



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE EXPERIMENTÁLNÍ KOMORY PRO MULTI-MATERIÁLOVOU ADITIVNÍ VÝROBU

DESIGN OF EXPERIMENTAL CHAMBER FOR MULTI-MATERIAL ADDITIVE MANUFACTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Jeleček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Petr Jeleček**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

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

Konstrukce experimentální komory pro multi–materiálovou aditivní výrobu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro 3D tisk kovových materiálů je v současné době nejvíce rozšířená technologie laserové fúze kovových prášků (Laser Powder Bed Fusion), která však nativně využívá pouze jeden práškový materiál. 3D tisk komponent kombinující více materiálů je zatím omezen použitím speciálních multi–materiálových nanášeců jejichž implementace do komerčně dostupných tiskáren je velmi omezena. Pro studium zpracování multi–materiálových dílů je tedy vhodnější vytvořit laboratorní komoru umožňující integraci různých způsobů nanášení a pokročilé senzorky.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: MŠMT

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je vyvinout experimentální komoru pro multi–materiálovou aditivní výrobu umožňující integraci různých způsobů nanášení a podpůrných systémů.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat možné varianty rešerší existujících experimentálních komor pro LPBF,
- navrhnout koncepční řešení experimentální komory umožňující integraci dostupných pohonů,
- navrhnout řešení specifické pro tisk s multi–materiálovým nanášečem,
- zpracovat detailní konstrukční návrh s využitím dostupných komponent (redukční rámeček, nanášec, filtrační systém, dmychadlo...),
- realizovat a ověřit funkci klíčových komponent komory.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, vybrané podsestavy, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GIRNTH, S.; KOOPMANN, J.; KLAWITTER, G.; WALDT, N. a NIENDORF, T. 3D hybrid-material processing in selective laser melting: implementation of a selective coating system. Progress in Additive Manufacturing [online]. 2019, 4(4), 399–409. ISSN 2363-9512. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00082-w>.

SCHNECK, M.; HORN, M.; SCHMITT, M.; SEIDEL, C.; SCHLICK, G. a REINHART, G. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential. Progress in Additive Manufacturing [online]. 2021, 6(4), 881–894. ISSN 2363-9512. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00205-2>.

ANWAR, A. B. a PHAM, Q. C. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. Additive Manufacturing [online]. 2018, 22, 86–97. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.036>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je návrh experimentální komory pro multi-materiálovou aditivní výrobu součástí z kovových materiálů technologií LPBF. Experimentální zařízení má sloužit jako modulární platforma pro vývoj a testování subsystémů, které nelze efektivně integrovat do běžných zařízení. Hlavní důraz je kladen na možnost implementace multi-materiálového nanášecího systému, kompatibilních tiskových platforem a okruhu vedení inertní atmosféry. Návrh komory byl zpracován na základě řešení současných experimentálních zařízení na principu LPBF, ze které byly stanoveny hlavní konstrukční požadavky.

Výsledkem práce je konstrukční návrh experimentální komory modulární konstrukce se zvětšeným pracovním prostorem a oboustranným přístupem. Součástí řešení jsou také modulární distributory inertního plynu, jejichž orientace a funkční potenciál byly ověřeny numerickými simulacemi. Kritické části návrhu byly fyzicky realizovány a během montáže byla ověřena sestavitelnost vyrobených součástí i základní funkce těsnicích prvků. Navržené zařízení proto tvoří základ pro další vývoj a testování experimentálních subsystémů LPBF nejen v oblasti multi-materiálové aditivní výroby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Komora, LPBF, konstrukce, experimentální, multi-materiál, inertní atmosféra, nanášecí systém

ABSTRACT

The subject of this master's thesis is to create a structural design of an experimental chamber intended for multi-material additive manufacturing of metallic components using LPBF technology. The proposed device is intended to be used as a modular platform for the development and testing of subsystems that cannot be effectively integrated into conventional machines. The main emphasis is placed on enabling the implementation of a newly designed multi-material powder deposition system, compatible build platforms, and an inert gas circulation circuit. The chamber design was based on a review of current experimental LPBF systems. The main design requirements were defined based on the findings.

The outcome of the thesis is the final design of an experimental chamber with a modular structure, an enlarged working space and access from both sides. The proposed solution also includes modular inert gas distributors, whose orientation and functional potential were verified using numerical simulations. Critical sections of the design were manufactured and during assembly, the proper fit of the manufactured components and the basic function of the sealing elements were verified. The experimental chamber therefore forms a basis for future development and testing of experimental LPBF subsystems, not only in the field of multi-material additive manufacturing.

KEYWORDS

Chamber, LPBF, design, experimental, multi-material, inert atmosphere, powder deposition systems

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JELEČEK, Petr. *Konstrukce komory pro multi-materiálovou aditivní výrobu* [online]. Brno, 2026 Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/174184>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D. [cit. 2024-05-22]

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce, doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D., za ochotnu a odborné rady v celém průběhu zpracovávání diplomové práce. Dále chci poděkovat své rodině a přátelům za jejich neustálou podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

Při zpracování textové části práce byly využity nástroje generativní umělé inteligence, konkrétně jazykový model *ChatGPT*, založený na architektuře *GPT-5.5 Thinking*. A to výhradně za účelem jazykové korektury a stylistických úprav. Odborný obsah práce, konstrukční řešení, výpočty, výsledky a závěry byly vytvořeny autorem práce.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Technologie LPBF	14
2.1.1	Konstrukční uzly tiskové komory technologie LPBF	15
2.1.2	Současná dostupná zařízení	19
2.1.3	Multi-materiálová výroba technologií LPBF	26
2.1.4	Konstrukční úpravy zařízení	28
2.2	Jevy vznikající při procesu výroby technologií LPBF	32
2.2.1	Tavná lázeň	32
2.2.2	Tisková platforma	34
2.2.3	Proudící inertní atmosféra v pracovním prostoru	35
2.3	Pokročilé pozorování výrobního procesu LPBF	45
2.3.1	Základní typy pozorovacích aparátů	46
2.3.2	Vizualizace proudění inertní atmosféry	48
2.3.3	Integrace pozorovací techniky	50
2.4	Shrnutí současného stavu poznání	52
2.5	Identifikace novosti a příležitostí	53
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	54
3.1	Vymezení problému	54
3.2	Cíl práce	56
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	57
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	57
4.2	Technická funkční analýza	59
4.3	Návrh alternativních řešení	61
4.4	Analýza řešení a výběr	65
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	66
5.1	Definice tvaru, rozměrů a materiálů komory	66
5.1.1	Definice tvaru	66
5.1.2	Definice rozměrů	69
5.1.3	Definice průchozích otvorů	78
5.1.4	Definice materiálů prvků komory	89

