do výměníku tepla, kde je ochlazen, aby mohl v cirkulaci pokračovat. Po skončení kalení je plyn natlakován zpět do zásobníku.

Pec musí být navržena tak, aby výše zmíněným podmínkám odolala. Tělo pece bývá mnohdy vyrobeno z konstrukční oceli (např. 11 416) o dostatečné tloušťce stěny, aby odolala jak přetlaku při kalení, tak i degradaci materiálu způsobenou stykem s chladící vodou. Rez poté znehodnocuje prakticky vše, co je spojeno s chladícím okruhem pro pec samotnou. Z hlediska údržby zařízení je tedy vhodné, aby stěna pece byla vyrobena z oceli nerezové a nikoli konstrukční.

Další prostředek pro ochranu stěny před vysokými teplotami v peci během austenitizace je tepelná izolace. Ta je složena z několika vrstev. Tyto vrstvy jsou tvořeny obvykle grafitovými materiály [10] (teplota tání cca 3500°C [11]) a odolnými kovy, např. Molybdenem [12] (teplota tání přes 2600°C [11]). Vnitřní části (včetně žhavících elementů[5], [12]) bývají rovněž z výše uvedených materiálů.

Pohled na vnitřní strukturu kalící pece je na obr. 6. Zde jsou topná tělesa v podobě zakřivených pásů po obvodu. Mezi nimi se nachází průduchy pro přívod plynu. Vsázka se umístí na 2 horizontální kolejnice z molybdenu, aby nedošlo ke kontaktu mezi výrobkem a topným tělesem. V závislosti na velikosti pece mohou být topná tělesa a průduchy pro přívod plynu umístěny i na čelech vnitřní válcové nádoby.

Obr. 6 Pohled na vnitřek kalící pece [12]

Kalící pece mohou být jednokomorové či vícekomorové. Za zmínku stojí porovnání těchto pecí v práci Minarskiho a kol. [4]. Rozdíl je v tom, že při použití jednokomorové pece je pec neustále ochlazována a ohřívána, čímž se snižuje její životnost. Plyn, jenž má za úkol ochladit vsázku musí navíc ochladit i pec samotnou, čímž se ochlazování zpomaluje. Vícekomorová pec má tzv. chladnou komoru (cold-chamber), která slouží výlučně pro kalení. Dochází zde k oddělení vysokoteplotních a nízkoteplotních procesů. Po ohřátí součástí je vnitřní transportní systém přesune do chladné komory ke kalení. Tyto komory jsou odděleny izolačními dveřmi. Ochlazování pak probíhá rychleji díky výše zmíněnému faktu, že se nemusí zároveň s náplní chladit i samotná pec. Nevýhodou těchto pecí je jejich komplikovanější konstrukce a výrazně vyšší cena oproti pecím jednokomorovým [8]. Používají se spíše ve velkosériových výrobách.

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Dokonalý povrch součástí s minimálními deformacemi a vnitřním pnutím byl od vzniku technologie HPGQ hlavním důvodem zavádění a zdokonalování této technologie. Pomineme-li pořizovací náklady, je kalení pomocí inertního plynu prakticky ve všech ohledech lepší než kalení do oleje. Kalení do vody poskytuje nejvyšší ochlazovací účinnost, ale během procesu dochází ke vzniku parního polštáře a nerovnoměrnosti intenzity ochlazování. Navíc mohou být povrchy náchylnější ke korozi.

Nejlépe je možno vidět výhody technologie HPGQ oproti kalení do vody při tepelném zpracování vysoce legovaných a nástrojových ocelí, kde není potřeba intenzivního ochlazování pro dosažení požadované struktury.

Jak již bylo popsáno výše, výhody použití inertního plynu spočívají především v kvalitě povrchů (rovnoměrné vlastnosti, čistota, absence koroze, deformací a vnitřních pnutí), snadné ovladatelnosti kalícího procesu, stabilitě kalícího média, ekonomických faktorech spojených s provozem pece (včetně snadnější údržby) a mnoha dalších faktorech [4]. Nelze opomíjet pozitivní vliv na kvalitu prostředí a to jak životního, tak pracovního. Během celého cyklu se využívá pouze elektrické energie a uzavřeného okruhu chladícího plynu a žádné nečistoty tak nemohou unikat do okolního prostředí [2].

Firma Termobit se v oblasti výroby zařízení na tepelné zpracování specializuje především na plazmovou nitridaci. Při této difúzní metodě vzniká tenká tvrdá povrchová vrstva. Vzhledem k tomu, že není žádané, aby tato tvrdá vrstva byla vytvořena na měkkém materiálu, bývá potřeba součásti před vstupem do plasmové nitridace nejprve zakalit. Nejvhodnější variantou zakalení se jeví právě použití technologie HPGQ, které by mělo v budoucnu nahradit dosud používané vakuové kalení do oleje.

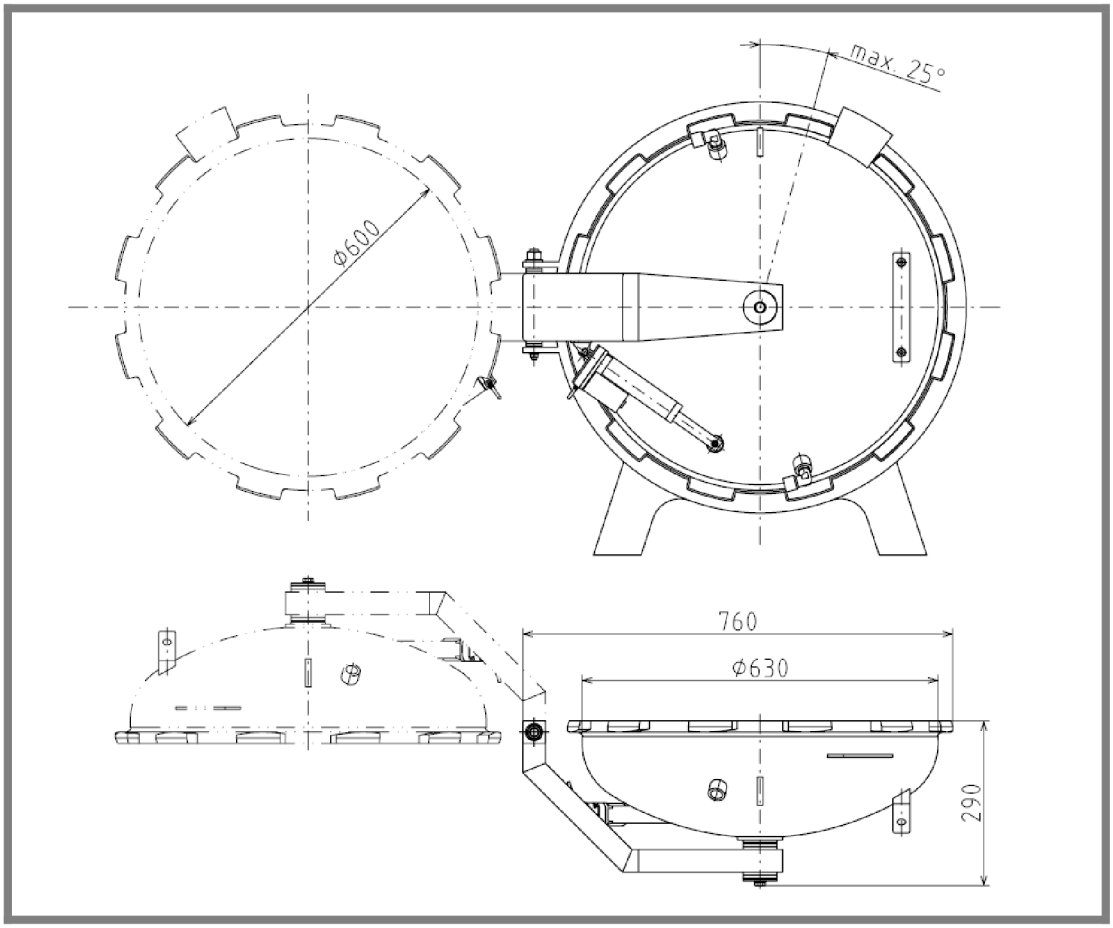
Charakteristické pro firmu Termobit je, že staví především na vlastním výzkumu a vývoji. Cílem firmy je tedy zkonstruovat a následně provozovat menší vakuovou pec (průměr pláště 600 mm), která jako kalící médium bude používat helium o tlaku 15 bar. Tato pec bude schopna ohřát součásti na teplotu 1200°C. K přívodu kalícího média by mělo dojít během 1 až 2 sekund.

Celá konstrukce musí být navržena tak, aby vydržela jak dané zatížení tlakem, tak danou teplotu. V peci bude implementován systém recyklace helia. Kalící cyklus bude plně automatizovaný.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem diplomové práce byl konstrukční návrh víka přetlakové pece včetně výkresové dokumentace a výpočtů. Pro znázornění výsledků práce a výpočty pomocí metody konečných prvků (MKP) byl vypracován 3D model. V diplomové práci je uveden i hrubý odhad ceny a montážní postup.

Konstrukční uzly byly navrženy tak, aby odolaly stejným podmínkám, jakým musí odolat pec samotná, především pak tlaku 15 bar. Důraz byl kladen na to, aby mohlo být víko vyrobeno z běžně dostupných polotovarů a materiálů běžně dostupnými technologiemi, aby nedošlo ke zbytečnému prodražení celého projektu. Nicméně u některých součástí bylo nutno použít kvalitnější materiály a méně konvenční technologie, což vyplynulo z požadavků kladených na přetlakovou pec.



Obr. 7 Kinematické parametry

Dále bylo třeba, aby víko splnilo i některé kinematické parametry související se zavíráním a zamykáním pece, konkrétně možnost otočení ramene vůči peci v úhlu 180° a pootočení víka při uzamykání maximálně o 25° (obr. 7). Pohled na jednotlivé části návrhu je popsán podrobněji v dalších kapitolách. Konstrukční řešení poslouží jako základ pro další pokračování návrhu konstrukce přetlakové pece.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4.1 Rešeršní činnost

Dostatečná znalost problematiky je základem k řešení jakéhokoliv problému. Je třeba vědět, kudy se ubírala cesta vývoje dané technologie a proč. Navíc je třeba mít dostatečnou znalost technických norem z dané oblasti a schopnost dopočítat se různými způsoby ke konkrétním výsledkům.

4.2 Volba optimální varianty pece

Z hlediska navrhování víka nelze opomíjet logický postup, který vede k volbě konkrétního druhu pece a to jak z hlediska teploty a tlaku během tepelného zpracování, tak z hlediska základního uspořádání pece a volby plynu.

4.3 Konstrukční uspořádání víka

Existuje mnoho variant, kudy se mohla konstrukce víka ubírat v závislosti na materiálu, způsobu uzamykání, zavěšení víka apod., jak je popsáno v kapitole 5. Je potřeba vybrat optimální konstrukční uspořádání, které bude splňovat dané požadavky a bude relativně levné na výrobu a jednoduché na údržbu.

4.4 Výpočtová činnost

Po výběru konstrukčního uspořádání je třeba navrhnout dané prvky dostatečně odolné vůči teplotě a tlaku a je třeba posoudit kinematiku sestavy víka jako celku, aby splňovala požadavky stanovené v kapitole 3.

4.5 Konstrukční řešení

Je potřeba vytvořit konkrétní konstrukční řešení na základě pevnostních, tepelných, dynamických a kinematických výpočtů prováděných za pomocí vhodného softwaru. Je třeba vytvořit výkresovou dokumentaci a 3D model.

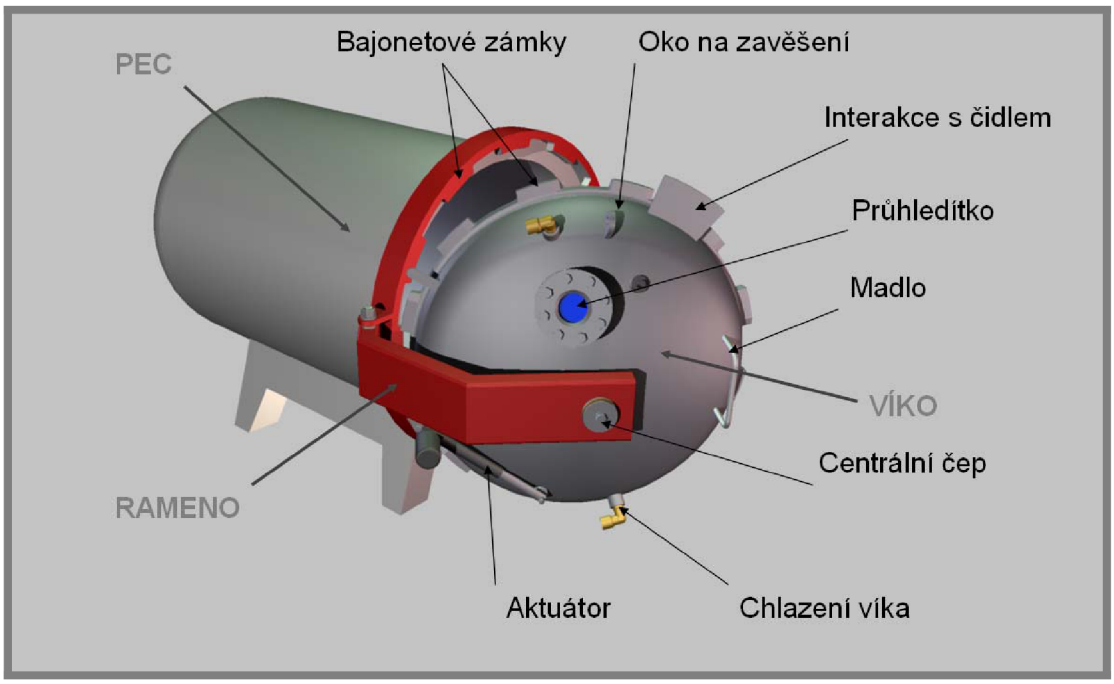
4.6 Software

Pro výpočtovou činnost byl použit MS Excel pro analytické výpočty a ANSYS pro výpočty pomocí MKP. Kinematická schémata a část konstrukčního řešení byly prováděny pomocí programu Autodesk AutoCAD. Konečná verze 3D modelu sestavení víka byla vypracována v programu Autodesk Inventor.

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

Návrh konstrukčního uspořádání víka byl proveden v závislosti na výběru optimálních variant u níže uvedených bodů. Pro názornost jsou tyto body na obr. 8 vztaženy k 3D modelu.



Obr. 8 Grafické znázornění řešených bodů

5.1 Pec

5.1

Jak je podrobněji popsáno v rešeršní části, pece jsou různých variant a velikostí. Záleží zde na druhu plynu, tlaku, kterému musí odolat a také na konstrukčním uspořádání pece. V zadání je věc poměrně jasně daná požadavky firmy Termobit, nicméně je vhodné poukázat i na další varianty, kudy se konstrukce mohla ubírat. Z hlediska konkrétní volby bylo potřeba udělat několik níže uvedených zásadních rozhodnutí.

5.1.1 Druh pece

5.1.1

O rozdílu mezi jednokomorovou a vícekomorovou pecí je podrobněji pojednáno v kapitole 1.4. Dvoukomorová pec má výhodu v tom, že v chladné komoře, kde dochází ke kalení není potřeba chladit daným plynem i stěny pece a ochlazování je tak rychlejší. Navíc stěny pece netrpí častým cyklickým ohříváním a ochlazováním a mají tudíž lepší životnost. Vícekomorové pece jsou komplikovanější na výrobu a tudíž dražší. Své uplatnění mají především ve velkosériové výrobě. Vzhledem k tomu, že pec bude sloužit především pro vnitřní účely firmy, byla zvolena jednokomorová varianta.

5.1.2 Kalící plyn

Výběr kalícího plynu byl zúžen na dusík a helium. Argon je relativně drahý a poskytuje malou ochlazovací účinnost. Vodík je sice levnější a ze všech plynů teoreticky nejefektivnější, ale rizika s jeho skladováním a užíváním jsou nepřijatelná. Současným trendem je použití helia kvůli jeho nízké hustotě a vysoké tepelné vodivosti. Do konstrukce systému cirkulace a distribuce média tak bude muset být zahrnut i systém skladování a recyklace helia (obr. 1).

5.1.3 Teplota a tlak

Hodnoty teploty a tlaku, které musí pec vydržet jsou srovnatelné s těmi v běžně vyráběných pecích tohoto druhu. Přestože Tonini [5] a Pritchard [3] považovali 5, resp. 6 bar za horní limit efektivity zvyšování tlaku, bylo později úspěšně použito 20 [4] i 24 bar [8]. Nicméně vyšší hodnoty tlaku vyžadují náročnější konstrukční řešení. I z tohoto důvodu byl zvolen tlak plynu 15 bar.

Teplota 1200°C, na kterou bude pec dimenzována je dostačující z hlediska škály materiálů, které se budou tímto způsobem tepelně zpracovávány. V literatuře se vyskytují například teploty 870°C, 1050°C nebo 1340°C. Teplota 1200°C odpovídá teplotě pro austenitizaci některých nástrojových ocelí.

5.2 Víko

Při konstrukci víka se vycházelo z různých variant, které jsou v současné době na trhu a konstrukční uspořádání bylo voleno a upravováno v závislosti na vnitřním přetlaku při kalení, teplotě v peci při austenitizaci a velikosti pece, která je ve srovnání s mnoha jinými druhy menší a mnohdy nevyžaduje náročná řešení různých prvků, které je možno vidět u vík větších rozměrů.

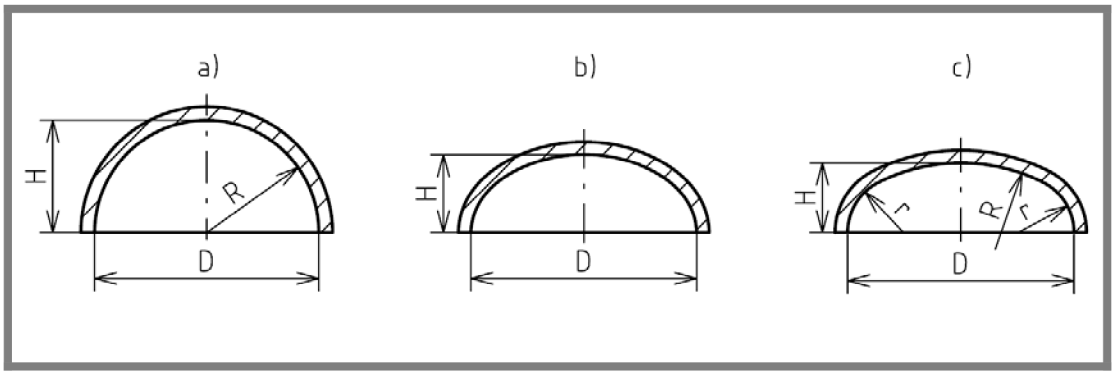
5.2.1 Materiál

Materiál (stejně jako tvar) byl pro první výpočty odvozen z polotovarů firmy Zyksal [13]. Pro materiál P265GH existuje český ekvivalent 11 416 (popř. 11 418). Nicméně vzhledem ke kontaktu povrchu víka s chladící vodou bylo později rozhodnuto použít nerezovou ocel DIN 1.4910. První výpočty byly prováděny s materiálovými vlastnostmi oceli 11 416. Vzhledem k tomu, že ocel 1.4910 má vlastnosti velice podobné, nebyla později konstrukce víka nijak měněna.

5.2.2 Tvar

5.2.2

Klenutý tvar víka (obr. 9) je běžný pro pece pracující s jiným než atmosférickým tlakem. Torosférické víko (obr. 9 - c) je tvořeno střední kulovou částí a anuloidovým (toroidním) okrajem. Oproti sférickému a eliptickému tvaru má výhodu v nízké objemnosti a v konstantních vlastnostech na sférické části. Na okraji je však menší rádius a při přetlaku v tomto místě dochází ke koncentraci napětí. Není tedy vhodné umísťovat konstrukční prvky do toroidní části. Tvar víka byl zvolen jako torosférický.



Obr. 9 Tvary klenutých den, a) sférické, b) eliptické, c) torosférické

5.2.3 Druh uzamykání

5.2.3

Uzamčení polohy víka vůči peci musí být snadné a rychlé. Není tedy možno použít připevnění víka k peci pomocí šroubů po obvodu. Jednou z reálnějších možností bylo použití několika páček (obr. 10). To se ale používá spíše u vakuových technologií, kdy tyto páčky prakticky nenesou žádnou zátěž, neboť je víko vlivem podtlaku tlačeno na přírubu pece.

Obr. 10 Použití páček při uzamykání víka [14]

Při vysokých tlacích je však víko tlačeno směrem od příruby pece a síla, která by byla na páčky vyvíjena je nepřiměřeně vysoká. V takovém případě je třeba použít bajonetový uzávěr, který danému zatížení odolá (obr. 11 a 12).

Bajonetový uzávěr je charakteristický tím, že pootočením mechanismu dojde k zajištění jeho polohy. V případě víka přetlakové pece má bajonet charakter několika výstupků po obvodě (bajonetových zámků). Tyto zámky tvarově dosednou na protikus umístěný na přírubě pece. Bajonetový mechanismus se poté pootočí přibližně o výseč určenou právě délkou jednoho bajonetového zámku tak, aby vždy dva výstupky (na peci a na víku) zůstaly v zákrytu. Použití bajonetového uzávěru umožní mimo jiné i rovnoměrné dosednutí příruby víka na těsnění.

5.2.4 Způsob uzamykání

Uzavření víka proběhne manuálně. V dosahu obsluhy bude poté umístěn spínač uzamykání pece. To už bude probíhat zcela elektronicky bez použití lidské síly. Uzamykání přitom může být realizováno dvěma způsoby. Buďto se otočí celé víko, nebo se otočí vnější bajonetová koruna a víko zůstane na místě.

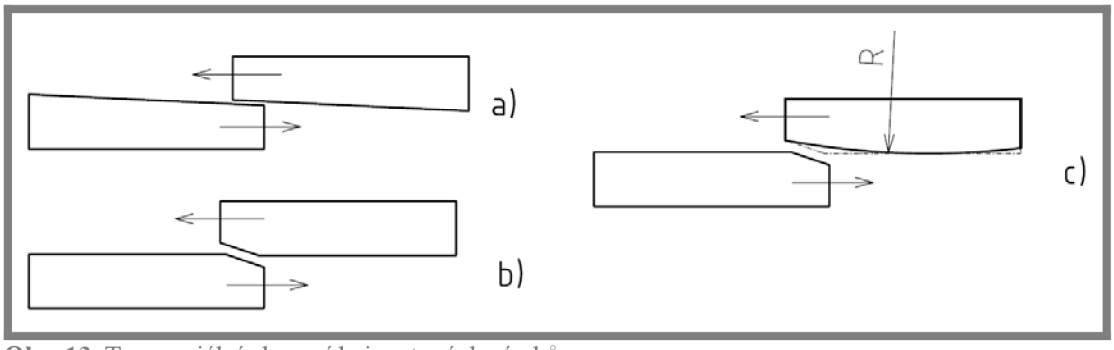
Obr. 11 Víko uzamykané vnější pohyblivou částí [15]

Druhá varianta je výhodnější z toho hlediska, že celá váha víka nemusí být umístěna na jednom otočném čepu a víko může být daleko stabilněji upevněno k rameni (obr. 11). Tento způsob uzamykání je vhodný hlavně pro větší pece, kdy je váha víka (doplněná o další konstrukční prvky, jako topná tělesa a rozvod chladícího plynu) příliš velká a kde je navíc vhodné, aby dané konstrukční prvky ve víku přesně dosedaly na protikusy v peci.

