



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH A KONSTRUKCE PŘÍSTROJE PRO PŘESNÉ VAKUOVÉ LITÍ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A VACUUM MACHINE FOR PRECISION CASTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Natanael Tetur

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Natanael Tetur**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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

Návrh a konstrukce přístroje pro přesné vakuové lití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na vývoj vakuového přístroje pro přesné lití. Student navrhne 3D model přístroje a zároveň provede simulaci komory pomocí metody konečných prvků k identifikaci kritických míst konstrukce, kde by mohlo docházet k deformacím nebo porušení materiálu při provozu. Zhotoví se reálná konstrukce prototypu dle vlastního návrhu. Provedou se testy funkčnosti (těsnosti) a vyhodnotí se výsledky testů.

Cíle bakalářské práce:

3D model přístroje pro vakuové lití.

Návrh reálné konstrukce.

Simulace jedné z komor v zátěži pomocí metody konečných prvků (MKP).

Výroba prototypu a ověření funkčnosti testem v provozních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

ROUPEC, J. Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Paloušek.

KRŇÁVEK, Š. Optimalizace technologie lití pod tlakem odlitku vakuové pumpy. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.

KOVAŘÍK, R. a ČERNÝ, F. Technologie svařování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.

CHUA, C. K., LEONG, K. F. a LIM, C. S. Rapid prototyping: principles and applications. 2. vyd. Hackensack: World Scientific, 2005. ISBN 981-238-120-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí funkčního prototypu zařízení pro vakuové lití šperků metodou ztraceného vosku, zaměřeného na potřeby malovýroby a hobby uživatelů. Hlavním cílem bylo vytvořit cenově dostupné, technologicky jednoduché a funkčně spolehlivé zařízení. Byl zvolen dvoukomorový systém bez asistence přetlaku inertního plynu, zahrnující přípravou a lici komoru s rotační lamelovou vakuovou vývěvou pro dosažení potřebného podtlaku. Mechanická pevnost a deformační chování byly navrženy pomocí numerické analýzy metodou konečných prvků, přičemž výsledky simulací byly experimentálně potvrzeny měřením průhybů při dosažení provozního vakua. Výroba prototypu zahrnovala kombinaci svařovaných kovových konstrukcí, 3D tisku a odlévání z betonové směsi, přičemž byl kladen důraz na využití ekonomických výrobních postupů. Experimentální testování prokázalo dosažení požadované těsnosti všech částí zařízení, zároveň byly odhaleny i některé konstrukční nedostatky, zejména nevhodné těsnění přípravné komory a vyšší průhyb jejího těla oproti simulaci. Tyto poznatky slouží jako podklad pro další vývoj zařízení. Práce tak dokládá, že navržený koncept je funkční a představuje reálný základ pro další optimalizaci a případné uvedení do praxe.

Klíčová slova

vakuové lití, lici komora, šperkařství, metoda konečných prvků, výroba prototypu

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the design and construction of a functional prototype of a vacuum casting device for jewelry using the lost-wax method, tailored to the needs of small-scale production and hobby users. The primary objective was to develop a cost-effective, technologically simple, and functionally reliable device. A dual-chamber system without the assistance of inert gas overpressure was selected, comprising a preparation chamber and a casting chamber, equipped with a rotary vane vacuum pump to achieve the necessary vacuum. Mechanical strength and deformation behavior were designed using finite element method (FEM) numerical analysis, with simulation results experimentally validated by measuring deflections under operational vacuum conditions. The prototype's fabrication involved a combination of welded metal structures, 3D printing, and concrete casting, emphasizing the use of economical manufacturing processes. Experimental testing confirmed the desired tightness of all device components; however, certain design shortcomings were identified, notably the unsuitable sealing of the preparation chamber and higher body deflection compared to simulations. These findings serve as a basis for further device development. The work thus demonstrates that the proposed concept is functional and provides a realistic foundation for further optimization and potential practical implementation.

Keywords

vacuum casting, casting chambre, jewelry making, finite element method, prototype manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TETUR, Natanael. *Návrh a konstrukce přístroje pro přesné vakuové lití*. Online, bakalářská práce. Jaromír DVOŘÁK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162306>. [cit. 2025-03-23].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Návrh a konstrukce přístroje pro přesné vakuové lití vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Natanael Tetur

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě vyjádřil upřímné poděkování vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost, které významně přispěly k úspěšnému dokončení této práce. Jeho zkušenosti a vstřícný přístup byly pro mě neocenitelnou oporou během celého procesu návrhu a vývoje zařízení. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Dawex Chemical s.r.o. za poskytnutí materiálu pro výrobu pružných forem.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 Přesné lití ve šperkařství.....	11
1.1 Odstředivé lití	11
1.1.1 Konstrukce zařízení odstředivého lití	11
1.1.2 Postup lití.....	12
1.2 Vakuové lití	12
1.2.1 Konstrukce zařízení pro vakuové lití.....	13
1.2.2 Konstrukce zařízení pro vakuové lití s asistencí přetlaku	14
2 Návrh vlastní konstrukce přístroje.....	15
2.1 Koncept řešení.....	15
2.2 Volba vakuové vývěvy	16
2.3 Přípravná komora	17
2.3.1 Proces analýzy přípravné komory metodou konečných prvků.....	18
2.3.2 Vyhodnocení analýzy přípravné komory metodou konečných prvků.....	22
2.3.3 Vybavení přípravné komory	25
2.3.4 Upevnění přípravné komory k rámu.....	27
2.4 Lící komora	28
2.4.1 Forma pro odlévání betonové směsi	28
2.4.2 Kotvení lící komory	31
2.5 Rám přístroje	32
2.6 Zakrytování	32
2.7 Filtrační systém	33
3 Výroba prototypu.....	35
3.1 Výroba přípravné komory	35
3.1.1 Vyříznutí plechových dílců	35
3.1.2 Ohýbání L profilů	36
3.1.3 Technologie svařování MIG/MAG	37
3.1.4 Svařování těla přípravné komory	38
3.1.5 Ohyb PMMA víka přípravné komory	40
3.2 Výroba lící komory	40
3.2.1 Výroba formy pro odlití betonové směsi.....	40
3.2.2 Pilotní odlévání betonové směsi do formy	42
3.2.3 Vývoj pružného jádra	43

3.2.4	Opětovné odlévání betonové směsi do formy	45
3.3	Výroba ostatních komponent.....	47
3.3.1	Vibrační stůl.....	47
3.3.2	Filtrační systém.....	47
3.3.3	Rám přístroje	49
3.3.4	Zakrytování.....	50
4	Testování těsnosti prototypu.....	51
4.1	Testování přípravné komory.....	51
4.2	Testování lící komory	52
4.3	Testování filtračního systému	53
ZÁVĚR.....		54

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

ÚVOD

Technologie odlévání kovů metodou ztraceného vosku, známá také jako investiční lití, představuje vysoce přesnou a efektivní výrobní metodu, která umožňuje vytváření detailních a složitých tvarů. Tato metoda je široce využívána především ve šperkařství, kde je kladen důraz na vysokou kvalitu povrchové úpravy a minimální výrobní odchylky. Proces zahrnuje vytvoření voskového modelu, jehož povrch je pokryt žáruvzdorným materiálem za vzniku formy. Po následném vytavení vosku a zahřátí formy na požadovanou teplotu je do dutiny nalit roztavený kov, čímž vznikne finální odlitek s vynikající přesností. [1]

Mezi nevýhody této technologie patří časová náročnost a vyšší pořizovací cena. Proces lití zahrnuje několik kroků, včetně tvorby voskového modelu a jeho vytavení ze vsázky. K tomuto průběhu je zapotřebí programovatelná vytavovací pec, kde se model postupně vypálí z formy ven. Na druhou stranu získáme výhodu vytvoření odlitku s vynikající přesností a možnost vzniku velmi složitých tvarů, kterých by bylo jinak velmi obtížné nebo nemožné docílit. Dále je zde minimalizace odpadu, která je velmi důležitá ve šperkařství a práci s drahými kovy.

Inspirací pro tuto práci byl požadavek mého bratra, který se aktivně věnuje trénování v oddíle Sokol Brno I. Jeho přáním je vytvoření sady specifických prstenů tohoto oddílu s jeho prvky. Metoda ztraceného lití se jeví jako ideální technologie pro dosažení požadované kvality a detailu těchto šperků.

Tato bakalářská práce se proto zaměřuje na návrh a konstrukci zařízení pro vakuové lití šperků metodou ztraceného vosku. Cílem je vytvoření funkčního prototypu s důrazem jak na ekonomičnost, tak na kvalitu a zároveň zajistit technologickou přesnost a spolehlivost celého systému.

1 PŘESNÉ LITÍ VE ŠPERKAŘSTVÍ

V oblasti šperkařství představuje přesné lití klíčovou technologii, která umožňuje výrobu složitých a detailních forem s minimálními odchylkami. Tato metoda využívá zvýšených sil – například odstředivou sílu nebo vakuum, což zaručuje rovnoměrné rozprostření roztaveného kovu v rámci formy a významně snižuje riziko vzniku vad, jako jsou póry nebo neúplné zaplnění detailů. Výsledkem je vysoká reprodukovatelnost a vynikající kvalita hotových šperků, což umožňuje kombinaci tradičních řemeslných postupů s moderními technologiemi. Tyto techniky se také ve velké míře používají v dentálním průmyslu. [2]

1.1 Odstředivé lití

Odstředivé lití je technologický proces využívaný při výrobě odlitků, při němž je roztavený kov vtlačován do formy působením odstředivé síly. Během otáčení formy vysokou rychlostí kolem její osy dochází k rovnoměrnému rozprostření tekutého kovu po jejím obvodu. Kov je v této pozici udržován až do úplného ztuhnutí, a tím je zaručena homogenita a přesnost výsledného odlitku. [3]

Použitím této metody je dosaženo velmi kvalitních a přesných výrobků, což je zvláště výhodné při výrobě dekorativních předmětů. V odstředivém lití jsou defekty minimalizovány a estetická hodnota finálního produktu zvýšena. Právě proto je tato technologie hojně využívána v uměleckém i průmyslovém odlévání dekorativních komponentů, kde je požadována vysoká úroveň detailu. [4]

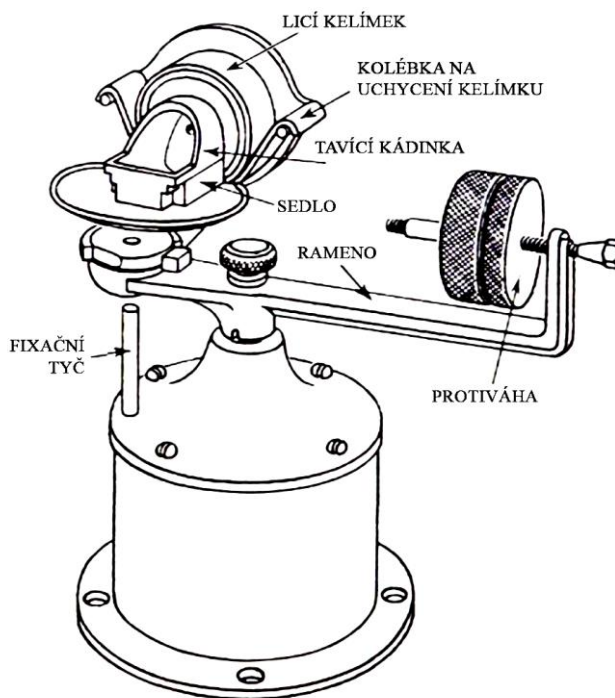
Ve srovnání s modernějšími technologiemi, jako je vakuové lití, je odstředivé lití starším postupem využívaným zejména při odlévání šperků za zvýšených sil [2]. Mezi hlavní výhody tohoto postupu patří nižší pořizovací cena a tím vyšší dostupnost pro menší výrobce. Z ekonomického hlediska je však vakuové odlévání pro velké série výrobků výhodnější vzhledem k omezené velikosti lícího kelímku. Dalším aspektem je nutnost manuálního tavení kovu plamenem, jež vyžaduje značnou zručnost a zkušenost obsluhy. [5]

1.1.1 Konstrukce zařízení odstředivého lití

Odstředivé lící stroje existují v různých konstrukčních provedeních. Základní rozdělení těchto strojů je podle orientace otáčivého ramene na horizontální a vertikální lící stroje. Horizontální lící stroj je charakteristický tím, že jeho lící rameno se otáčí na svislém vřetenu, zatímco vertikální odlévací stroj má rameno rotující kolem vodorovného vřetena. [6]

Lící stroje se dále rozlišují podle typu pohonu. Existují zařízení s pružinovým pohonem, která umožňují lepší kontrolu tlaku při odlévání díky vinutí pružiny, a stroje s přímým pohonem, jež však postrádají možnost regulace rychlosti [6]. Většina vertikálních lících strojů je poháněna pružinou, zatímco u horizontálních strojů může být pohon zajištěn jak pružinou, tak elektromotorem [2].

Za konstrukční součást lících strojů bývá považován vyvažovací mechanismus, který je přizpůsobován hmotnosti odlévacího kelímku. Pro zajištění stability celého procesu je nezbytné správné vyvážení, protože při chybné kalibraci může dojít k nekontrolovanému pohybu stroje a rozliti roztaveného kovu, což představuje značné bezpečnostní riziko. [6]



Obr. 1 Horizontální odstředivý lící přístroj, upraveno dle [7].

1.1.2 Postup lití

Před zahájením lití je nutné otočením ramene unašeče navinout pružinu a následně zajistit rameno zatlačením fixační tyče. Poté se kov zahřívá pomocí hořáku, který musí být držen v kolmé poloze ke kovu. Tímto způsobem není nutné měnit polohu hořáku během procesu tavení, protože roztavený kov se usazuje na dně kelímku. Nejžhavější část plamene, která se nachází těsně nad vrcholem kužele, je nasměrována přímo na kov, a tím je zajištěn efektivní přenos tepla. Důležitým faktorem je dostatečně vysoká teplota plamene, protože při příliš pomalém zahřívání může kov absorbovat nadměrné množství plynu, což může vést k tvorbě povrchových vad v odlitku. Proto je nutné udržovat nepřetržité zahřívání až do dosažení plně tekutého stavu kovu. Jakmile je kov roztaven, plamen se mírně zvedne a na kov se aplikuje připravené redukční tavidlo, které zabraňuje jeho oxidaci během tavení. Alternativně lze použít boraxový prášek, avšak ten neobsahuje stejné redukční vlastnosti jako připravené tavidlo. [7]

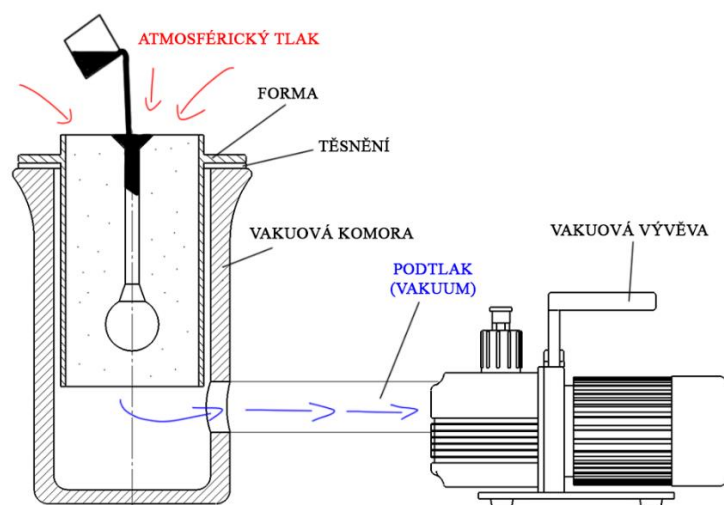
Jakmile se kov nachází v tekutém stavu, avšak nedosahuje bodu varu, uvolní se fixační tyč. Tím dojde k uvolnění ramene, které je uvedeno do otáčivého pohybu, a roztavený kov je vržen z tavící kádinky do kelímku, tedy formy. Po ukončení procesu lití je nutné vyčkat, až se otáčení stroje zcela zastaví. Následně se kelímek ponoří do nádoby s vodou, čímž dojde k jeho úplnému zchlazení a uvolnění vsázky. [7]

1.2 Vakuové lití

Vakuové lití představuje metodu, při níž je forma před odléváním roztaveného kovu umístěna do vakuové komory. Procesem tvorby vakua je z dutiny formy odstraněn vzduch, minimalizuje se výskyt vzduchových bublin a umožňuje se dosažení detailního odlitku. [1]

Na rozdíl od odstředivého lití, kde odstředivá síla napomáhá vytlačování vzduchu z dutiny formy skrze porézní vsázku, je při vakuovém lití využíván podtlak ke snížení tlaku v dutině formy. Atmosférický tlak následně působí na kov a stlačuje jej do formy. [2]

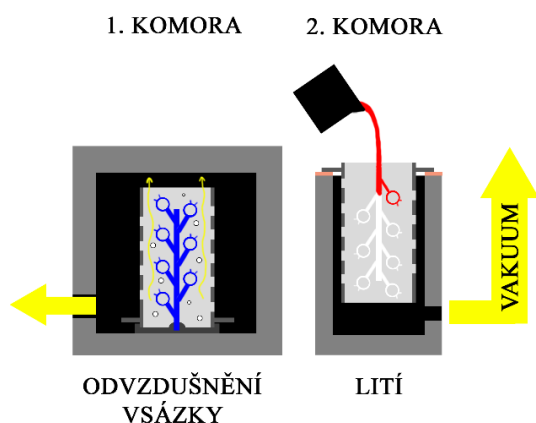
V následující části této práce bude sestrojeno zařízení, které využívá princip vakuového lití. Tento přístup je založen na modernější technologii, která zajišťuje vyšší efektivitu procesu a zároveň usnadňuje jeho ovládání uživatelem. Díky využití podtlakového systému bude dosaženo lepšího rozložení materiálu ve formě a lepší se kvalita výsledných odlitků.



Obr. 2 Princip vakuového lití.

1.2.1 Konstrukce zařízení pro vakuové lití

V oblasti malosériové výroby a hobby sféry se vakuové lící přístroje obvykle skládají ze dvou separátních komor. První komora slouží k odvzdušnění vsázky, zatímco druhá je určena pro samotný proces lití kovu. V první komoře dochází k přípravě vsázky prostřednictvím vakua, které odstraní veškerý vzduch z nalité vsázky do formy. Nachystaná forma, která prošla vytavovacím cyklem, je následně přesunuta do druhé komory, kde dochází k samotnému procesu lití. Při něm je forma vystavena podtlaku generovanému vakuovým systémem, jenž skrze porézní strukturu vsázky snižuje tlak v dutině formy. Horní část formy, skrze kterou je kov ručně naléván (roztaven mimo zařízení), zůstává v kontaktu s atmosférickým tlakem, podtlak působící zespodu a z boků formy podporuje efektivní vtahování roztaveného kovu do dutiny formy. Tento mechanismus eliminuje nedostatky a umožňuje dosažení detailního a přesného odlitku. Mezi představitele těchto zařízení patří například Kaya Cast od společnosti ARBE Machine Manufacturing, Inc.



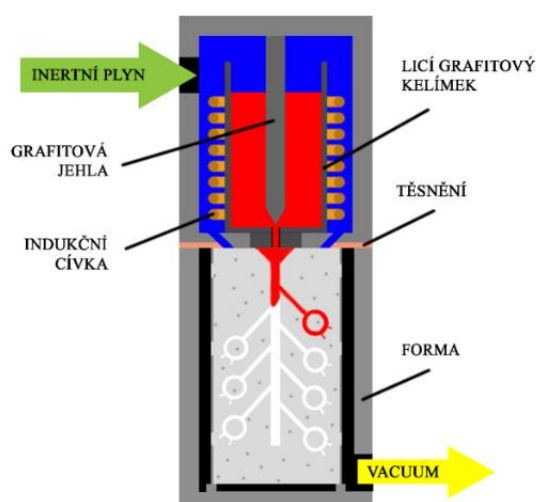
Obr. 3 Schéma zařízení vakuového lití.



Obr. 4 Přístroj pro vakuové lití Kaya Cast společnosti ARBE [8].