5.2	Okruh rozvodu inertní atmosféry	90
5.2.1	Návrh distributorů	97
6	DETAILNÍ NÁVRH	111
6.1	Konstrukční návrh	111
6.1.1	Komora	112
6.1.2	Koncepce mechanismu tiskové platformy	116
6.1.3	Koncepce uspořádání pozorovací soustavy	117
6.1.4	Rám	118
6.1.5	Systém dopravy inertní atmosféry	119
6.2	Cenová rozvaha	128
6.3	Realizace	129
6.3.1	První test těsnosti	130
7	ZÁVĚR	132
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	133
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	140
9.1	Použité zkratky	140
9.2	Použité veličiny	141
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	142
11	SEZNAM TABULEK	148
12	SEZNAM PŘÍLOH	149

1 ÚVOD

Aditivní výroba součástí technologií Laser Powder Bed Fusion vykazuje stálý rozvoj postupné rozšiřování možností samotných zařízení i spektra zpracovatelných materiálů. S vývojem technologie roste i zájem o výrobu z více druhů materiálů v rámci jedné součásti. Tímto způsobem lze kombinovat pozitivní vlastnosti jednotlivých materiálů a umožnit zcela nové konstrukční přístupy. Tento přístup však přináší vyšší nároky na stavbu zařízení a řízení výrobního procesu.

Jedním z hlavních omezení technologie je nízká modularita dostupných zařízení. Běžné průmyslové tiskárny jsou navrženy zejména pro stabilní výrobu z jednoho materiálu ve formě prášku, proto je nelze snadno modifikovat pro potřeby subsystémů, určených pro umožnění multi-materiálové výroby. Problematická je zejména samotná fyzická integrace vyvíjených systémů. V pracovním prostoru stávajících zařízení je jen omezený zástavbový prostor, který je v průmyslových zařízení minimalizovaný z hlediska efektivity a hospodaření s inertními plyny.

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně disponuje zařízením SLM280 HL, které je využíváno jak pro běžnou výrobu, tak pro vývoj nových subsystémů. Potřebná úprava zařízení pro potřeby multi-materiálové výroby by byla však provozně riziková. Z toho důvodu vzniká potřeba tvorby samostatné experimentální platformy a pracoviště, která bude vycházet z principů zařízení technologie LPBF, ale zároveň poskytne vyšší volnost subsystémů v návrhových i testovacích fázích.

Experimentální komora by měla umožňovat tvorbu stabilní ochranné inertní atmosféry napříč vnitřním pracovním prostorem, integraci dostupných tiskových platform, nanášecích mechanismů a systému dopravy inertní atmosféry. Zároveň by měla být dostatečně modulární pro usnadnění sestavení, v případě potřeby i zjednodušené demontáže bez zásahů do hlavních konstrukčních celků. Z toho důvodu musí obsahovat i dostatečný počet mechanický rozhraní, například pro implementaci pozorovací techniky, senzoriky, či doprovodných prvků.

Hlavním cílem této diplomové práce je proto navrhnout konstrukční řešení experimentální komory pro multi-materiálovou aditivní výrobu, která bude sloužit jako základní platforma dalšího rozvoje zařízení v laboratorních podmínkách.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

První obsáhlá kapitola této závěrečné práce má za úkol představit problematiku a důležité informace pro následný návrh experimentální komory na principu aditivní technologie LPBF.

2.1 Technologie LPBF

Zařízení pro aditivní výrobu je možno dělit podle několika kritérií. Jedním z nejširších je členění podle zpracovávaného materiálu, například na zařízení určená pro zpracování kovů, polymerů, keramiky a kompozitů, případně podle formy vstupního materiálu, například prášek, drát nebo pryskyřice. Vzhledem k zaměření této práce je však podstatná pouze oblast aditivní výroby kovových materiálů ve formě prášku, konkrétně technologie LPBF.

Dále je nezbytné představit a definovat základní principy a prvky technologie LPBF (Laser Powder Bed Fusion), taktéž nazývané SLM (Selective Laser Melting), aby bylo možné pochopit souvislosti mezi jednotlivými sledovanými jevy a konstrukčními prvky konstruovaného zařízení. Technologie LPBF využívá postupného tavení kovového prášku, po jednotlivých vrstvách, pomocí vysoce výkonného laseru. Zařízení LPBF obsahují značné množství subsystémů, které mají zásadní vliv na průběh i výslednou kvalitu vyráběného produktu.

Z hlediska následného konstrukčního návrhu lze zařízení technologie LPBF rozdělit na několik vzájemně doplňujících se subsystémů. Mezi nejdůležitější patří:

- **energetický modul**, obsahující generátor laserového paprsku a ovládací prvky pozice dopadu na tiskovou platformu,
- **nanášec prášku** a jeho vedení,
- **práškové lóže**, součást **tiskové platformy**, včetně vertikálně pohyblivé podstavy,
- **zásobníky prášku** a mechanismy jeho dávkování a odklizení,
- **systém řízení a rozvodu inertní atmosféry**,
- **osvětlení a doprovodné systémy** pro pozorování a ovládání výrobního procesu.