Nicméně pro průměr víka 600 mm je uzamykání otočením korunové části poměrně komplikované řešení, neboť zde musí dojít k zajištění hned tří částí najednou. Oproti tomu je uzamčení otočením celého víka (obr. 12) relativně jednodušší. I když i zde se vyskytují jisté komplikace. Čep musí být dostatečně pevný a tuhý, aby bylo víko přesně usazeno do drážek bajonetových zámků na peci a navíc je potřeba, aby byla zajištěna dostatečná vůle, aby víko rovnoměrně dolehlo na přírubu pece.

Obr. 12 Víko uloženo otočně na pohyblivém rameni [16]

Bajonetové zámky na víku i na peci musí mít takový tvar, aby při otočení víka došlo k jeho axiálnímu posuvu, který zajistí dostatečné utěsnění pece od okolního prostředí. Způsobu těsnění je věnována kapitola 5.2.6. Původní záměr byl zkosení umístit po celé délce zámku (obr. 13 - a). Nejprve byla tato varianta nahrazena variantou b) kvůli jednoduchosti výroby. Tento způsob má ovšem jednu hlavní nevýhodu vztahující se k potřebné síle aktuátoru. Kalící proces může trvat několik hodin. Během této doby se vytvoří mezi dotýkajícími se povrchy zámků značná statická třecí síla. Pro její minimalizaci bylo rozhodnuto použít mezi zámky liniový kontakt. Toho bylo docíleno náhradou zkosené plochy na zámku víka plochou válcovou s obdobnými parametry jako u varianty b) (obr. 13 - c). Jeden z dvojice zámků musí zůstat plochý, aby nevznikala různá mezera pro těsnění v závislosti na pootočení. Styková plocha zámků bude v provozu průběžně mazána.



Obr. 13 Tangenciální zkosení bajonetových zámků

5.2.5 Pohonná jednotka uzamykající víko

Vzhledem k použití uzamykání pomocí pootočení celého víka, musí být aktuátor zajišťující toto pootočení umístěn přímo na rameni, na kterém je víko upevněno (obr. 12).

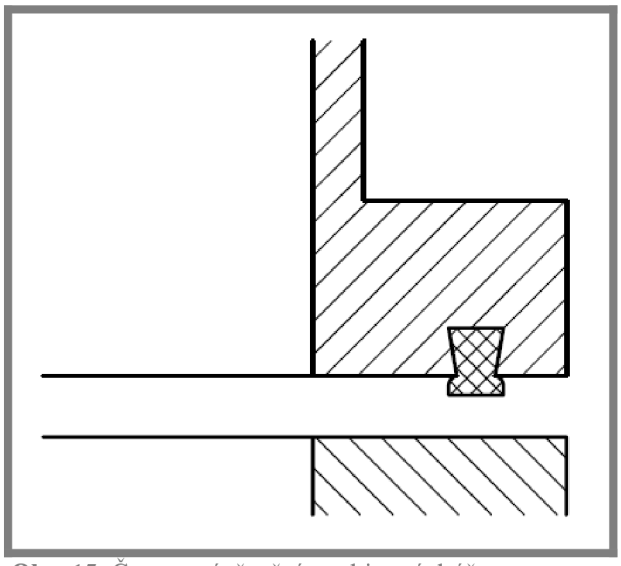
Tento aktuátor může být hydraulický, pneumatický nebo elektrický. Musí být schopen nastavit polohu víka vůči peci velice přesně, aby mezi jejich bajonetovými zámky nedošlo ke kolizi. Vzhledem k omezené možnosti hydraulických a pneumatických válců udržet jednu konkrétní polohu (nejedná-li se o polohu krajní) byl zvolen elektrický aktuátor. Tento aktuátor musí mít dostatečný zdvih a dostatečnou sílu, aby byl schopen víkem pootočit do uzamčené či odemčené polohy. Zároveň musí tuto polohu udržet (zvláště při odemčeném stavu). Elektrický aktuátor je samosvorný a udržení konkrétní polohy je tedy mnohem jednodušší a efektivnější než u hydraulických nebo pneumatických válců, ačkoliv lze předpokládat, že statické tření mezi zámky způsobené vnitřním přetlakem bude příliš velké, než aby se mohlo víko bez zajištění samovolně otevřít.

Obr. 14 Koncový spínač

Na přírubě pece bude umístěn minimálně jeden koncový spínač (obr. 14), který bude hlídat, jestli je víko dostatečně uzavřené, aby bylo bezpečné s ním pootočit a nedošlo ke kolizi zámků. Na víku je umístěn tvarový prvek (viz kapitola 5.2.12), který spínač přitlačí a umožní tak pootočení. Hlídání polohy natočení pomocí dalších čidel a řízení aktuátoru není řešeno v této diplomové práci. Důležité je, aby se aktuátor vypnul při dosažení požadované polohy (při zavírání zákryt zámků a při otvírání zákryt zámku a mezery).

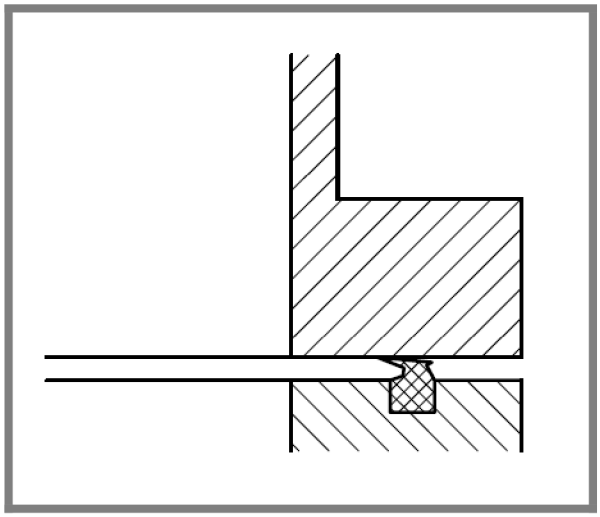
5.2.6 Těsnění

Původní návrh těsnění vycházel ze zkušeností firmy Termobit s vakuovými technologiemi. U vakuových pecí používá firma rybinové drážky s těsněním s čtvercovým průřezem, které přesahuje několik milimetrů do prostoru (obr. 15). Za pomocí podtlaku dojde k přitisknutí víka na přírubu pece a těsnost je dostatečná. Těsnění navíc v drážce tvarově drží a není třeba jej lepit.



Obr. 15 Čtvercové těsnění v rybinové drážce

Pro použití přetlaku, který je 15x silnější než podtlak ve vakuu, je však dané řešení nevyhovující. Pece tohoto typu bývají těsněny tvarovaným těsněním (obr. 16), které se přetlakem zdeformuje (obdobně jako u O-kroužků) a zdaleka tak není potřeba tlačit víko na přírubu pece tak velkou silou jako u těsnění čtvercového. Toto těsnění bude umístěno na přírubě pece a příruba víka zůstane hladká. Vzhledem k tomuto faktu nebylo dále detailněji řešeno.



Obr. 16 Tvarované těsnění

5.2.7 Druh chlazení

Během austenitizace mohou dosahovat teploty v peci až 1200°C. Stěna víka tak musí být před tímto žárem dostatečně chráněna. Zevnitř je chráněna pomocí izolace (kapitola 5.2.9) a zvenku je tato stěna chlazena vodou.

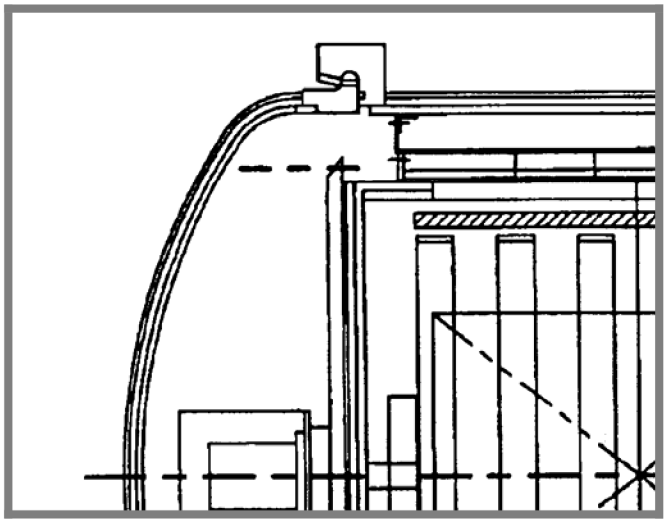
V úvahu připadaly dvě varianty chlazení. Chlazení pomocí meandru (hada) a dvojitého dna. Chlazení pomocí meandru (obr. 17) může být rovnoměrnější. Je však poměrně komplikované a nevypadá na víku příliš esteticky.

Obr. 17 Chlazení pomocí meandru [17]

Hlavní pozornost byla upřena na chlazení pomocí dvojitého dna. Tento druh chlazení je zcela běžný a navíc umožňuje, aby se některé konstrukční prvky umístily na vnější víko, které nenese zatížení od tlaku a tyto prvky se tedy mohou umístit i na toroidní část tohoto víka.

Princip je takový, že dutina mezi víky slouží jako prostor, kudy proudí chladící voda. Na vrchní a spodní části vnějšího víka je umístěno šroubení pro přívod a odvod vody. Hadice sloužící k tomuto účelu jsou vidět na dřívějších obrázcích (obr. 10, 11 a 12). Světlý průměr šroubení musí být dostatečně velký, aby odpovídal průtoku kapaliny potřebnému pro dostatečné chlazení víka. Vtok je vhodnější umístit dole a výtok nahoře, protože teplá voda stoupá vzhůru. Navíc je potřeba, aby tlak vody působil zespodu a masa vody se tak nemohla odtrhávat a vytvářet prázdná místa.

Mezera mezi oběma víky je řádově na stejné úrovni jako tloušťka vnitřního víka (5 až 10 mm). Nesmí být příliš malá, aby nedocházelo místy k vaření vody a příliš velká mezera by byla energeticky náročná na výkon čerpadla a způsobila by objemové zvětšení víka, zvýšení jeho hmotnosti a zvýšení náročnosti na výrobu. Mezeru mezi víky a nastínění možného tvaru příruby a jejího protikusu na válcové části pece je možno vidět na obr. 18.



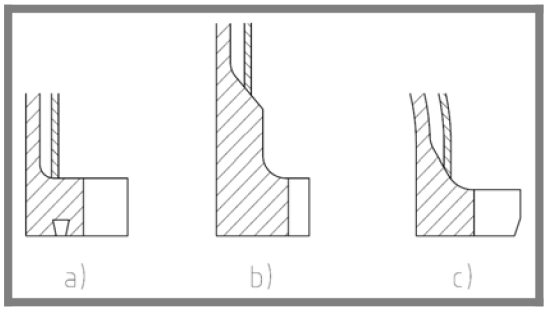
Obr. 18 Uspořádání víka s bajonetovým uzamykáním, [18]

Nevýhodou této varianty chlazení je fakt, že jsou-li vtok a výtok umístěny nahoře a dole, mohou na stranách vznikat místa s menším průtokem. Chlazení tak není zcela rovnoměrné. Vzhledem k charakteru chlazení bylo potřeba použít odolnější (nerezový) materiál, jak již bylo zmíněno v kapitolách 1.4 a 5.2.1.

5.2.8 Příruba víka

5.2.8

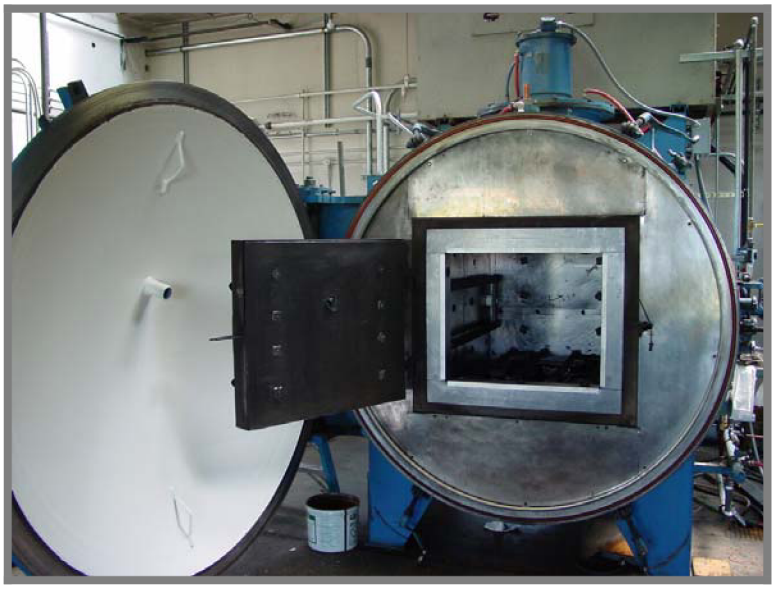
První varianta tvaru příruby (obr. 19 - a) vycházela z normy ČSN 69 0010-4-18 (přírubové spoje). Výpočty však naznačily, že tento tvar není z hlediska namáhání optimální. Další zvažovaná varianta (obr. 19 - b) vycházela z obr. 18. Zde se sice podařilo dojít ke konkrétním výsledkům, ale tvar není optimální z hlediska výroby ani z hlediska úspory materiálu. Tvar byl následně pozměněn právě s ohledem na výše zmíněná hlediska a jeho konečná podoba je na obr. 19 - c. Pevnostní analýza příruby je detailněji popsána v kapitole 6.1.3.



Obr. 19 Tvar příruby (průřez)

5.2.9 Tepelná izolace

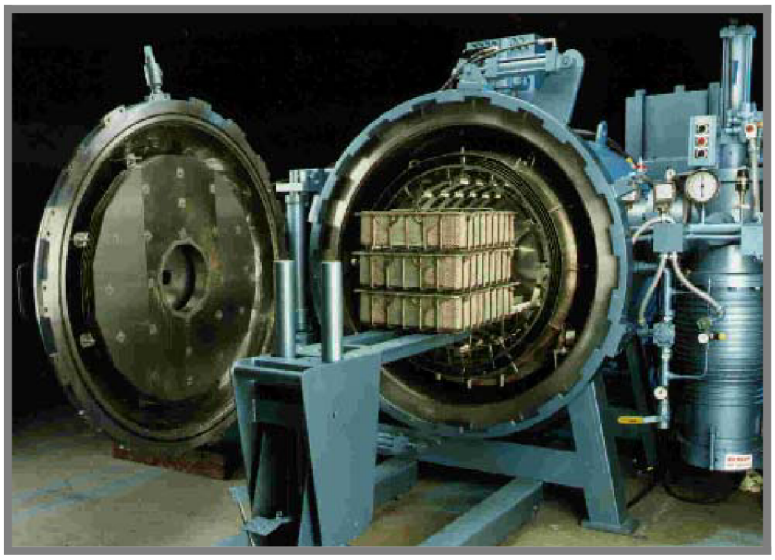
Umístění tepelné izolace mohlo být provedeno dvěma základními způsoby. První z nich počítá s tím, že je izolace umístěna pouze na peci a víko zůstává samo o sobě neizolované. Komora pece je od víka oddělená pomocí dvířek (obr. 20). Tento způsob je zřejmě nejjednodušší variantou, ačkoli ne moc používanou.



Obr. 20 Tepelná izolace víka umístěná na peci [19]

Druhá možnost je, že pec samotná má izolaci jenom po obvodu a čelní část je umístěna na víku (obr. 21). Tato varianta je poměrně častá.

V praxi je celkem běžné, že je tepelná izolace připevněna k víku spolu s dalšími vnitřními prvky pece, jako je rozvod chladícího plynu či dokonce topná tělesa. V případě malé pece je však zbytečné rozmísťovat topení i chlazení ze všech stran. Tento způsob umístění izolace se navíc vyskytuje spíše u pecí, kde se při uzamykání víko a pec vzájemně nepohybují, aby se izolace nepoškodila třením.



Obr. 21 Izolace umístěna na víku [20]

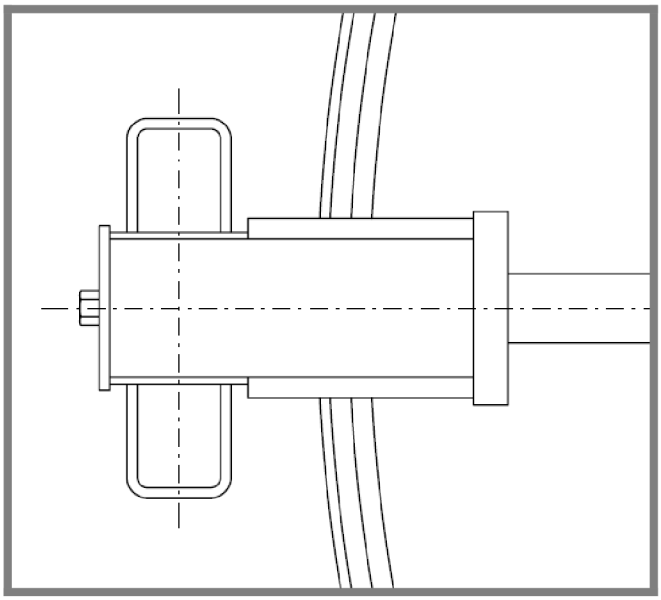
Při uvážení dosavadního konstrukčního uspořádání, kdy se víko otáčí při uzamykání je vhodnější a především jednodušší umístit izolaci ze strany víka přímo na pec. Jinou možností by bylo prodloužit čep, na kterém se víko otáčí (kapitola 5.2.10) skrz hlavní víko a izolaci na něj umístit otočně, aby po dosednutí na protikus zůstala na místě a víko se mohlo bez problému otočit. Toto by už však bylo zbytečně komplikované.

Stejně tak by bylo značně komplikované použití pneumatického válce, který by s izolací na víku posouval v axiálním směru. Při pootočení by se tak části izolace nedotýkaly a po pootočení by pneumatický válec přitiskl izolaci víka na izolaci pece.

Nakonec byla pro jednoduchost vybrána první varianta (obr. 20) a dále nebyla izolace víka součástí řešení diplomové práce.

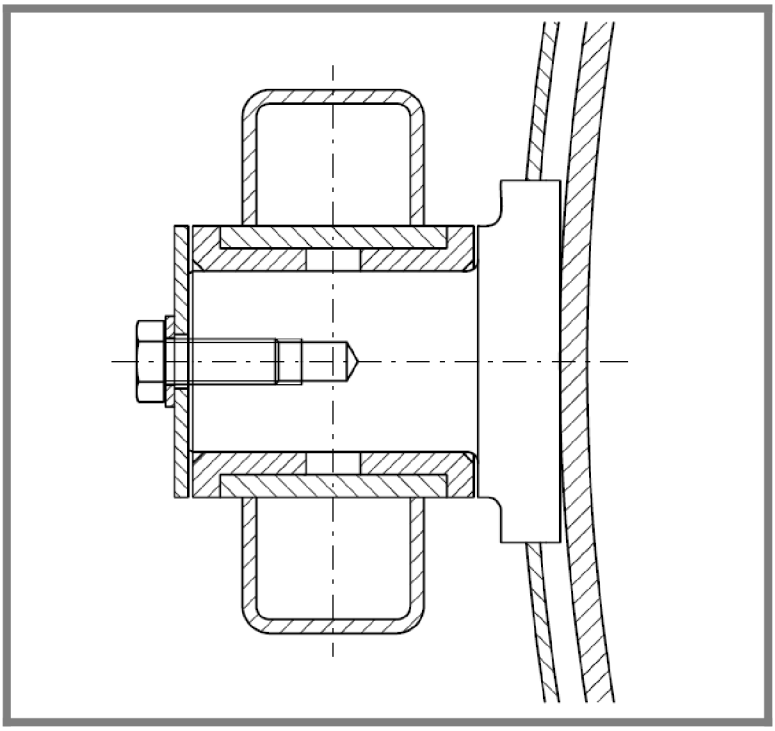
5.2.10 Upevnění víka na rameni

Poměrně mnoho komplikací ze začátku skýtalo otočné umístění víka na rameni. Problematické bylo především uvažovat o zkombinování umístění čepu a izolace tak, aby izolace netřela o část umístěnou na peci. První návrh (obr. 22) počítal s čepem pevně umístěným na rameni a procházejícím skrz víko. Na jeho konci by pak byla umístěna izolace, která by po uzavření dolehla na izolaci pece. Při následném uzamykání víka by tak zůstala na místě a otáčelo by se pouze víko.



Obr. 22 Víko otočné na čepu

Tento návrh nebyl dále upravován, protože po vyjasnění umístění izolace (viz kapitola 5.2.9) bylo možno čep umístit neinvazivně pouze na vnějším víku a vnitřní nechat v celku (obr. 23). V rameni je umístěna trubka, do které je z každé strany vlisováno kluzné ložisko. Čep je přivařen k vnějšímu víku. Na vnitřním je pouze přiložen. Axiální posuv je vymezen šroubem s dorazovou podložkou. Axiální vůle pak může být upravena pomocí distančních podložek, které jsou v jednom místě přerušené pro snadnější umístění či odebrání. Otvor ve vnějším víku pro umístění čepu při svařování poslouží pro kontrolu, zda je mezi víky dostatečná a rovnoměrná mezera.



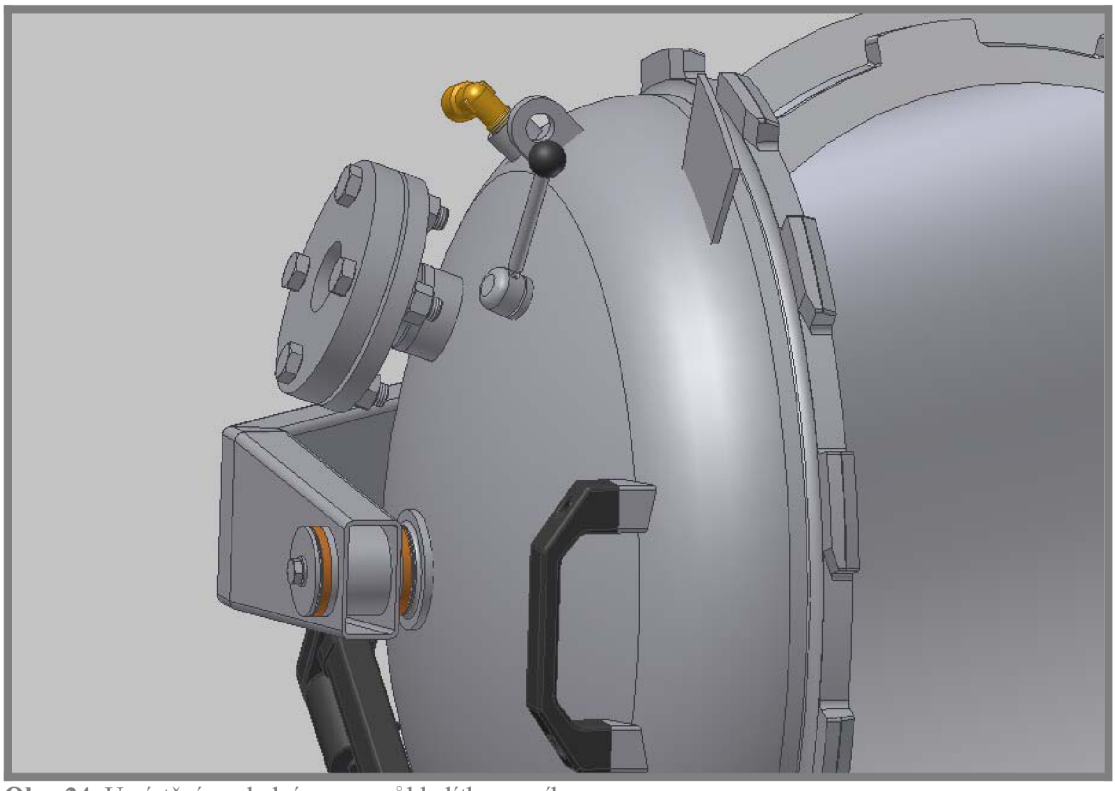
Obr. 23 Víko přivařeno k čepu

Další zvažovanou možností bylo umístit víko na kulový čep. Tato varianta by umožňovala lepší dosednutí víka na přírubu pece a tím pádem lepší těsnění. Problém by však nastal při otevírání a zavírání, kdy by mělo víko tendenci se naklánět a bylo by obtížné uzavřít víko aniž by došlo ke kolizi mezi bajonetovými zámky.