1.2.2 Konstrukce zařízení pro vakuové lití s asistencí přetlaku

Profesionální zařízení určená pro šperkařský průmysl se oproti předešlé variantě liší absencí komory pro odvětrání vsázky – příprava formy se tedy odehrává mimo zařízení. Tato vysoce sofistikovaná zařízení mají pouze jednu komoru, ve které probíhá jak tavení kovu, tak samotný proces lití, a to v plně uzavřeném prostoru. Nejprve je v komoře vytvořeno vakuum pro kompletní odplynění, následně je do ní zaveden inertní plyn, například helium, který slouží jako ochranná atmosféra a zároveň zajišťuje finální očištění kovu a formy. Roztavení kovu probíhá v tavícím kelímku pomocí indukce, přičemž po dosažení požadované teploty lze aplikovat nízkofrekvenční pulzy pro homogenizaci taveniny. Poté je roztavený kov vypuštěn do formy pomocí grafitové jehly, přičemž podtlak působící ve spodní části formy podporuje jeho nasátí, zatímco v horní části komory je současně aplikován přetlak inertního plynu, typicky argonu. Firma ASEG Galloni Srl udává hodnoty přetlaku až 6 barů (0,6 MPa) [9]. Tento synergický efekt vakua a přetlaku zajišťuje vysoce hladký povrch a optimalizovanou strukturu odlitku, což vede k dokonalému výsledku i u složitých a detailních odlitků. Mezi zástupce této kategorie patří například model K2NEXT od společnosti YASUI & CO. [10]



Obr. 5 Schéma zařízení vakuového lití s asistencí inertního plynu.



Obr. 6 Přístroj pro vakuové lití s asistencí přetlaku K2NEXT společnosti YASUI & CO [11].

2 NÁVRH VLASTNÍ KONSTRUKCE PŘÍSTROJE

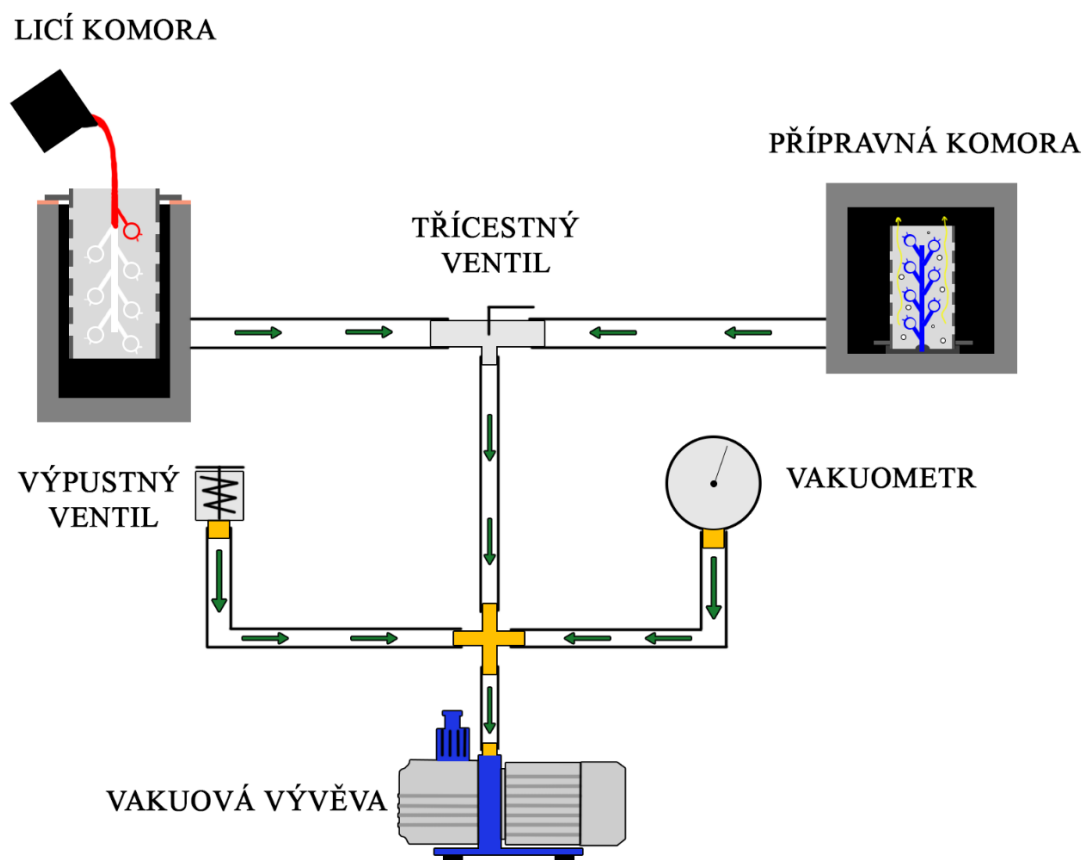
Cílem této konstrukce je vytvořit funkční lící jednotku za dostupnou cenu, aby byl přístroj ekonomicky výhodný i pro menší podnikatele v tomto odvětví. Bude se tedy jednat o výše zmiňovanou variantu dvou komor bez asistence přetlaku inertního plynu.

Důležitým aspektem návrhu je zajištění těsnosti systému, protože správná funkce podtlakového lítí vyžaduje, aby komory nepropouštěly žádný vzduch během procesu. Volba technologických postupů a konstrukčních prvků bude proto zaměřena na eliminaci netěsností a zajištění dlouhodobé spolehlivosti zařízení i při opakovaném používání. Kromě těsnosti je nutné také zohlednit mechanickou pevnost jednotlivých součástí, neboť komory budou vystaveny značným silám působícím vlivem vytvořeného podtlaku.

V rámci konstrukčního návrhu budou řešeny i některé běžné nedostatky stávajících lících zařízení, které jsou často uváděny uživateli a menšími podnikateli v oboru. Mezi tyto problémy patří například nepohodlná výměna oleje v systému či omezený prostor komory pro odvzdušnění vsázky, který neumožňuje použití větších nádob pro přípravu vsázky do rozměrnějších forem. Konstrukce bude tedy navržena s ohledem na ergonomii a praktičnost, aby bylo zajištěno pohodlné ovládání a údržba zařízení.

Dalším klíčovým hlediskem bude také vizuální stránka přístroje. Cílem návrhu je nejen funkční a spolehlivá konstrukce, ale také moderní profesionální design, který odpovídá požadavkům současného trhu. Přitom však bude zachována dostupnost zařízení z hlediska výrobních nákladů, aby bylo ekonomicky přijatelné pro širší spektrum uživatelů.

2.1 Koncept řešení



Obr. 7 Návrh přístroje jako celku.

Návrh zařízení zahrnuje dvě komory – licií a přípravnou, jejichž funkce byly již podrobně popsány v kapitole 1.2.1. Pro zajištění řízení vakua budou tyto komory propojeny třicestným kulovým ventilem, který umožní výběr komory, z níž bude vzduch odsáván. K vytvoření [12]potřebného podtlaku bude použita rotační lamelová vývěva, která je vhodná pro tento typ aplikace díky své schopnosti dosahovat stabilního a dostatečně nízkého tlaku v krátkém čase. Kromě těchto základních prvků bude součástí systému také vakuometr, který zajistí vizuální kontrolu hladiny podtlaku, a výpustný ventil, jehož úkolem bude regulované uvolnění podtlaku v systému.

Uvolnění podtlaku by teoreticky bylo možné realizovat i jiným způsobem, konkrétně otevřením nepoužívané komory a následným přepnutím třicestného ventilu, čímž by se tlak v systému okamžitě vyrovnal s atmosférickým tlakem. Tento přístup by však nebyl příliš uživatelsky přívětivý, protože by vyžadoval neustálou kontrolu a zajištění, že druhá komora je během procesu otevřená. Vzhledem k tomu, že by toto řešení mohlo vést k provozním chybám a ztěžovat práci obsluhy, bude v zařízení implementován samostatný výpustný ventil, který umožní rychlé a kontrolované vyrovnání tlaku bez nutnosti jakéhokoli dodatečného zásahu. Detailní technické provedení jednotlivých prvků a celková konstrukce přístroje budou podrobně rozpracovány v následujících kapitolách.

2.2 Volba vakuové vývěvy

Vývěva je zařízení sloužící k odstraňování vzduchu nebo plynu z uzavřeného systému s cílem vytvořit částečné či úplné vakuum. Proces funguje na principu postupného snižování tlaku v uzavřeném prostoru, přičemž nasávané plynné molekuly jsou následně vypouštěny buď do okolní atmosféry, nebo do jiné nádrže. [12]

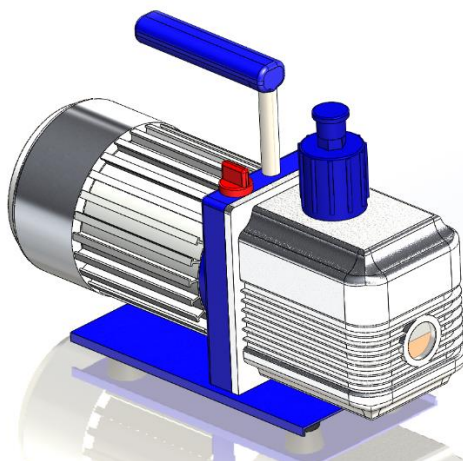
Pro tento návrh byla zvolena rotační lamelová vývěva, která je široce používána v různých průmyslových aplikacích, například při údržbě klimatizací a chladicích systémů. Tento typ vývěvy nachází také uplatnění například ve vakuovém balení, zdravotnických zařízeních nebo při čištění odpadních vod [13]. Díky svému rozšířenému použití je snadno dostupná za přijatelnou cenu. Její konstrukce je založena na jednoduchém designu s jednou hřídelí a přímým pohonem, což přispívá k její dlouhé životnosti, vysoké spolehlivosti a nízkým provozním nákladům [14]. Dalšími výhodami tohoto typu vývěvy jsou její kompaktní rozměry, nízká hmotnost a snadná integrace do zařízení [14].

Princip fungování rotační lamelové vývěvy je založen na otáčení lamel uvnitř excentricky uloženého rotoru. Tyto lamely se působením odstředivé síly vysouvají a vytvářejí komory, ve kterých dochází k oddělení, stlačení a následnému vypuštění čerpaného média. Vývěvy tohoto typu se vyrábějí v jedno a dvoustupňových verzích, přičemž jednostupňové modely provádějí pouze jedno stlačení média, zatímco dvoustupňové umožňují dosažení vyššího vakua díky dvojité kompresi. [12]

Nevýhodou rotačních lamelových vývěv je nutnost jejich provozu v cyklickém režimu, což zajišťuje správný odvod oleje nashromážděného v separátoru zpět do olejového okruhu. V případě navrhovaného liciího přístroje však tato vlastnost neomezuje jeho funkčnost, protože vývěva pracuje pouze po krátkou dobu v každém cyklu. [12]

Volba padla na cenově dostupné řešení značky VEVOR. Ninuk Jonoajji ve své studii uvádí, že vakuový tlak přibližně $-1,013$ bar ($101\,300$ Pa) je dostatečný pro vakuové lití šperků za kontrolovaných podmínek. Při jeho aplikaci po dobu 27 sekund při teplotě lití 1000 °C dochází k úplnému zaplnění formy, vytvoření hladkého povrchu s jemnými detaily a bez viditelné porozity [15]. Vzhledem k tomu, že všechny modely této značky umožňují dosažení takového vakua, byl dalším rozhodujícím faktorem průtok vzduchu, který ovlivňuje rychlost vytvoření podtlaku v komoře.

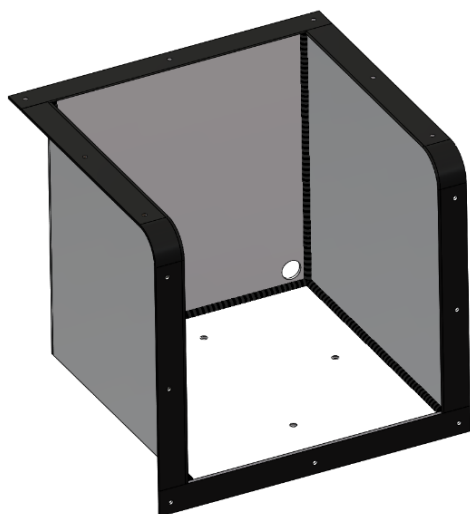
Pro zajištění optimálního uživatelského komfortu, tedy rychlého vytvoření vakua při zachování dostupné ceny, byla zvolena varianta se středním průtokem 6 CFM (170 l/min). Nižší model s průtokem 3 CFM (85 l/min) byl vyřazen z výběru, jelikož je pouze jednostupňový, což znamená nižší kvalitu dosaženého vakua, a tím i možné snížení detailnosti odlitků. Na základě uvedených kritérií byla finálně vybrána dvoustupňová vakuová vývěva VEVOR, model 2RS-2.



Obr. 8 Model vývěvy 2RS-2.

2.3 Přípravná komora

Přípravná komora byla navržena pro odvětrání vsázky a vytvoření optimálních podmínek před vlastním litím. Její vnitřní objem umožňuje umístění nádob různých rozměrů, včetně větších forem, bez nutnosti kapacitních kompromisů. Tělo komory bylo koncipováno jako svařovaná konstrukce z ocelových plechů, jejichž tloušťka bude stanovena na základě výsledků simulace MKP, a je zpevněno obvodovým rámem z L profilů, který slouží jak pro usazení do konstrukce přístroje prostřednictvím předvrtaných otvorů, tak jako opěrná plocha pro pryžové těsnění mezi tělem a víkem. Víko je zhotoveno z tvarovaného plexiskla s pravoúhlými hranami a rádiusem, čímž je umožněna vizuální kontrola odvětrávacího procesu a současně zajištěna ergonomie obsluhy. Tloušťka plexiskla víka bude také stanovena na základě provedené simulace a následně výsledky budou ověřeny experimentálně.



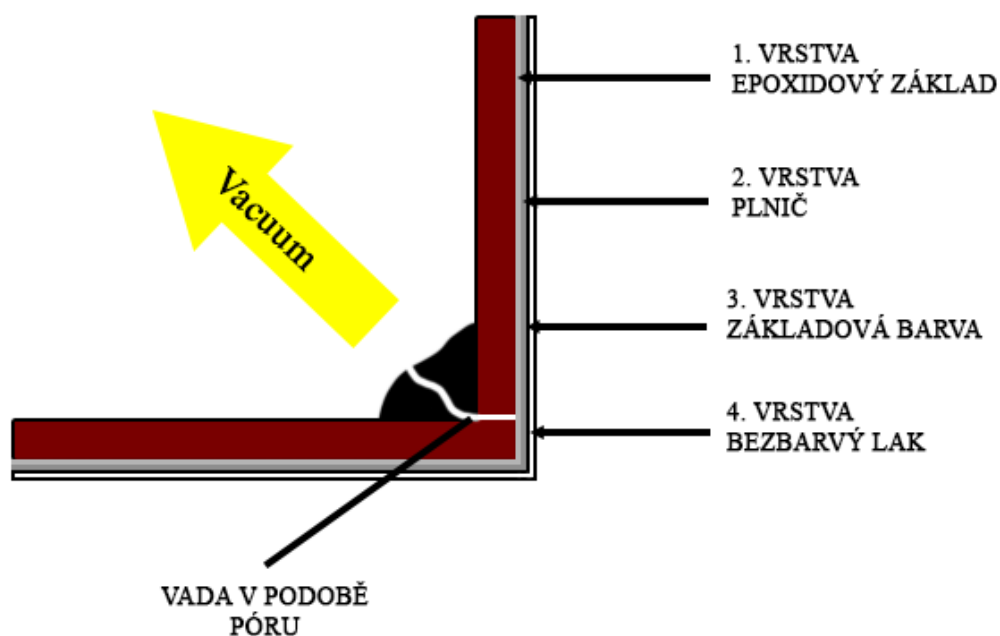
Obr. 9 Tělo přípravné komory.



Obr. 10 Přípravná komora.

Těsnost přípravné komory vůči vakuu je zajištěna plošným těsněním z pryže, které bude precizně vyřezáno tak, aby dokonale lícovalo s límcem těla a víka. Spáry vzniklé při svařování plechů bývají náchylné k drobným vadám jako např. porozita, proto bude vnitřní i vnější plocha ošetřena dvousložkovým lakem používaným v automobilovém průmyslu. Nanesení tohoto nátěru vyplní veškeré nerovnosti, vytvoří souvislý ochranný film a zamezí tak úniku vzduchu skrze mikropóry. Současně poskytne jednotný estetický dojem celku.

Povrchová úprava se provede ve čtyřech fázích. Nejprve budou hrubé nedostatky vyplněny tmelem a vyhlazeny tak, aby zanikly viditelné prohlubně. Druhý krok spočívá v aplikaci epoxidového základu, který zajistí antikorozi ochranu substrátu. Následně se nanese vrstva plniče, jehož úkolem je vyrovnat i ty nejjemnější rýhy a připravit povrch na finální nátěr – tento stupeň bude po vytvrdnutí zbroušen do hladka. V závěru bude položena vrchní barva, která vytvoří odolný ochranný film s vysokou mechanickou i chemickou životností a zároveň dodá komponentě profesionální vzhled.



Obr. 11 Těsnost v místě sváru.

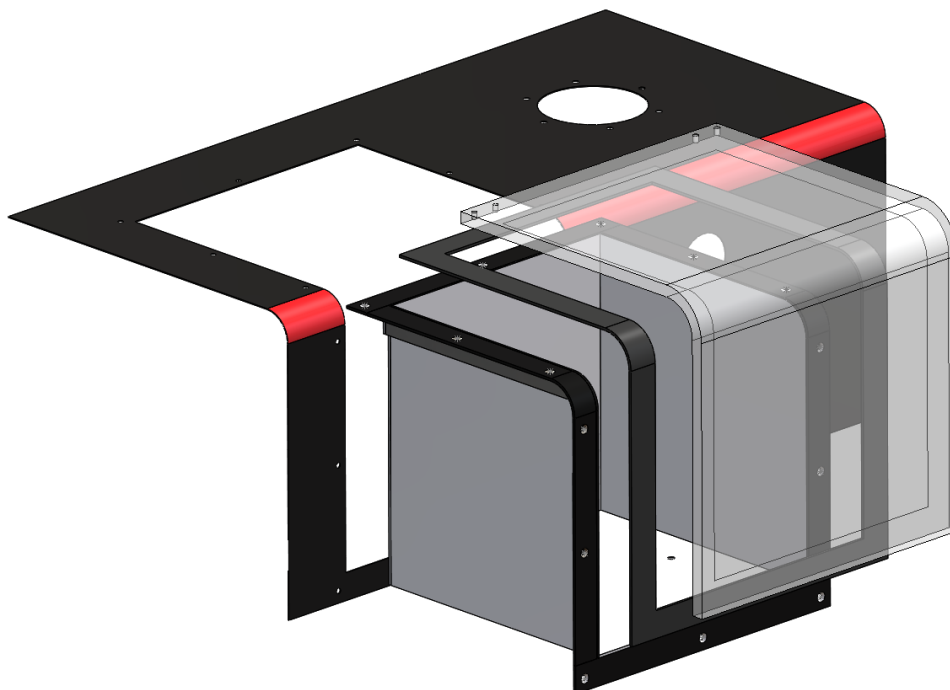
2.3.1 Proces analýzy přípravné komory metodou konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále značeno MKP) je numerická technika umožňující aproximaci řešení komplexních inženýrských a fyzikálních úloh rozdělením původní oblasti na malé, vzájemně propojené elementy. Každý z těchto konečných prvků, v rovině obvykle trojúhelníky nebo čtyřúhelníky je charakterizován vlastními materiálovými vlastnostmi a geometrickým popisem. Na základě těchto elementů se vytváří soustava algebraických rovnic, jež reprezentují mechanické chování celé struktury pod zadanými hraničními podmínkami a zatěžovacími silami. Řešení této soustavy numerickými metodami, jako je přímá eliminace nebo iterační postupy, poskytuje detailní rozložení napětí, deformací a dalších fyzikálních veličin v konstrukci. [16]

Toto rozčlenění a precizní popis interakcí mezi prvky umožňuje analyzovat i velmi komplikované tvary a složitá zatížení, která by analytickými metodami byla neřešitelná. Původně vyvinutá pro potřeby strojího, stavebního a leteckého inženýrství, se MKP stala univerzálním nástrojem pro návrh, ověřování a optimalizaci produktů a konstrukcí ve všech odvětvích, kde je nezbytné testovat jejich odolnost vůči zatěžujícím silám [17].

Mezi hlavní výhody patří schopnost zahrnout složité geometrie a heterogenní materiálové charakteristiky, vysoká přesnost výsledků díky jemné diskretizaci a možnost parametrické studie, která umožňuje optimalizovat tvary a rozměry komponent s ohledem na hmotnost, pevnost i výrobní náklady [17]. V kontextu přípravné komory to znamená, že MKP analýza odhalí kritická místa vystavená nejvyššímu napětí a umožní navrhnout vhodné tloušťky stěn, čímž se minimalizuje riziko plastické deformace nebo selhání ve fázích odvzdušnění a manipulace se vsázkou.