Princip technologie umožňuje výrobu geometricky komplexních dílů s vysokou přesností, je však omezen nutností užití podpor, které mají mimo jiné podíl na odvodu tepla a minimalizaci vnitřních pnutí a smršťování tisknutých součástí. Stěžením jsou i náročné dokončovací operace, protože součásti nelze z tiskové podložky jednoduše odloupnout, ale musí být mechanicky odstraněny. Co se pracovního prostředí týče, to též není uživatelsky

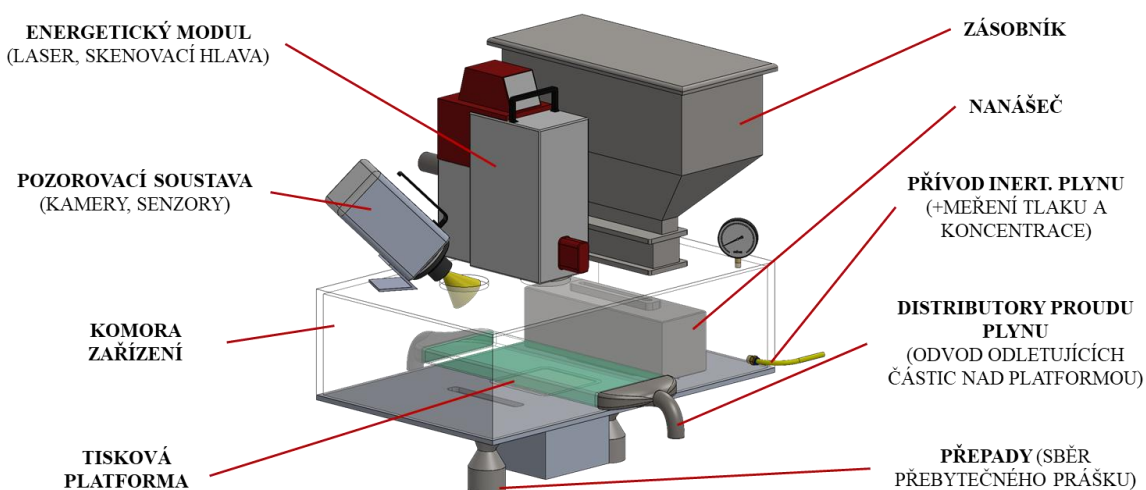
nejpříjemnější, při manipulaci s výtisky a kovovými prášky samotnými je nutné používat ochranné pomůcky, aby se minimalizoval fyzický kontakt s částicemi.

Díky možnosti vytvářet geometricky rozmanité součásti, z tradičně obtížně zpracovatelných slitin, mají technologie, zpracovávající materiál ve formě prášku, tendenci vést k vyšším nákladům na výrobu jednotek součástí [1]. Způsoby, kterými lze částečně výrobní náklady optimalizovat, jsou například masová výroba, či minimalizace vzniku defektů a zmetků.

2.1.1 Konstrukční uzly tiskové komory technologie LPBF

Pod pojmem „tisková komora“ je označován ochranný a zároveň funkční pracovní prostor, ve kterém musí být zajištěny stálé, přesně nastavitelné a komplexně monitorované provozní podmínky. Zároveň slouží jako nosný celek, který vzájemně ustavuje hlavní subsystémy zařízení. Vzájemná poloha energetické soustavy, tiskové platformy, nanášecího prvku a zásobníku musí být navržena takovým způsobem, aby nedocházelo k vzájemnému negativnímu ovlivnění a například i omezení pohybu. Cílem je dosáhnout v pracovním prostoru stabilních termodynamických podmínek, homogenního ochranného proudu nad tiskovou platformou a současně možnost vizualizace procesu a dostatečný prostor pro pohyb pracovních modulů.

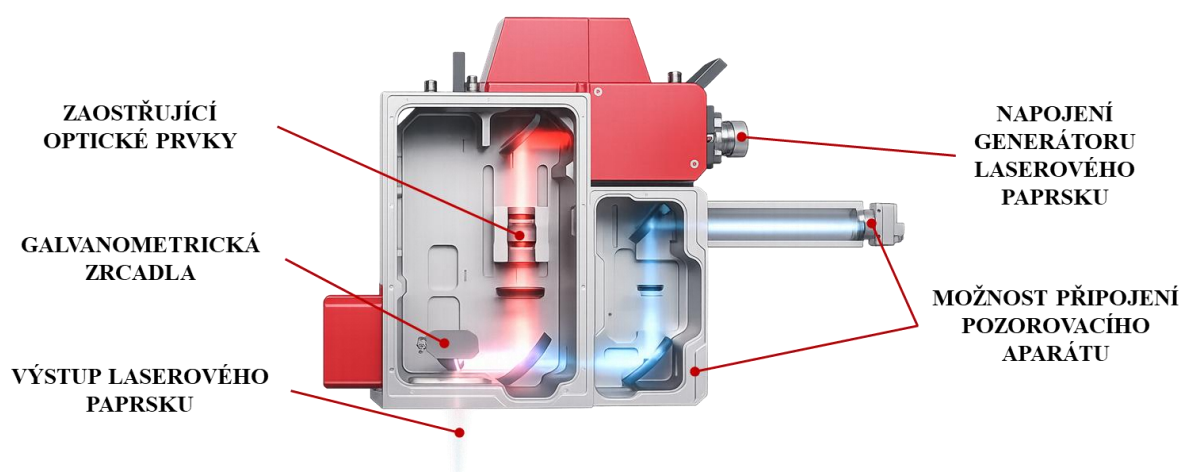
Zmíněné subsystémy nelze posuzovat samostatně, protože i malá změna provedení prvku může ovlivnit funkci zbylých. Na začátek je tak důležité získat povědomí o struktuře hlavních konstrukčních uzlů běžné tiskové komory technologie LPBF a vymezit základní funkce. Získaný přehled následně poslouží jako podklad pro definici konstrukčních požadavků pro navrhovanou experimentální komoru, která bude navíc muset splňovat požadavky integrace i nově vyvíjených a pokročilejších subsystémů než které lze vidat v základní konfiguraci.