5.2.11 Průhledítko

5.2.11

Vzhledem k možnosti lepšího monitorování procesu tepelného zpracování bylo velmi dlouho zvažováno umístění průhledítka na víku, kterým by bylo možno pozorovat vnitřní prostor pece. Nakonec se však od použití průhledítka upustilo. Jedním z důvodů byla nutnost narušit izolaci ve dvířkách na peci kvůli uvolnění průzoru. Dalším nepříznivým jevem je narušení vnitřního víka kvůli otvorům, ve kterých by docházelo ke koncentraci napětí. Nelze opomíjet také estetickou stránku a vysokou hmotnost průhledítka. Bylo by příliš prostorově výrazné, jak je patrné z obr. 24. Při neuvažování průhledítka tak nakonec zůstává celá plocha vnitřního víka hladká a bez vrubů a navíc je víko lépe tepelně chráněno díky absenci otvoru v izolaci.



Obr. 24 Umístění poslední verze průhledítka na víku

5.2.12 Další konstrukční prvky

5.2.12

Na víku bylo potřeba umístit i několik dalších konstrukčních prvků. Všechny tyto zbývající prvky jsou umístěny na vnější víko, které nepřenáší zatížení z pece. Bylo tedy možné je dát i na toroidní část.

Kvůli lepší manipulaci při výrobě a montáži bylo do horní polohy umístěno *oko pro zavěšení*. Toto oko musí být dostatečně dimenzované, aby uneslo váhu hotového víka se všemi náležitostmi. Oko je umístěno nad centrálním čepem při otevřeném stavu.

Vzhledem k manuálnímu zavírání bylo na okraji víka umístěno *madlo* (obr. 25). Poblíž madla bude umístěn ovládací panel, aby bylo možno jednou rukou držet víko v uzavřené poloze a druhou nastartovat uzamykání víka a kalící cyklus. Madlo je umístěno naproti kloubu nosného ramene při otevřeném stavu.

Madlo nemůže být přišroubováno přímo k vnějšímu víku. Z tohoto důvodu zde musely být umístěny *připojovací prvky* (obr. 25). Jedná se vesměs o bloky oceli s vhodným tvarem a závitovou dírou skrz. Jejich tvar musí částečně korespondovat s tvarem okrajů madla. Stejně tak musí korespondovat poloha děr a šroubů. Tyto bloky jsou navíc zkoseny tak, aby do jisté míry kopírovaly tvar víka. Připojovací prvky se přivaří přímo k vnějšímu víku (nejlépe ve stavu přišroubovaném k madlu či k přípravku s obdobnými rozměry).

Obr. 25 Madlo s připojovacími prvky

Dále budou na víku umístěny *výstupky* kvůli fyzické či optické interakci s koncovými spínači. Prozatím je počítáno hlavně s výstupkem zajišťujícím sepnutí čidla během celého otáčení víka. Musí se tedy rozprostírat minimálně na úhlu pootočení. Plocha tohoto výstupku bude při uzavření rovnoběžná s přírubou pece. Je tedy i rovnoběžná s přírubou víka.

Pro rozvod chladící kapaliny je nutné na víku vytvořit *vtok a výtok* chladící vody. Oba tyto prvky jsou stejné a jedná se o válce s průchozí závitovou dírou pro armaturu, např. koleno se závitem. K těmto kolenům budou upevněny hadice a zajištěny k nim budou pomocí otočného šroubení, aby bylo možno hadici přišroubovat bez ohledu na to, jestli má druhý konec volný či zajištěný. Hadice můžou vést z estetického hlediska i vnitřkem dutého ramene, ale tyto záležitosti jsou už spíše informativní a mimo záběr této diplomové práce. Vtok a výtok chladící kapaliny jsou umístěny nahoře a dole při uzavřeném stavu.

Posledním prvkem umístěným na víku je *uchycení tyče aktuátoru*. Toto upevnění muselo být dostatečně pevné a pevně přivařené k vnějšímu víku, aby dokázalo přenést sílu od aktuátoru. Bylo třeba (kvůli momentu), aby bylo toto umístění co možná nejdál od středu otáčení. Zároveň bylo nutné, aby poloha aktuátoru vzhledem k roztečné kružnici, na které tento prvek leží byla přibližně tečná k zajištění maximálního možného momentu pro uzamykání víka. Vzhledem k charakteru

umístění aktuátoru vzhledem k víku musí být tyč upevněna letmo. Uchycení tyče aktuátoru je umístěno rovnoběžně s osou víka.

Kvůli možné interakci s průhledítkem byly aktuátor a tím i upevnění jeho tyče k víku umístěny do spodní části konstrukce. Po odstranění průhledítka se už tato poloha neměnila.

5.3 Nosné rameno

5.3

Víko je k nosnému rameni připevněno pomocí čepu přivařeného k víku, jak je řešeno v kapitole 5.2.10. Nosné rameno musí být dostatečně pevné, aby víko udrželo a tuhé, aby dokázalo udržet i navrženou vůli mezi bajonetovými zámky víka a pece. Jeho druhý konec je otočně připevněn k přírubě pece.

5.3.1 Polotovar

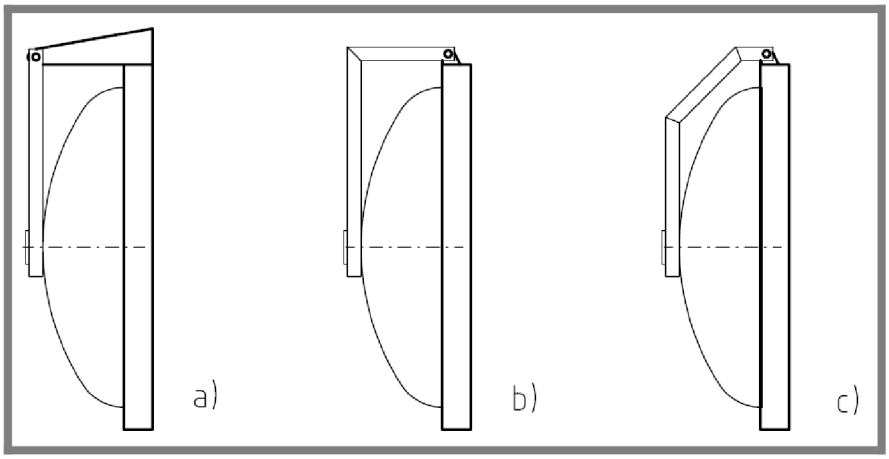
5.3.1

Nosná ramena, pokud jsou určená pro otočné víko, se vyskytují v provedeních z tlustého plechu nebo z uzavřeného profilu. Plech není z hlediska tuhosti optimální a je potřeba, aby se víko naklánělo co možná nejméně kvůli udržení dostatečné vůle v bajonetových zámcích. Navíc je vhodné, aby přední trubka s kluznými ložisky (viz kapitola 5.2.10) byla přivařena na více než jednom místě. Byl tedy zvolen uzavřený profil.

5.3.2 Tvar

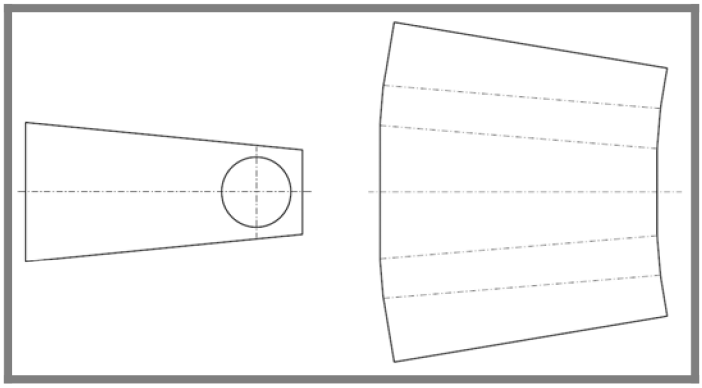
5.3.2

Dalším předmětem řešení byl celkový tvar ramene. V první variantě bylo rameno ponecháno rovné a kloub byl umístěn dál od příruby pece (obr. 26 - a). Z pevnostního hlediska však tohle není vhodné řešení. Pro minimalizování namáhání patek na přírubě pece je důležité, aby byl kloub ramena umístěn co nejblíže k této přírubě. Toho lze dosáhnout zalomením celkového tvaru na jednom či více místech. V případě plechu se často ponechává přední část rovná a okraj se ohne s určitým konstantním poloměrem. U uzavřeného profilu však něco takového není možné. Nakonec byla z estetického hlediska zvolena varianta zalomit rameno ve dvou místech (obr. 26 - c).



Obr. 26 Celkový tvar ramena

Později bylo rovněž z estetického hlediska rozhodnuto nahradit přední profil ohýbaným plechem, aby bylo možno vytvořit zúžení celého ramena. Tvar posledního článku ramena s tvarem rozvinutého plechu je na obr. 27.

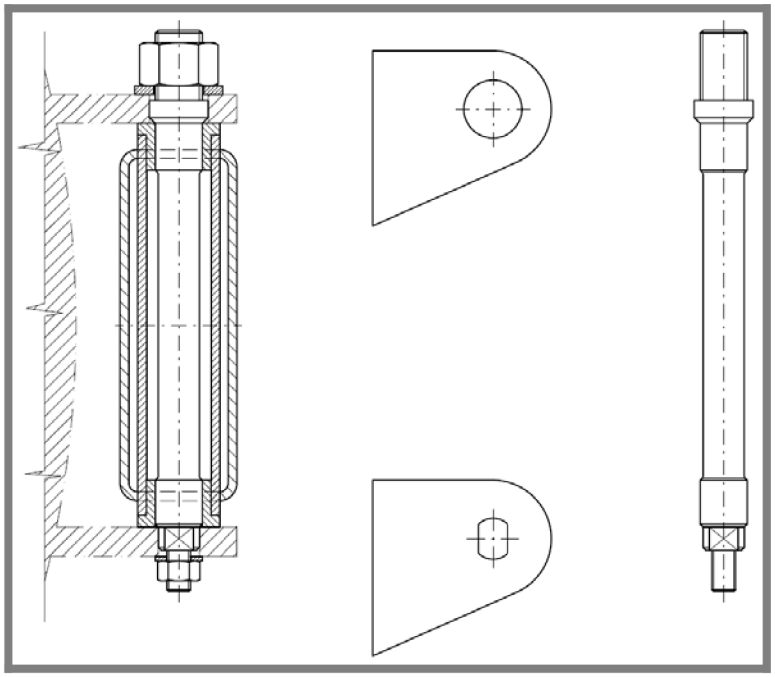


Obr. 27 Tvar přední části ramena a rozvinutého plechu

5.3.3 Zavěšení ramena na peci

Jako způsob uchycení ramena na peci byl zvolen ten zobrazený na obr. 28. Průchozí čep je k patkám na peci připevněn pomocí dvou matic. Tvarový prvek na spodní části zabraňuje jeho rotaci během používání. Rotace tak probíhá pouze tam, kde má – mezi čepem a ložisky. Čep jako takový nenese váhu celého víka, ale pouze moment, který vyplívá z umístění víka na konci ramene. Vůle mezi patkami pece a čely ložisek je vymezená pomocí tenkých plechových podložek, které jsou vyjímatelné i ve smontované sestavě (podobně jako v kapitole 5.2.10).

Stejně jako u zavěšení víka na rameni jsou ložiska umístěny v trubce procházející uzavřeným profilem ramene. Tentokrát je však poloha této trubky vertikální.



Obr. 28 Uložení ramena na peci, tvar patek, tvar průchozího čepu

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

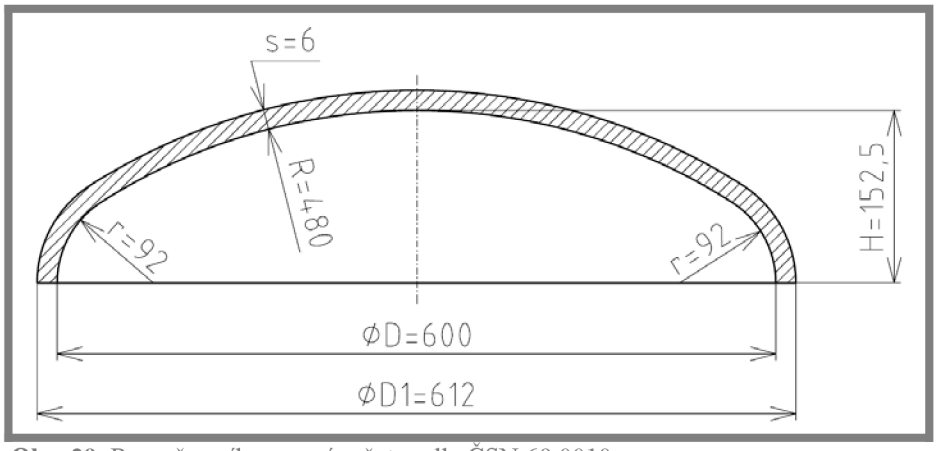
6.1 Výpočty

6.1.1 Tloušťka stěny

Stejně jako pec, i víko musí vydržet namáhání způsobené technologií HPGQ s parametry definovanými v bodě 2. Před žárem je víko chráněno pomocí izolace a chlazení. Další namáhání je způsobeno vakuem, rychlým přivedením kalícího média a přetlakem kalícího média.

První zkoumanou veličinou při navrhování konstrukce byla tloušťka stěny vnitřního víka. Hlavním parametrem byl přitom vnitřní tlak. Ten je totiž 15x větší než podtlak způsobený vakuem a tak se dá předpokládat, že v konstrukci navržené na tlak 15 bar nedojde ke ztrátě vzpěrné stability v důsledku podtlaku 1 bar.

Ze začátku bylo snahou postupovat podle ČSN 69 0010-4-7 (Výpočet pevnosti, klenutá dna nádob). Jako výchozí tvar víka byl zvolen polotovar firmy Zyksal (obr. 29), který koresponduje s torosférickým dnem typu C podle výše zmíněné normy. Zjednodušený výpočet pro konečnou tloušťku stěny 6 mm je popsán v rovnici (1). Jedná se o podmínku pevnosti okrajové oblasti.



Obr. 29 Rozměry víka pro výpočet podle ČSN 69 0010

$$[p] = \frac{2 \cdot s \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_1 \cdot \beta_2} = \frac{2 \cdot 6\text{mm} \cdot 1 \cdot 167\text{MPa}}{612\text{mm} \cdot 1,574} = 2,08 \text{ MPa} \qquad (1)$$

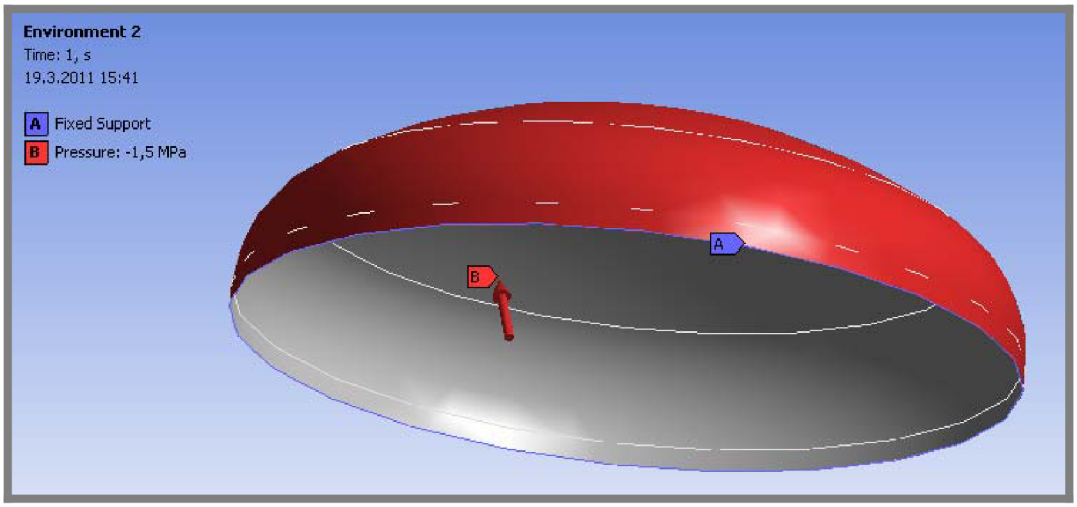
kde:

$[p]$	MPa	je dovolený přetlak
s	mm	- tloušťka stěny
φ	1	- součinitel svarového švu
$[\sigma]$	MPa	- dovolené namáhání
D_1	mm	- vnější průměr víka
β_2	1	- součinitel tvaru víka

Z rovnice (1) vyplývá, že torosférické dno typu C (koeficient β_2) o vnějším průměru 612 mm (D_1) vyrobené z jednoho kusu plechu (koeficient φ) s tloušťkou stěny 6 mm (s) a dovoleným namáháním 167 MPa ([σ]) je možno použít pro přetlak 2,08 MPa ([p]).

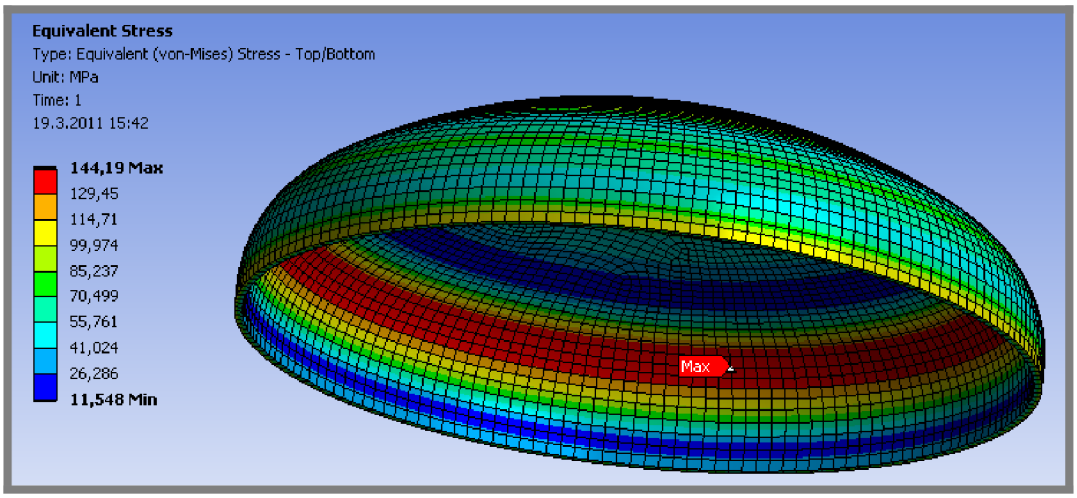
Pokud by bylo normované víko přivařeno na normovanou přírubu, žádné výpočty by nemusely být prováděny a zvolila by se vhodná kombinace pro nominální tlak PN16 či PN25. Bajonetové zámky však normované nejsou a jakékoliv výpočty spojené s jejich použitím chybí. Proto byly další výpočty prováděny pomocí MKP softwaru ANSYS. ČSN či jiné analogické výpočty využívající metod obecné pružnosti pak sloužily zejména pro ověření, a to pouze tam, kde to bylo možné.

První výpočet pomocí MKP se rovněž zaměřoval na tloušťku stěny, od které se konstrukce odvíjela. Postup byl přitom daný výsledky výpočtů podle ČSN. Okrajové podmínky (obr. 30) byly použity pro víko stejných rozměrů a stejného tvaru s tloušťkou stěny 6 mm.



Obr. 30 Okrajové podmínky pro statickou strukturální analýzu, p=1,5MPa

Pro výpočet bylo použito skořepinového prvku Shell 181. Okrajové podmínky odpovídají připevnění víka k přírubě při přetlaku 15 bar. Hustota sítě a výsledky analýzy jsou zobrazeny na obr. 31.

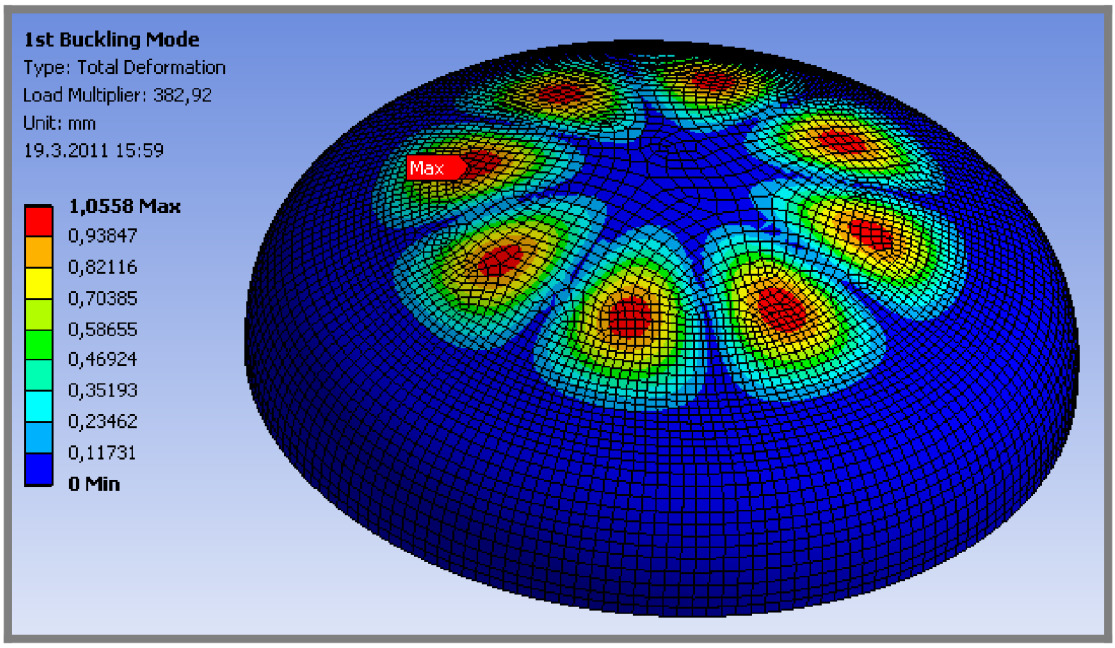


Obr. 31 Síť a výsledky analýzy, σ_{max}=144MPa

Maximální napětí vychází 144 MPa. Zvolená ocel 1.4910 má přitom deklarovanou minimální mez kluzu $R_{p0,2} \geq 260$ MPa [21]. Tloušťka stěny je tedy vyhovující.