Pro simulaci byla zvolena platforma SolidWorks Simulation, neboť již v rámci návrhového procesu byly veškeré 3D modely přístroje vytvořeny v prostředí SolidWorks, což umožnilo plynulý přenos geometrie do výpočetně náročného modulu bez potřeby znovuvytvoření dat. Přestože by bylo možné využít pokročilejších specializovaných nástrojů, jako je program Ansys, jež nabízejí jemnější kontrolu nad algoritmy řešení a širší spektrum nelineárních materiálových modelů, byla upřednostněna jednotná platforma. Hlavním důvodem je skutečnost, že navržený prototyp bude vyroben a fyzicky otestován v reálných podmínkách, takže výsledné numerické předpovědi budou ověřeny experimentálními daty, čímž se eliminuje případný nedostatek přesnosti spojený s jednodušším řešením.



Obr. 12 Sestava pro simulaci – rozpad.

V prvním kroku byla v prostředí CAD vytvořena kompletní sestava přípravné komory, která zahrnuje tělo komory, plošné pryžové těsnění i tvarované plexisklové víko. Aby byla analýza co nejpřesnější, bylo do modelu přidáno i vrchní krytový panel přístroje, ke kterému je komora smontována, čímž se zohledňují vazby a opěrné body skutečné konstrukce (viz obr. 12). Součástí přípravy bylo také vytvoření rozpadu sestavy, které slouží pro přehlednou kontrolu výsledků analýzy a pro přesné definování kontaktních vazeb v rámci MKP simulace. Tímto postupem se zajistí, že výsledky simulace budou odpovídat reálným provozním podmínkám a umožní spolehlivě odhalit případná kritická místa.

V dalším kroku analýzy konstrukce byl zvolen systematický postup simulace, který se skládá z několika na sebe navazujících etap:

- Nejprve dochází k vytvoření nové studie, přičemž program SolidWorks Simulation umožňuje zvolit různé typy studií – například statickou, únavovou nebo tepelnou, podle charakteru požadovaného výpočtu. Pro účely této práce byla zvolena statická analýza, která je vhodná pro posouzení pevnosti jednotlivých částí a jejich deformací pod zatížením.
- Jako další je nutné přiřadit materiálové charakteristiky každé součásti v sestavě. Toto nám udává fyzické informace ohledně modelu jako například mez kluzu, modul pružnosti nebo Poissonovo číslo, které jsou nezbytné pro provedení výpočtu napětí a deformace. Pro svařované tělo i krytový panel byl zvolen materiál s označením S235JR. Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel válcovanou za tepla. Tento materiál vyniká dobrou plasticitou, houževnatostí a svařitelností [18]. Dále má také dobré ohybové vlastnosti za studena [18]. Veškeré tyto vlastnosti tvoří ideální volbu pro tvorbu této konstrukce. Pro simulaci byl materiál zvolen z knihovny materiálů s následujícími parametry:

Tab. 1 Charakteristiky materiálu S235JR.

Modul pružnosti E [MPa]	Poissonův poměr μ [-]	Mez kluzu Re [MPa]
210 000	0,28	235

U vrchního víka přípravné komory byl zvolen materiál Polymethylmethakrylát, dále označovaný zkratkou PMMA, běžně známý také jako plexisklo či akrylátové sklo. Jedná se o průhledný syntetický polymer s termoplastickými vlastnostmi, používaný pro výrobu organického skla a dalších výrobků ků pro domácí i technickou potřebu. Z PMMA se vyrábí jak barevná, tak čirá plexiskla. Materiál je přirozeně křehký, avšak směřováním nebo roubovací polymerací s elastomery (např. polybutadiénem) získává vyšší houževnatost, což je vykoupeno mírným snížením optické čistoty. Mezi přednosti polymethylmethakrylátu patří vysoká tvrdost, tuhost a pevnost, vynikající lesklý povrch, dobré optické vlastnosti, vysoká tepelná odolnost a odolnost vůči slabým kyselinám, louhům či nepolárním rozpouštědlům. PMMA se navíc dobře zpracovává a mechanicky opracovává. Mezi nevýhody patří náchylnost k prasknutí při nárazu a hořlavost. [19]

Z hlediska simulace byl materiál PMMA také přiřazen z integrované databáze v programu SolidWorks s následujícími parametry:

Tab. 2 Charakteristiky materiálu PMMA.

Modul pružnosti E [MPa]	Poissonův poměr μ [-]	Pevnost v tahu Rm [MPa]
3200	0,37	75

Pro těsnění byla z knihovny materiálů programu SolidWorks vybrána obyčejná guma. Vzhledem k tomu, že se nejedná o kritickou část z hlediska pevnostní analýzy, je toto zjednodušení považováno za akceptovatelné.

- Následně jsou definovány kontaktní vazby mezi jednotlivými díly sestavy, tedy interakce, které určují, jak se prvky při zatížení vzájemně ovlivňují, například pevné spojení nebo dotyk. V základu jsou pro všechny přiléhající povrchy nastaveny globální interakce, jež zamezují jejich relativnímu pohybu. Přidáním místních interakcí je

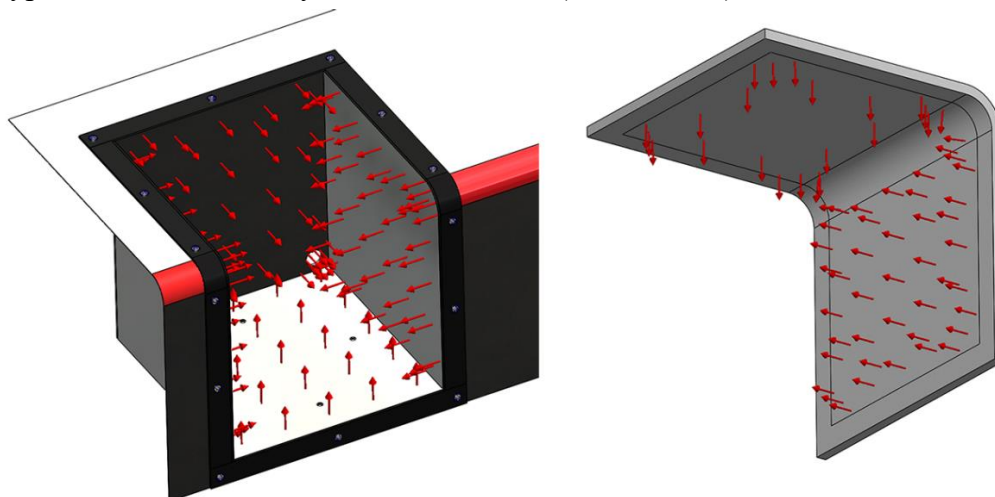
umožněno oddělení komponent vůči sobě, přičemž je stále vyloučeno pronikání dílů skrze sebe. Navíc bylo definováno šroubové spojení mezi tělem komory a předním panelem pomocí zápusťných šroubů M5 třídy 8.8. Firma Bossard CZ s.r.o. uvádí ve své tabulce hodnoty pro zadání parametrů tohoto šroubového spojení pro výpočet [20]:

Tab. 3 Parametry šroubového spojení.

Závít	Koeficient tření [-]	Maximální utahovací moment [Nm]
M5	0,14	6,5

Vzhledem k tomu, že jde o maximální hodnotu utahovacího momentu a nejedná se o hlavní upevnění komory, byl pro simulaci zvolen konzervativnější utahovací moment 1 Nm.

- Další fází je aplikace vnějších zatížení a okrajových podmínek. Tímto krokem jsou do modelu zavedeny síly a tlaky simulující reálné provozní podmínky. V rámci této analýzy byl hlavním zatížením podtlak působící na vnitřní stěny přípravné komory. Pro jeho stanovení byl k vývěvě připojen vakuometr, který naměřil hodnotu $-0,95$ baru ($-95\,000$ Pa). Vzhledem k požadavku na dostatečnou bezpečnostní rezervu byla do výpočtu zadána mírně vyšší hodnota -1 bar ($-100\,000$ Pa).

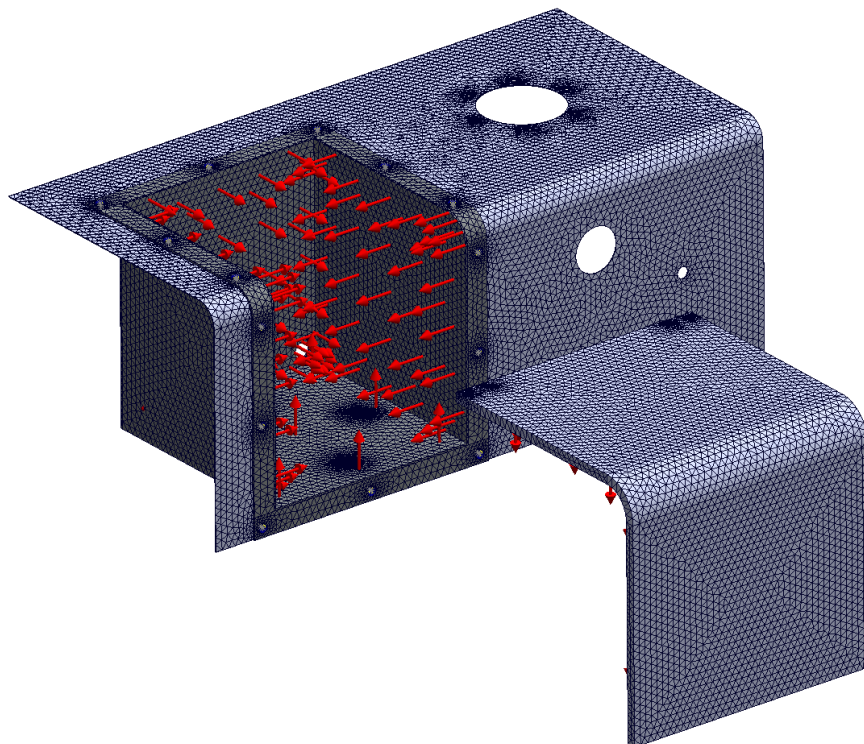


Obr. 13 Definice podtlaku.

- V pátém kroku byla vytvořena výpočetní síť – model byl rozdělen na drobné elementy, což umožnilo algoritmu přesně vyčíslit napětí, deformace a další fyzikální veličiny v místech styku sousedních elementů [21]. Pro tvorbu sítě byly v k dispozici tři algoritmy. Standardní síť, síť na základě zakřivení a síť na základě splývavého zakřivení. Při tvorbě sítě byl zvolen algoritmus sítě na základě splývavého zakřivení, který automaticky zpřesňuje síť v oblastech s vyšší křivostí a jemnými detaily [22]. Pro vytvoření a zjemnění sítě byly vybrány tyto parametry:

Tab. 4 Parametry sítě.

Maximální velikost elementu [mm]	Minimální velikost elementu [mm]	Min. počet elementů v kružnici [-]	Tempo růstu elementu [-]
10	0.5	8	1.2



Obr. 14 Diskretizace přípravné komory metodou konečných prvků.

- V posledním kroku byla simulace provedena v několika iteracích, během nichž byly postupně eliminovány zjištěné konstrukční nedostatky, až bylo dosaženo optimálně vyváženého návrhu. Průběh jedné testovací studie přesáhl deset a půl hodiny výpočtů, což umožnilo detailní ověření stability a pevnostních charakteristik celé sestavy.

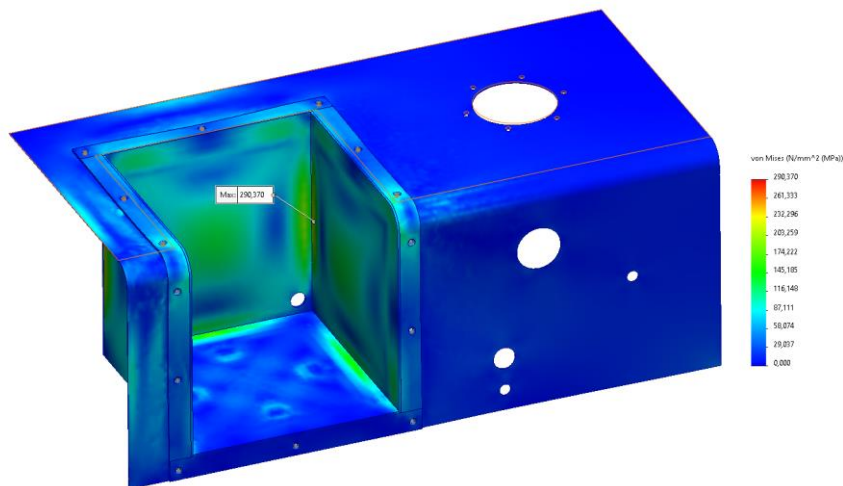
2.3.2 Vyhodnocení analýzy přípravné komory metodou konečných prvků

- V první iteraci simulace byl u přípravné komory zvolen svařovaný plech tloušťky 2 mm. Analýza odhalila nadměrné soustředění napětí v okolí montážních otvorů ve spodní části těla komory, jež fungovaly jako koncentrátoři napětí. Naměřené maximální napětí dosáhlo hodnoty 626 MPa, což značně převyšuje mez kluzu materiálu S235JR (235 MPa). Z tohoto důvodu byly všechny otvory eliminovány a místo nich byl navržen nový způsob upevnění – svaření přímo ze spodní strany komory. Touto úpravou došlo k odstranění kritických míst napětí a zároveň k zajištění hermetičnosti v oblasti dřívějších otvorů.



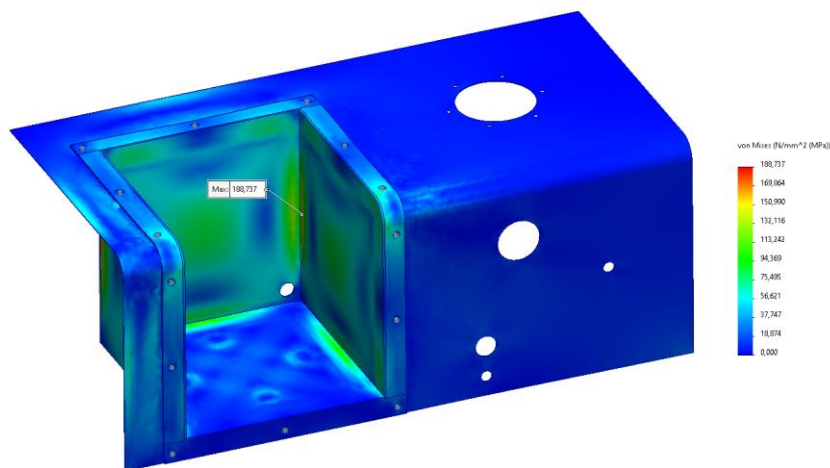
Obr. 15 Kritické místo napětí těla komory 1. iterace analýzy.

- Ve druhé iteraci, při zachování tloušťky plechu 2 mm a po odstranění montážních otvorů, byla simulace opět provedena za stejných podmínek. Přesto však v oblasti podélných hran stále docházelo k překročení meze kluzu materiálu, přičemž maximální napětí dosáhlo hodnot lehce přes 290 MPa (viz obr. 16). Z důvodu zajištění plastické deformace bylo rozhodnuto o zvýšení tloušťky plechu na 3 mm pro další testovací běh.

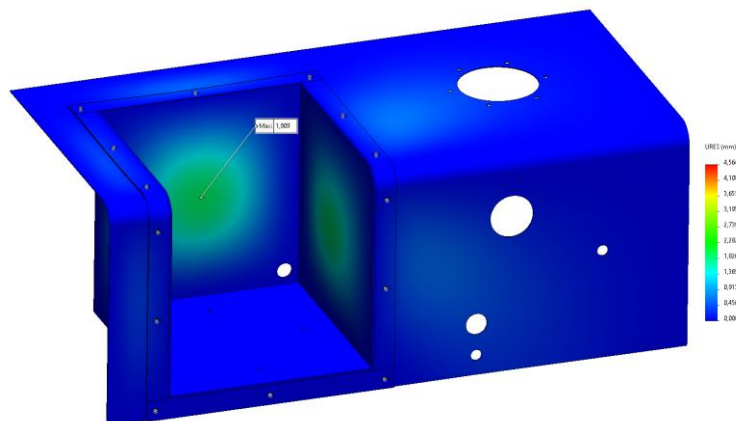


Obr. 16 Kritické místo napětí těla komory 2. iterace analýzy.

- Ve třetí iteraci byla tloušťka plechu zvýšena na 3 mm, kdy maximální napětí kleslo na 188,7 MPa, tedy pod mez kluzu materiálu a nedochází ke vzniku plastických deformací. Největší průhyb panelu komory dosáhl hodnoty 1,9 mm.

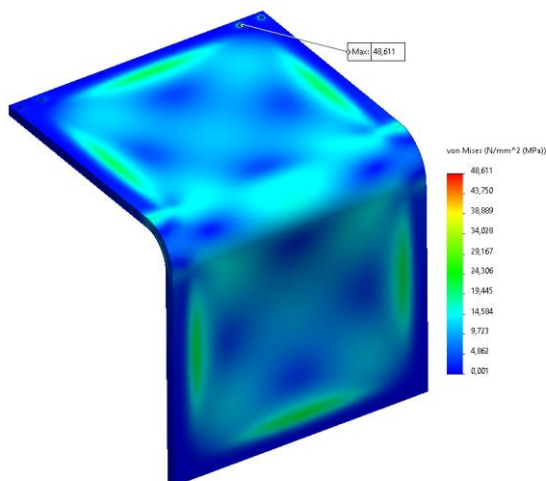


Obr. 17 Místo nejvyššího napětí těla komory 3. iterace analýzy.

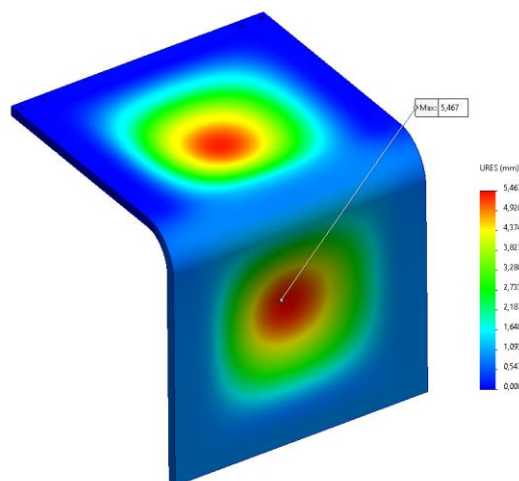


Obr. 18 Místo největšího průhybu těla komory 3. iterace analýzy.

- V první iteraci víka z PMMA o tloušťce 10 mm bylo zjištěno nejvyšší napětí 48,6 MPa v okolí montážních otvorů. Pro odstranění tohoto kritického místa budou otvory odstraněny a místo mechanického upevnění bude použita lepená spojka. Naměřené napětí tak zůstává pod pevností PMMA v tlaku, se kterou se tato hodnota porovnává [23]. Maximální průhyb víka činí 5,5 mm. Ačkoli tyto hodnoty naznačují akceptovatelnou bezpečnost vůči selhání, pro zvýšení rezervy byla rozhodnuta další iterace s větší tloušťkou materiálu.

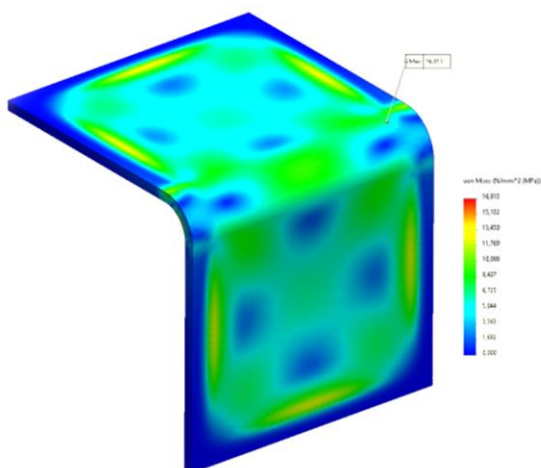


Obr. 19 Kritické místo víka komory 1. iterace analýzy.

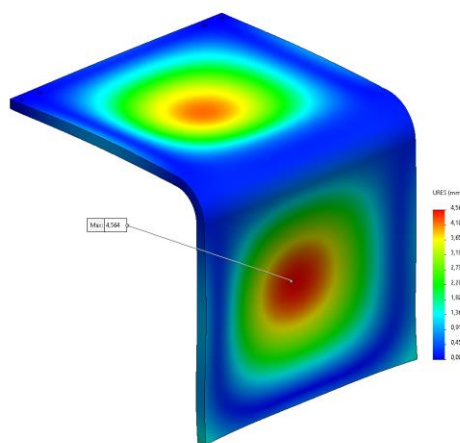


Obr. 20 Místo největšího průhybu víka komory 1. iterace.

- Ve druhé a poslední iteraci byla tloušťka víka PMMA navýšena na 13 mm v souladu s běžně dostupnými standardními rozměry. Maximální napětí kleslo na 16,8 MPa a maximální průhyb činil 4,6 mm, přičemž obě hodnoty poskytují dostatečnou bezpečnostní rezervu vzhledem k mechanickým vlastnostem materiálu.