Obrázek 2-1 Zjednodušené zobrazení hlavních prvků tiskové komory LPBF

Energetický modul představuje nejkomplexnější systém zařízení, který slouží k převodu energie laserového paprsku v lokální natavení prášku v přesně určeném bodě, či po definované trajektorii na pracovní ploše. Nejedná se pouze o generátor laserového svazku, ale i o navazující optický celek, který obsahuje skenovací hlavu a ochranné průhledové prvky oddělující optiku od pracovního prostoru komory [2][3]. V experimentálních i komerčních zařízeních je výstup tohoto subsystému obvykle umístěn přímo nad komorou, v ose středu tiskové platformy. Nejdůležitější funkcí, kterou musí energetický modul splňovat, je schopnost rychlé aretace pozice dopadu laserového svazku po celé výrobní oblasti, při zachování přijatelné velikosti stopy a stability zaostření [2][3].

V dostupných publikacích jsou uváděny především ytterbiové vláknové generátory laserového svazku s vlnovou délkou mezi 1060 a 1070 nm [5]. U různých výrobců a modelů zařízení se objevují jak kontinuální zdroje, například IPG YLR-400AC s výkonem 400 W, IPG YLR-500-WC-SM s výkonem 500 W, tak i zdroje schopné pulzního režimu, například IPG YLR-150/750-QCW-AC s maximálním výkonem 250 W [2],[4],[5]. Důležitou informací je, že volba zdroje neurčuje jen maximální energetický vstup, ale i způsob řízení procesu, možnou velikost tavné lázně a nároky na optiku a pozici modulu v prostoru. Ve většině popisovaných soustav se výsledný průměr laserové stopy na pracovní rovině rovná přibližně 100 μm .



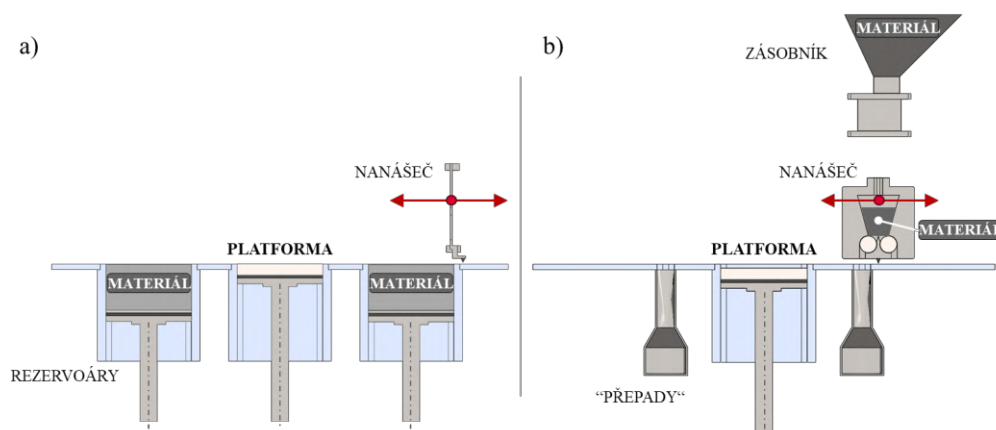
Obrázek 2-2 Příklad skenovací hlavy AM-MODULE III, společnosti RAYLASE.de [6]

Skenovací hlava zastává funkci směřování laserového svazku z generátoru na práškové lože prostřednictvím galvanometrických zrcadel a ostřících optických prvků, viz. Obrázek 2-2. Galvanometricky řízená zrcadla převádějí řídicí signál na úhlovou změnu směru laserového svazku [3]. U zobrazené skenovací hlavy AM-MODULE III je ostření svazku prováděno předřazeným dynamickým systémem pohyblivých čoček, které upravují svojí vzájemnou polohu podle aktuální polohy bodu dopadu na práškové lóže. U běžných skenovacích hlav je za galvanometrickými zrcadly navíc přítomen F-théta objektiv [7].

Pro zvýšení efektivity zařízení stále je u stále více výrobců vývoj směřován k použití více laserových soustav v rámci jednoho pracovního prostoru [8]. Díky tomu může být buď zvětšena tisková plocha, nebo zkrácen výrobní čas. Tento přístup však současně významně zvyšuje nároky na konstrukční ustavení a řízení systému, protože jednotlivé moduly musí být přesně rozmístěny, kalibrovány a synchronizovány včetně návaznosti jejich pracovních polí. Kritické jsou zejména překryvné oblasti sousedních, ve kterých se projevují chyby kalibrace nejvýrazněji a mohou vést k lokálním geometrickým nepřesnostem nebo viditelným přechodům mezi oblastmi [6]. Pro dosažení dostatečné přesnosti a zkrácení výrobního času existuje dále možnost kombinace laserových paprsků o různých průměrech [8]. Tato strategie, označovaná jako „skin-core“, využívá soustavy s paprskem menšího průměru pro vytavení vnějších perimetrů (skin), zatímco paprsek s až desetinásobným průměrem vytavuje vnitřní prostor (core) součásti. Při této konfiguraci lze snížit rychlost výroby až desetinásobně oproti zařízení s jediným laserovým paprskem, při dodržení stejné přesnosti.

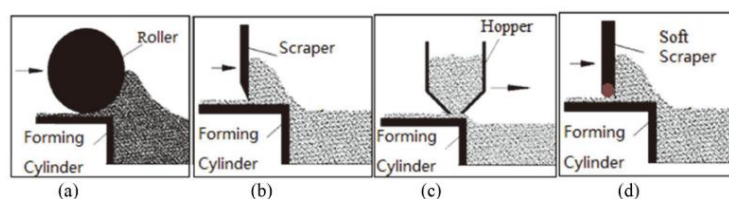
Nanášecí prášku

Ve standardní konfiguraci jsou jednotlivé vrstvy prášku tvořeny opakovaným nanášením prášku ze zásobníku, který může být umístěn nad nanášečem (Obrázek 2-3b), či ve stejné výšce jako tisková platforma (Obrázek 2-3a).