Stejně jako u ČSN, při výpočtu podle MKP vychází nejkritičtěji toroidní část. Dá se to vysvětlit tím, že v toroidní části je menší rádius, a tak dochází k vyšší koncentraci napětí. Je proto logické, že na toroidní část nesmí být umístěny žádné výrazné konstrukční prvky, aby nedocházelo k další koncentraci napětí. Podle ČSN nesmí být prvky umístěné k okraji blíže než 62 mm.

Dalším řešeným problémem souvisejícím s potřebnou tloušťkou stěny vnitřního víka byla kontrola proti ztrátě vzpěrné stability. Modelu totožnému s předchozím výpočtem byly zadány jiné okrajové podmínky, tentokrát simulující vnější přetlak 1 bar.



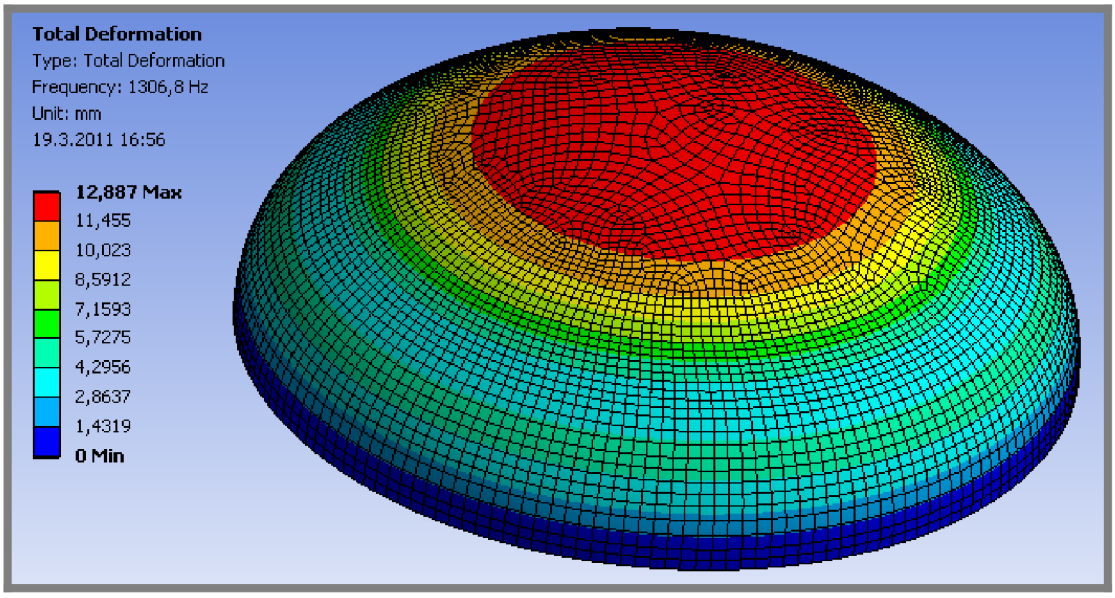
Obr. 32 Ztráta vzpěrné stability, Load multiplier = 383

Z výsledků analýzy (obr. 32) vyplývá, že by muselo být zatížení 383x větší než 1 bar, aby ke ztrátě vzpěrné stability došlo. Otázkou je, do jaké míry lze těmto výsledkům věřit. Podle ČSN vychází výsledky jiné, ale rovněž vyhovující. Povolený podtlak je podle těchto výpočtů 2,7 MPa, což je 27x více než jaký bude na víko působit. ČSN a ANSYS se v tomto bodě liší o řád. Další nesrovnalostí při výpočtu pomocí MKP je tvar deformace 1. módu vzpěrné stability. Ten by se měl spíše podobat obr. 33, kde je předmětem řešení vlastní frekvence víka. Důležité však je, že víko je z hlediska ztráty vzpěrné stability vyhovující.

Posledním bodem v řešení tloušťky stěny víka je dynamický ráz způsobený rychlým přívodem chladícího plynu. Dá se očekávat, že během kalícího procesu se zvýší tlak z -1 bar na 15 bar během asi 1-2 s.

Dynamické zatěžování je charakteristické tím, že při úderu určitou silou (a setrvání účinku síly) do součásti se tato rozkmitá kolem základní polohy, která je dána působením dané síly při statickém zatěžování. Aby se součást rozkmitala, musí nastat účinek dané síly v časovém úseku řádově srovnatelném s periodou kmitání.

Prvním úkolem tedy bylo porovnání rychlosti účinku síly s periodou vlastní frekvence víka. Rychlost účinku síly je přitom v horším uvažovaném případě 1 s. Pro představu o vlastní frekvenci víka byl proveden další výpočet se stejným modelem, tentokrát jako modální analýza při zachování vetknutí (fixed support) z obr. 30.



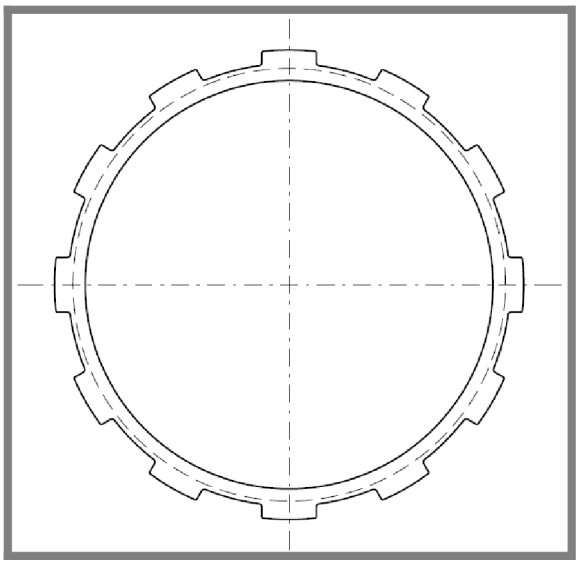
Obr. 33 Výsledky modální analýzy, f = 1300 Hz

Z modální analýzy vyplývá, že vlastní frekvence víka se bude pohybovat nad hodnotou 1000 Hz (obr. 33). Perioda bude tedy menší než 1/1000 s. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že přivedení kalícího plynu během 1 s je příliš pomalé, než aby způsobilo dynamické zatížení. Zatížení lze považovat za statické.

6.1.2 Návrh bajonetových zámků

Počet zámků byl volen tak, aby nebylo potřeba vysokého zdvihu aktuátoru a zároveň tak, aby nebyly zámky příliš úzké kvůli potřebě určitého axiálního posuvu během uzamykání a dostatečné pevnosti bajonetových zámků samotných.

Bylo zvoleno 12 bajonetových zámků po obvodě. Délka jednoho zámku je při daných rozměrech přibližně 80 mm. Ze začátku byla radiální šířka zámků určována spíše orientačně v určité závislosti na pracovním přetlaku. Později bylo navrhování radiální šířky určováno zároveň s navrhováním příruby, jak je popsáno detailněji v bodě 6.1.3. Tvar bajonetových zámků z axiálního směru je na obr. 34.

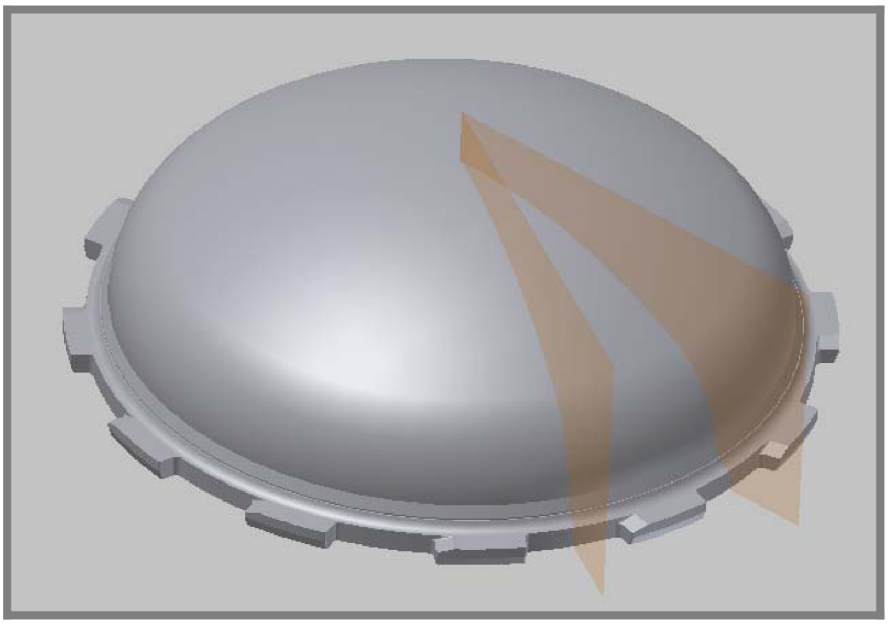


Obr. 34 Tvar příruby s bajonetovými zámky

6.1.3 Návrh příruby

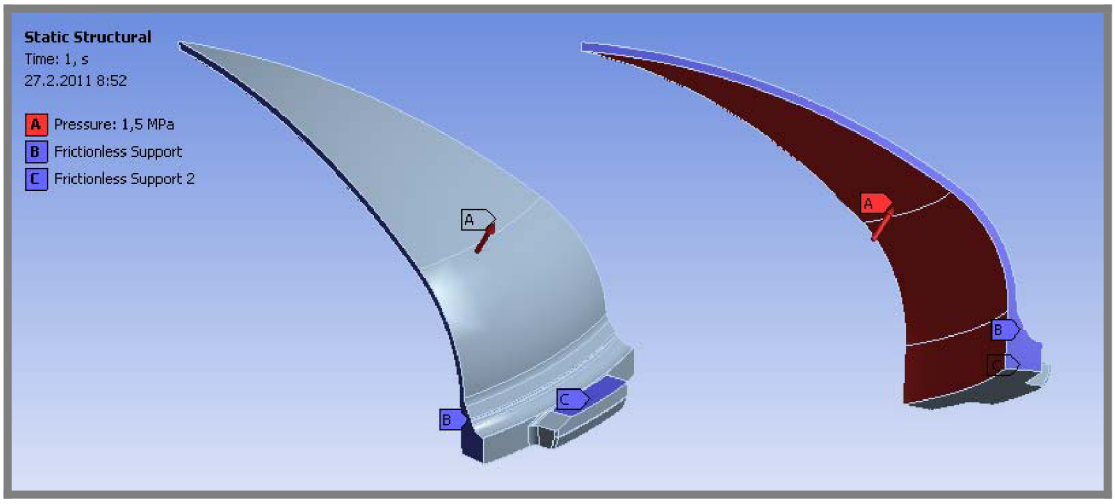
6.1.3

Pevnostní výpočet příruby víka probíhal výlučně pomocí MKP. Pro výpočet byl použit model, který obsahoval pouze vnitřní víko s přírubou. Pro usnadnění výpočtu byl tento model zjednodušen na jednu výseč (1/12), která ve svém středu obsahuje jeden zámek (obr. 35).



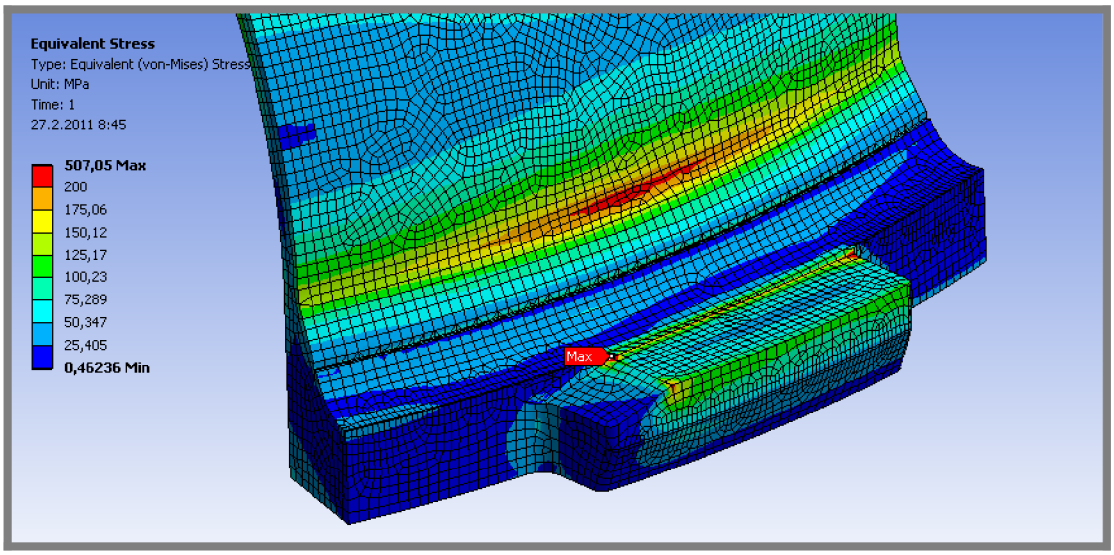
Obr. 35 Zjednodušení modelu pro návrh příruby

Tato výseč poté byla zavazbena podle obr. 36. Charakter deformace je v podstatě symetrický. Z tohoto důvodu byla na roviny řezu podle obr. 35 aplikována podmínka rovinné podpory (frictionless support). Další podmínka tohoto charakteru byla aplikována na zámek, což má simulovat styk víka s pecí. Napětí bylo nakonec aplikováno na vnitřní část výseče, a to již několikrát zmiňovaných 1,5 MPa. Jako druh prvku byl použit převážně Solid 186, čili krychlový prvek s 20 uzlovými body.

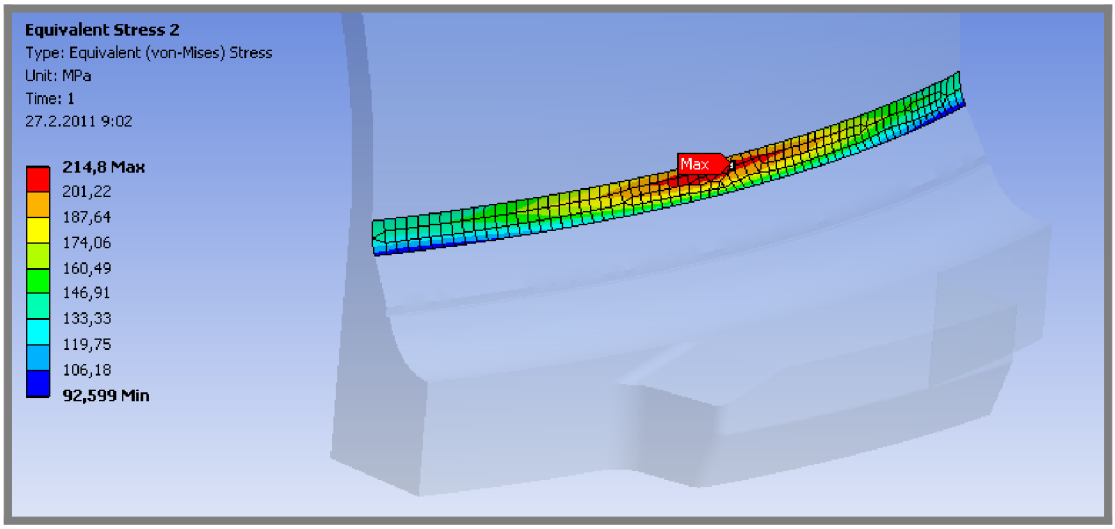


Obr. 36 Okrajové podmínky pro návrh příruby, p=1,5MPa

Jak bylo zmíněno v kapitole 5.2.8, příruba se několikrát měnila, až do její konečné podoby, jejíž výsledky analýzy lze vidět na obr. 37 a 38. Na obr. 37 je maximum 507 MPa na rohu oblasti se zadanou *frictionless support*. K vysoké koncentraci napětí dochází v průběhu jednoho prvku, kvůli tvaru a poloze zavazbené oblasti vůči zbytku tělesa. Kdyby byla síť dále zjemňována, rostlo by napětí v tomto bodě teoreticky do nekonečna. Z tohoto důvodu nemusí být bráno vážně. Podstatně významnější je maximální napětí na obr. 38, které se nachází na svaru příruby s vnitřním víkem a má hodnotu 215 MPa.



Obr. 37 Síť a výsledky analýzy v celém modelu, σ_{max}=507MPa



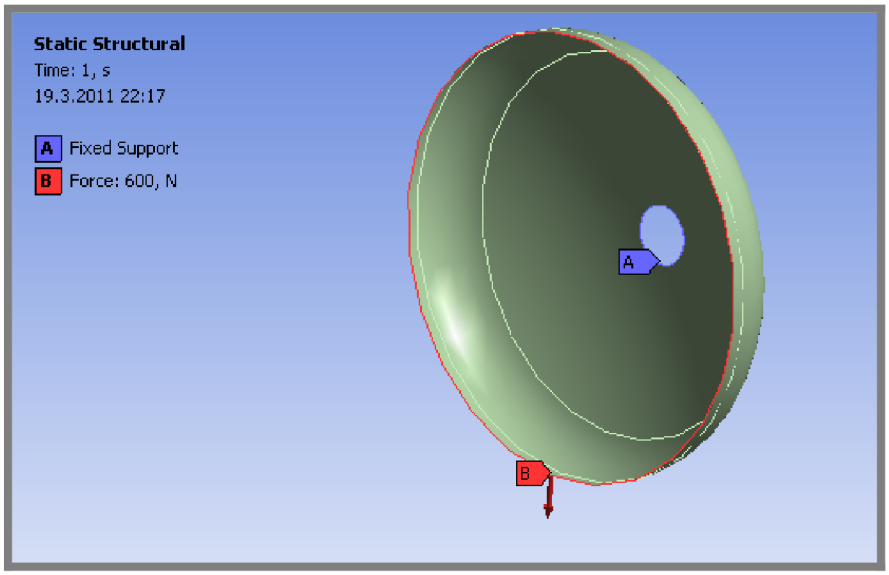
Obr. 38 Výsledky analýzy na svaru příruby a hlavního víka, σ_{max}=215MPa

Zvolený materiál (1.4910) má deklarovanou minimální mez kluzu $R_{p0,2}$≥260 MPa, jak již bylo uvedeno u navrhování tloušťky stěny víka v kapitole 6.1.1, bezpečnost by tedy měla být dostatečná. Napětí se nevyskytuje přímo na materiálu, ale na svaru. Je tedy kladen velký důraz na kvalitu svaru. Případně je možno svar opracovat a zajistit mezi přírubou a víkem plynulý přechod (s rádiusem 12 mm). Těsnost a pevnost svaru bude hlavním předmětem zkoumání při tlakové zkoušce, která bude provedena po dokončení celé pece.

6.1.4 Centrální čep

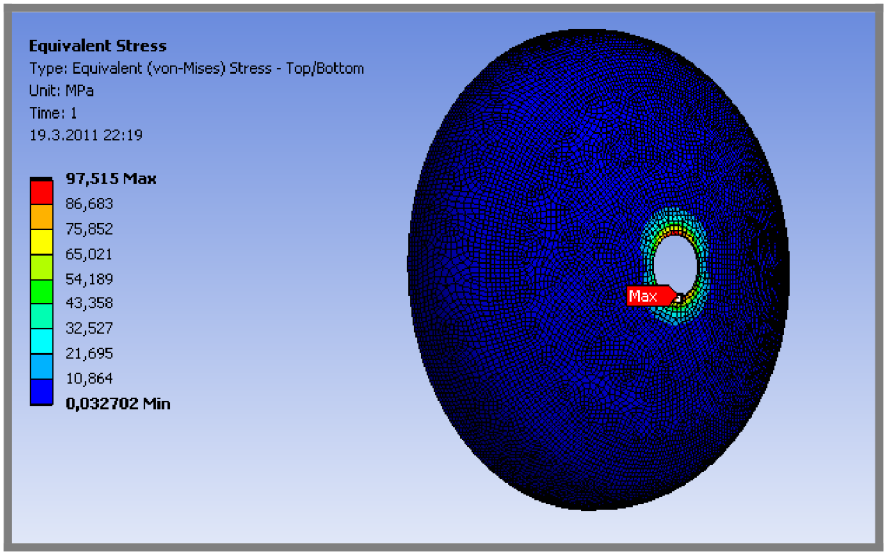
6.1.4

Konstrukční uspořádání centrálního čepu je zobrazeno v kapitole 5.2.10. Centrální čep je přivařen k vnějšímu víku a je uložen v dvojici kluzných ložisek. Jedním z prvních navrhovaných parametrů byl vnější průměr čepu, jenž je přivařen k víku. Ten musí být dostatečně velký, aby víko v daném místě odolalo zatížení vlastní vahou v otevřeném stavu.



Obr. 39 Okrajové podmínky pro výpočet vnějšího průměru čepu, F=600N

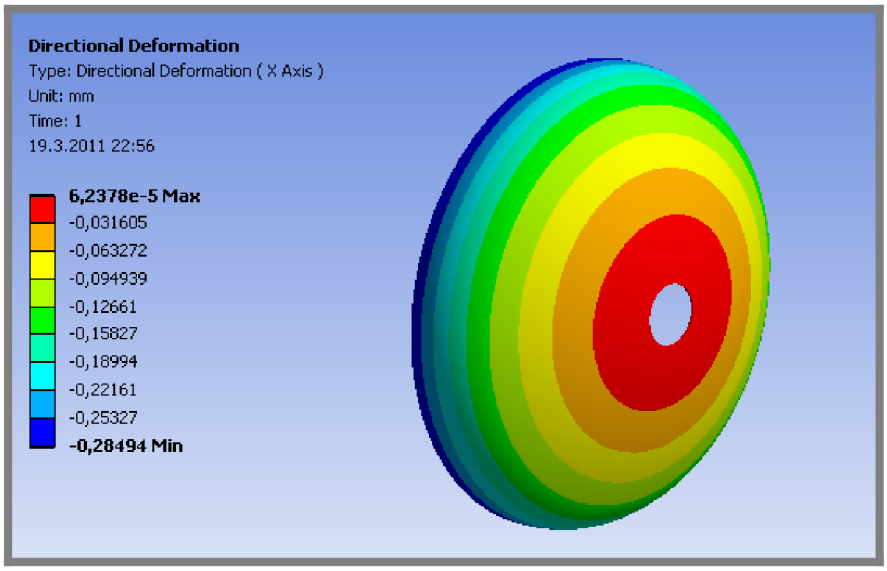
Vnější víko v podstatě kopíruje tvar hlavního (vnitřního) víka s určitým odsazením. Vzhledem k tomu, že není namáháno od přetlaku, může mít výrazně nižší tloušťku stěny. Na obr. 39 jsou okrajové podmínky pro výpočet vnějšího průměru centrálního čepu. Víko s výše popsaným tvarem a stěnou 3 mm má uvnitř otvor odpovídající vnějšímu průměru čepu, za který je geometrie vetknuta. Po okraji je síla působící na svar. Hodnota 600 N vychází z hmotnosti víka v době, kdy bylo uvažováno s průhledítkem. Vzhledem k nižší aktuální hmotnosti (52 kg včetně ramena) jsou tyto výpočty bezpečnější. Vnější víko bylo pro výpočet nahrazeno skořepinovými prvky Shell 181.