Obr. 21 Rozložení napětí víka komory 2. iterace analýzy.



Obr. 22 Místo největšího průhybu víka komory 2. iterace.

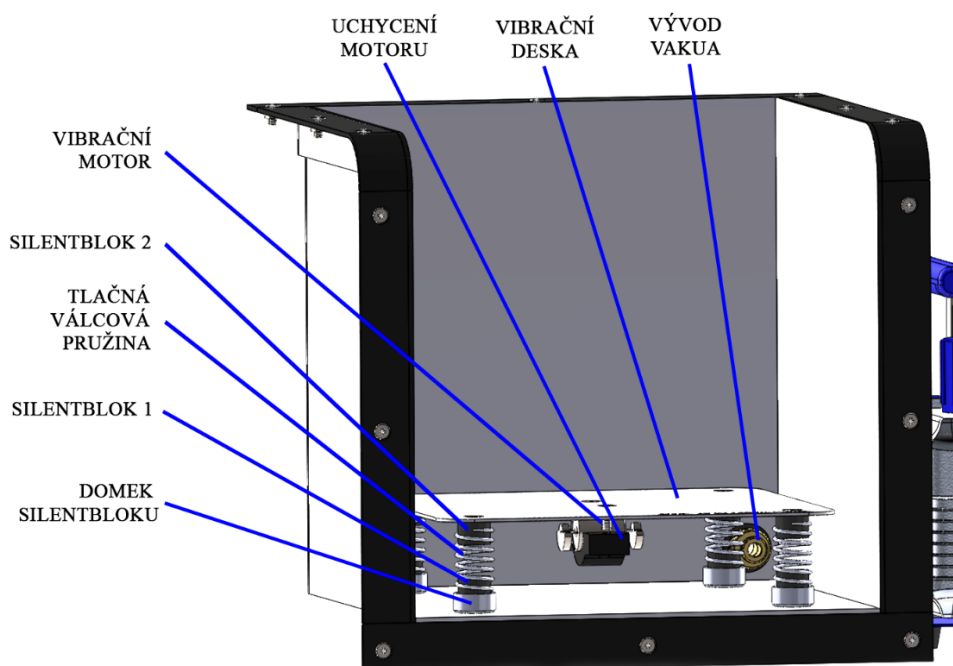
- V rámci MKP analýzy bylo provedeno postupné ladění konstrukčních parametrů přípravné komory i jejího víka. U těla komory byly nejprve eliminovány montážní otvory, které se ukázaly jako významné koncentrátoři napětí, a následně byla zvýšena tloušťka plechu z 2 mm na 3 mm. V konečném modelu tak maximální napětí dosáhlo hodnoty 188,7 MPa, což zajišťuje provozní bezpečnost pod mezí kluzu materiálu, a největší průhyb panelu komory činil 1,9 mm.

U plexisklového víka byla první iterace s tloušťkou 10 mm doprovázena maximálním napětím 36,7 MPa v okolí upevňovacích otvorů, což vedlo k nahrazení mechanického spoje lepením. Ve druhé fázi byl materiál zesílen na 13 mm, čímž se maximální napětí snížilo na 16,8 MPa a průhyb dával hodnotu 4,6 mm. Tento vícestupňový přístup umožnil odstranit kritické defekty návrhu, ověřit deformační a pevnostní charakteristiky dílů a potvrdit výrobní i ekonomickou efektivitu navržených řešení. Výsledky analýzy jsou zformovány do následující tabulky:

Tab. 5 Výsledky analýzy přípravné komory metodou konečných prvků.

Iterace	Díl	Tloušťka materiálu [mm]	Maximální napětí [MPa]	Maximální průhyb [mm]	Bezpečnost [-]
1.	Tělo	2	626	-	0,38
2.	Tělo	2	290	-	0,81
3.	Tělo	3	188,7	1,9	1,25
1.	Víko	10	48,6	5,5	1,54
2.	Víko	13	16,8	4,6	4,46

2.3.3 Vybavení přípravné komory



Obr. 23 Vybavení přípravné komory.

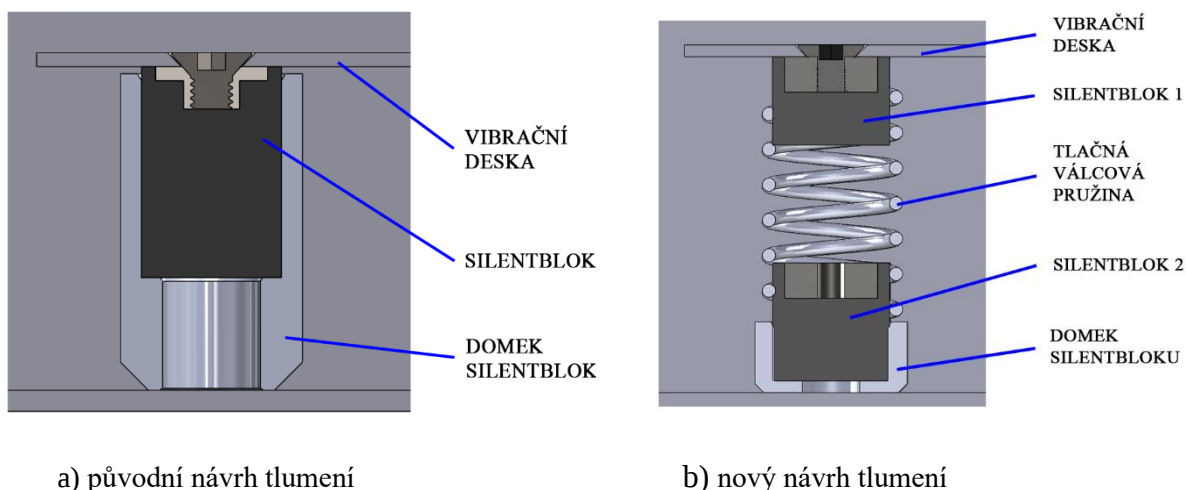
Mezi klíčové prvky přípravné komory bude patřit vibrační stolek určený k odkládání formy naplněné vsázkou. Vrchní deska stolku bude zhotovena z ocelového plechu a na své spodní straně osazena vibračním motorkem uchyceným do tvarovaných držáků, které se k desce

přípevním šroubovým spojem. Motor bude pracovat na základě principu excentrické nevývahy – po dosažení provozních otáček se díky pohybu excentru přenesou vibrace do desky. Tyto kmitavé pohyby se následně přenesou do formy a napomohou efektivnějšímu odvádění vzduchových bublin z vsázky, čímž se zlepší homogenita a kvalita předpřipraveného odlitku.

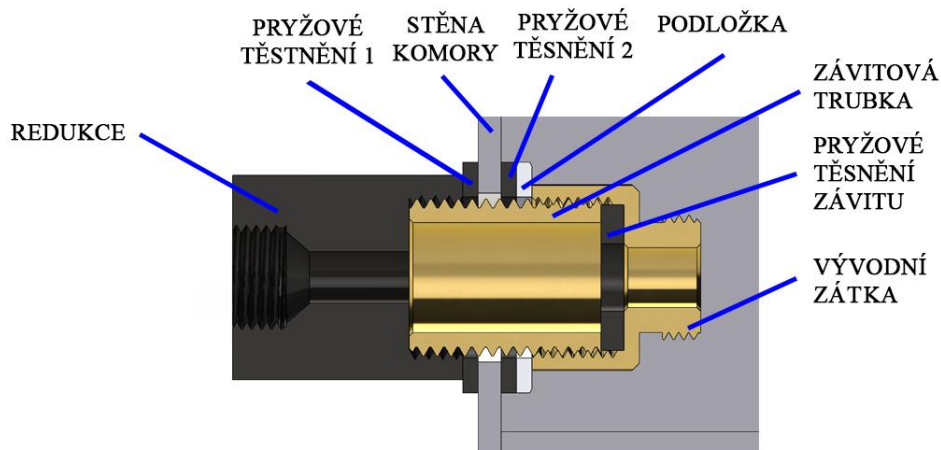
Aby se vibrace nešířily do ostatních částí konstrukce, bude deska stolku uložena na speciálně navrženém tlumicím systému. V prvotním návrhu měly být použity přivařené úchyty na těle komory a silentbloky mezi deskou a rámem (viz obr. 24), avšak testy odhalily nedostatečné odhlučnění – vibrace se šířily do konstrukce s vysokou intenzitou. Toto by vedlo k hlučnému provozu a možnému zvýšení opotřebení montážních prvků či jejich úplnému selhání.

Na základě těchto poznatků bude implementováno nové řešení: deska stolku bude podepřena dvěma silentbloky, umístěnými pod deskou a na těle rámu, které budou vzájemně propojeny pružinami. Tato kombinace pružinového uložení a gumových tlumičů umožní výrazné snížení přenosu vibrací do rámové konstrukce a zaručí tichý provoz i dlouhodobou spolehlivost (viz obr. 24).

V přípravné komoře se dále nachází vývod pro připojení vakuového systému, jehož těsnost bude zajištěna pryžovým těsněním. Součástí tohoto uzlu budou pečlivě navržené přechodové těsnicí prvky zabráňující úniku vzduchu jak mezi stěnou komory a vývodem, tak v místě závitového spoje (viz obr. 25). Konec vývodu bude ve finální fázi doplněn filtračním sítkem, jež ochrání vakuovou pumpu před vnikem nečistot a zajištění dlouhodobé funkčnosti systému.

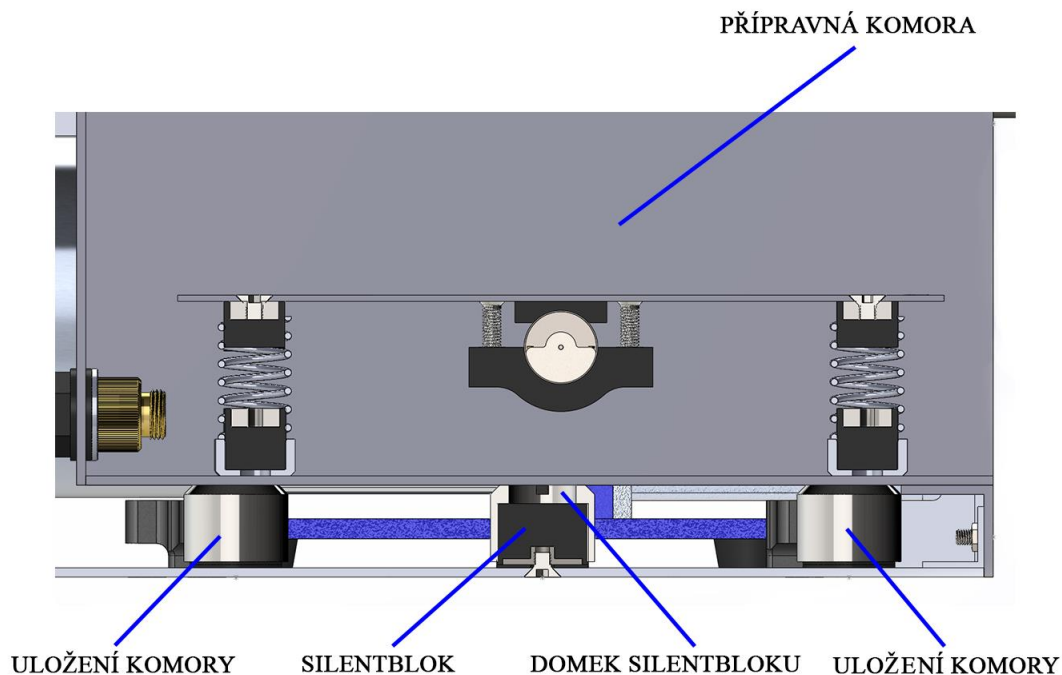


Obr. 24 Tlumicí systém.



Obr. 25 Těsnění vývodu přípravné komory.

2.3.4 Upevnění přípravné komory k rámu

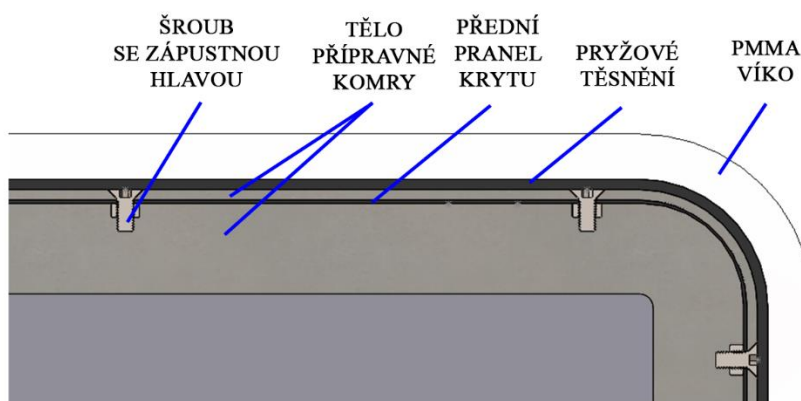


Obr. 26 Uložení přípravné komory.

V souladu s odstraněním montážních otvorů popsaným v kapitole 2.3.1 bude uchycení přípravné komory k rámu realizováno svářecí technologií. Z důvodu eliminace napěťových koncentrátorů a zachování hermetičnosti nebylo možné použít šroubové spoje, a proto budou na spodní ploše komory přivařeny čtyři ocelové domky.

Do těchto domků budou zasazeny silentbloky, které zajistí pružné uložení komory vůči rámu. Díky tomuto způsobu ukotvení dojde k významnému utlumení nárazových a vibračních vyvolaných sil, což prodlouží životnost spoje i celé konstrukce.

Navržené díly budou svařeny na rám přístroje v přesně definovaných bodech, které zároveň korespondují s otvory pro usazení silentbloků. Toto řešení umožní snadné demontování přípravné komory pro servisní zásahy a současně zajistí dostatečnou pevnost a stabilitu během provozu i transportu zařízení.



Obr. 27 Ukotvení přípravné komory.

Ve vrchní části bude přípravná komora upevněna šroubovým spojením tak, aby bylo dosaženo plné těsnosti mezi tělem a víkem. Do tzv. límce těla komory budou osazeny zápuštné šrouby se zapuštěnou hlavou. Tím vzniká rovná plocha, na kterou bude následně položeno těsnění. Tento způsob kontrakce zajistí spolehlivý uzávěr mezi přípravnou komorou a odnímatelným víkem.

2.4 Licí komora

V licí komoře probíhá vlastní proces odlévání roztaveného kovu do formy. Komora byla navržena s menším vnitřním objemem než přípravná komora, protože licí kelímek je usazen přímo v její dutině, kdy mezi stěnami komory a formou zůstává pouze tenká vzduchová mezera. Prvotní koncepce předpokládala svařovanou trubkovou konstrukci s límcem pro těsnění, avšak její výroba by generovala nadměrné množství materiálového odpadu, což není v korespondenci s cílem návrhu. Z důvodu minimalizace výrobních nákladů a co nejefektivnějšího využití materiálu bylo navrženo vytvoření formy pro odlití těla komory z betonové směsi. Betonová konstrukce nabízí nízké pořizovací náklady, dostatečnou tepelnou odolnost proti krátkodobému působení sálavého tepla z kelímku a spojuje mechanickou pevnost s možností přesného odlití do požadovaného tvaru.

Nevýhodou tohoto provedení je možná pórovitost, která by mohla ohrozit těsnost komory při podtlaku. Proto bude proces výroby formy pečlivě řízen (výběr správné směsi, aplikace vibrací během lití, vhodné poměry vody a cementu). Také je možnost případné finální povrchové úpravy jako je např. penetrace pryskyřicí nebo nátěr, jež zajistí uzavření mikropórů. Po výrobě bude těsnost ověřena testem podtlaku, než bude komora integrována do finální sestavy přístroje.

2.4.1 Forma pro odlévání betonové směsi

Na počátku návrhu byla v CAD prostředí vytvořena 3D geometrie betonového těla komory. Válcovitý tvar odlitku kopíruje průměr licího kelímku, tím jsou minimalizovány materiálové ztráty a zároveň je zajištěna vysoká pevnost komory vůči působení vakua. Vnitřní průměr odlitku byl stanoven tak, aby mezi stěnou komory a licím kelímkem vznikla dostatečná vůle umožňující snadné zasazení zařízení bez rizika zaseknutí či poškození obou povrchů.

Ve vrchní části betonového tělesa byla vytvořena zesilující koruna k zabudování kovových matic pro upevnění komory k rámu přístroje. Matice budou do formy umístěny před odlitím betonové směsi, aby se během tvrdnutí pevně připevnily do konstrukce. Tímto postupem bude dosaženo přesného a trvanlivého kotvení betonového těla bez potřeby pozdějších mechanických úprav nebo vrtání. Ve spodní části komory byl vytvořen otvor pro vývod vakua.



Obr. 28 Licí komora.

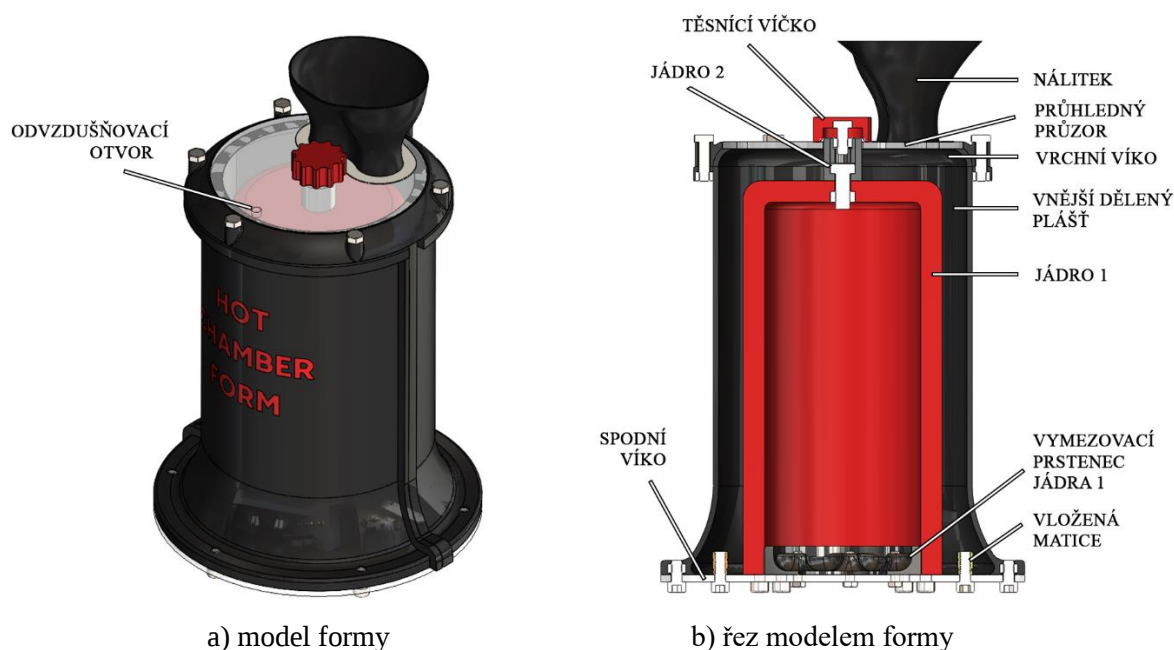
Po dokončení 3D modelu betonového těla byla zahájena výroba formy. Pro výrobu byla zvolena metoda FDM (Fused Deposition Modeling), běžně označovaná jako 3D tisk. Princip této technologie spočívá v tavení termoplastického vlákna v tiskové hlavě a jeho vrstveném nanášení podle předem definované geometrie pomocí pohybu v osách X a Y [24]. Výsledkem je tvarově přesný a rozměrově stálý díl. Využitím FDM bude dosaženo rychlé a nákladově efektivní produkce kompletní formy bez nutnosti tradičního obrábění. Jako každá technologie má i tato své výhody a nevýhody:

Tab. 6 Výhody a nevýhody technologie FDM.

Výhody	Nevýhody
Rychlé prototypování	Omezená velikost dílu
Personalizace návrhu	Menší pevnost
Redukce vedlejšího odpadu	Nutnost podpor u složitějších tvarů
Nízké náklady	Kvalita povrchu

Modely formy byly navrženy s ohledem na minimalizaci převisů. V případě komplikovanějších tvarů byly díly rozděleny na menší segmenty, aby byla zachována vysoká kvalita povrchů a sníženo riziko deformací při tisku. Spodní a vrchní část formy byly vyrobeny z průhledného plexiskla, aby byla umožněna přímá vizuální kontrola procesu odlévání a snadné sledování plnění betonové směsi.