Obrázek 2-3 Základní konfigurace nanášecích soustav technologie LPBF

V případě, kdy není přítomný zásobník nad nanášečem, je materiál umístěný v tzv. rezervoárech prášku a konfigurace vyžaduje jen méně komplexní nanášeč. Tloušťky nanášených vrstev se v obou případech pohybují mezi 30 a 120 μm [9].



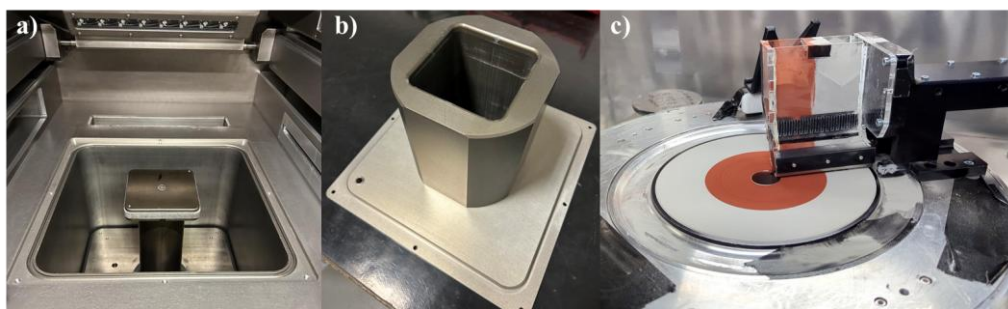
Obrázek 2-4 Základní typy nanášeců: a) Válečkový, b) Tvrdá stěrka, c) Násypkový, d) Pružná stěrka [10]

Jako základní typy nanášecích systémů je možno uvést výčet na Obrázku 2-4. Stěrka nanášče, jakožto prvek v kontaktu s práškovou loží, může být vyrobena například z kovu, či uhlíkových vláken, v takovém případě je označena jako tvrdá, Obrázek 2-4b. Tvrdou stěrkou lze nanášet vrstvy s vysokou přesností, za cenu vyšší citlivosti na kontakt s lehce vyčnívajícími hranami vyráběné součásti a taktéž může snadno dojít k rozladění systému, či poškození nanášče [9]. Měkká stěrka, vyrobena obvykle z pryže nebo jiného elastomeru, je poddajnější a vykazuje snížené riziko výrazné kolize s lokální nerovností, ale současně disponuje odlišnou mechanickou interakcí s nanášenou vrstvou prášku. Válcové nanášecí systémy jsou uváděny pouze ojediněle a primárně se vyskytují u zařízení s polárním souřadnicovým systémem, či silně komplexnější konstrukcí [9]. V případě koncepce s gravitačním zásobníkem nad nanáščem, viz. obrázek 2-3b, je přebytečný prášek prostřednictvím otvorů ve dnu komory odváděn do tzv. přepadů (sběren prášku), ze kterých je následně možné jej i recyklovat a znovu použít. V případě reservoárů, viz. obrázek 2-3a, je prášek postupně přesouván mezi reservoáry a platformou.

Tisková platforma

Tisková platforma, představuje funkční prvek, na který je součást po vrstvách postupně vyráběna. Její funkce není pouze nosná, současně určuje referenční rovinu tisku a odvádí zbytkové teplo ze součásti do konstrukce stroje. Předehřev platformy patří mezi důležité prostředky pro stabilizaci procesu, protože snižuje rychlost ochlazování v blízkosti substrátu a omezuje riziko zkroucení součásti nebo vzniku trhlin. V extrémních případech může dojít i ke zkroucení samotné tiskové platformy a následně obtížnějšímu vyjmutí z jejího uložení. U moderních LPBF systémů jsou uváděny možnosti předehřevu platforem až 500 °C [11].

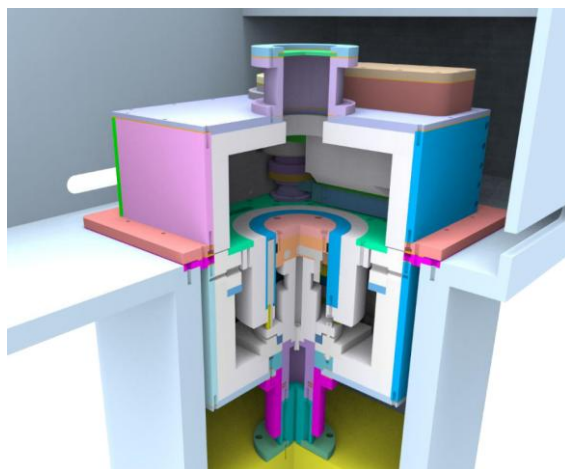
V zařízeních LPBF jsou běžnější platformy se čtvercovým, či obdélníkovým půdorysem. Možnost orientovat větší součásti na úhlopříčce platformy, což je jedna z hlavních výhod volby tvaru, však nese i značnou konstrukční nevýhodu, obtížnější výrobu uložení platformy a nákladnější těsnící prvky, které nejsou většinou ve čtvercové geometrii dostupné. Výhoda kruhové platformy je možnost omezit nerovnoměrnou disperzi prášku [11]. Druhou nespornou výhodou kruhové platformy jsou nižší výrobní náklady, která je pro vývoj experimentálních zařízení často kritická.



Obrázek 2-5 Tiskové platformy: a) Čtvercová, tiskárny SLM280 HL, b) Redukční rámeček SLM280 HL, c) Příklad kruhové platformy tiskárny společnosti Rapture [12]

V současném provozu, na pracovišti FSI, je u zařízení SLM 280HL možno používat platformu se čtvercovým půdorysem 278×278 mm, Obrázek 2-5a, a předhřevem až na 200°C [13], přičemž pro většinu experimentálních úloh je vložený redukční rámeček, obrázek 2-5b. Redukční rámeček zmenšuje efektivní tiskovou plochu na 98×98 mm a zároveň výrazně snižuje minimální potřebné množství surového materiálu. Díky většímu počtu prvků není však možné dosáhnout stejně vysoké teploty předehřevu jako u velké platformy [13].