Obr. 40 Namáhání podle HMH, σ_{max}=98MPa

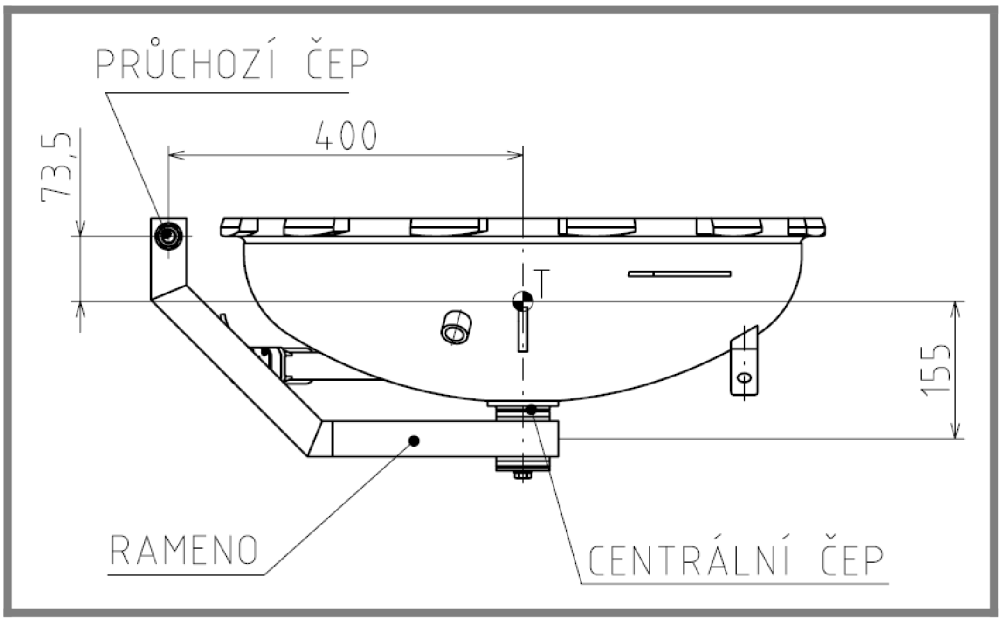
Horní víko, které bude vyrobeno ze stejného nerezového materiálu jako víko vnější, bez problémů odolá napětí 100 MPa podle podmínky HMH (obr. 40). Dalším faktorem, který musel být kontrolován je deformace ve vertikálním směru. Tu je potřeba co možná nejvíce eliminovat, aby nedošlo ke kontaktu mezi zámky víka

a pece při uzavírání. Radiální vůle mezi těmito tvarovými prvky byla navrhnuta na 3 mm. Jak vyplývá z obr. 41, víko se posune dolů o pouhých 0,3 mm. Tuhost je tedy dostatečná. Použitý průměr otvoru v těchto výpočtech (80 mm) byl navrhnut jako vnější průměr centrálního čepu.



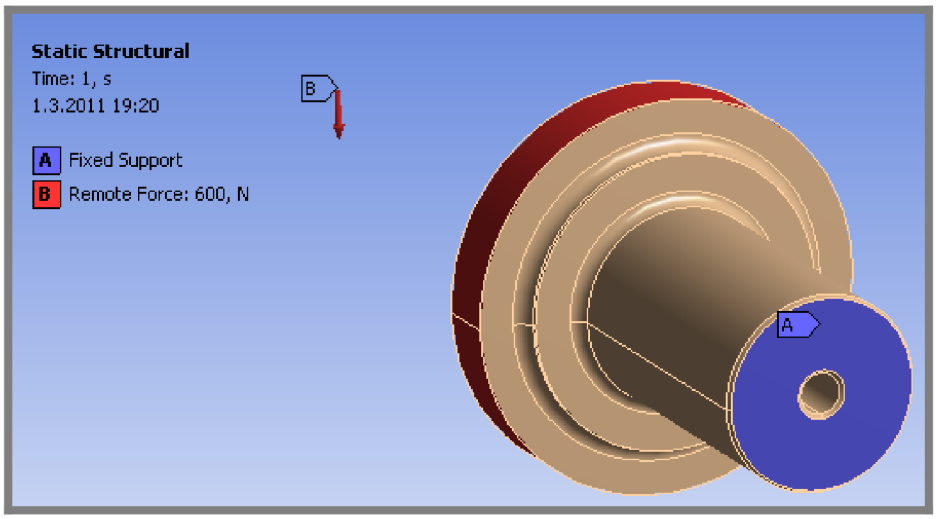
Obr. 41 Vertikální deformace vnějšího víka, Δx=0,28mm

Menší průměr centrálního čepu byl navržen tak, aby odpovídal rozměrům nakupovaných kluzných ložisek. Tyto rozměry byly stanovovány podle katalogu SKF [22], konkrétně pro bronzová přírubová ložiska. V případě centrálního čepu bylo zvoleno ložisko s vnitřním průměrem 40 mm, kratší varianta.
Ve výpočtech, které počítaly s víkem v otevřeném stavu, bylo zatížení hmotností víka simulováno jako vzdálená síla (remote force) s působištěm v těžišti. Poloha těžiště byla určena pomocí programu Inventor. Vzdálenost těžiště od jednotlivých počítaných konstrukčních uzlů je znázorněna na obr. 42.



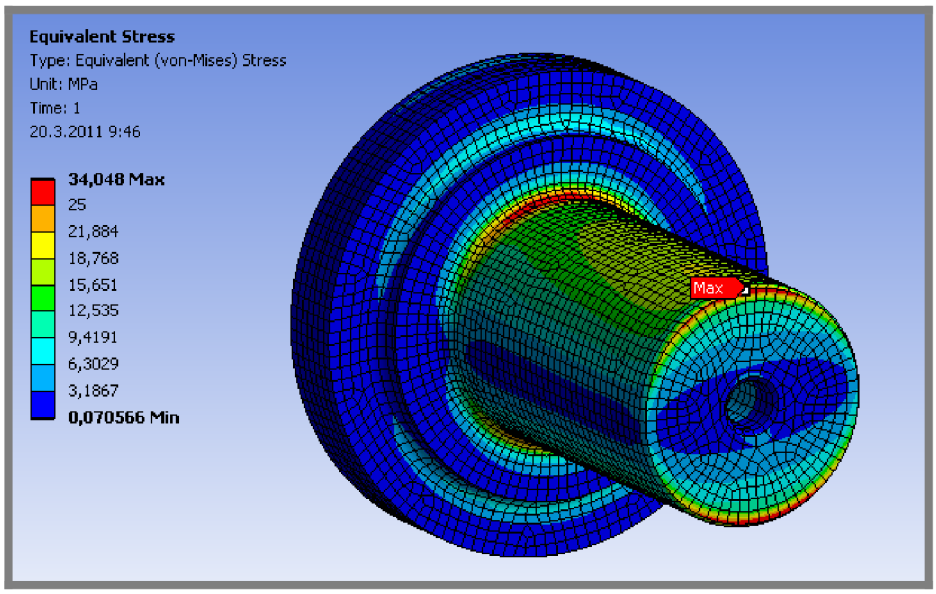
Obr. 42 Poloha těžiště víka

Působiště vzdálené síly je tedy na obr. 43 umístěno v ose čepu vzdáleno asi 155 mm od geometrického středu kluzné plochy. Vetknutí neodpovídá realitě, neboť je umístěno do čela čepu. Na kluznou plochu nebylo umístěno z toho důvodu, že není vhodné umístit vetknutí poblíž místa, kde lze očekávat koncentraci napětí (v rádiusu). Prvek použitý pro výpočet je Solid 186.



Obr. 43 Okrajové podmínky pro zatížení centrálního čepu, F=600N

Maximální napětí je podle analýzy (obr. 44) sice na čele čepu, ale vzhledem ke skutečnému charakteru zatížení je důležité především napětí ve zmiňovaném rádiusu. To má hodnotu 30,5 MPa.



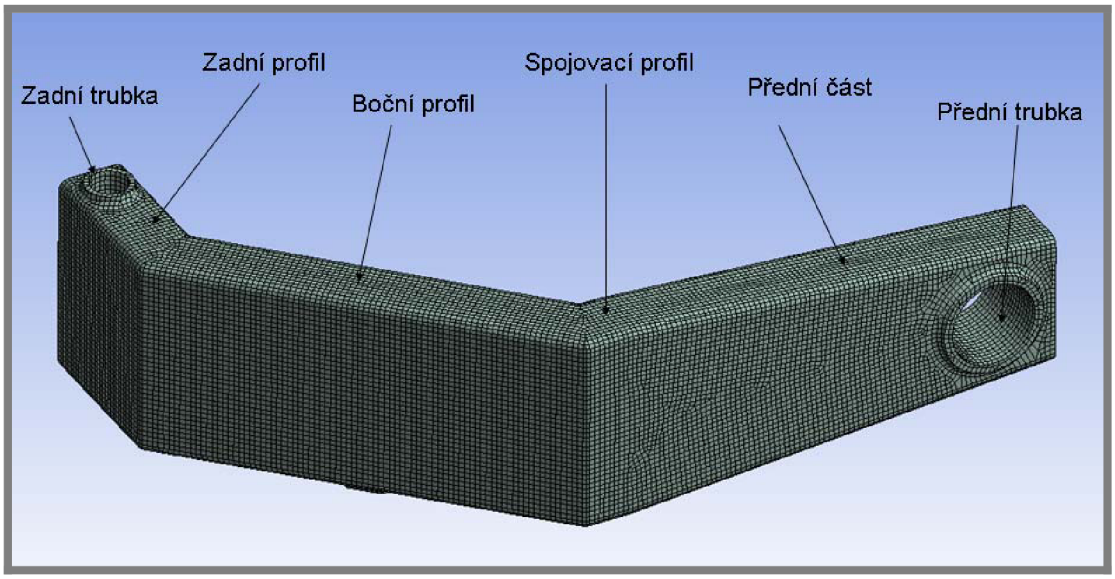
Obr. 44 Síť a napětí HMH pro centrální čep, σ_{max}=34MPa

Dá se říct, že celý čep je značně předimenzovaný, což je výhodné kvůli nízkým deformacím vzhledem k uzavírání víka. Vnější průměr nemůže být o moc menší, tudíž není ani výhodné, aby se zmenšoval vnitřní průměr čepu, který by měl za následek sice snížení hmotnosti, ale zvýšení výrobních nákladů a odpadu.

6.1.5 Nosné rameno

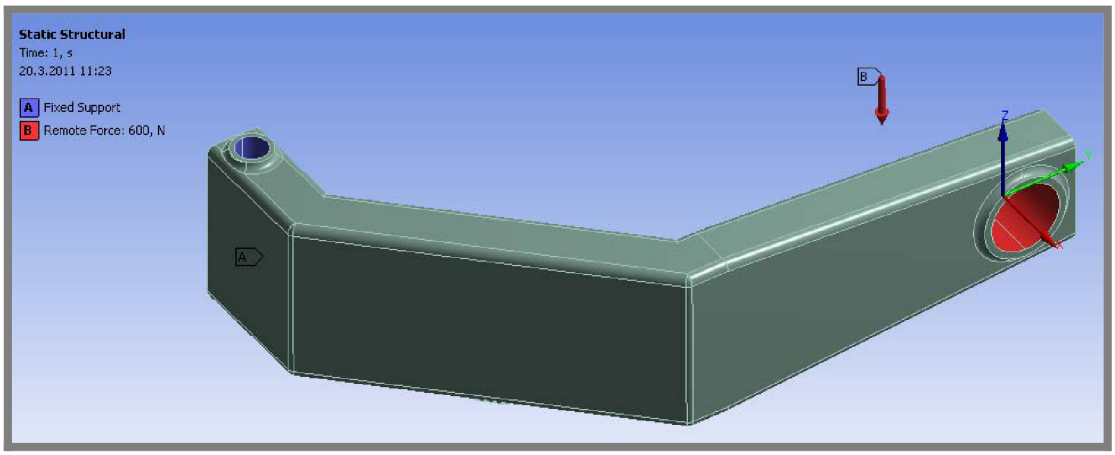
Vzhledem k velikosti průchozího čepu byl zvolen rozměr uzavřeného profilu ramena 120x40x3 podle Ferony [23]. Materiál ramene je ekvivalentem 11 375 (1.0039) a dá se tedy předpokládat, že se mez kluzu bude pohybovat nad hranicí 200 MPa, což jako informace pro následující výpočty postačuje.

První pevnostní výpočty byly prováděny na prutovém modelu s průřezem odpovídajícím použitému profilu. Celkový tvar ramene je však příliš komplikovaný, než aby se dalo zjistit maximální namáhání této konstrukce daným způsobem.



Obr. 45 Použitá geometrie a síť pro výpočet namáhání ramene

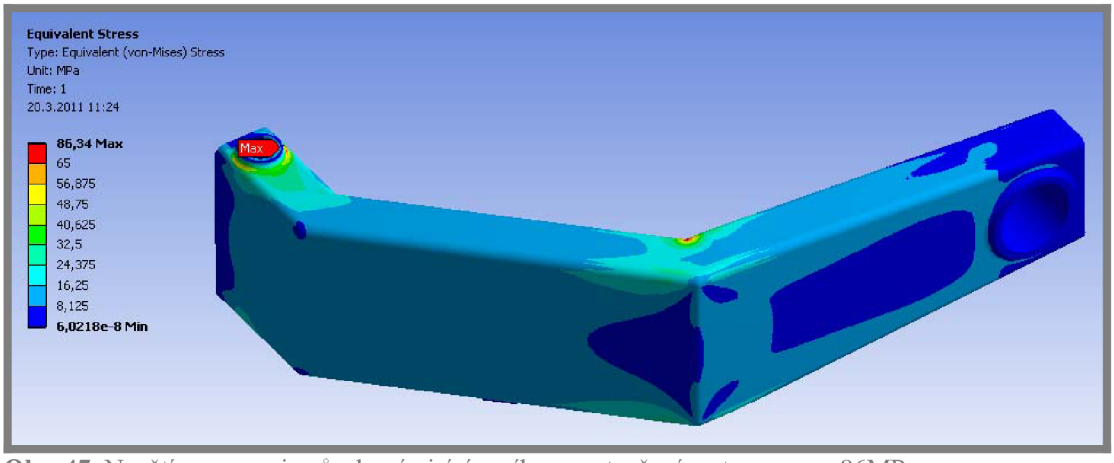
Po vytvoření 3D modelu ramene skládajícího se z více částí byl tento model spojen do jednoho celku a upraven tak, aby výsledky analýzy byly relevantní (především se jednalo o zaoblení ostrých hran). Takto upravený model spolu s použitou sítí je na obr. 45.



Obr. 46 Okrajové podmínky pro víko zavěšené na rameni, F=600N

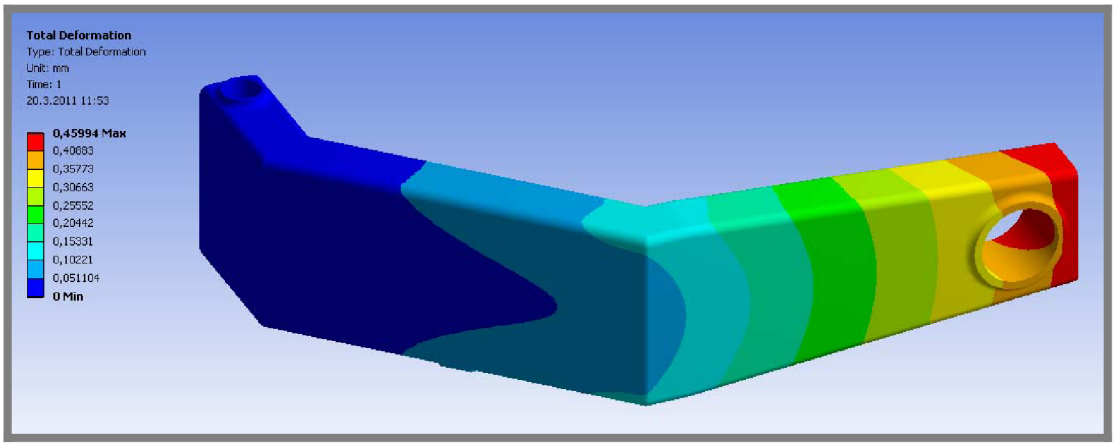
První pevnostní analýza se zaměřovala na případ, kdy je víko volně zavěšeno na rameni v otevřeném stavu. Tomuto zatížení odpovídají okrajové podmínky na

obr. 46, kde je vetknutí umístěno v zadní trubce a zatížení v přední trubce. Poloha působiště síly odpovídá poloze těžiště víka (obr. 42, kapitola 6.1.4). Velikost působící síly je 600 N.



Obr. 47 Napětí na rameni způsobené visícím víkem v otevřeném stavu, σ_{max}=86MPa

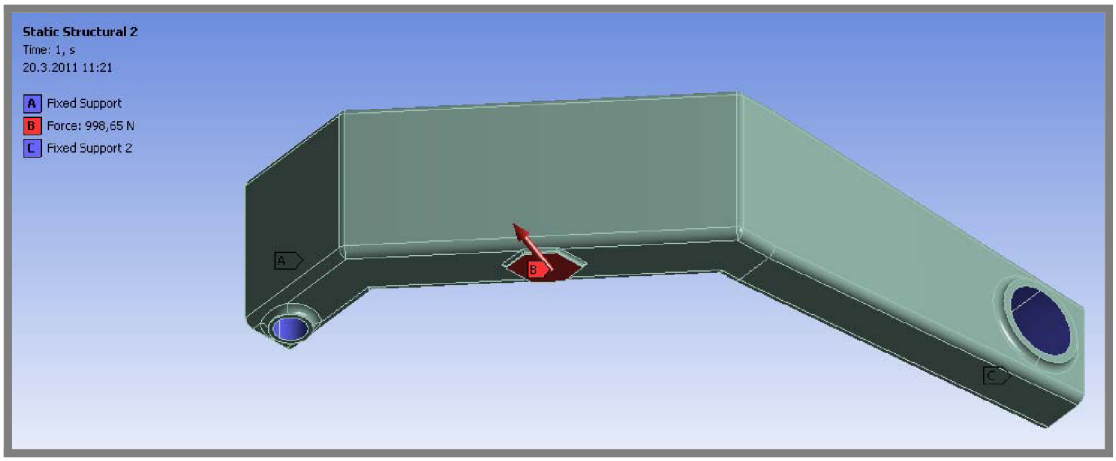
Výsledky určují místo maximálního namáhání poblíž vetknutí (obr. 47), ale k znatelnému nárůstu napětí dochází také v místě zlomu mezi spojovacím profilem a bočním profilem. Maximální napětí má hodnotu 86 MPa, je tedy vyhovující.



Obr. 48 Deformace ramena způsobená tíhou víka, Δx=0,46mm

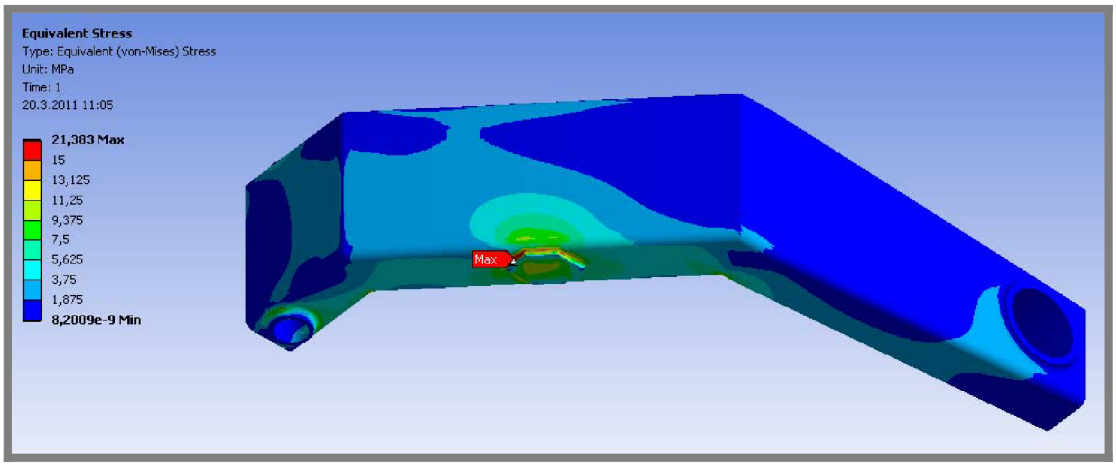
Významnou vypovídající hodnotu má i deformace celého ramene způsobená tíhou víka (obr. 48). Jak bylo popsáno dříve, víko se svou tvarovanou přírubou nesmí kolidovat s tvarovanou přírubou pece, mezi nimiž je navržená konstantní vůle 3 mm. Hodnota deformace ramena je 0,46 mm. Rameno je tedy dostatečně tuhé.

Dalším stavem, který bylo nutno prošetřit je zatížení od aktuátoru během uzamykání víka. Určování potřebné síly aktuátoru je poměrně komplikované a zřejmě bude třeba ji ověřit až bude víko fyzicky vyrobeno.



Obr. 49 Okrajové podmínky simulující reakci od síly aktuátoru, F=1000N

Na rameno je zespodu přivařen držák aktuátoru (viz kapitola 6.1.6), který byl pro výpočet ramene nahrazen pouze jeho vodorovnou částí – deskou. Na ni byla aplikována síla 1000 N rozdělena na dvě části tak, aby úhel svíraný touto silou odpovídal úhlu natočení aktuátoru vůči rameni během provozu. Okrajové podmínky jsou na obr. 49. Vetknutí je tentokrát aplikováno na obou koncích, protože aktuátor pracuje pouze tehdy, je-li víko uzavřeno a tudíž nevisí volně na rameni.