Jelikož se jedná o aditivní metodu, je kvalita povrchu formových dílů z 3D tisku pro výrobu hladkých betonových odlitků nedostatečná. Mohlo by docházet k zaklínění odlitku mezi nepřesnostmi vzniklé z podkládání jednotlivých vrstev na sebe. Z tohoto důvodu je u vytištěných částí nutné provést dodatečné dokončovací operace.



Obr. 29 Forma lící komory.

Formu tvoří vnější plášť, který je koncipován jako dělený plášť, rozdělený na dvě samostatné části. Každá z těchto částí je vybavena přesně vyrobenými osazeními na svých hranách, jež do sebe vzájemně zapadají. Tato konstrukční opatření zajišťují jednoznačné vymezení polohy obou dílů vůči sobě během celého výrobního procesu. Důsledné zachování vzájemné polohy

dílů je klíčové pro minimalizaci rozměrových odchylek výsledného odlitku a pro dosažení optimální kvality konečného komponentu.

Spodní víko formy je vyrobeno z transparentního plexiskla, což umožňuje vizuální kontrolu plnění bez nutnosti demontáže formy. V plexisklovém víku je vytvořeno několik otvorů, jejichž účelem je jednak mechanické uchycení víka k dělenému plášti formy, a také pevné zafixování závitových prvků před vlastním procesem lití. Pro tento účel byly zvoleny bronzové matice M6, běžně používané pro zatavování do termoplastických materiálů (viz obr. 30). Díky drážkovanému povrchu jsou matice schopny se v materiálu mechanicky zakotvit, čímž vzniká velmi odolné a trvanlivé spojení. Vedle těchto montážních otvorů jsou ve spodním víku také vymodelovány otvory pro přesné uchycení vymežovacího prstence jádra 1. Jakmile je prstenec na svém místě, vkládá se do něj jádro 1 (viz obr. 29), které svou geometrií zajišťuje exaktní vymezení polohy tohoto prvku ve formě. Mezera mezi jádrem 1 a vnějším pláštěm formy byla stanovena na 14 mm, aby bylo možné bez komplikací odlévat betonovou směs do vzniklé dutiny a současně omezit celkové rozměry a hmotnost konstrukce formy na přijatelnou míru.

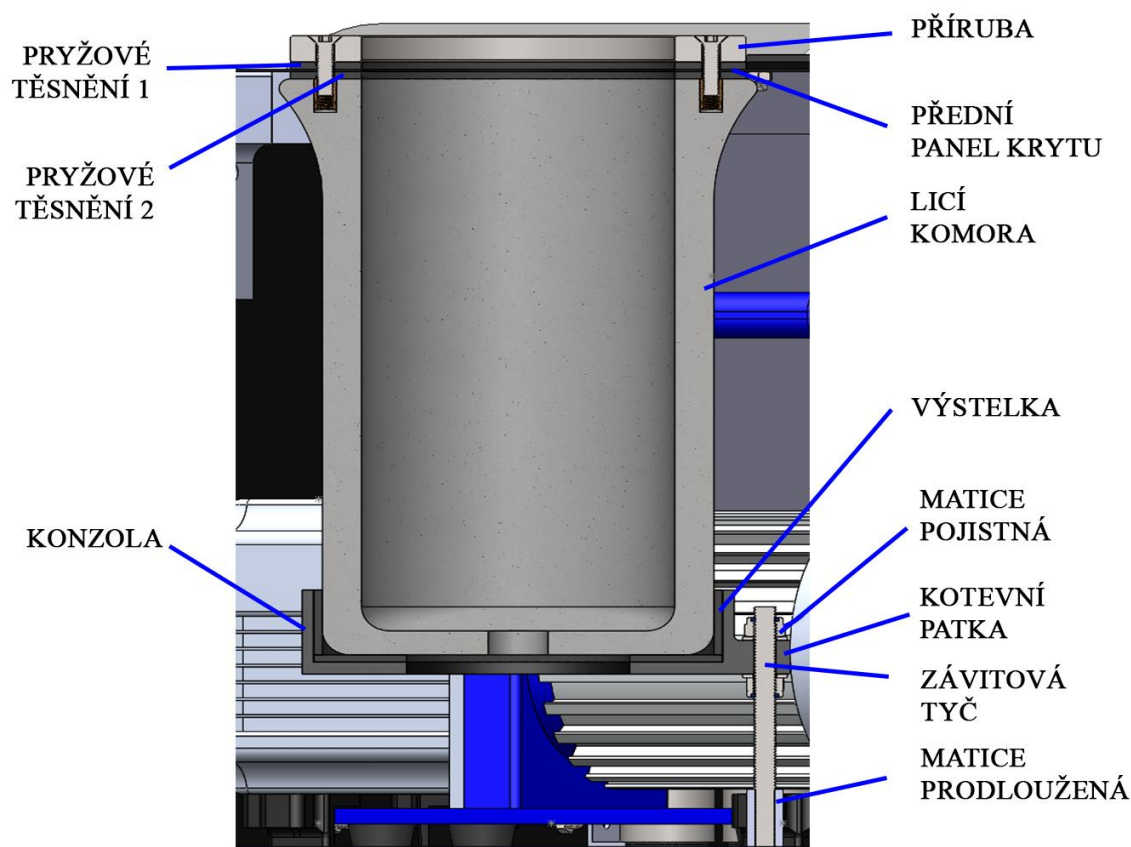
Pevnostní charakteristiky výsledné komory jsou výrazně závislé na přesném složení a míchacím poměru betonové směsi. Z tohoto důvodu bude finální pevnost odlitku určena experimentálně podle použité receptury. Tímto empirickým přístupem je možné kvantifikovat vliv konkrétních složek směsi a optimalizovat tak recepturu pro požadované provozní zatížení.

Ve vrchní části formy je připevněno vrchní víko, které obsahuje transparentní průzor umožňující kontrolu vnitřního prostoru formy během plnění. V průzoru je vytvořen otvor sloužící pro zasazení jádra 2, jehož úkolem je vytvoření přesného průchozího otvoru ve výsledném odlitku pro usazení vývodu vakua. Jádro 2 je následně utěsněno pomocí speciálního těsnicího víčka (viz obr. 29), tím je zajištěna těsnost spoje a minimalizují se případné úniky směsi během provozu formy. Na vrchním víku se dále nachází nálipek. Vtokový otvor umožňuje pohodlné a kontrolované vkládání betonové směsi do formy. Připevnění vrchního víka k dělenému plášti probíhá prostřednictvím šroubového spojení, které zajišťuje dostatečnou upínací sílu pro udržení těsnosti. Pro odvod vzduchu vytlačovaného směsí byl ve vrchním průzoru vyvrtán otvor.



Obr. 30 Závitové vložky [25].

2.4.2 Kotvení licí komory

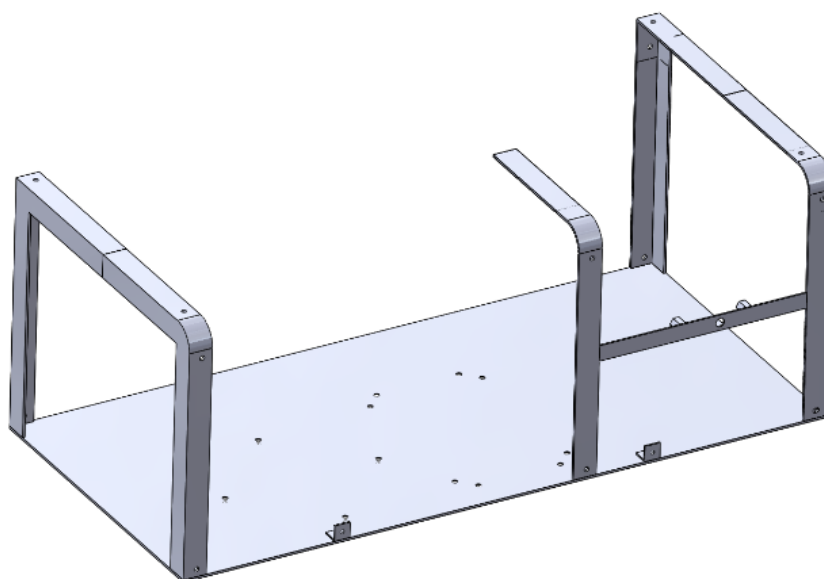


Obr. 31 Uložení licí komory.

Licí komora bude ze spodní části pevně usazena do obloukové konzoly, jejíž tvar přesně koresponduje s vnějším obrysem těla licí komory. Vnitřní prostor konzoly bude opatřen měkkou výstelkou, jež zajistí bezpečné uložení a zároveň zamezí nežádoucímu pohybu či opotřebení povrchu komory. Ve spodní části této konzoly bude vytvořen průchod pro vývod vakua, který umožní připojení vakuové hadice přímo k licí komoře. Tento vývod bude shodný s vývodem přípravné komory probíranému v kapitole 2.3.3. Pro uchycení celé sestavy k základnímu rámu poslouží tři kotevní patky rozložené rovnoměrně po obvodu konzoly. Každý z nich bude mít otvor pro vedení závitové tyče. Tyto tyče se prostrčí otvory a zajistí se zespodu maticemi, jež budou navařeny na spodní desku rámu. Pro zajištění proti samovolnému povolení spoje budou na závitové tyče nasazeny pojistné matice po obou stranách konzoly, přičemž pod každou maticí bude umístěna plochá podložka pro rovnoměrné rozložení síly utažení a ochranu povrchu.

Vrchní část licí komory bude ukotvena pod polohou předního panelu krytu přístroje. Na přední straně panelu bude integrována příruba s otvory, jejichž rozmístění bude odpovídat pozicím matic zalitých přímo v horní části betonového těla komory. Příruba bude přišroubována šrouby skrze přední panel k maticím v licí komoře, přičemž otvory v přírubě budou opatřeny zahluobením, jež umožní zapuštění hlavy šroubu do roviny plochy. Na tuto rovnou plochu příruby bude poté položeno těsnění určené pro utěsnění rozhraní mezi licím kelímkem a komorou. Aby se zamezilo průniku vzduchu v místě tohoto tříbodového spoje – mezi přírubou, předním panelem a tělem licí komory, budou ve všech styčných plochách aplikována pryžová těsnění. Tato řešení zajistí bezúdržbovou a opakovaně spolehlivou těsnost během celého provozu licího procesu.

2.5 Rám přístroje



Obr. 32 Rám přístroje.

Základna rámu bude vyrobena z plechu o stejné tloušťce, jaká bude použita u svařence přípravné komory. Toto řešení umožní pořizovat materiál z jedné velké tabule, čímž se maximalizuje ekonomičnost návrhu a minimalizuje vznik odpadních kusů. Ve spodní desce budou vytvořeny otvory pro uchycení silentbloků, na kterých se usadí přípravná komora a dále také budou sloužit pro fixaci rotační lamelové vývěvy.

Po bocích základny budou navařeny L profily, předem ohnuté do tvaru předního krytu přístroje, které vytvoří nosnou konstrukci pro opláštění. Na rám budou dále přivařeny další úchyty (viz obr. 32), jež umožní montáž dalších dílů, jako třicestného kulového ventilu, zvedacího mechanismu víka přípravné komory a dalších funkce přístroje.

2.6 Zakrytování



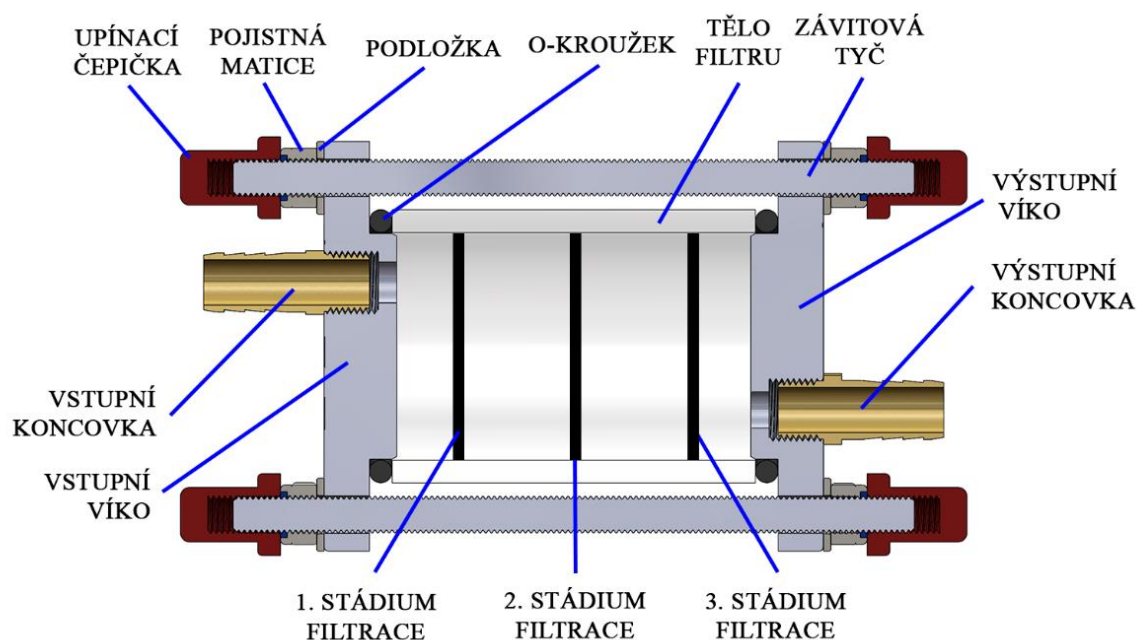
Obr. 33 Zakrytování přístroje.

Pro zakrytování konstrukce bude zvolen tenčí ocelový plech, pravděpodobně o tloušťce 1 mm, aby se minimalizovala hmotnost a zachovala snadná manipulovatelnost přístroje. Všechny kryty budou kopírovat obrysy rámu, což umožní přesné lícování a eliminaci mezer. Přichycení bude realizováno skrze předpřipravené otvory ke svařnému rámu.

Přední panel bude nejnáročnější na výrobu, neboť bude vyžadováno velké množství výřezů: čtvercový otvor pro usazení přípravné komory, vstupní otvor pro průchod licího kelímku do licí komory, dále otvory pro vakuometr, olejový průzor, táhlo třicestného ventilu a další ovládací prvky. Panel bude z jednoho kusu plechu ohnut do pravého úhlu s rádiusem na hraně, přičemž v této zaoblené části bude vytvořeno označení modelu stroje. Dále budou vytvořeny popisky označující obě komory a ovládací prvky, které zajistí přehlednost při obsluze.

Boční panely budou osazeny z obou stran rámu tak, aby byly zapuštěny za přední díl a byl tak vytvořen čistý vzhled přístroje. V další fázi návrhu bude ještě pravděpodobně vytvořen na jednom z těchto panelů otvor pro přístup k filtrační jednotce. Zadní panel bude instalován obdobně, navíc bude opatřen perforací pro odvod tepla generovaného vývěvou i samým procesem odlévání.

2.7 Filtrační systém



Obr. 34 Řez filtrační jednotkou.

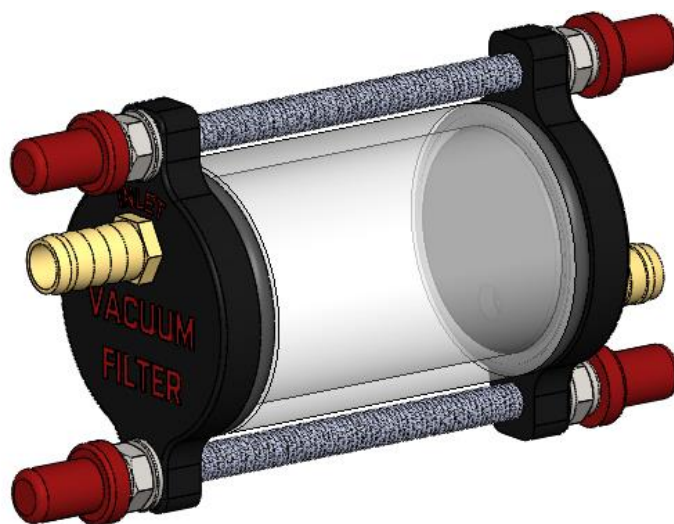
Aby byla vakuová vývěva chráněna před nečistotami a prachem z okolního prostředí i před rizikem zanesení při selhání v průběhu procesu lití, bude k přístroji integrován filtrační systém. Tento modul zajistí, že vniklé pevné částice nebudou moci proniknout do sacího okruhu vývěvy, čímž se minimalizuje opotřebení a riziko poruchy zařízení během provozu.

Tělo filtru bude realizováno z tlustostěnné trubky z plexiskla, osazené z obou stran odnímatelnými víky. Mezi každým víkem a tělem bude umístěn O-kroužek, jehož těsnost bude zajištěna přitlakem vyvozeným dvěma závitovými tyčemi prostrčenými očky na víkách (viz obr. 34). Na každé tyči budou z obou stran přišroubovány matice s podložkami, které po dotažení pevně přimáčknou víka vůči O-kroužkům.

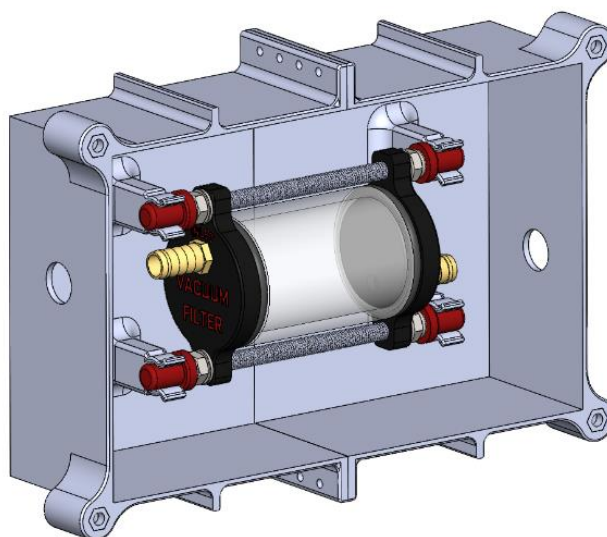
V každém víku budou vytvořeny závitové průchody pro montáž hadicových koncovek, jimiž bude filtr napojen na vakuový okruh. V tomto prvotním návrhu budou použity standardní

hadicové šroubení, přičemž v budoucnu je plánována úprava na rychlospojky pro snadnější a rychlejší demontáž a servis systému. Na konce závitových tyčí budou nasazeny upínací čepičky, které umožní jednoduché vyjmutí celé filtrační jednotky z přístrojové skříně usazené v samostatném boxu určeného pro tento filtr (viz obr. 36).

Uvnitř těla filtru budou umístěny tři stupně filtrace. První stupeň bude tvořen korozivzdornou sítí s okem 0,25 mm, druhý stupeň bude z jemnější sítě stejného materiálu o velikosti oka 49 μm (0,049 mm). Třetí stupeň, navržený pro zachycení nejmenších částic bude realizován z pórového molitanového filtračního materiálu. Konstrukce tohoto finálního filtru bude upřesněna na základě experimentálních testů účinnosti a průchodnosti vzduchu.



Obr. 35 Filtrační jednotka.



Obr. 36 Filtrační systém.

3 VÝROBA PROTOTYPU

Ve třetí kapitole bude představen postup praktické realizace navrženého zařízení formou výroby funkčního prototypu. Budou popsány technologie a metody zpracování jednotlivých konstrukčních prvků jako řezání a ohyby profilů pro rám komory, 3D tisk formy a šroubované i svařované spoje.

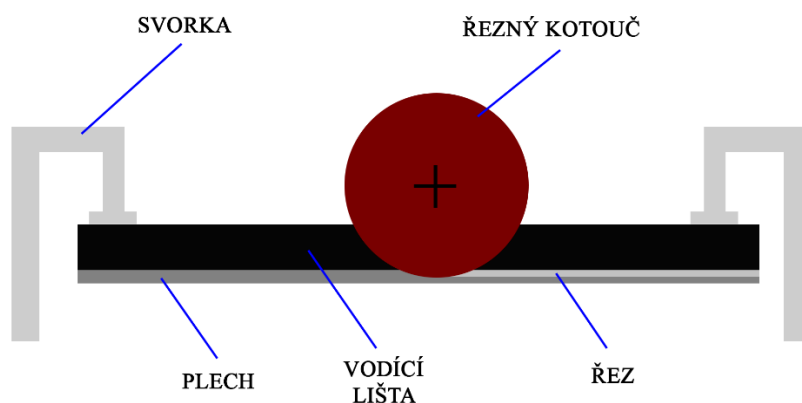
3.1 Výroba přípravné komory

3.1.1 Vyřiznutí plechových dílců

Pro realizaci přípravné komory byl zvolen plech o rozměrech 2000×1000 mm a tloušťce 3 mm, jak vyplývá z návrhového řešení uvedeného v kapitole 2.3.2. Nejprve byla navržena optimální konfigurace výřezů na celé ploše tabule, přičemž bylo dosaženo minimalizace odpadu materiálu pod 5 % z plochy plechu. K tomuto účelu byla vytvořena jednoduchá skica, do níž byly zakresleny všechny jednotlivé komponenty přípravné komory s ohledem na jejich vzájemné uspořádání a technologické tolerance.