Na FSI byla roce 2017 vyvinuta experimentální vyhřívaná platforma, určená pro zařízení SLM280 HL, jejíž cílem bylo tento problém optimalizovat (Obrázek 2-6). Výsledné řešení obsahuje vlastní kruhovou tiskovou platformu o průměru 75 mm a tisk dílů možný do výšky 50 mm. V závěrečné fázi testování bylo na povrchu stavěcí desky dosaženo teploty 400°C [13].



Obrázek 2-6 Experimentální vyhřívaná platforma pro zařízení SLM280 HL [13]

Zbývající prvky z výčtu na obrázku 2-1, konkrétně distributory a přívod inertního plynu, jsou představeny v kapitole 2.3.3, obdobně jako pozorovací soustava, jejíž výčet a vliv na konstrukci experimentální komory je uveden v kapitole 2.4.

2.1.2 Současná dostupná zařízení

Obecně jsou mezi sebou zařízení technologie LPBF odlišována primárně rozměrem tiskového prostoru, koncepcí stroje, výkonem energetického modulu a mírou optimalizace pro konkrétní účel. Hlavními výzvami dalšího vývoje jsou zejména zvětšování pracovního prostoru, při zachování relativní přesnosti a zkrácení celkového výrobního času [8]. Tyto požadavky si často vzájemně odporují, protože větší pracovní plocha při použití jedné laserové jednotky vede ke zhoršení přesnosti polohování paprsku [8].

Mimo výkonu energetického modulu se na výsledných vlastnostech zařízení výrazně podílí i konstrukční řešení dalších subsystémů. Khorasani [11] uvádí, že současná dostupná zařízení je vhodné posuzovat nejen podle základních katalogových parametrů, ale i podle míry sofistikovanosti funkčních celků.

Rozdělení

V tomto užším rámci je vhodné rozlišovat zařízení nejen podle velikosti, ale i podle účelu, pro který byla vyvinuta. Základní dělení je možno zvolit na konvenční a primárně experimentální systémy.

Konvenční zařízení jsou obvykle koncipována jako komerčně dodávané stroje pro stabilní a reprodukovatelný provoz, zatímco u experimentálních zařízení je prioritou otevřenější architektura, možnost zásahu do konstrukce a modularita subsystémů. Pro přehled současného trhu je však stále velmi užitečné i klasické dělení konvenčních zařízení podle výkonnosti, protože dobře vystihuje vztah mezi objemem komory, výkonem laseru a objemovou produktivitou.

Konvenční zařízení

Khorasani [11] ve své publikaci rozděluje konvenční LPBF zařízení do tří základních skupin: malá, střední a velká. Malé stroje jsou určeny především pro výzkumné a vývojové použití a obvykle poskytují lepší rozlišení a menší rozměrové odchylky. Tyto vlastnosti z nich činí vhodné zařízení například pro zkušební vzorky, či dentální aplikace.

Střední zařízení představují přechod mezi laboratorním a výrobním nasazením. Jsou vhodná jak pro výzkum, tak pro menší produkci nebo výrobu objemnějších dílů. Oproti předešlým systémům mají vyšší výkon i vyšší objemovou rychlost výroby, při zachování nižší pořizovací ceny a provozní náročnosti. Tato skupina představuje často kompromis mezi dostupností, flexibilitou a produktivitou [11].

Orientace velký zařízení je primárně na průmyslovou výrobu. Disponují nejrozměrnějšími pracovními prostory, a až desetinásobnou objemovou rychlostí výroby oproti malým tiskárnám. Kombinace většího pracovního prostoru a vyššího výkonu umožňuje výrobu rozměrnějších součástí, ale současně výrazně zvyšuje cenu zařízení, nároky na ochrannou atmosféru, práškové hospodářství i celkovou provozní infrastrukturu [11]. Z praktického hlediska tedy větší stroj není automaticky výhodnější, ale vhodnější pro jiný typ aplikace.

Tabulka 2-1 Rozdělení zařízení LPBF dle výkonnosti [11]

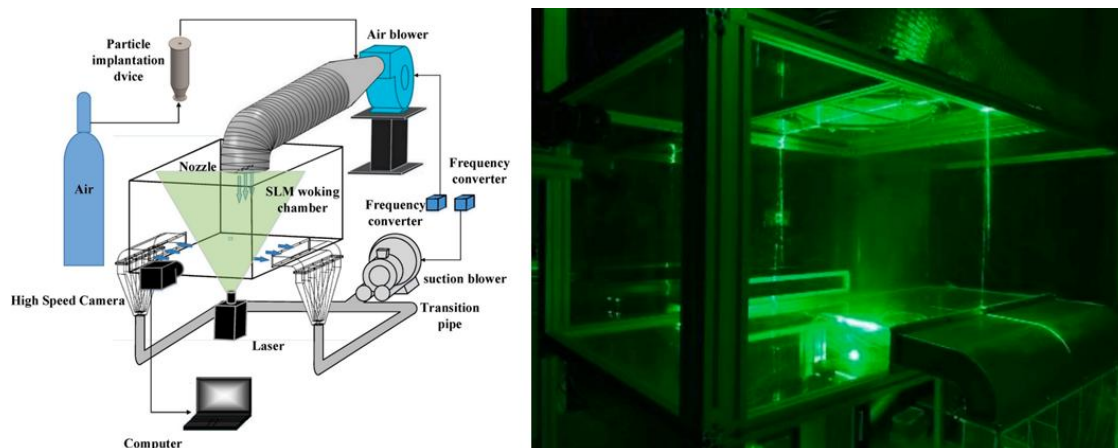
Označení	Tiskový prostor	Výkon laseru	Objemová rychlost výroby
Malá	< 250x250x250 mm	< 250W	< 20 cm ³ /h
Střední	< 400x400x400 mm	< 400W	< 60 cm ³ /h
Velká	< 750x750x750 mm	< 2800W	až 180 cm ³ /h

Toto rozdělení lze doplnit i informacemi publikace Pereiry [8], který uvádí, že s rostoucím tiskovým objemem začíná být limitující samotná přesnost klasického galvo-skenerového systému. Zvětšování pracovní plochy, při zachování jediné skenovací hlavy, vede ke zhoršení přesnosti, a proto se jako logický směr dalšího vývoje objevují vícepráskové systémy, případně posuvné nebo on-the-fly koncepce [8].