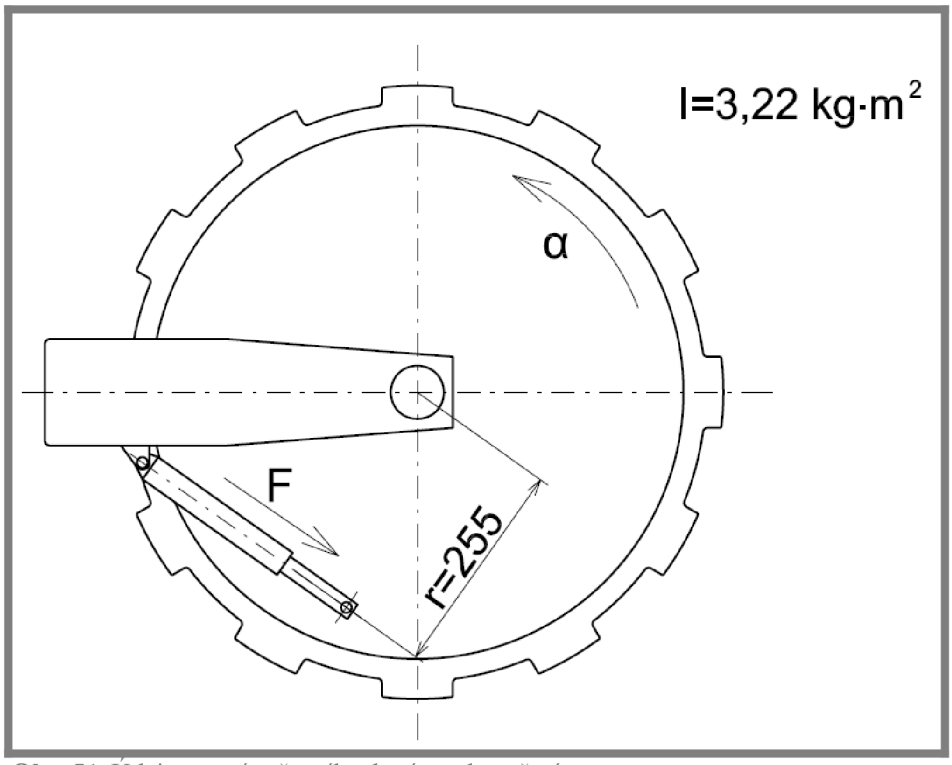


Obr. 50 Napětí HMH na rameni pro zatížení od aktuátoru, σ_{max}=21MPa

Výsledky potvrdily, že vliv síly aktuátoru na rameno je poměrně malý a rameno bez problémů vydrží. Případné navýšení síly aktuátoru by na rameno nemělo mít vliv. Maximum namáhání je na svaru mezi deskou uchycení aktuátoru a zbytkem ramene. Toto napětí má hodnotu 21 MPa. Rozložení napětí na rameni pro tento případ je zobrazeno na obr. 50.

6.1.6 Aktuátor

Potřebná síla nutná k uzamčení pece a tím i zatížení jednotlivých prvků není úplně známa a zřejmě bude nutno ji stanovit až z měření na fyzickém modelu. Určité orientační hodnoty je možno získat z výpočtů pro moment setrvačnosti. Síla potřebná pro překonání tření bude však zřejmě několikanásobně větší než síla nutná k pootočení víka bez tření.



Obr. 51 Údaje pro výpočet síly aktuátoru bez tření

Výpočet byl prováděn podle diagramu na obr. 51. Moment setrvačnosti víka samotného je podle programu Inventor roven 3,22 kg·m^2. Pro další výpočet bylo stanoveno, že aktuátor musí teoreticky dokázat víko roztočit na 1 otáčku za sekundu během jedné sekundy, jinými slovy, udělit víku úhlové zrychlení 6,28 rad/s^2 (Vynásobené o 2·π). Výpočet celkového momentu potřebného pro dané podmínky je uveden v rovnici (2).

$$M = I \cdot \alpha = 3,22\ \mathrm{kg \cdot m^2} \cdot 6,28\ \mathrm{rad \cdot s^{-2}} = 20,2\ \mathrm{Nm} \qquad (2)$$

kde:

M	Nm	je moment síly
I	kg·m^2	- moment setrvačnosti
α	rad·s^{-2}	- úhlové zrychlení

Navrhnutý poloměr od síly aktuátoru je 255 mm (=0,255 m). Pro dané parametry by tak teoreticky postačoval aktuátor o síle 80 N, jak vyplývá z rovnice (3).

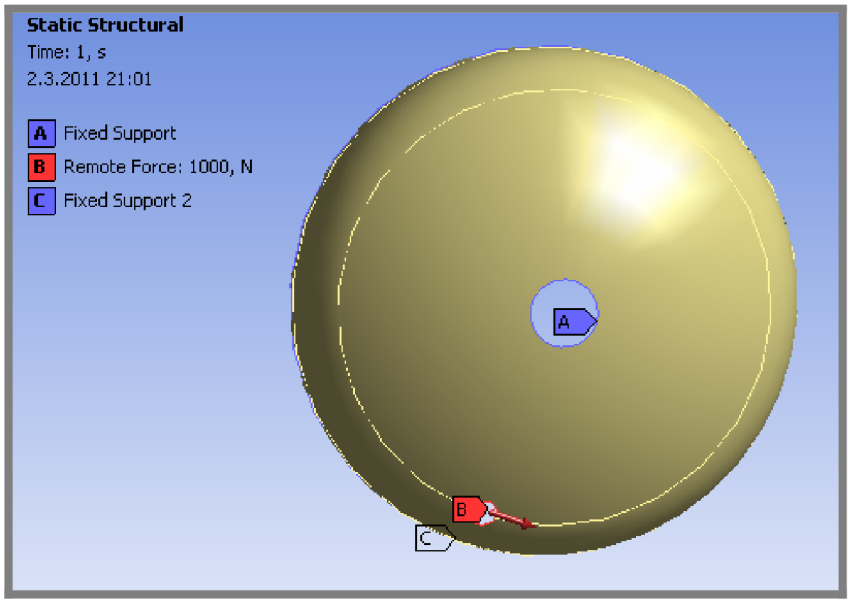
$$F = \frac{M}{r} = \frac{20,2\ \text{Nm}}{0,255\ \text{m}} = 79,3\ \text{N} \tag{3}$$

kde:

F	N	je síla
M	Nm	- moment síly
r	mm	- poloměr síly

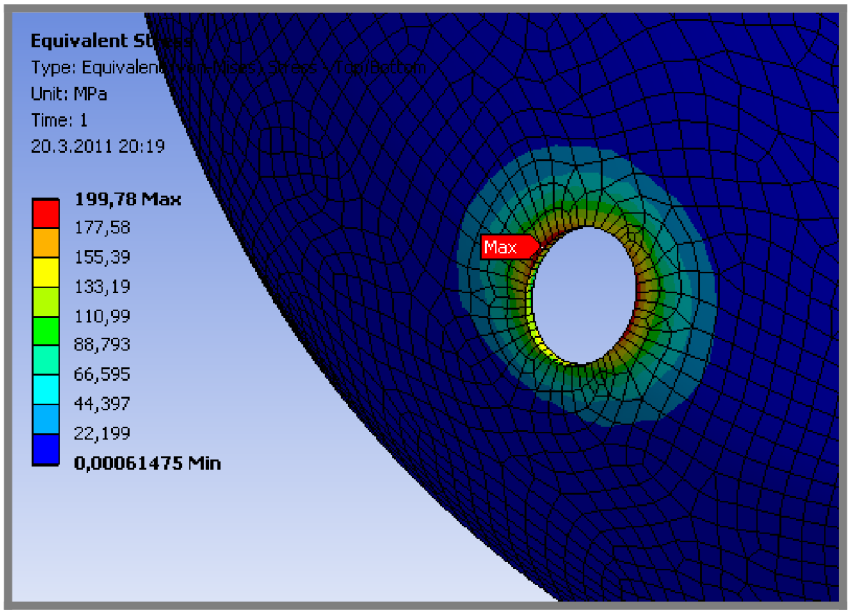
Nelze ovšem zanedbat tření mezi bajonetovými zámky víka a pece a mezi přírubou a těsněním. K tomu je zapotřebí znát, jakou silou je potřeba stlačit těsnění, aby bylo utěsnění prostoru pece dostatečné. Jistou snahou získat v tomto směru konkrétní bylo počítat s plochým těsněním pro přírubový spoj podle ČSN 13 1550. Výpočet podle dané normy je do jisté míry analogický s coulombovským třením. To znamená, že tlak na ploché těsnění musí odpovídat tlaku působícímu z nádoby (15 bar) vynásobenému o příslušný koeficient. V tom lepším případě byla potřebná síla stlačení těsnění rovna asi 50 000 N, což pro pootočení vyžadovalo aktuátor o síle několik desítek kN a to je naprosto nepřijatelné.

Pro utěsnění mezery mezi víkem a pecí bude použito tvarované těsnění, které se tlakem zdeformuje a ještě více ucpe mezeru mezi přírubami. Je tedy zřejmé, že síla stlačení těsnění ani zdaleka nebude muset být tak velká. Jak velká bude muset nakonec být se rozhodne až po volbě konkrétního těsnění a s dodatečnými informacemi od výrobce. Do té doby je síla aktuátoru počítána hlavně s ohledem na omezené možnosti konstrukce víka. V závislosti na následujících výpočtech byla předběžně zvolena síla aktuátoru 1000 N s tím, že v případě potřeby se mohou udělat drobné konstrukční úpravy, které by umožnily použití síly vyšší. Tyto úpravy jsou zmíněny u jednotlivých kritických prvků.



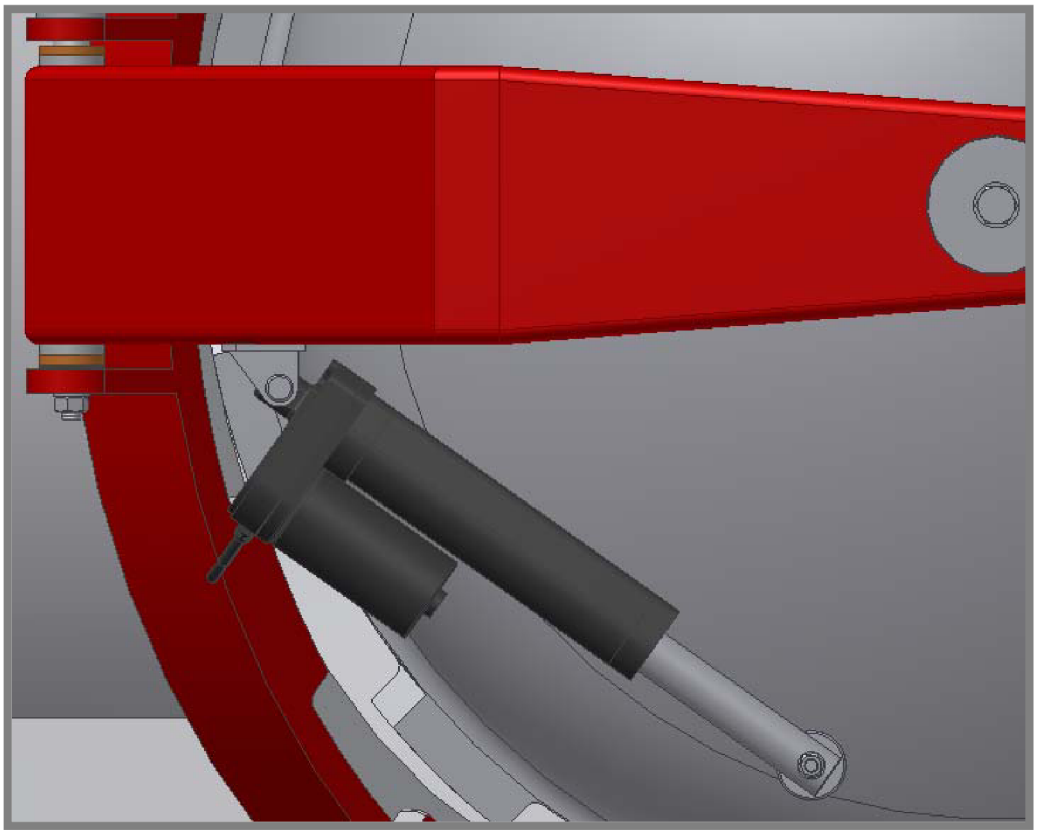
Obr. 52 Okrajové podmínky, zatížení od aktuátoru, F=1000N

První výpočet se zaměřil na odolnost vnějšího víka, které bude sílu od aktuátoru přenášet. Ve víku je otvor o průměru 30 mm, na který se přivaří přípravek pro uchycení tyče aktuátoru (obr. 55). Do tohoto otvoru byla aplikována síla 1000 N, a to tečně (obr. 52). Víko bylo vetknuto za vnitřní otvor a vnější hranu. Pro výpočet bylo opět použito skořepinového prvku Shell 181.



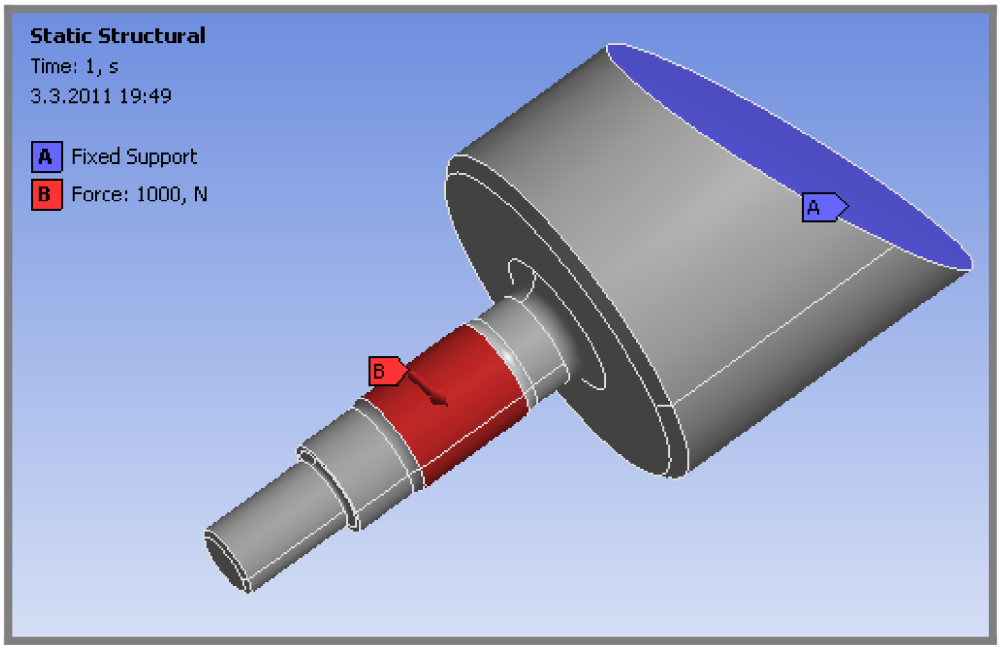
Obr. 53 Napětí na otvoru pro umístění uchycení tyče aktuátoru, σ_{max}=200MPa

Jak jde vidět z detailního pohledu na kritický otvor (obr. 53), Napětí na tomto místě je 200 MPa a další zvyšování síly aktuátoru by mohlo být komplikované. V případě, že by opravdu bylo potřeba zvolit aktuátor silnější než 1000 N, by bylo nutné otvor vyztužit. Bez komplikací by se tento zásah ale neobešel, protože by nemuselo zbýt dostatek prostoru pro přivaření samotného uchycení tyče a celá sestava aktuátoru by se musela lehce posunout ve směru osy pece.



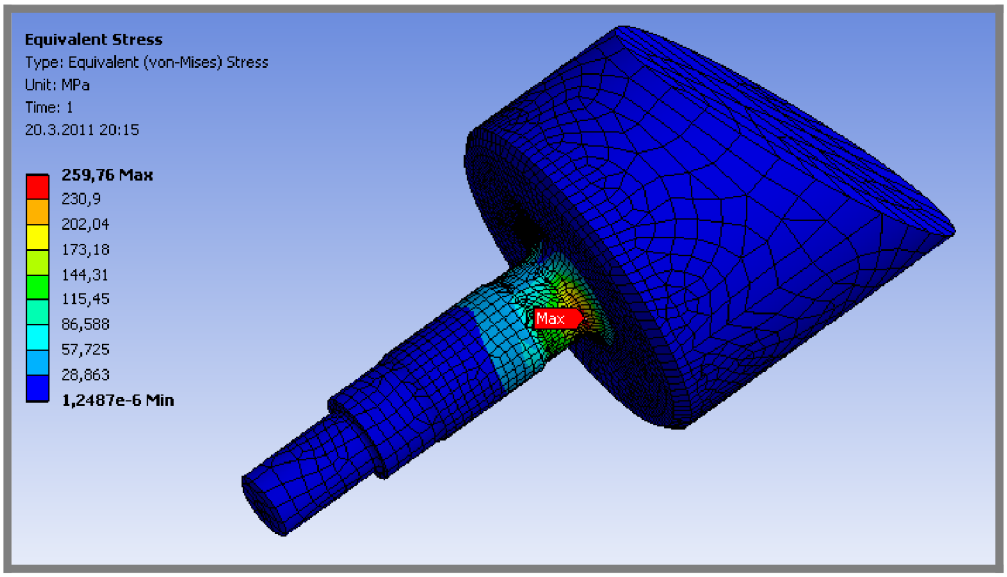
Obr. 54 Umístění aktuátoru v sestavě

Po získání určité představy o síle aktuátoru přišlo na řadu další omezení. Tím byly jeho geometrické rozměry. Vzhledem k lomenému tvaru ramene a délce bajonetových zámků bylo potřeba zvolit aktuátor, který by se do daného prostoru vešel tak, aby byl umístěn kolmo k ose víka, přibližně tečně k roztečné kružnici, na které leží uchycení tyče a přitom dokázal s víkem pootočit o potřebný úhel. Tyto podmínky byly pro aktuální konstrukci vyčísleny jako maximální délka celého aktuátoru 225 mm a minimální zdvih 70 mm. Přitom bylo potřeba počítat s určitou rezervou. Objektem hledání tak byl aktuátor o síle do 1000 N, který by byl dlouhý asi 200 mm a měl zdvih asi 100 mm. Přestože si poslední dva požadavky poměrně protiřečí, podařilo se najít několik jednotek, které vyhovují. Nakonec byl zvolen (i s přihlédnutím k ceně) aktuátor Transmotec DLA, jehož délka je 207 mm a zdvih 100 mm. Velikost aktuátoru a jeho umístění a upevnění v sestavě je na obr. 54.



Obr. 55 Okrajové podmínky uchycení tyče aktuátoru, F=1000N

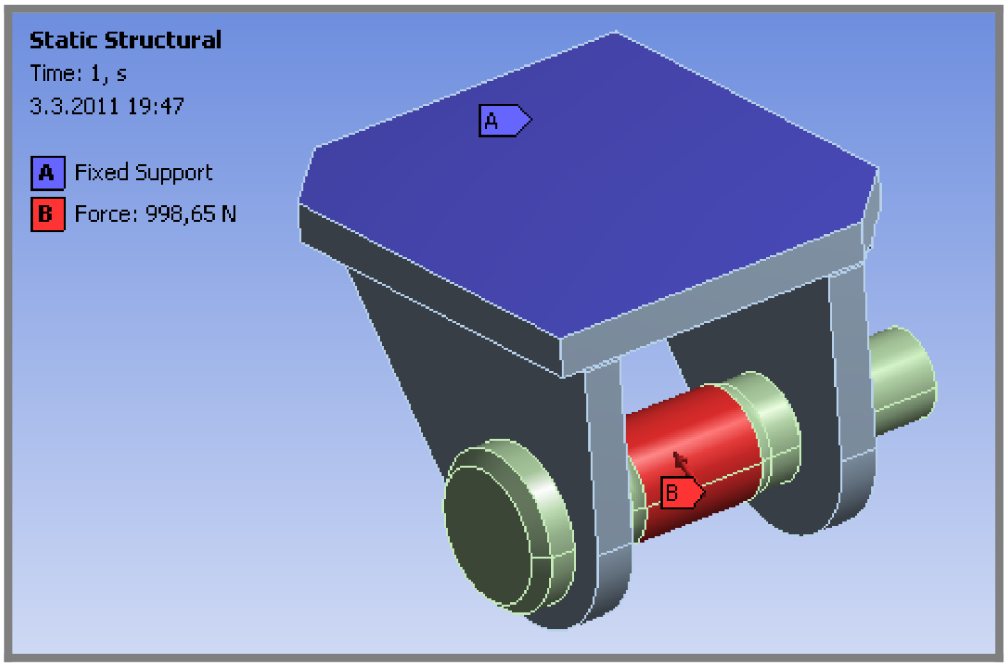
Druhým kritickým prvkem, který do jisté míry omezuje použití silnějšího aktuátoru je uchycení tyče. To se skládá z mohutné válcové části přivařené k víku a tenkého čepu, na kterém se tyč volně otáčí. Pohyb tyče v axiálním směru je zajištěn maticí. Pro pevnostní analýzu byl čep upraven tak, aby bylo možno na plochu čepu umístit zatížení aniž by došlo ke koncentraci napětí na hranici tohoto zatížení. Okrajové podmínky pro uchycení tyče jsou na obr. 55.



Obr. 56 Napětí uchycení tyče aktuátoru, σ_{max}=260MPa

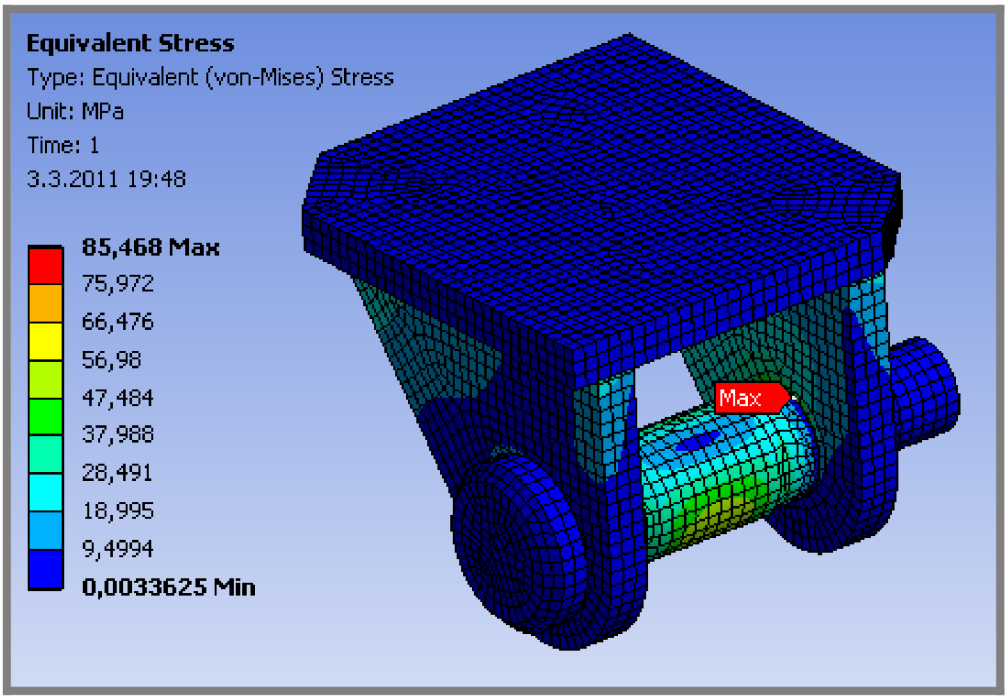
Kritické místo je podle výsledků analýzy na přechodu mezi čepem a válcovou částí pro přivaření k víku a má hodnotu 260 MPa (obr. 56). Napětí je v tomto případě na spodní hranici meze kluzu pro použitý materiál. Vzhledem k umístění aktuátoru a nutnosti zachování jeho relativního pohybu vůči víku je nutné, aby byla tyč k čepu uchycena letmo. Navíc je průměr čepu na tomto prvku dán průměrem otvoru na tyči

aktuátoru a nemůže být snadno zvětšen. Rádius s maximálním napětím je na horní hranici, aby ještě nekolidoval s tyčí a větší válcovou část nelze zmenšit, protože by se zvětšovalo napětí na vnějším víku. Tuto situaci lze řešit dvěmi způsoby. Méně invazivní je regulace síly aktuátoru elektronicky tak, aby její hodnota nestoupla např. nad 600 N. Bude-li ovšem nutné použít sílu 1000 N a vyšší, jedinou možností bude úprava tyče aktuátoru v tom smyslu, aby otvor na tyči měl větší průměr, než je současných 8 mm a tím pádem se mohl zvětšit i čep uchycení tyče aktuátoru.