Po definici konfigurace výřezů následovalo přesné značení obrysů dílů. U všech segmentů přípravné komory byl povrch plechu opatřen tenkou vrstvou značící kapaliny, tvořené směsí barviva a lihu, která zajistila vysoký kontrast vůči kovovému povrchu. Tento nátěr umožnil vedení karbidového rýsovacího hrotu, který vytvořil tenké a přesné značení. Tímto krokem byla zaručena správnost geometrie obrysů. Jako alternativní a perspektivní metoda bylo otestováno laserové gravírování šablonových čar přímo na povrchu plechu, které poskytuje opakovatelnost značení s vysokou přesností a výrazně snižuje riziko lidské chyby. Toto gravírování zajišťoval diodový laser, který byl položen přímo na plochu tabule plechového plátu.

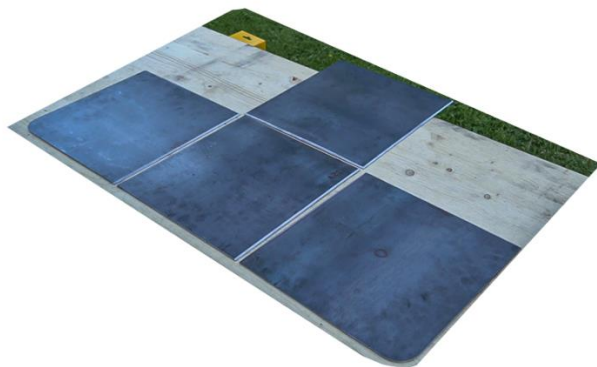
Ke zhotovení hrubého řezu byla využita úhlová bruska s kotoučem na řezání tenkých plechů, vedený po pevně upnuté vodící liště (viz obr. 37). Lišta byla fixována k plechu pomocí svorek, čímž byl zajištěn lineární pohyb kotouče a udržení tolerance řezu na úrovni $\pm 0,3$ mm. Tento postup se ukázal jako vysoce ekonomický pro výrobu prototypu, přičemž výsledné řezné plochy vyhovovaly požadavkům na následné svařování bez nutnosti dodatečného broušení nebo frézování.



Obr. 37 Řez pomocí vodící lišty.

V rámci alternativních výrobních technologií lze uvažovat o CNC vyřezávání vodním paprskem, plazmovým hořákem či laserem, které umožňují čisté řezy s minimální výrobní odchylkou. Tyto metody však nebyly pro pilotní výrobu aplikovány vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům. Pro případnou sériovou či kusovou výrobu přípravné komory je však plánováno využití laserového značení a CNC řezání, což výrazně zkrátí dobu přípravy a zvýší

opakovatelnost rozměrové přesnosti. Zároveň by byl vyřazen faktor lidské chyby při manipulaci s rýsovacím hrotem.



Obr. 38 Vyříznutí plechových dílců přípravné komory.

V místě dvou plechových dílců, kde je požadován přesný rádius, byla zhotovena 3D tištěná šablona metodou FDM. Šablona odpovídala navrženému zakřivení a byla přiložena k rohu plechového dílce. Pomocí lamelového brusného kotouče bylo vybráno zakřivení opisem šablony. Pro jemné doladění profilu rádiusu byl následně použit ruční pilník, který zajistil hladký přechod a dodržení požadované tolerance.



Obr. 39 Šablona pro tvorbu rádiusu plechového dílce.

3.1.2 Ohýbání L profilů

Pro vytvoření límce kolem obvodu přípravné komory (viz obr. 9) byly nejprve na pásové pile odříznuty L profily v přesných délkách odpovídajících obvodu těla přípravné komory. Dva z těchto profilů musely být následně ohnuty do pravého úhlu se stejným rádiusem, jaký byl definován pro boky plechových dílců.

Pro zajištění přesnosti ohybu byl navržen a vyroben speciální přípravek. Tento přípravek byl zhotoven z borové překližky o tloušťce 12 mm, jež byla vyřezána diodovým laserem (viz obr. 40). Díky jejím materiálovým charakteristikám byla garantována dostatečná tvarová stálost při kontaktu s ohýbaným profilem. Přípravek se skládal ze tří identických dílců, které byly vrstveny na sebe a pevně upevněny na montážní desce (viz obr. 41).



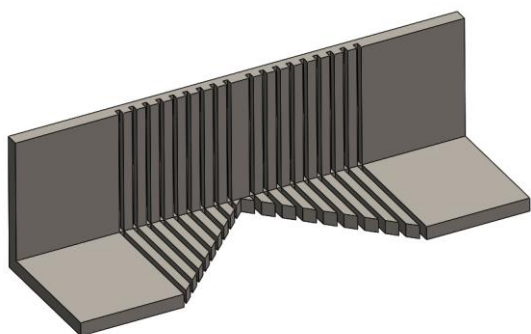
Obr. 40 Vypalování dílců z překližky.



Obr. 41 Přípravek pro ohnutí L profilů.

L profil byl dočasně upevněn k přípravku pomocí svorek, čímž bylo zajištěno pevné a stabilní ustavení pro proces ohýbání. Pro umožnění elastického vychýlení profilu bylo nejprve nezbytné provést jak zeslabení jedné stěny, tak lokálního zeslabení druhé stěny, které mělo snížit odpor materiálu v místě ohybu. První pokus se uskutečnil podle postupu znázorněného na obr. 42, kdy byl materiál nevhodně odstraněn vůči ohybu. To vedlo k nesprávné deformaci tvaru rádiusu a nedostatečné shodě s předlohou přípravku.

Na základě získaných zkušeností byl zvolen alternativní způsob vyjmutí materiálu, znázorněný na obr. 43, při němž byla odebrána celá přilehlá stěna budoucího záhybu. Tento zásah spolu s lokálním nahřátím oblasti plynovým hořákem umožnil profil přesně ohnout podle tvaru šablony a dosáhnout požadovaného rádiusu bez vzniku nežádoucích nepravidelností či defektů.

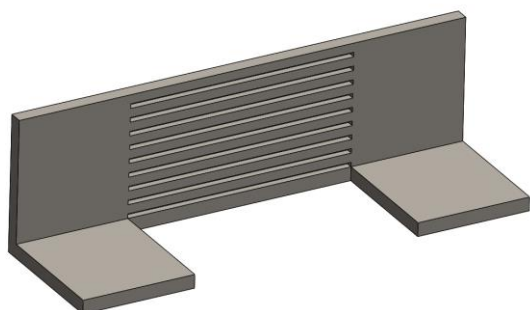


a) model zeslabení v místě ohybu



b) nesprávné zakřivení profilu

Obr. 42 Nevhodné zeslabení L profilu.



a) model zeslabení v místě ohybu



b) správné zakřivení profilu

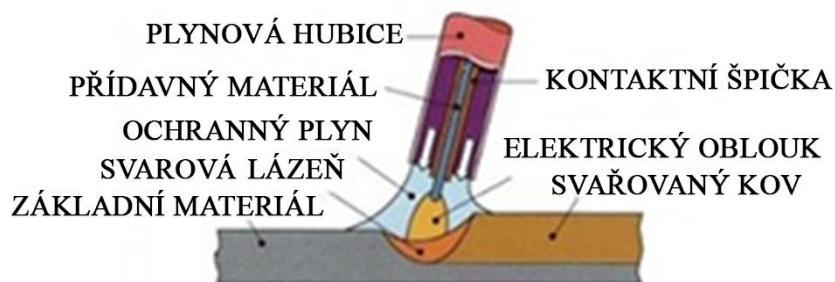
Obr. 43 Vhodné zeslabení profilu.

3.1.3 Technologie svařování MIG/MAG

Při výrobě přípravné komory bude u svařovaných spojů využita poloautomatická metoda MIG/MAG, která kombinuje ochrannou atmosféru plynného média s motorizovaným podáváním svařovacího drátu. Tento způsob umožní kontinuální přísun přídavného materiálu ovládaný stiskem spínače na hořáku, což výrazně zvýší produktivitu oproti ručně obalené elektrodě (MMA). [26]

Metoda MIG (Metal Inert Gas) využívá inertního plynu, jako je argon nebo helium, který chrání tavnou lázeň před oxidací. U varianty MAG (Metal Active Gas) je ke směsi argonu přidáván aktivní plyn, například oxid uhličitý, který se podílí na chemických reakcích v tavné lázni a zlepšuje průvar ocelí. [27]

Mezi klíčové výhody MIG/MAG svařování patří možnost provádět svary v libovolných polohách, vysoká rychlost ukládání svarového kovu a viditelnost svařovacího oblouku i tavné lázně. Dále dochází k redukci objemu strusky, omezení deformací tvořených tepelným zatížením a snížení emisí kouře ve srovnání s MMA postupem. Na druhé straně je nutné zohlednit vyšší pořizovací cenu a provozní náročnost svařovacího zdroje, zvýšené požadavky na údržbu a potenciální riziko odfouknutí ochranného plynu, které může ovlivnit kvalitu svaru. [26]



Obr. 44 Princip metody MIG/MAG, upraveno dle [26].

3.1.4 Svařování těla přípravné komory

Před zahájením svařovacích prací byla na všech dílech určených k vytvoření svarových spojů provedena úkosová úprava hran. Tato příprava umožnila dosažení hlubokého průniku svarové lázně a výsledného estetičtějšího a odolnějšího svaru. Ke stabilnímu upevnění plechových panelů sloužily magnetické pravoúhlé svorky, které udržely díly v přesné poloze po celou dobu svařování.

V první fázi bylo dílům provedeno bodové sváření k dočasnému ustavení polohy. Následně byla nanесena souvislá svařovací housenka na spodní straně spoje. První pokus však zahrnoval pouze jednostranné sváření, což vedlo ke vzniku koncentrace tepelných napětí a nežádoucímu prohnutí plechu (viz obr. 45). Tento deformovaný spoj nesplnil požadované tolerance, a proto byl demontován.

V druhém pokusu byla aplikována technika sváření z obou stran panelu. Dvoustranné provaření zajistilo homogenní svarovou lázeň a významně omezilo vznik průchozích pórů. Tepelná napětí vzniklá během svařování byla téměř vyvážena, díky čemuž nedošlo k průhybu dílů. Výsledné spoje vykazovaly požadovanou kolmost a rozměrovou přesnost.



Obr. 45 První fáze nepovedeného sváření dílců.

Po sváření všech rovinných dílců (viz obr. 46) do finálního korpusu bylo provedeno zhotovení límce. Na hranu L profilů bylo před svářením nanесeno zkosení, aby bylo dosaženo optimální

hloubky provaření a minimalizace vystupujícího svaru. Díky tomu bylo následné broušení do vodorovné plochy snazší a časově úsporné.

Pro přesné ustavení profilů vůči tělu komory byly použity magnetické svorky, přičemž profily byly po obvodu zajištěny samosvornými kleštěmi (viz obr. 47). Nejprve bylo provedeno bodové sváření podél linie budoucího spoje, poté byla nanесena souvislá svařovací housenka. Při svařování byl kladen důraz na jednotnou hloubku a šířku svaru, aby se minimalizoval výskyt defektů ovlivňujících těsnost.

Po dokončení vnitřního provaření límce byly L profily opatřeny doplňkovým svarem z vnější strany celého obvodu. Toto opatření posílilo pevnost spoje a zvýšilo těsnost korpusu. Vnější svary nejsou ve výsledné aplikaci viditelné, a proto nebylo nutné provádět jejich dodatečné obrábění.



Obr. 46 Svařené rovinné dílce přípravné komory.



Obr. 47 Vymezení a upevnění L profilu.



Obr. 48 Bodové ustanovení L profilu.



a) přední pohled



b) zadní pohled

Obr. 49 Svařené tělo přípravné komory.

Po dokončení navaření límce byly po jeho obvodu vyvrtány montážní otvory se zahluobením pro zápusné šrouby. Otvory vznikly až po úplném svaření konstrukce, aby byla zaručena přesnost jejich polohy. Pro vedení vrtáku byl využit speciální přípravek, přiložený na límec a fixovaný silným magnetem. Součástí přípravku byla drážka ve tvaru „V“, která zajistila kolmost vrtaných děr. Po vyvrtání bylo zahluobení dokončeno na stojanové vrtačce Scheppach DP 18 Vario. Tímto úkonem byla ukončena výroba těla přípravné komory a konstrukce byla připravena k montáži dalších komponent.

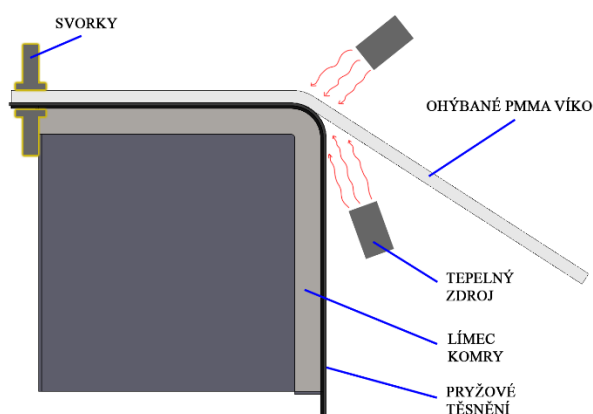
3.1.5 Ohyb PMMA víka přípravné komory

PMMA je amorfní termoplast s teplotou skelného přechodu $106\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28]. Pod touto teplotou se materiál nachází ve sklovitém stavu, kdy je tvrdý, křehký a vykazuje vysoký modul pružnosti [29]. V okolí teploty zesklenní se vlastnosti PMMA skokově mění a materiál přechází do kaučukovitého stavu, v němž získává výraznou pružnost [29].

Pro úspěšné vytvarování plexisklového víka bylo proto nezbytné materiál ohřát nad teplotu skelného přechodu. Tím bylo zajištěno, že plexisklo při ohýbání získalo požadovanou tvárnost a nedošlo k praskání či vzniku trhlin. Po provedení ohýbání a dosažení tvarové stálosti byla teplota postupně snížena pod hranici skelného přechodu, čímž byl plastifikovaný rádius zafixován ve sklovité fázi a víko získalo konečnou pevnost i tuhost.

K ohřevu plexisklové tabule byly použity dvě horkovzdušné pistole s dostatečným výkonem k překonání teploty skelného přechodu PMMA. Vzhledem k tloušťce materiálu 13 mm byly pistole umístěny z obou stran místa ohybu, aby se teplo rovnoměrně rozložilo skrze celý průřez. Rovná tabule plexiskla byla připevněna ke svařenému tělu komory, jež fungovalo zároveň jako ohybové lůžko. Proces ohřívání trval přibližně 25 minut.

Mezi tělo komory a plexisklovou tabuli bylo vloženo na zakázku vyřezané pryžové těsnění přizpůsobené tvaru límce. Toto těsnění zajistilo přesnou polohu materiálu během ohýbání a definovalo výsledný rozměr rádiusu víka. Po dosažení stabilní teploty a plastického stavu PMMA bylo víko rovnoměrně ohnuto podle tvaru komory a poté pomalu ochlazeno pod teplotu zesklenní, aby bylo dosaženo optimální tuhosti a přesnosti zakřivení.



Obr. 50 Proces ohýbání PMMA víka.



Obr. 51 Vyrobené PMMA víko.

Okraje víka byly po hrubém řezu nejprve obroušeny brusným papírem se střední zrnitostí P320, aby byly odstraněny ostré hranice a větší nerovnosti. Následně byla zrnitost brusiva postupně snižována až k jemnému dokončovacímu leštění pomocí plstěného kotouče a speciální pasty. Tento postup zajistil hladký povrch a minimalizoval se vznik mikroskopických rýh, které by pod cyklickým namáháním podtlaku mohly iniciovat vznik trhlin.

3.2 Výroba licí komory

3.2.1 Výroba formy pro odlití betonové směsi

Po vytvoření CAD modelů formy byla vytvořena sestava pro kontrolu rozměrů, aby bylo ověřeno shodné usazení všech dílů (viz obr. 29). Následně byly jednotlivé díly převedeny do formátu STL a načteny do softwaru OrcaSlicer, který připraví vrstvená data pro 3D tisk v podobě G-kódu.

Jako tiskový materiál byl vybrán PETG (Polyethylene Terephthalate-Glycol). Ve srovnání s běžnějším materiálem PLA (Poly Lactic Acid) disponuje PETG vyšší teplotní odolností, je pružnější, méně křehký a velmi houževnatý, což jej předurčuje pro tisk mechanicky namáhaných částí. Nízká tepelná roztažnost PETG navíc minimalizuje deformace a kroutivost velkých modelů, a proto je ideální pro výrobu přesné formy. [30]

Pro tento účel byla využita 3D tiskárna Elegoo Neptune 4 Pro. V následující tabulce jsou uvedeny zásadní parametry o nastavení a průběhu tisku:

Tabulka 7 Nastavení tisku formy pro betonovou směs.

Výška vrstvy [mm]	Velikost trysky [mm]	Počet perimetrů [-]	Hustota výplně [%]	Teplota trysky [°C]	Nutnost podpor [-]	Doba tisku [hod]	Množství materiálu [g]
0,2	0,4	3	20	235	ne	19	626,5

Po vytištění všech částí formy byla zahájena série povrchových úprav, které zajistily snadné odformování a kvalitní konečný vzhled. V první fázi byly překryty nejhlubší vrstvené nerovnosti dvousložkovým tmelem, který vyplnil mezery mezi jednotlivými vrstvami. Po jeho vytvrzení a základním vybroušením se nanasla vrstva dvousložkového plniče aplikovaného lakovací pistolí, která přinesla jednotný podklad a vyrovnala zbývající mikrodefekty.

Následovalo mokré broušení, jež výrazně zvýšilo účinnost odstranění brusného odpadu, omezilo prašnost a urychlilo přípravu podkladu pro nátěr. Na takto připravený povrch byla následně nanasena základová barva v černé a červené metalíze, která plnila především estetickou funkci dílů. Dále byl doplněn kontrastní nápis pro popis formy.

Jako finální krycí vrstva byl aplikován dvousložkový průmyslový lak rovněž pomocí lakovací pistole. Tento vrchní nátěr vytvořil hladký a vysoce odolný film, který chrání formu před abrazivním opotřebením způsobeným betonovou směsí a chemickými vlivy provozního prostředí. Díky své mechanické i chemické odolnosti umožní lakovaná forma opakované použití bez nutnosti častých oprav či výměny, a tím prodlouží životnost výrobního nástroje.



a) zbroušený aplikovaný tmel

b) vrstva plniče před broušením

c) tvorba popisu formy

Obr. 52 Proces výroby formy pro betonovou směs.



a) vnitřní část pláště formy

b) vnější část pláště formy

c) kompletní forma

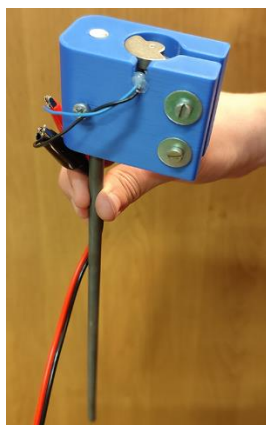
Obr. 53 Vyrobená forma pro betonovou směs.

3.2.2 Pilotní odlévání betonové směsi do formy

Po úplném vytvrzení vrchního laku, které trvalo několik dní, byla připravená forma pečlivě očištěna a ošetřena odbedňovacím olejem, jenž zaručil snadné vyjmutí odlitku. Následně došlo k přípravě materiálové kompozice. Do předem odměřeného množství vody dle doporučení byla vmíchána suchá směs Cemix Beton Profi B30 obsahující kamenivo frakce 4 mm. Díky této velikosti zrna byla zajištěna dobrá tekutost směsi a výsledná kvalita povrchu odlitku. Vše proběhlo strojním mícháním podle technologického listu výrobce tak, aby vznikla homogenní kašovitá směs.

Kompozice byla postupně nanášena do formy po malých objemech. Pro dokonalé vyplnění dutiny a eliminaci vzduchových kapes byl vyroben speciální vibrační přípravek sestávající z vibračního motorku, pevného tělesa a ocelové tyče o průměru 8 mm (viz obr. 54). Tyč byla horizontálně vedena skrz celou délku formy a vibrace se z motoru přenášely do betonové hmoty, aniž by zdroj vlhkosti přišel do přímého kontaktu s elektrickým motorem. Díky tomu bylo zajištěno rovnoměrné usazení zrna a dosažena vysoká hutnost odlitku.