Nekonvenční výzkumná a jednoúčelová zařízení

Ve výzkumných institucích jsou primárně používána konvenční komerční zařízení, jejichž konkrétní volba je ale obvykle ovlivněna financemi a dostupností servisu. Pokud zařízení nejsou vyhovující požadavkům experimentu, pracoviště se často ubírají cestou jednoúčelových zařízení. Cílem takových zařízení je co nejjednodušší realizace konkrétního experimentu nebo pozorování. Konstrukcí se vyvinutá zařízení mohou do určité míry podobat běžným LPBF zařízením, ve skutečnosti však často zastávají podobu pouze zjednodušených komor, které obklopují veškeré subsystémy [11]. V této souvislosti existují i specializovanější směry vývoje, kromě běžných experimentů zaměřených na pozorování práškového lóže a cirkulace inertní atmosféry, například systémy doplněné o vakuové a tepelné moduly, kde už je architektura stroje přizpůsobena velmi konkrétnímu účelu [11]. Tyto informace jsou pro návrh experimentální komory naprosto klíčové, vychází z nich například orientace a umístění jednotlivých přídavných průchozích otvorů, jejich provedení a rozměry. Dále jsou u experimentálních zařízení daleko lépe viditelná provedení specifických prvků, obdobné informace je u průmyslových zařízení často možné získat jedině fyzickou inspekcí stroje.

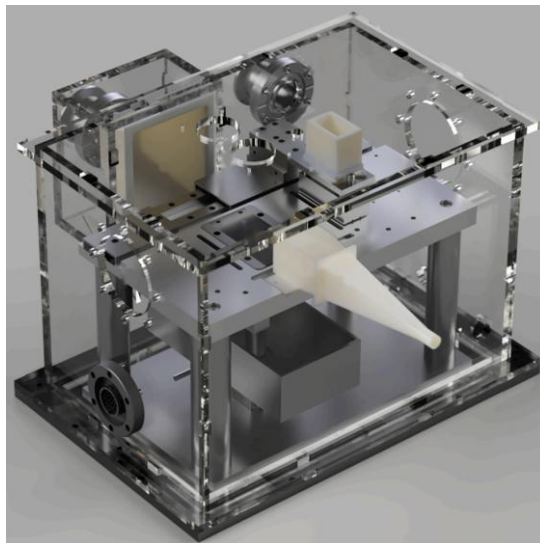
Příkladem jednoúčelového výzkumného zařízení je aparatura, zobrazena na Obrázku 2-7, univerzity z Taiwanu [14], která byla navržena pouze jako experimentální komora pro studium upraveného systému proudění uvnitř pracovního prostoru. S rozměry přibližně 1495×550×700 mm se objemem blíží středním až větším průmyslovým zařízením. Autoři se nezabývali výrobou součástí, nýbrž byla provedena studie o charakteru proudění vlivem geometrie trysek (distributorů) a podobou konfigurace.



Obrázek 2-7 Schématické znázornění experimentálního zařízení pro pozorování proudění uvnitř pracovního prostoru vlevo, pohled na realizované zařízení vpravo [14]

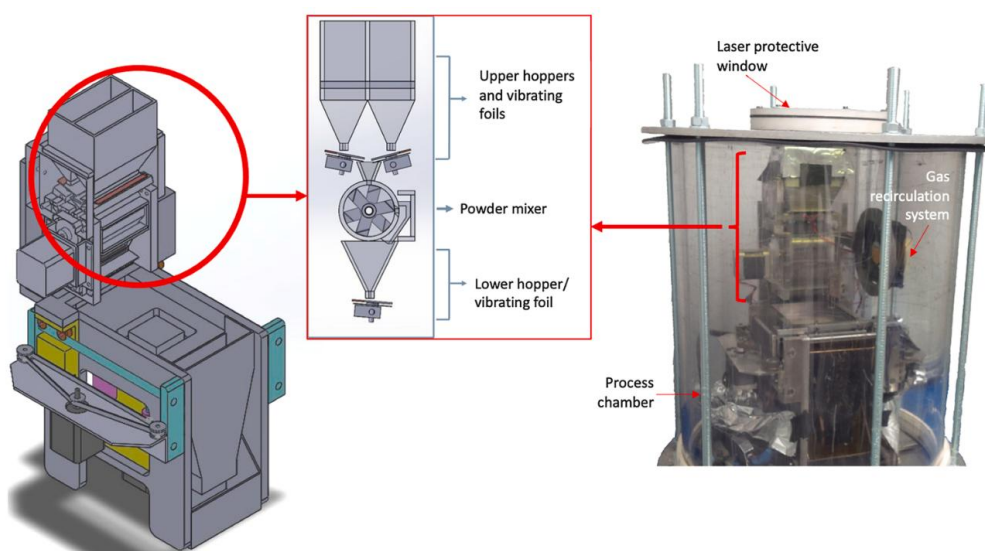
Komplexnější zařízení představují platformy, které zachovávají základní funkci tisku, ale jejich architektura je od počátku podřízena pozorováním konkrétního jevu. Výzkumná skupina z Edinburské univerzity Heriot-Watta [15] realizovala LPBF systém s otevřenou architekturou (Obrázek 2-8), určený pro měření a pozorování jevů v reálném čase. Hlavní

výhodou systému je snadná integrace optické diagnostiky bez ztráty schopnosti realizovat reálný tisk. Systém obsahuje speciálně navržený subsystém ochranného proudu inertní atmosféry a pracovní oblast s tiskovou platformou o velikosti pouhých 80×40 mm.