Obr. 57 Okrajové podmínky uchycení aktuátoru, F=1000N

Daleko méně problémů skýtalo uchycení aktuátoru samotného. Ten je umístěn na čepu zachyceném na obou koncích a zajištěném maticí. Držák tohoto čepu je přivařen k rameni, jak je patrno z obr. 54 i z pevnostní analýzy ramene. Síla 1000 N byla v tomto případě rozložena do dvou složek, aby dohromady vyjadřovala úhel 35°, pod kterým je aktuátor vůči rameni nakloněn. Síla byla i zde aplikována na dodatečně vytvořenou geometrii, aby zbytečně nevznikala koncentrace napětí tam, kde nemá. Vetknutí celku bylo aplikováno na horní plochu držáku. Okrajové podmínky uchycení aktuátoru jsou znázorněny na obr. 57.

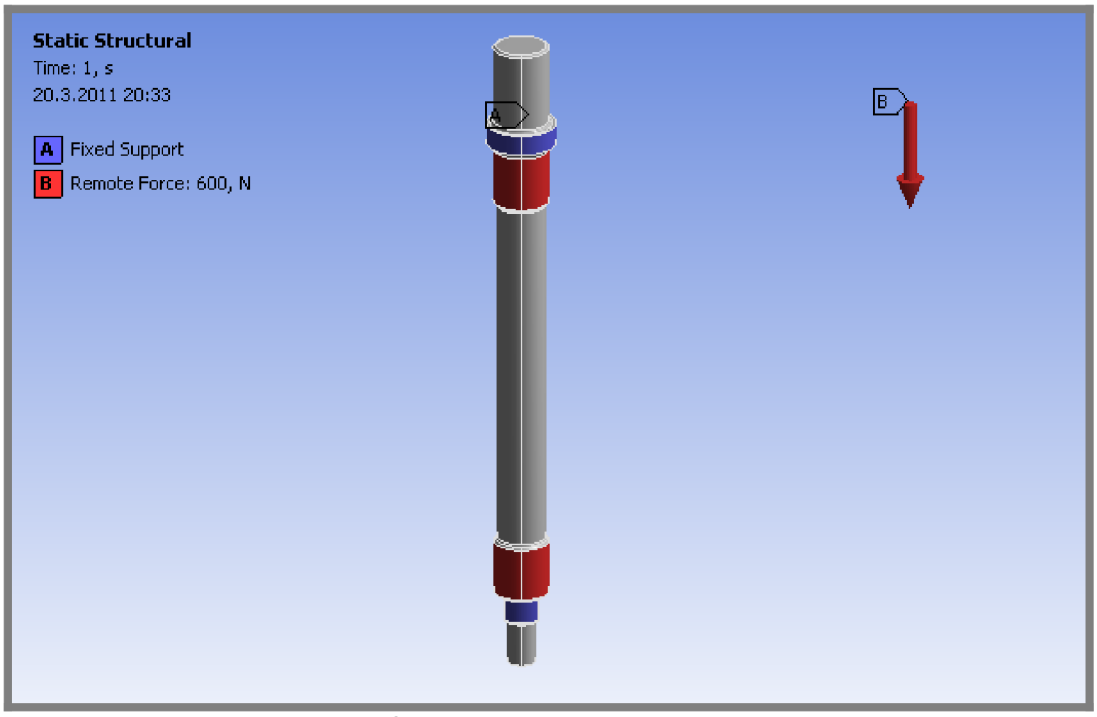


Obr. 58 Analýza držáku aktuátoru, σ_{max}=85MPa

Jak vyplývá z analýzy (obr. 58), držák je dimenzován dostatečně a není třeba dělat žádné úpravy. Maximum je na styku bočnice držáku s menším průměrem čepu a má hodnotu 85 MPa. Materiál držáku byl zvolen stejně jako u ramene 11 375, aby byla zajištěna jeho svařitelnost. Jako materiál čepu byla zvolena ocel 12 050. Oba tyto materiály mají mez kluzu vysoko nad maximálním vypočteným napětím.

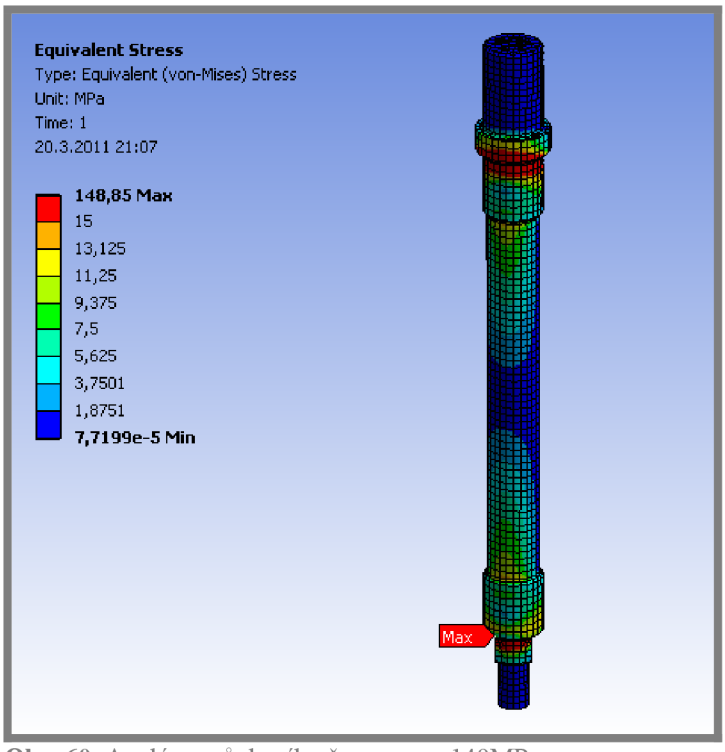
6.1.7 Průchozí čep

Průchozí čep slouží k uchycení ramena k peci a k omezení pohybu ramena na rotační kolem osy tohoto čepu. Umístění průchozího čepu v sestavě je zobrazeno na obr. 28 (kapitola 5.3.3). Okrajové podmínky byly voleny v závislosti na tomto umístění (obr. 59). Vzhledem k tomu, že na čep nepůsobí žádná axiální síla, byla forma umístění zvolena jako vetknutí. Vzdálená síla 600 N odpovídá váze víka s ramenem 60 kg a její vzdálenost od osy čepu odpovídá vzdálenosti těžiště víka podle obr. 42 v kapitole 6.1.4.



Obr. 59 Okrajové podmínky pro průchozí čep, F=600N

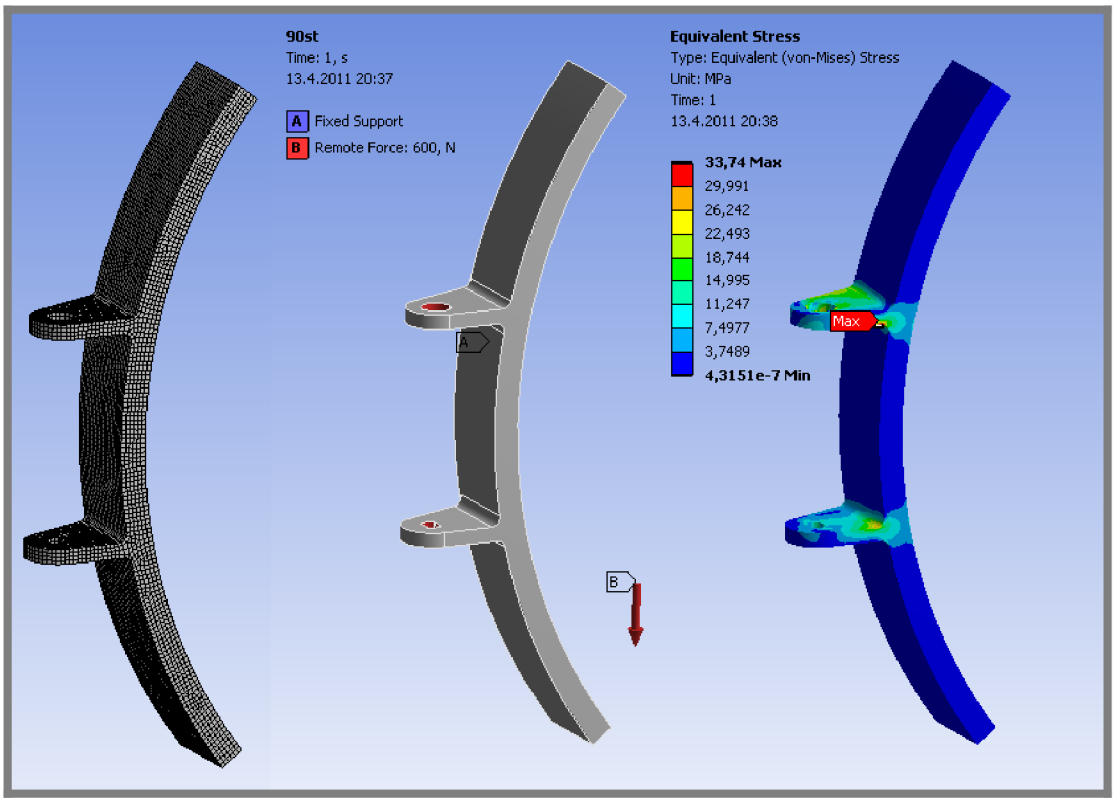
Výsledky dokazují, že čep je dimenzován dostatečně (obr. 60). Maximální napětí je na spodním tvarovém prvku, který zamezuje rotaci čepu. Jako materiál průchozího čepu byla zvolena ocel 12 050, která má mez kluzu rovnu 325 MPa. Maximální napětí je přitom 149 MPa.



Obr. 60 Analýza průchozího čepu, σ_{max}=149MPa

6.1.8 Uchycení na peci

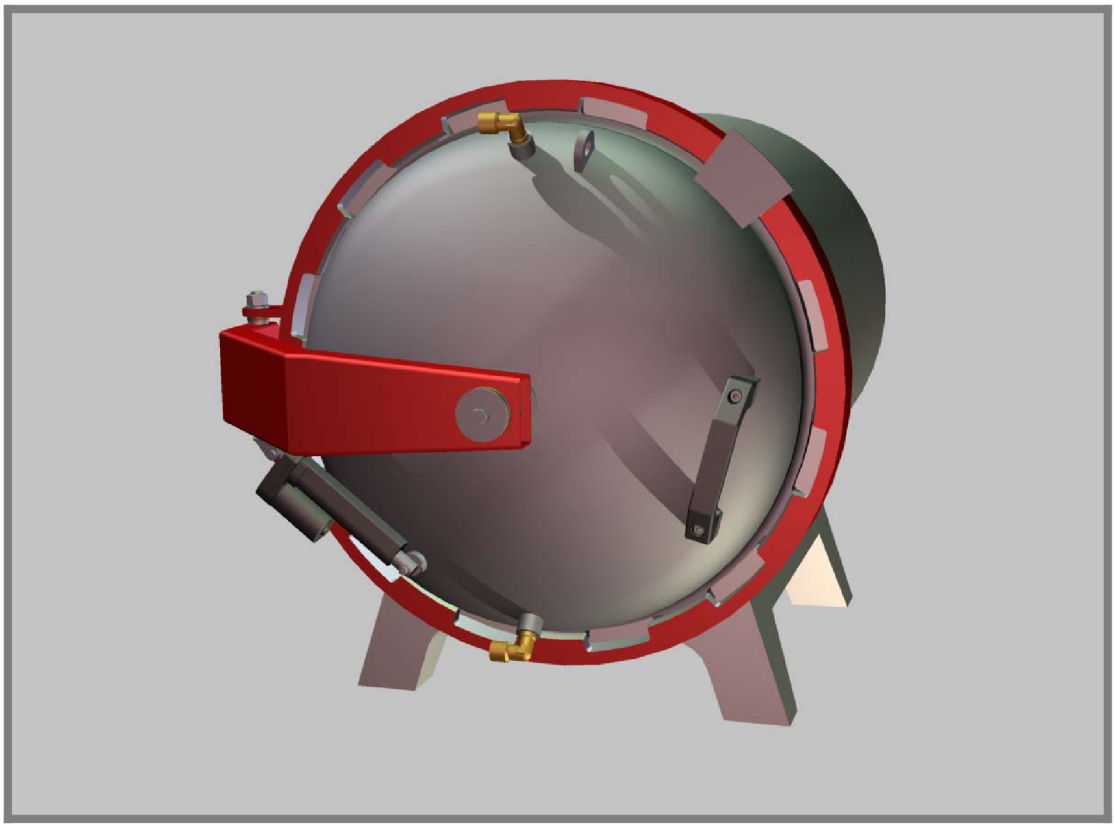
Pro doplnění byl proveden také výpočet odolnosti patek na peci, ke kterým je celá sestava víka připevněna. Průběh výpočtu je shrnut na obr. 61. Zavazbení odpovídá stavu, kdy je víko otevřeno pod úhlem 90°, neboť tento se během výpočtů ukázal jako nebezpečnější než při úhlu 180°. Napětí však ani v jednom případě nedosahuje takových hodnot, aby bylo potřeba se návrhem patek podrobněji zabývat. Jako předběžný návrh zvolena tloušťka patek postačuje. Maximální napětí je rovno 34 MPa.



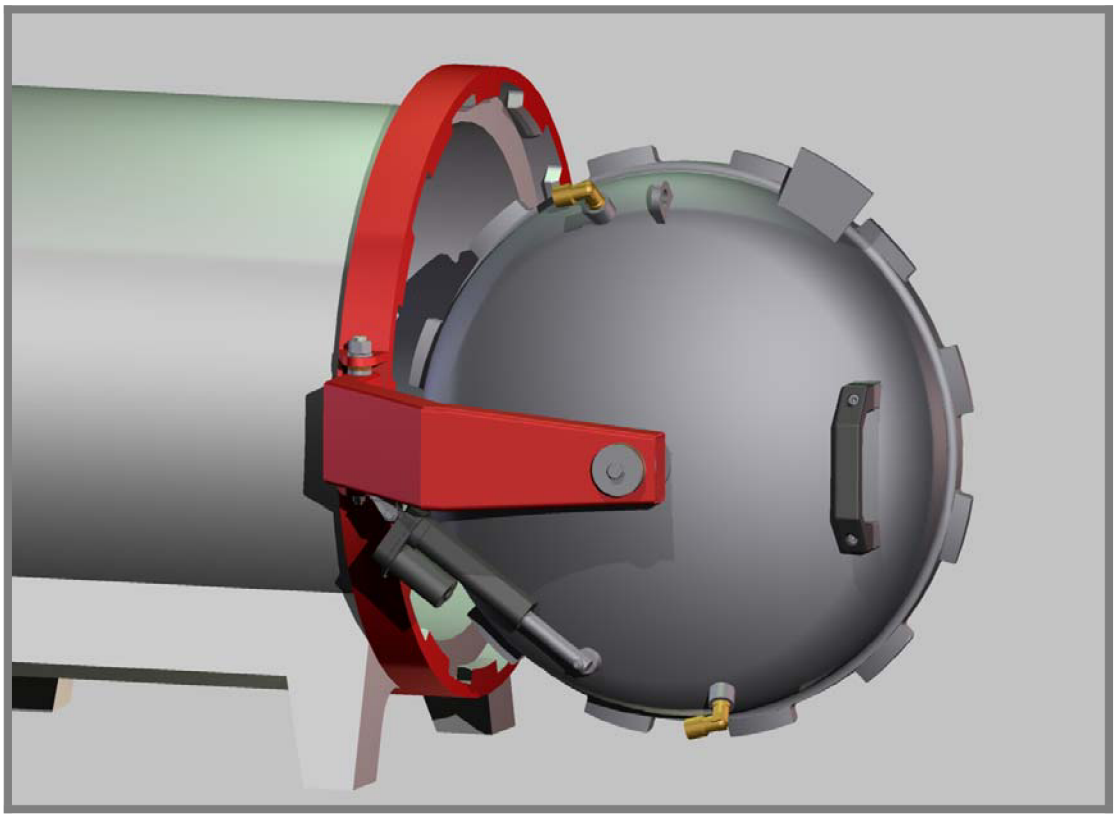
Obr. 61 Síť, okrajové podmínky a výsledky analýzy pro uchycení na peci, F=600N, σ_{max}=34MPa

6.2 Sestavení

Na základě výše uvedených výpočtů a volby jednotlivých prvků bylo vypracováno konstrukční řešení, jehož konečnou podobu je možno vidět na obr. 62 a 63. Pec je vymodelována pouze pro představu. Detaily ohledně uložení, svarů, materiálů apod. je možno vyčíst z přiložené výkresové dokumentace.



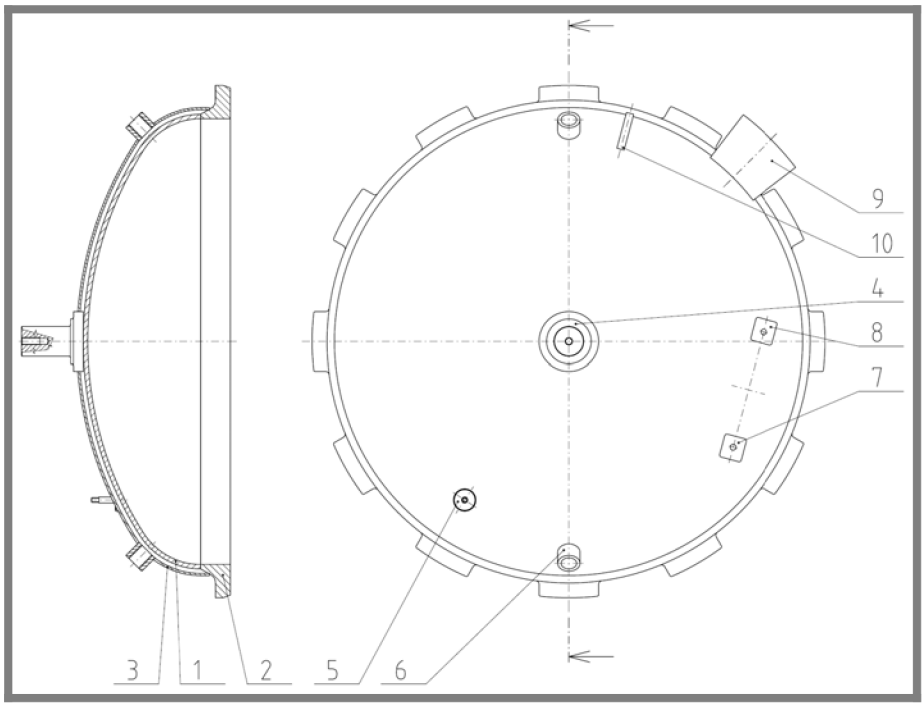
Obr. 62 3D model konečné verze, uzavřený stav



Obr. 63 3D model konečné verze, otevřený stav

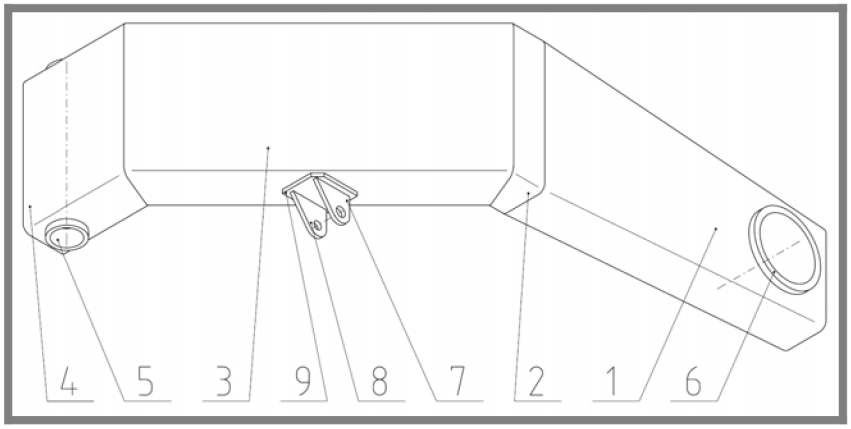
6.3 Výrobní a montážní postup

Před samotnou montáží je potřeba vyrobit svarek víka a rameno. Svarek víka je tvořen hlavním víkem (1), přírubou (2), horním víkem (3), centrálním čepem (4), uchycením tyče aktuátoru (5), vtokem a výtokem chladící kapaliny (6), připojovacími prvky madla (7 a 8), výstupkem pro interakci s koncovým spínačem (9) a okem pro zavěšení (10), jak je patrno z obr. 64. Číslování je totožné s číslováním ve výkresové dokumentaci.



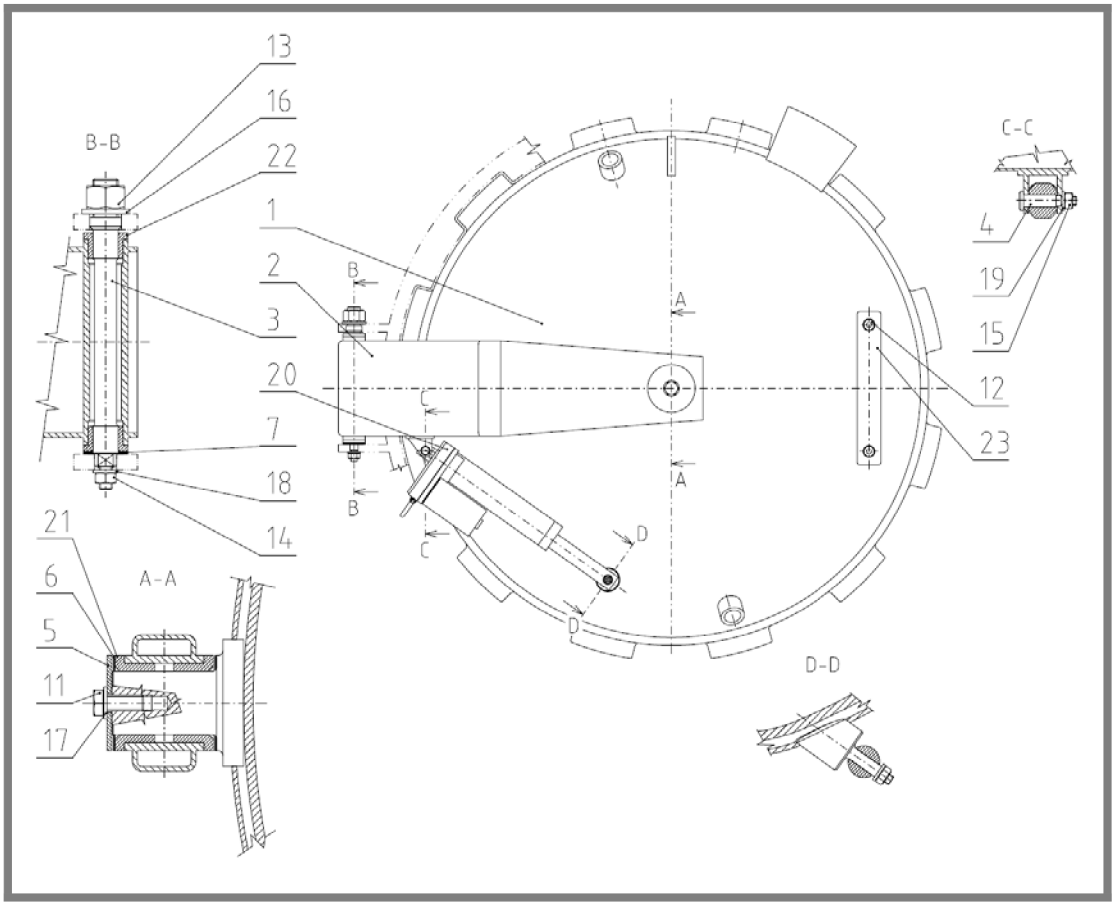
Obr. 64 Svarek víka

Rameno sestává z přední části (1), spojovacího profilu (2), bočního profilu (3), zadního profilu (4), zadní trubky (5), přední trubky (6) a držákem aktuátoru. Ten je tvořen bočnicemi (7 a 8) a základovou deskou (9). Tvar ramene s popisem jednotlivých částí je na obr. 65. U svarku víka i u ramene je třeba funkční plochy opracovat před svařováním.