Po úplném naplnění formy byla betonová hmota ponechána vytvrdit při ambientní teplotě po dobu několika dnů.



Obr. 54 Vibrační přípravek.

Po uplynutí doby potřebné k vytvrzení bylo přistoupeno k demontáži 3D tištěné formy. Odstranění vnějších dílů proběhlo bez komplikací, neboť lakované části a odbedňovací olej zajistily hladký rozpoj povrchů. Při vyjmutí vnitřního jádra však došlo k zablokování jeho polohy v odlitku. Kombinace použití separačního prostředku a technologického úkosu 15° nestačila zabránit zaklínění hmoty a jádro z odlitku nebylo možné vyjmout. Snahou o jeho uvolnění byla narušena integrita stěny odlitku, což vedlo ke vzniku podélné trhliny a poškození celé jeho části (viz obr. 55).

Tento neúspěch vyvolal potřebu přepracovat koncepci jádra. Pro další verzi bude pravděpodobně navrženo pružné jádro z elastomeru na bázi silikonu, které umožní snadné vyjmutí bez mechanického namáhání betonové stěny. V návaznosti na tuto změnu bude vytvořena nová sekundární forma, dimenzovaná pro odlití silikonového jádra, jež částečně zkopíruje původní geometrii. Vlivem pružných vlastností nového jádra bude technologický úkos odebrán.



Obr. 55 Neúspěšné odformování odlitku.

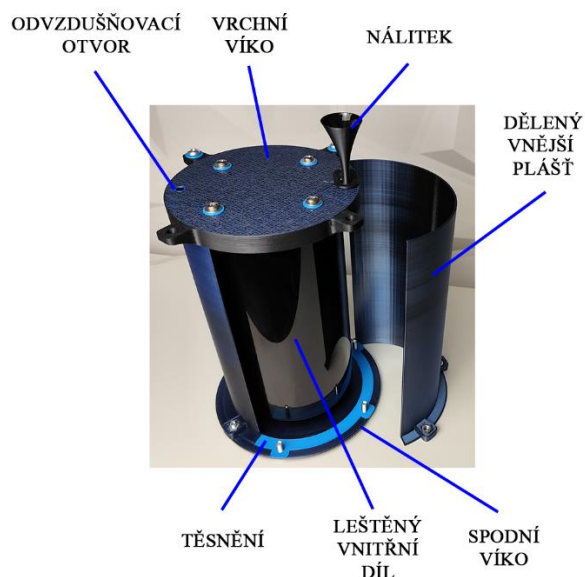
3.2.3 Vývoj pružného jádra

Pro přípravu pružného jádra byly navrženy a vyrobeny dvě oddělené 3D tištěné formy. To z důvodu, že vnější plášť formy je nutné mít ze dvou dělených dílů, jelikož u vnitřní plochy jednolitého válcového pláště by bylo nemožné dosažení požadované kvality povrchu metodou lakování. Toto dělení ovšem vytvoří viditelné švy, které by se přenesly na odlitek.

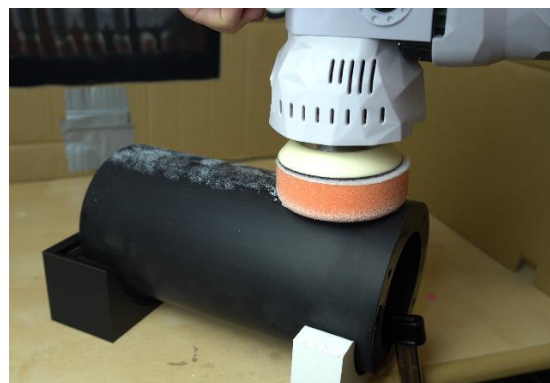
Z toho důvodu byl postup výroby rozdělen do dvou fází. V první fázi byl odlit první dílec z pružného materiálu, přičemž vzniklý šev se nacházel na vnějším povrchu odlitku (viz obr. 58) a vnitřní dutina zůstala díky leštěnému dílu této formy hladká a bez viditelných spojů (viz obr. 59). Tento dokonalý vnitřní povrch teď sloužil jako vnější plášť druhé formy. Díky pružným vlastnostem prvního odlitku mohl tento odlitek sloužit jako jednolitý vnější plášť. Jako odlévací materiál byl použit dvousložkový silikon, který se po smíchání složek vytvrdí do pevného silikonu. Tvrdost silikonu činila 40 Shore.

Ve druhé fázi byla odlita druhá forma s dokonale hladkým povrchem, sloužící jako finální jádro pro betonovou směs (viz obr. 62). Tentokrát byla použita polyuretanová licí pryskyřice, která svými vlastnostmi kombinuje výhody plastů a pryže. Vyniká vlastnostmi jako vysoká odolnost vůči mechanickému a dlouhodobému opotřebení a chemickou odolností při zachování

elasticity. Aby ovšem nevznikala deformace jádra pod tíhou betonové směsi při odlévání licí komory, byla vybrána značně vyšší tvrdost 70 Shore. Použitý produkt Gaform E70 zajišťuje tvarovou stálost i po vložení těžkých směsí a je velmi odolný vůči abrazi, ke které by při odlévání mohlo docházet. [31]



Obr. 56 První forma pružného jádra.



Obr. 57 Proces leštění vnitřního dílu.



Obr. 58 Odlitek první formy vnější část.



Obr. 59 Odlitek první formy vnitřní část.



Obr. 60 Druhá forma pružného jádra.



Obr. 61 Proces lití polyuretanového jádra.



Obr. 62 Výsledné polyuretanové jádro.

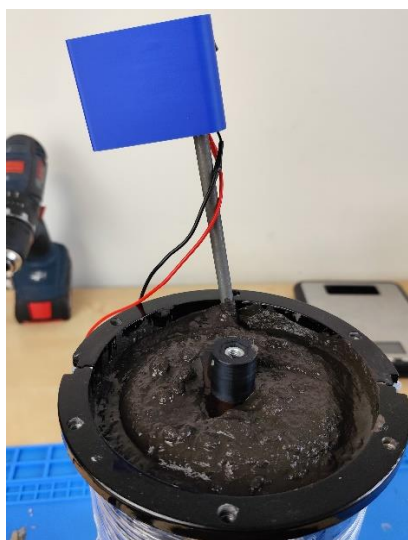
3.2.4 Opětovné odlévání betonové směsi do formy

Pro opakované odlévání licí komory byla připravena vlastní betonová směs složená z jemného kameniva (štěrk a písek) a portlandského cementu. Do této základní kompozice byla přidána superplastifikační přísada MasterGlenium 124, která umožnila snížení vodního faktoru bez ztráty zpracovatelnosti, tím byla dosažena homogenní a stabilní konzistence [32]. Pro zvýšení hutnosti a mikromechanické soudržnosti byly využity částice mikrosiliky, jejichž jemný práškový charakter vyplnil mezery mezi zrny cementu a vedl ke zpevnění struktury a snížení nasákavosti, tedy pórovitosti [33]. Pro estetické sjednocení odstínu byl do směsi zakomponován černý pigment.

Poměry jednotlivých složek byly laděny ve více iteracích, dokud nebyla zajištěna optimální rovnováha jednotlivých složek a výsledný odlitek se vyskytoval bez jakékoliv vady. Připravená směs byla následně strojně promíchána a vlivem vibračního přípravku rovnoměrně pokládána do formy, kde proběhlo vytvrzení za standardních podmínek před odformováním finálního tvaru licí komory.

Tabulka 8 Poměry složek směsi lící komory.

Iterace	Portlandský cement [g]	Štěrk frakce 4 mm [g]	Písek betonářský [g]	Plastifikátor [g]	Mikrosilika [g]	Pigment [g]	Voda [g]
1.	1000	500	1000	75	125	50	250
2.	1000	1000	2000	150	140	50	400
3.	1000	1000	2000	65	250	30	350



Obr. 63 Hutnění směsi.



Obr. 64 Pokus 1. iterace.



a) tělo komory



b) límec komory

Obr. 65 Lící komora

V prvním pokusu byla připravená betonová směs příliš křehká, a při aplikaci minimální mechanické síly došlo k vzniku trhlin a rozdělení odlitku. Tento výsledek poukázal na nedostatečnou soudržnost a nevhodné složení, které neumožňovalo dosažení požadované pevnosti a integrity struktury.

Na základě těchto zjištění byla receptura směsi upravena a po dvou dalších iteracích byl získán finální odlitek s homogenní strukturou a bez jediného defektu na povrchu. Tento třetí prototyp vykázal optimální rovnováhu mezi tekutostí, pevností a odolností, která umožnila vytvoření hladkého a přesného tvaru licí komory.

3.3 Výroba ostatních komponent

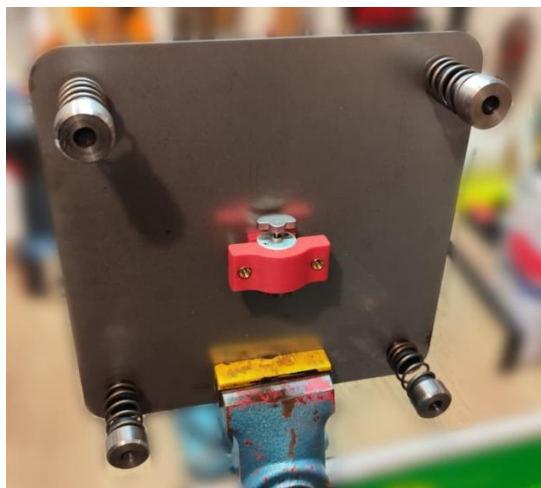
V této kapitole budou stručně popsány výrobní postupy u zbývajících klíčových dílů přístroje. Každá podkapitola se zaměří na stručný popis použité technologie, materiálu a základních kroků vedoucí k dosažení finální podoby konkrétní součásti.

3.3.1 Vibrační stolek

Pro uchycení stolku k tělu přípravné komory byly nejprve vyrobeny čtyři domky pro silentbloky (viz kapitola 2.3.3). Každý domek byl soustružen z oceli s označením 11 375, která zaručuje vynikající svařitelnost. Vnitřní průměr domku byl navržen s přesahem vůči silentbloku, aby byl vytvořen lisovaný spoj. Pro usnadnění vkládání elastomerového tělíska byl vnitřní prostor napuštěn organickým alkoholovým rozpouštědlem, které po usazení a upevnění spoje odpařením vytvořilo vazbu odolnou vibracím. Na každý domek byla nasazena tlačná válcová pružina, jež zajistila sevření gumového bloku, do něhož byl poté z druhé strany vsazen silentblok se závitovým otvorem pro montáž ke konstrukci.

Po výrobě všech čtyř tlumicích nožek byla zhotovena vibrační deska z plechu o tloušťce 2,5 mm. Deska byla na zakázku vypálena CNC plasmou tak, aby se minimalizoval odpad a nebylo nutné pořizovat celou tabuli tohoto formátu. Montážní otvory byly následně zahloubeny pomocí záhlubníku na stojanové vrtačce, aby bylo možné použít zápusťné šrouby.

Do spodní strany vibrační desky bylo upevněno 3D tištěné uchycení pro vibrační motorek. Po osazení motorku byly všechny díly smontovány na tlumicích nožkách pomocí zápusťných šroubů. Výsledná konstrukce umožnila efektivní přenos vibrací do uložené formy při zachování izolace rámu od velké části kmitů.



a) zadní pohled



b) přední pohled

Obr.66 Vibrační stolek

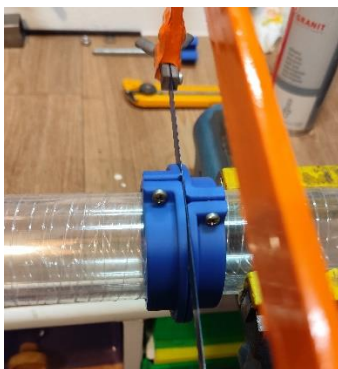
3.3.2 Filtrační systém

Výroba filtrační jednotky začala zhotovením těla ze silnostěnné trubky z materiálu PMMA. Z této trubky byl uříznut segment požadované délky. Aby bylo dosaženo přesného a kolmého řezu, byl navržen a vyroben speciální přípravek. Ten se upnul přímo na vnější plášť trubky

a sloužil jako vedení pro pilový plát ruční pily (viz obr. 2). Díky tomuto řešení bylo dosaženo konzistentního výsledku bez odchylek v řezu.

Vzhledem k tomu, že na řezané plochy budou následně dosedat těsnicí O-kroužky, bylo nutné dosáhnout vysoké kvality povrchu. Hrubý povrch po řezání by mohl způsobit netěsnosti nebo poškození těsnění. Z tohoto důvodu bylo provedeno postupné broušení pomocí brusných papírů různých zrnitostí v rozsahu P320 až P3000. Od zrnitosti P800 bylo přistoupeno k tzv. mokrému broušení, kdy se k ochlazení a odvodu obroušeného materiálu používala voda. Tento postup výrazně zlepšil kvalitu broušení a urychlil celý proces.

Po dosažení požadované kvality následovalo finální leštění. To bylo provedeno pomocí lešticího kotouče a jemné lešticí pasty, která odstranila mikrorýhy po broušení. Výsledkem byl opticky čirý a dokonale hladký povrch, který je pro správnou funkci těsnicích prvků zcela zásadní.



Obr. 67 Přípravek pro vedení pilového listu.

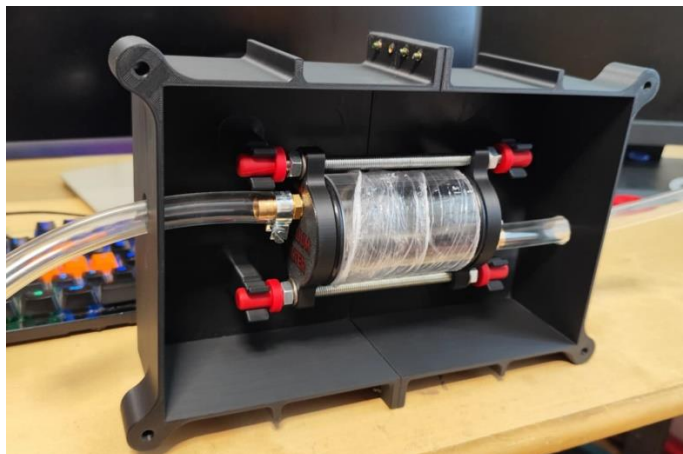
Vlastní víka filtrační jednotky, stejně jako box pro její uchycení, upevňovací čepičky a prototypová filtrační síta, byly vyrobeny pomocí technologie FDM. Tato metoda 3D tisku byla zvolena zejména pro její dostupnost, možnost rychlého prototypování a dobrou rozměrovou přesnost při tisku složitějších geometrií.

Do vík byly následně našroubovány hadicové koncovky, přičemž k utěsnění závitového spoje byla použita teflonová páska. Pro zajištění dokonalé těsnosti v oblasti výstupu hadice bylo navíc na dosedací plochu koncovky zasazeno pryžové těsnění, které slouží jako sekundární těsnicí prvek. V kombinaci s teflonovou páskou tak vzniká spolehlivý a odolný systém, minimalizující možnost netěsností.

Vzhledem k nedokonalé kruhovitosti vnitřního průměru trubky byla filtrační síta vyrobena s mírnou vůlí, která zohledňuje výrobní tolerance. Pro jejich dočasné uchycení byl použit sanitární silikon, který zajistí stabilní uložení komponent a zároveň umožní jejich snadné odstranění či výměnu. Tato konstrukční odchylka však bude v budoucím návrhu dále zohledněna a bude navrženo nové, přesnější řešení pro usazení filtračních segmentů.

Pro zajištění dodatečné těsnosti a ochranu vůči difuzi vzduchu byla na vnitřní plochy obou vík aplikována vrstva bezbarvého dvousložkového laku. Tento lak vytvořil souvislý a neporézní film, který uzavřel případné mikroskopické póry vzniklé při tisku a přispěl tak k celkové funkčnosti a spolehlivosti systému.

Celá filtrační sestava byla spojena a zajištěna pomocí dvou závitových tyčí procházejících víky. Tyče byly dotaženy pomocí podložek a šestihranných matic, což vytvořilo pevný a demontovatelný spoj celého systému.



Obr. 68 Vyrobený prototyp filtračního systému.

3.3.3 Rám přístroje

V průběhu výroby přípravné komory (viz kapitola 3.1) došlo k revizi původního konstrukčního návrhu rámu přístroje. Při výrobě se ukázalo, že ohýbání L profilů v požadovaných rádiusech je technologicky náročné, časově neefektivní a z ekonomického hlediska nevýhodné. Tento poznatek vedl k přepracování návrhového konceptu.

Namísto ohýbání byla zvolena alternativa, kdy byla prohnutá část profilu nahrazena 3D tištěným segmentem. Tento díl byl následně mechanicky připojen k rovným částem kovového profilu (viz obr. 69), tím bylo dosaženo požadovaného tvaru bez nutnosti složitého ohýbání. Tento způsob výroby přinesl nejen snazší zpracování, ale i možnost snadného opakování a případných úprav.

Takto připravené rohové dílce byly poté přivařeny do každého rohu spodní základové desky, která byla vyrobena na míru pomocí CNC plazmového řezání. Následně byly navařeny i zbývající části rámové konstrukce a vznikl kompletní a pevný základ pro uchycení všech dalších prvků přístroje.



Obr. 69 Nová konstrukce zakřivení.

3.3.4 Zakrytování

Plechý určené k zakrytování jednotlivých částí zařízení byly zhotoveny na zakázku pomocí CNC plazmového řezání. Tento způsob výroby byl zvolen vzhledem ke komplexnímu tvaru jednotlivých krycích dílů, který by při konvenčním dělení plechu nebylo možné s dostatečnou přesností a efektivitou dosáhnout.

Finální povrchová úprava přístroje, stejně jako kompletní montáž všech částí, bude provedena až v závěrečné fázi vývoje, a to z důvodu postupného doladování jednotlivých dílů v rámci prototypového zařízení. V této fázi je možné, že některé komponenty ještě projdou změnami tvaru, rozměrů nebo usazení, a předčasná povrchová úprava by mohla vést ke zbytečným nákladům a ztrátě materiálu. Odložení finální kompletace proto umožňuje flexibilní přístup k testování, úpravám a optimalizaci celého systému bez rizika poškození či nutnosti přepracování již upravených dílů.



Obr. 70 Připravené zakrytování přístroje.

4 TESTOVÁNÍ TĚSNOSTI PROTOTYPU

Po dokončení výroby prototypu zařízení byla provedena série funkčních zkoušek zaměřených na testování těsnosti klíčových komponent. Jelikož zařízení pracuje ve vakuu, je právě těsnost jedním z nejdůležitějších aspektů, které musí být experimentálně ověřeny. Netěsnosti mohou způsobovat nežádoucí přísávání vzduchu, které by snižovalo účinnost zařízení.

Získaná data z reálného testování byla porovnána s výsledky numerické analýzy provedené metodou konečných prvků (MKP). Cílem bylo ověřit, zda konstrukční návrh odpovídá reálnému chování systému při zatížení. Pro měření podtlaku byl použit ručičkový mechanický vakuometr, připojený přímo k vývěvě nebo ke komponentě pomocí standardizovaných hadicových koncovek. K zaznamenání průhybů byl zvolen ručičkový úchylkoměr s rozlišením 0,01 mm a maximálním zdvihem 20 mm, osazený v měřicím stojanu.

4.1 Testování přípravné komory

Přípravná komora byla testována jako první z hlediska těsnosti i konstrukční odolnosti. Testování probíhalo ve dvou fázích, před a po aplikaci povrchové úpravy svarových spojů. Již při prvním spuštění vakuové vývěvy bylo zjištěno, že pryžové těsnění mezi víkem a tělem komory vykazuje příliš vysokou tuhost. Víko nebylo schopné se samovolně přisát k tělu komory, čímž docházelo k výraznému narušení těsnosti. Aby bylo možné testování vůbec provést a vyloučit tuto chybu z hodnocení konstrukce samotné komory, byl mezi těsnění a límec těla aplikován silikon s cílem vytvořit dočasný těsný spoj.

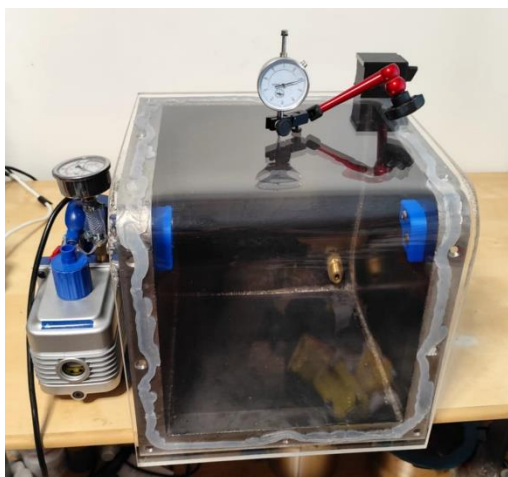
Do budoucna bude nezbytné tento nedostatek vyřešit volbou měkkějšího a tvarově přizpůsobivějšího těsnicího materiálu, případně upravit konstrukci víka a těla tak, aby bylo dosaženo automatického přisátí při spuštění vývěvy bez ztráty těsnosti.