Obr. 65 Rameno

Při sestavování finální sestavy víka (obr. 66) je nejprve potřeba připevnit k peci (bez pozice) rameno (2). K tomu je nutno vložit do zadní trubky v rameni kluzná ložiska (22). Poté je tento celek umístěn mezi patky na přírubě pece, jejichž otvory se prostrčí průchozí čep (3). Ten se následně zajistí pomocí matic s podložkami (13, 14, 16 a 18). Rameno se otočí do otevřené polohy, aby byl umožněn přístup se svarkem víka (1). Do přední trubky jsou vložena kluzná ložiska (21). Svarek víka je k rameni upevněn pomocí centrálního čepu, který je vložen do přední trubky s ložisky. Pro lepší manipulaci se svarkem víka je možno jej pověsit za oko v horní části. Víko je na rameni zajištěno pomocí dorazové podložky a šroubu s podložkou (5, 11 a 17). Správné upevnění víka je zkontrolováno pootočením na obě strany. Poloha víka je vůči bajonetovým zámkům pece dále přizpůsobena pomocí distančních podložek (6 a 7) umístěných v kloubu ramene a na centrálním čepu. Madlo (23) je připevněno pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou (12). Posledním krokem je montáž aktuátoru. Aktuátor (20) je nejprve upevněn na víku (na uchycení tyče) pomocí matice a podložky (15 a 19). Dále je víkem potřeba pootočit tak, aby byl otvor na druhé straně aktuátoru v zákrytu s otvorem držáku na rameni. Tudy je prostrčen čep držáku (4), který je poté zajištěn maticí a podložkou (15 a 19).



Obr. 66 Víko

6.4 Odhad výrobní ceny

Cena stanovena v této kapitole má pouze orientační charakter, protože jednotková cena některých materiálů není konkrétně známa. Pro výpočet se součástmi vyrobenými z materiálu 1.4910 byla odhadnuta cena 240 Kč/kg, která je vztažena na rozměry polotovaru a zahrnuje v sobě i náklady na výrobu či montáž. Pro ostatní materiál včetně materiálu ramene byla odhadnuta jednotková cena 50 Kč/kg, protože nároky na použitý materiál jsou výrazně nižší. Cenu aktuátoru bylo naopak možno stanovit přesně podle stránek výrobce [24]. Cena veškerého spojovacího materiálu byla odhadnuta na 50 Kč.

Předběžný odhad ceny víka lze vyčíst z následujících tabulek. Veškeré uvedené ceny jsou s DPH.

SOUČÁST	POLOTOVAR	HMOTNOST POLOTOVARU	JEDNOTKOVÁ CENA	CENA
HLAVNÍ VÍKO	P6-650x650	19.9 Kg	240 Kč/kg	4 780 Kč
PŘÍRUBA VÍKA	P40-700x700	153.9 Kg	240 Kč/kg	36 940 Kč
HORNÍ VÍKO	P3-650x650	11 Kg	240 Kč/kg	2 640 Kč
CENTRÁLNÍ ČEP	ø85-88	3.9 Kg	240 Kč/kg	940 Kč
UCHYCENÍ TYČE	ø35-65	0.49 Kg	240 Kč/kg	118 Kč
VTOK, 2ks	ø32-30	2x 0.19 Kg	240 Kč/kg	91 Kč
PŘÍPOJKA DOLNÍ	□35-30	0.29 Kg	50 Kč/kg	15 Kč
PŘÍPOJKA HORNÍ	□35-30	0.29 Kg	50 Kč/kg	15 Kč
VÝSTUPEK	P5-85x105	0.35 Kg	50 Kč/kg	18 Kč
OKO	40x10-50	0.16 Kg	50 Kč/kg	8 Kč
SVAREK VÍKA				**45 500 Kč**

Tab. 1 Odhad výrobní ceny svarku víka

SOUČÁST	POLOTOVAR	HMOTNOST POLOTOVARU	JEDNOTKOVÁ CENA	CENA
PŘEDNÍ ČÁST	P3-270x300	1.9 Kg	50 Kč/kg	95 Kč
PROFIL SPOJOVACÍ	TR□120x40x3-30	0.22 Kg	50 Kč/kg	11 Kč
PROFIL BOČNÍ	TR□120x40x3-260	1.9 Kg	50 Kč/kg	95 Kč
PROFIL ZADNÍ	TR□120x40x3-95	0.69 Kg	50 Kč/kg	35 Kč
TRUBKA ZADNÍ	TRø28x4-135	0.32 Kg	50 Kč/kg	16 Kč
TRUBKA PŘEDNÍ	TRø60.3x6.3-55	0.46 Kg	50 Kč/kg	23 Kč
BOČNICE VNĚJŠÍ	P3-30x35	0.02 Kg	50 Kč/kg	2 Kč
BOČNICE VNITŘNÍ	P3-30x35	0.02 Kg	50 Kč/kg	2 Kč
DESKA	P3-35x40	0.03 Kg	50 Kč/kg	2 Kč
RAMENO				**300 Kč**

Tab. 2 Odhad výrobní ceny ramena

SOUČÁST	POLOTOVAR	HMOTNOST POLOTOVARU	JEDNOTKOVÁ CENA	CENA
SVAREK VÍKA				45 500 Kč
RAMENO				300 Kč
PRŮCHOZÍ ČEP	ø22-200	0.60 Kg	50 Kč/kg	30 Kč
ČEP DRŽÁKU	ø12-40	0.01 Kg	50 Kč/kg	1 Kč
DORAZOVÁ PODL.	P3-62x62	0.09 Kg	50 Kč/kg	5 Kč
AKTUÁTOR				5 465 Kč
LOŽISKO d=40, 2ks				1 200 Kč
LOŽISKO d=16, 2ks				720 Kč
MADLO				50 Kč
SPOJOVACÍ MAT.				50 Kč
VÍKO - CELKEM				**53 000 Kč**

Tab. 3 Odhad výrobní ceny víka

7 ZÁVĚR – KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ

7.1 Konstrukční rozbor

Navrhnuté řešení víka přetlakové pece bylo konstruováno tak, aby splňovalo parametry dané zadáním diplomové práce blíže specifikovaným v kapitolách 2 a 3. Hlavními parametry pro konstrukci byly přetlak plynu 15 bar a podtlak 1 bar. Na základě výpočtů se tento cíl podařilo splnit. Dalším požadavkem bylo pootočení ramena vůči peci kolem 180°. Tento bod se splnit podařilo, což bylo ověřeno na vytvořeném 3D modelu. Pro uzamčení víka je potřeba jím pootočit o 15°, což splňuje poslední parametr zadání diplomové práce, maximální pootočení o 25°.

Do budoucna bude potřeba znát tvar těsnění a potřebnou sílu pro udržení těsnosti. Na základě těchto informací pak bude možno přibližně stanovit potřebnou sílu aktuátoru. Bude-li větší než 600N, budou muset být zváženy změny v konstrukci prvků, kterých se tato problematika týká, především pak u uchycení tyče.

Další záležitost, kterou bude potřeba dořešit je přívod a odvod chladící kapaliny. Stejně tak bude potřeba navrhnout potřebnou elektroniku pro ovládání aktuátoru a vyřešit umístění a funkci bezpečnostních snímačů.

Dalším krokem při návrhu vakuové kalící pece je konstrukční návrh pece samotné. Pec bude muset obsahovat vývěvy pro dosažení vakua, topná tělesa, zařízení pro rozvod chladícího plynu a rozvod vody pro chlazení pece i helia. Dále bude muset být pec dobře odizolována a všechny rozebíratelné spoje budou muset být navrženy tak, aby byla zajištěna dostatečná těsnost pece. V peci budou navíc umístěna různá čidla pro monitorování kalícího procesu.

Před uvedením pece do provozu bude nutno provést tlakovou zkoušku podle ČSN 69 0010-7-1.

7.2 Technologický rozbor

Z hlediska technologie je výroba víka poměrně komplikovaná. Je potřeba použít méně konvenčních výrobních postupů a lepších materiálů, aby byly splněny požadavky kladené na přetlakovou pec. Při výrobě je potřeba dodržet předepsané mezní úchylky a geometrické tolerance. Je nutné, aby zatěžované svary na konstrukci byly provedeny s maximální pečlivostí z důvodu možného ohrožení lidí v případě jejich porušení. Pokud by se prokázalo, že je svar mezi hlavním víkem a přírubou z pevnostního hlediska nedostatečný, je možno jej před přivařením horního víka opracovat na bezvrubý.

7.3 Ekonomický rozbor

Odhad výrobní ceny je v současné chvíli velice předběžný, ale již nyní je téměř jisté, že bude potřeba navrhnout jiný technologický postup výroby příruby víka. Zdaleka nejvyšší položku tvoří právě tato příruba, jejíž cena se při současném návrhu výroby (vyřezání z plechu pomocí vodního paprsku a následné obrábění) může pohybovat okolo 37 000 Kč. Jednou z možností redukce této ceny je použít jako polotovar zakružený čtvercový profil 45x45 mm, který by se dále opracoval obdobným technologickým postupem. Podle výpočtu ceny v kapitole 6.4 by klesla hmotnost polotovaru na asi 32 kg a cena by se mohla snížit skoro 5x (na 7 700 Kč). Problematické u tohoto postupu je dosažení přesného kruhového tvaru, od kterého se odvíjí následující obrábění. Dalším problémem je provedení svaru u spoje obou konců tak, aby mohl být tento polotovar dále bez problémů obráběn a splňoval všechny pevnostní předpoklady, které jsou na přírubu víka kladeny.

Další významnou položkou v ceně svarku víka jsou obě víka vyráběná z plechových polotovarů, jejichž cena byla odhadnuta na 7 420 Kč. Ostatní vyráběné součásti už tolik neovlivňují celkovou cenu.

Nejvýznamnější položka v nakupovaných součástech je aktuátor Transmotec DLA, jehož cena je podle [24] 4 553 Kč za jeden kus bez DPH (5 465 Kč s DPH).

V současné chvíli se tak předběžná cena celé sestavy pohybuje okolo 53 000 Kč. Ta se však může výrazně snížit změnou technologie výroby příruby víka. Jiné ceny uvedené v kapitole 6.4 jsou naopak použitým postupem jejich odhadování podhodnocené. Např. přední část ramene vypalovaná z plechu bude zajisté výrazně dražší. V tuto chvíli lze však konstatovat, že žádná z těchto položek nebude mít výrazný vliv na celkovou cenu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu II*. 1. vydání, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392s. ISBN 80-7204-130-4.

[2] DEL PUGLIA, A., TESI, B., BACCI, T., REVELLI, M., TONINI, G.: *A mathematical model of heat transfer processes in hardening high vacuum furnaces*. Vacuum. Volume 34, number 5, 1984, s. 533-539.

[3] PRITCHARD, J. E., NURNBERG, G.: *Computer modelling of pressure gas quenching in vacuum furnace*. Heat treatment of metals. 4, 1996, s. 79-83.

[4] MINARSKI, P., PREISSER, F., ZENKER, W. R.: *Quenching steel parts in 20-bar helium*. Advanced materials and processes. April 2000, s. 23-26.

[5] TONINI, G., BAVARO, A., CAPORALI, L.: *Metallurgical aspects relating to the use of high vacuum furnaces with pressurized gas quenching for hardening of high speed steels*. Vacuum. Volume 31, number 8/9, 1981, s. 379-383.

[6] STRATTON, P. F.: *Modelling gas quenching of a carburised gear*. Heat treatment of metals. 2, 2002, s. 29-32.

[7] *Helium Gas Quench Recycling* [online]. Citováno 2010-11-27. Dostupné z <http://www.ald-holcroft.com/HeliumRecycling.aspx>.

[8] KORECKI, M., OLEJNIK, Z., SZCZERBA, Z., BAZEL, M.: *Single-chamber HPGQ vacuum furnace with quenching efficiency comparable to oil*. Industrial heating. September 2009, s. 73-77.

[9] *Ipsen turbo treater* [online]. c2007 [citováno 2011-05-18]. Dostupné z <http://www.scribd.com/doc/46969192/Ipsen- Furnace-Turbo-Cooling>.

[10] JORDAN, D.: *Vacuum gas-nitriding furnace produces precision nitrided parts*. Heat treating progress. September 2009, s. 45-48.

[11] *Chemical elements* [online]. Citováno 2010-11-18. Dostupné z <http://www.chemicalelements.com/index.html>.

[12] *Vacuum Gas Quench Furnaces* [online] c2007 [citováno 2010-11-04]. Dostupné z <http://vacaero.com/images/stories/Furnace_Manufacturing/vac_aero_vah_series_specs.pdf >.

[13] *Dna Zyksal (ceník)* [online]. Citováno 2011–01-09. Dostupné z <http://www.zyksal.cz/cenik.htm>.

[14] *Tradeget* [online]. Citováno 2010-11-28. Dostupné z <http://img1.tradeget.com/Vacuumsystems/BS7DJ3N91vacuumfurnaces.jpg>.

[15] *High pressure gas quenching furnace* [online]. Citováno 2010-11-26. Dostupné z <http://www.wdtrade.com/showroom/product/944398/high_pressure_gas_quenching_furnace.aspx >.

[16] *Vacuum furnace* [online]. Citováno 2010-11-28. Dostupné z <http://www.directindustry.com/prod/ipsen/vacuum-furnace-34417-239966.html>.

[17] *Vakuová pec VP800* [online]. Citováno 2011-05-17. Dostupné z <http://www.vakuotechnika.cz/va_vp800.html>.

[18] *Directional cooling system for vacuum heat treating furnace* [online]. 2005 [citováno 2010-11-28]. Dostupné z <http://www.freepatentsonline.com/6903306.html>.

[19] *Vacuum furnace interior after rebuild* [online]. Citováno 2010-11-28. Dostupné z <http://www.lawrenceindustriesheattreat.com/gallery.html>.

[20] *Vacuum Furrnace* [online]. Citováno 2010-08-08. Dostupné z <http://www.prestigethermal.com/traditional-vacuum%20furnace.htm >.
[21] *Vlastnosti oceli 1.4910* [online]. 2001 [citováno 2011-05-01]. Dostupné z <http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/ Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4910_en.pdf >.
[22] *SKF bushings* [online]. 2003 [citováno 2011-03-20]. Dostupné z <http://www.exvalos.cz/soubory/File/SKF_kluzna_loziska.pdf >.
[23] *Ferona - Sortiment* [online]. Citováno 2011-01-23. Dostupné z <http://www.ferona.cz/cze/velkoobchod/sortiment.php >.
[24] *Aktuátor série DLA bez senzoru* [online]. Citováno 2011-04-30. Dostupné z <http://www.transmotec.cz/linearni-aktuatory/cenik-dla-bez-senzoru.html>.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratek:

HPGQ	High pressure gas quenching
MKP	Metoda konečných prvků

Seznam veličin:

D_1	mm	Vnější průměr víka
F	N	Síla
I	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti
M	$N \cdot m$	Moment síly
$[p]$	MPa	Dovolený přetlak
r	mm	Poloměr síly
s	mm	Tloušťka stěny
α	$rad \cdot s^{-2}$	Úhlové zrychlení
β_2	1	Součinitel tvaru víka
φ	1	Součinitel svarového švu
λ	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$	Tepelná vodivost
$[\sigma]$	MPa	Dovolené namáhání

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Recyklační systém helia pro použití při HPGQ [4] 15
Obr. 2 Srovnání deformací při kalení do oleje (a) a do inertního plynu (b) [4] 16
Obr. 3 Diagram kalící pece [5] 17
Obr. 4 Diagram vnější chladící smyčky [3] 17
Obr. 5 Diagram vnitřní chladící smyčky [9] 18
Obr. 6 Pohled na vnitřek kalící pece [12] 19
Obr. 7 Kinematické parametry 21
Obr. 8 Grafické znázornění řešených bodů 23
Obr. 9 Tvary klenutých den, a) sférické, b) eliptické, c) torosférické 25
Obr. 10 Použití páček při uzamykání víka [14] 25
Obr. 11 Víko uzamykané vnější pohyblivou částí [15] 26
Obr. 12 Víko uloženo otočně na pohyblivém rameni [16] 27
Obr. 13 Tangenciální zkosení bajonetových zámků 27
Obr. 14 Koncový spínač 28
Obr. 15 Čtvercové těsnění v rybinové drážce 29
Obr. 16 Tvarované těsnění 29
Obr. 17 Chlazení pomocí meandru [17] 30
Obr. 18 Uspořádání víka s bajonetovým uzamykáním, [18] 31
Obr. 19 Tvar příruby (průřez) 31
Obr. 20 Tepelná izolace víka umístěná na peci [19] 32
Obr. 21 Izolace umístěna na víku [20] 32
Obr. 22 Víko otočné na čepu 33
Obr. 23 Víko přivařeno k čepu 34
Obr. 24 Umístění poslední verze průhledítka na víku 35
Obr. 25 Madlo s připojovacími prvky 36
Obr. 26 Celkový tvar ramena 37
Obr. 27 Tvar přední části ramena a rozvinutého plechu 38
Obr. 28 Uložení ramena na peci, tvar patek, tvar průchozího čepu 38
Obr. 29 Rozměry víka pro výpočet podle ČSN 69 0010 39
Obr. 30 Okrajové podmínky pro statickou strukturální analýzu, p=1,5MPa 40
Obr. 31 Síť a výsledky analýzy, σ_{max}=144MPa 40
Obr. 32 Ztráta vzpěrné stability, Load multiplier = 383 41
Obr. 33 Výsledky modální analýzy, f = 1300 Hz 42
Obr. 34 Tvar příruby s bajonetovými zámky 43
Obr. 35 Zjednodušení modelu pro návrh příruby 43
Obr. 36 Okrajové podmínky pro návrh příruby, p=1,5MPa 44
Obr. 37 Síť a výsledky analýzy v celém modelu, σ_{max}=507MPa 44
Obr. 38 Výsledky analýzy na svaru příruby a hlavního víka, σ_{max}=215MPa 45
Obr. 39 Okrajové podmínky pro výpočet vnějšího průměru čepu, F=600N 46
Obr. 40 Namáhání podle HMH, σ_{max}=98MPa 46
Obr. 41 Vertikální deformace vnějšího víka, Δx=0,28mm 47
Obr. 42 Poloha těžiště víka 47
Obr. 43 Okrajové podmínky pro zatížení centrálního čepu, F=600N 48
Obr. 44 Síť a napětí HMH pro centrální čep, σ_{max}=34MPa 48
Obr. 45 Použitá geometrie a síť pro výpočet namáhání ramene 49
Obr. 46 Okrajové podmínky pro víko zavěšené na rameni, F=600N 49

Obr. 47 Napětí na rameni způsobené visícím víkem v otevřeném stavu, σ_{max}=86MPa 50
Obr. 48 Deformace ramena způsobená tíhou víka, Δx=0,46mm 50
Obr. 49 Okrajové podmínky simulující reakci od síly aktuátoru, F=1000N 51
Obr. 50 Napětí HMH na rameni pro zatížení od aktuátoru, σ_{max}=21MPa 51
Obr. 51 Údaje pro výpočet síly aktuátoru bez tření 52
Obr. 52 Okrajové podmínky, zatížení od aktuátoru, F=1000N 54
Obr. 53 Napětí na otvoru pro umístění uchycení tyče aktuátoru, σ_{max}=200MPa 54
Obr. 54 Umístění aktuátoru v sestavě 55
Obr. 55 Okrajové podmínky uchycení tyče aktuátoru, F=1000N 56
Obr. 56 Napětí uchycení tyče aktuátoru, σ_{max}=260MPa 56
Obr. 57 Okrajové podmínky uchycení aktuátoru, F=1000N 57
Obr. 58 Analýza držáku aktuátoru, σ_{max}=85MPa 58
Obr. 59 Okrajové podmínky pro průchozí čep, F=600N 59
Obr. 60 Analýza průchozího čepu, σ_{max}=149MPa 59
Obr. 61 Síť, okrajové podmínky a výsledky analýzy pro uchycení na peci, F=600N, σ_{max}=34MPa 60
Obr. 62 3D model konečné verze, uzavřený stav 61
Obr. 63 3D model konečné verze, otevřený stav 61
Obr. 64 Svarek víka 62
Obr. 65 Rameno 62
Obr. 66 Víko 63

11 SEZNAM TABULEK

11

Tab. 1 Odhad výrobní ceny svarku víka 64
Tab. 2 Odhad výrobní ceny ramena 64
Tab. 3 Odhad výrobní ceny víka 65

12 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

Víko	1/5O/95-50/00
Svarek víka	1/5O/95-50/01
Hlavní víko	3/5O/95-50/01/01
Příruba víka	3/5O/95-50/01/02
Horní víko	3/5O/95-50/01/03
Centrální čep	4/5O/95-50/01/04
Uchycení tyče	4/5O/95-50/01/05
Vtok	4/5O/95-50/01/06
Přípojka dolní	4/5O/95-50/01/07
Přípojka horní	4/5O/95-50/01/08
Výstupek	4/5O/95-50/01/09
Oko	4/5O/95-50/01/10
Rameno	2/5O/95-50/02
Přední část	3/5O/95-50/02/01
Profil spojovací	4/5O/95-50/02/02
Profil boční	4/5O/95-50/02/03
Profil zadní	4/5O/95-50/02/04
Trubka zadní	4/5O/95-50/02/05
Trubka přední	4/5O/95-50/02/06
Bočnice vnější	4/5O/95-50/02/07
Bočnice vnitřní	4/5O/95-50/02/08
Deska	4/5O/95-50/02/09
Průchozí čep	3/5O/95-50/03
Čep držáku	4/5O/95-50/04
Dorazová podložka	4/5O/95-50/05
Distanční kroužek velký	4/5O/95-50/06
Distanční kroužek malý	4/5O/95-50/07