V další fázi testování bylo sledováno dosažené vakuum v komoře a zároveň deformace těla a víka při tomto zatížení. Pro porovnání byla nejprve měřena schopnost samotné vývěvy, naměřená hodnota dosahovala – 0,95 bar. Při připojení komory a vakuometru bylo v první iteraci měřeno – 0,91 bar. Tato hodnota indikuje menší netěsnosti, nicméně je to stále velmi uspokojivý výsledek i s ohledem na to, že komora v té době neměla žádnou povrchovou úpravu.

Po aplikaci bezbarvého dvousložkového laku na všechny svarové spoje se podtlak v komoře vyrovnal s hodnotou vývěvy, tedy – 0,95 bar. Tento výsledek potvrzuje, že po opravě těsnění a úpravě svarových spojů bylo dosaženo plné těsnosti v souladu s návrhem.

Součástí testu byla i měření průhybů pomocí úchylkoměru. Měření probíhalo ve dvou kritických místech. Na středu PMMA víka a na největší rovinné ploše těla komory. Pro minimalizaci chyb způsobených stlačením silikonového těsnění bylo měření víka prováděno tak, že stojan úchylkoměru byl umístěn na víku, a to na samotném jeho okraji. Po dosažení podtlaku – 0,95 bar byl změřen průhyb víka ve středu 3,6 mm. Tato hodnota byla nižší než hodnota predikovaná při výpočtu pomocí MKP, což může být způsobeno mírně vyšším simulovaným podtlakem použitým v analýze z důvodu návrhové rezervy.

Naopak při měření těla komory byl zjištěn průhyb 2,6 mm, což bylo oproti předpokládaným 1,9 mm vyšší. Tento výsledek vyžaduje dodatečné přehodnocení konstrukční bezpečnosti a může indikovat možnost vzniku napětových koncentrací v oblasti svarů nebo nedostatečnou tuhost dané stěny. Po vypnutí vývěvy se hodnoty úchylkoměru vždy vrátily do výchozích pozic, což potvrzuje, že nedocházelo k trvalým plastickým deformacím a konstrukce odolala zatížení pouze elasticky.



Obr. 71 Testování průhybu víka.



Obr. 72 Testování průhybu těla komory.

4.2 Testování licí komory

U licí komory bylo testování zaměřeno výhradně na ověření těsnosti. S ohledem na použitý konstrukční materiál, tedy betonovou směs, nebylo prováděno měření deformací. Materiál tohoto typu vykazuje zcela odlišné mechanické vlastnosti než kovové nebo polymerní konstrukce. Jeho vysoká křehkost neumožňuje elastické průhyby. Při překročení mezní hodnoty napětí dojde spíše k náhlému a úplnému selhání než k postupné deformaci, a proto měření deformace nebylo považováno za relevantní.

Pro samotný test těsnosti byl po obvodu horní koruny komory aplikován silikonový tmel, který sloužil k provizornímu utěsnění víka během experimentu. Po jeho dostatečném vytvrzení byla na horní vstupní otvor komory usazena rovná deska fungující jako dočasné víko. K testu byl připojen třicestný ventil, který bude použit i v reálném provozu zařízení. Jeho začlenění do zkušebního okruhu umožnilo ověřit funkčnost celého propojení.

Po spuštění vývěvy bylo na vakuometru naměřeno - 0,94 bar, což je hodnota téměř shodná s maximálním podtlakem, kterého je samotná vývěva schopna dosáhnout (-0,95 bar). Tento výsledek lze považovat za velmi uspokojivý, neboť značí minimální ztráty podtlaku v rámci konstrukce komory i testovacího spoje. Během celého testu se neobjevily žádné známky poruchy, mikropřasklin ani degradace materiálu, což potvrzuje dostatečnou pevnost konstrukce.

Přestože výsledek lze z hlediska těsnosti považovat za dostatečný, bude v rámci následujících vývojových iterací zvažena aplikace dodatečné povrchové úpravy vnějších stěn licí komory. Cílem je zajistit dlouhodobou stabilitu a spolehlivost při opakovaném provozu, a to především s ohledem na možné mikroskopické defekty v porézním povrchu betonového materiálu, které by mohly při opakovaném zatížení vést k degradaci těsnosti.



Obr. 73 Testování licí komory.

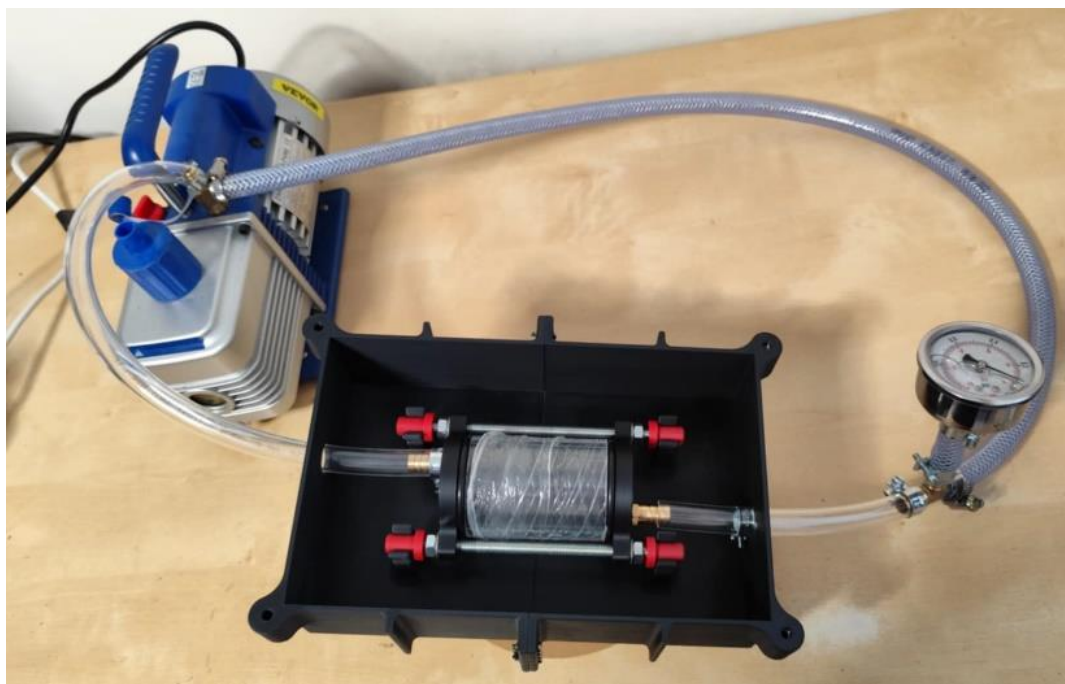
4.3 Testování filtračního systému

Testování filtrační jednotky bylo zaměřeno výhradně na ověření její těsnosti. Cílem testu bylo ověřit kvalitu těsnění jednotlivých spojů a komponent, především s ohledem na kombinaci materiálů a technologii výroby, která zahrnovala FDM tisk, těsnící prvky a ručně opracované styčné plochy.

Pro usnadnění testování byly oba konce filtračního těla připojeny k vakuové vývěvě. Toto řešení umožnilo simultánní zatížení celého systému podtlakem bez nutnosti dočasného utěšňování jednoho z vývodů. Připojení bylo provedeno pomocí standardizovaných hadicových spojek, jejichž těsnost byla zajištěna kombinací teflonové pásky a pryžových těsnění integrovaných ve víkách jednotky.

Po aktivaci vývěvy bylo opět použito mechanického ručičkového vakuometru pro zjištění dosaženého podtlaku. Naměřená hodnota činila $-0,95$ bar, což odpovídá maximálnímu provoznímu podtlaku dosažitelnému použitou vývěvou. Tento výsledek potvrzuje, že sestava neobsahuje žádné podstatné netěsnosti, a že všechny spoje a styčné plochy byly vyhotoveny s dostatečnou přesností a kvalitou.

Navzdory pozitivnímu výsledku bude v následujících vývojových krocích opět zvažováno dodatečné zatěsnění některých segmentů, zejména těch, které byly v současném prototypu osazeny pomocí sanitárního silikonu. Tento způsob uchycení byl volen jako provizorní a umožnil pružné doladění geometrických nepřesností. Pro sériové řešení se však předpokládá robustnější a opakovatelné konstrukční řešení, které bude odolnější vůči opotřebení a provozním podmínkám.



Obr. 74 Testování filtračního systému.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a konstrukcí funkčního prototypu přístroje pro přesné vakuové lití šperků metodou ztraceného vosku s důrazem na ekonomičnost a technologickou spolehlivost, primárně pro menší podnikatele a hobby sféru. Byl navržen dvoukomorový systém bez asistence přetlaku inertního plynu, zahrnující přípravnou a licí komoru, rotační lamelovou vakuovou vývěvu pro vytvoření potřebného podtlaku, třicestný ventil pro řízení vakua a vakuometr pro vizuální kontrolu.

V rámci návrhu přípravné komory, určené pro odvzdušnění vsázky, byla zvolena svařovaná ocelová konstrukce zesílená L-profilů a víko z tvarovaného plexiskla. Pro ověření mechanické pevnosti a deformačních charakteristik byla provedena numerická analýza metodou konečných prvků. Iterativní simulace prokázaly, že pro dosažení provozní bezpečnosti pod mezí kluzu materiálu S235JR a přijatelných průhybů je nutné použít ocelový plech tloušťky 3 mm pro tělo komory a 13 mm tlusté plexisklo PMMA pro víko. Kritická místa napětí u montážních otvorů v původním návrhu těla a víka, kde maximální napětí dosahovalo 626 MPa, vedla k jejich eliminaci a implementaci alternativních spojovacích řešení. V konečném modelu těla dosáhlo maximální napětí 188,7 MPa při průhybu 1,9 mm, u víka s odstraněnými otvory a tloušťkou 13 mm kleslo maximální napětí na 16,8 MPa při průhybu 4,6 mm. Součástí přípravné komory byl navržen vibrační stolek s vylepšeným tlumícím systémem, využívajícím kombinaci silentbloků a pružin.

Konstrukce licí komory, sloužící pro samotné lití kovu, byla navržena s ohledem na minimalizaci výrobních nákladů a materiálového odpadu. Namísto svařované kovové konstrukce bylo rozhodnuto o odlití těla komory z betonové směsi do speciálně navržené FDM 3D tištěné formy. Pro zajištění požadované pevnosti a minimalizace pórovitosti betonového odlitku byla vyvinuta vlastní receptura směsi s použitím superplastifikační přísady MasterGlenium 124 a mikrosiliky. Pilotní odlévání odhalilo problém s vyjímáním rigidního vnitřního jádra formy, což si vyžádalo vývoj pružného jádra z polyuretanové pryskyřice s vyšší tvrdostí (70 Shore) pro zachování tvarové stálosti, které bylo vyrobeno pomocí dvoufázového odlévacího procesu s využitím 3D tištěných forem. Licí komora je kotvena k rámu přístroje pomocí konzoly ve spodní části a šroubového spojení s přírubou na předním panelu v horní části, přičemž těsnost je zajištěna pryžovými těsněními.

Rám přístroje, tvořící základnu pro montáž všech komponent, byl revidován během výroby, kdy technologicky náročné ohýbání L-profilů nahradila kombinace přímých profilů a 3D tištěných segmentů. Základna rámu byla vyrobena z ocelového plechu o tloušťce 3 mm pomocí CNC plazmového řezání. Zakrytování přístroje z tenčího ocelového plechu (1 mm) bylo rovněž vyrobeno pomocí CNC plazmového řezání. Pro ochranu vakuové vývěvy byl integrován filtrační systém s tělem z tlustostěnné PMMA trubky a více stupni filtrace (sítě s oky 0,25 mm a 49 μ m, pórový molitan), jehož víka a nosiče filtračních sít byly vyrobeny 3D tiskem a mechanickým opracováním.

Experimentální testování těsnosti vyrobeného prototypu potvrdilo funkčnost navržených řešení. U přípravné komory bylo po aplikaci bezbarvého dvousložkového laku na svarové spoje dosaženo podtlaku -0,95 bar, což odpovídá maximální kapacitě použité vývěvy. Měření průhybu víka komory ukázalo hodnotu 3,6 mm při podtlaku -0,95 bar, zatímco průhyb těla komory činil 2,6 mm. U licí komory test těsnosti prokázal dosažení podtlaku -0,94 bar, což svědčí o minimálních netěsnostech betonové konstrukce i testovacího spoje. Filtrační systém při testu dosáhl podtlaku -0,95 bar, což potvrzuje jeho těsnost.

V průběhu vývoje prototypu se rovněž objevily nedostatky, které bude nutné v dalším návrhu zohlednit a dále rozpracovat. Nejzásadnějším problémem bylo nevhodně zvolené těsnění mezi víkem a tělem přípravné komory, které svou tuhostí neumožnilo samovolné přisátí víka při vytvoření podtlaku. Toto provizorně vyřešilo použití silikonového tmelu, nicméně do budoucna

bude nutné zvolit alternativní konstrukční řešení s měkčím a lépe deformovatelným těsnicím prvkem. Dále bylo zjištěno, že skutečný průhyb těla komory je vyšší než hodnoty predikované numerickou simulací, což poukazuje na potřebu revize simulace a modelu. V případě potřeby provést zesílení konstrukčních prvků. Tento prototyp je zatím ve vývojové fázi a je třeba dalšího testování pro dosažení dlouhodobé pevnosti a stability. Dílčí rezervy jsou rovněž v návrhu filtračních segmentů, jejichž usazení bylo prozatím řešeno pomocí silikonového tmelu kvůli výrobní odchylce v trubkovém těle.

Základní funkčnost a spolehlivost navrženého zařízení pro vakuové lití šperků byly experimentálně ověřeny, přičemž získané poznatky poskytují cenné podklady pro případné další vývojové iterace a optimalizaci jednotlivých komponent z hlediska výrobní technologie a provozní spolehlivosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Objevování světa odlévání: 10 typů metod odlévání*. Online. Easiahome. 2022. Dostupné z: https://www.easiahome.com/cs/different-types-of-casting/#elementor-toc_heading-anchor-0. [cit. 2025-03-22].
- [2] EDWARDS, Keith. *Lost wax casting of jewelry*. Mills & Boon, 1974. ISBN 0809283328.
- [3] MARTA, James Matthew. *Lost-Wax Casting in Contemporary Jewelry*. Thesis. Washington: Central Washington University, 1963.
- [4] *Technologie odstředivého lití TekCast*. Online. Slevarnazinku.cz. Dostupné z: <https://www.slevarnazinku.cz/technologie-odstrediveho-liti-tekcast/>. [cit. 2025-03-22].
- [5] *Centrifugal Casting Machine Overview, Pro's and Con's*. Online. Youtube.com. 2019. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=58psqQQz7rc&ab_channel=ClearMindJewellery%F0%9F%87%A8%F0%9F%87%A6. [cit. 2025-03-22].
- [6] CHAMBERLAIN, Marcia. *Metal Jewellery Techniques*. Watson Guptill, 1976. ISBN 0273001264.
- [7] PACK, Greta. *Jewelry Making by the Lost Wax Process*. Van Nostrand Reinhold, 1975. ISBN 0442251769.
- [8] *Vacuum Investment and Casting Machine 6L,LK-CM05*. Online. Lakimitools.com. Dostupné z: <https://www.lakimitools.com/products/casting-lk-cm05>. [cit. 2025-03-25].
- [9] *Goldsmith G Series Innovation in metallurgical casting*. Online. Galloni-aseg.com. Dostupné z: <https://www.galloni-aseg.com/en/goldsmith/products/g-series>. [cit. 2025-03-25].
- [10] *Induction Vacuum Pressure Casting machine | G series [ENGLISH]*. Online. Youtube.com. 2021. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=NxheJNbbhw&ab_channel=ASEGalloniSrl. [cit. 2025-03-25].
- [11] *K2NEXT – Vacuum Pressure Casting machine*. Online. Yasui.co.jp. Dostupné z: <https://yasui.co.jp/en/500-2/product-casting-machines/487-2>. [cit. 2025-03-26].
- [12] *Co jsou vývěvy?* Online. Průmyslové vakuum. Dostupné z: <https://www.prumyslove-vakuum.cz/co-jsou-vyvevy/>. [cit. 2025-05-15].
- [13] *Rotační lamelové vývěvy a kompresory*. Online. Busch Vacuum Solution. Dostupné z: <https://www.buschvacuum.com/cz/cs/products/vacuum-pumps/rotary-vane/rotary-vane-technology/#faq>. [cit. 2025-05-15].
- [14] *Vývěvy lamelové olejové*. Online. Ynna. Dostupné z: <https://www.ynna.cz/becker-20-40-m3-h>. [cit. 2025-05-15].
- [15] Pemanfaatan Mesin Vacuum Casting Semi Otomatis untuk Kebutuhan Pembuatan Produk Perhiasan. *Jurnal Teknik Mesin*. 2023, roč. 2023, č. 20, s. 7. ISSN 1410-9867.
- [16] *Metoda konečných prvků*. Online. SVS FEM. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/metoda-konecnych-prvku>. [cit. 2025-05-16].
- [17] *Finite Element Method neboli FEM: Jak funguje a proč je tak důležitá v technických aplikacích?* Online. SVS FEM. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/finite-element-method-neboli-fem-jak-funguje-proc-je-tak-dulezita-v-technickyh-aplikacich>. [cit. 2025-05-16].

- [18] *Ocelový plech S235JR*. Online. Gnee steel. Dostupné z: <https://www.gneesteel.com/cs/products/steel-plate/carbon-steel/s235jr-steel-plate.html>. [cit. 2025-05-17].
- [19] *Co je polymethylmethakrylát?* Online. Koplast. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/co-je-polymethylmethakrylat-pmma/>. [cit. 2025-05-17].
- [20] *Utahovací momenty šroubů*. Online. In: Bossard. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/cz/f-047-cz.pdf>. [cit. 2025-05-17].
- [21] *Proces analýzy*. Online. MySolidWorks. Dostupné z: <https://my.solidworks.com/training/master/290/proces-analzy>. [cit. 2025-05-17].
- [22] *SOLIDWORKS: Making Sense of Simulation Meshing- Part 3*. Online. Computer Aided Technology. 2017. Dostupné z: https://www.cati.com/blog/making-sense-simulation-meshing-part-3/?utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-05-17].
- [23] HALAMA, Radim. *Pružnost a pevnost- interaktivní studijní materiál*. Online. In: Mi21.vsb.cz. 2011. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_pevnost_obraz.pdf. [cit. 2025-05-18].
- [24] *3D tisk a aditivní výroba FDM*. Online. MCAE. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/technologie/fdm/>. [cit. 2025-05-19].
- [25] *Závitové vložky*. Online. Prusa3d. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/zavitove-vlozky-m6-standard-20-kusu/>. [cit. 2025-05-19].
- [26] *Metoda svařování MIG/MAG*. Online. Schinkmann. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>. [cit. 2025-05-21].
- [27] *Co je vlastně... svařování MIG/MAG?* Online. Perfect Welding Blog. 2020. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/>. [cit. 2025-05-21].
- [28] *Polymethylmetakrylát (PMMA) – PLEXISKLO*. Online. Koplast. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>. [cit. 2025-05-21].
- [29] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Online. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=180-polymery>. [cit. 2025-05-21].
- [30] *Prusament PETG*. Online. Prusament. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>. [cit. 2025-05-22].
- [31] *GAFORM E70*. Online. Levnětmely. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/gaform-e70--bal--1-kg--0-6-kg-slozky-a-0-4-kg-slozky-b/>. [cit. 2025-05-22].
- [32] *Superplastifikační přísada MasterGlenium 124*. Online. Cementum. Dostupné z: <https://www.cementum.shop/superplastifikacni-prisada-masterglenium-124/>. [cit. 2025-05-22].
- [33] *Mikrosilika do betonu*. Online. Cementum. Dostupné z: <https://www.cementum.shop/mikrosilika-do-betonu/>. [cit. 2025-05-22].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
E	Modul pružnosti	[MPa]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnost v tahu	[MPa]
μ	Poissonův poměr	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
MKP	Metoda konečných prvků
CAD	Computer Aided Design
PMMA	Polymethylmethakrylát
FDM	Fused Deposition Modeling
CNC	Computer Numerical Control
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
MMA	Manual Metal Arc
STL	STereoLithography
PETG	Polyethylene Terephthalate-Glycol
PLA	Poly Lactic Acid