Obrázek 2-8 CAD render LPBF systému s otevřenou architekturou [15]

Ještě zřetelnější jednoúčelové zaměření je patrné u zařízení určeného pro testování gradientního nanášení prášku [16]. V publikaci je popsána konstrukce experimentálního LPBF systému, vybaveného dvojitým zásobníkem s mísící komorou. Komora celý systém obklopuje a je zhotovena jako bariéra tvořená transparentním polymerním materiálem. Princip, kterým je dosažena extrakce vzduchu v procesní komoře je vytvoření částečného vakua, konkrétně podtlak přibližně 950 mbar, a následné napuštění argonu pod tlakem 10 mbar [16]. Pro dosažení úplného vzduchoprázdna je tento proces nutno třikrát opakovat. Pracovní prostor obsahuje opět značně zmenšenou stavební plochu, konkrétně pouhých 60×60 mm s maximální výškou 20 mm.



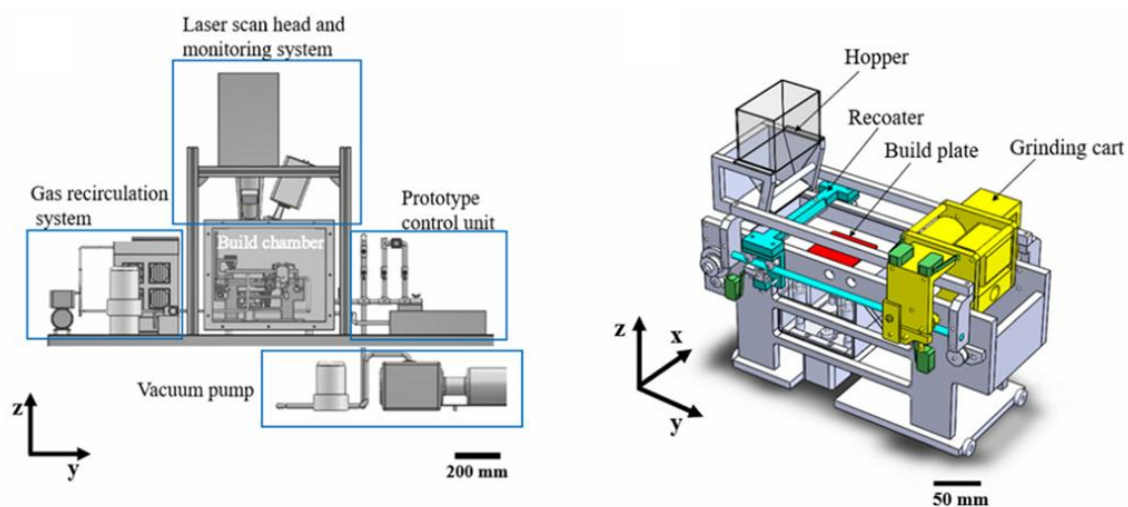
Obrázek 2-9 Zařízení pro studium gradientního mísení materiálů [16]

Z uvedených příkladů vyplývá, že nekonvenční výzkumná jednoúčelová zařízení tvoří zjednodušený a méně finančně náročný způsob realizace specifického experimentu, který nelze realizovat v komerčně dostupném zařízení. Oproti konvenčním strojům umožňují výrazně větší zásah do konstrukce i procesu, avšak za cenu menší pracovní oblasti, nižší provozní soběstačnosti a ojediněle i robustnosti.

Komplexní zařízení pro experimentální účely

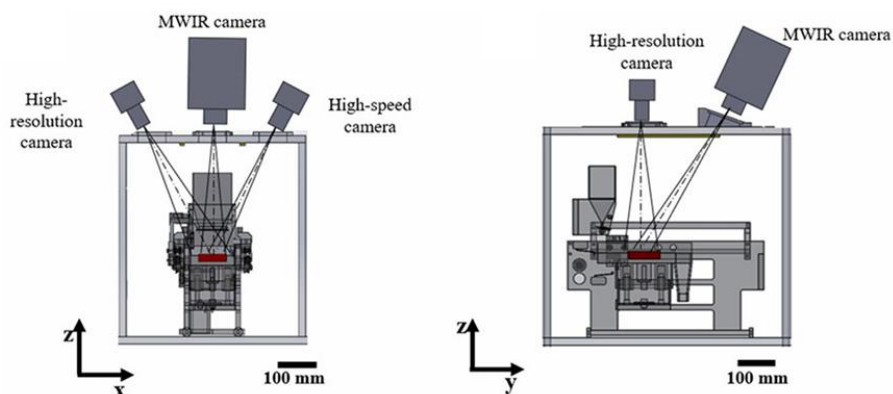
Do kategorie experimentálních zařízení lze zařadit takové LPBF systémy, u nichž není primárním cílem sériová výroba, ale ověřování nových konstrukčních principů a monitorování procesů. Oproti nekonvenčním jednoúčelovým strojům zde již bývá zachována většina základních funkčních celků průmyslových tiskáren a cílem je i kompetitivní objemová rychlost výroby. Typická je vyšší míra otevřenosti, lepší přístupnost k jednotlivým subsystémům i možnost záměny modulů. Architekturu se silně podobají ověřeným průmyslovým systémům a zároveň se snaží optimalizovat jejich nedostatky pro implementaci komplexnějších, či tvarově rozměrnějších subsystémů.

Jedním z příkladů mírně komplexnějšího systému, oproti předešlým jednoúčelovým, je zařízení pod názvem Penelope [5]. Jedná se o experimentální zařízení obsahující i subtraktivní prvek ve formě pojízdného brusného systému pro odstraňování defektů vznikajících během výrobního procesu. Samotná komora zařízení obsahuje jednoduchý stěrkový nanášec se silikonovým břitem a na stejném vedení je umístěn i brousící modul.



Obrázek 2-10 Zjednodušené zobrazení a popis hlavních částí zařízení Penelope [5]

Součástí zařízení je i pozorovací soustava tvořená třemi kamerami, umístěnými kolem otvoru skenovací hlavy. Autoři zde podrobně popisují, jaké parametry jsou nutné pro pozorování různých prvků procesu. Jedním z primárních monitorovaných procesů je vznik a chování tavné lázně [5].



Obrázek 2-11 Známostření pozorovací soustavy zařízení Penelope [5]

Funkce zařízení již nespočívá pouze ve zkoumání konkrétního jevu, ale v komplexním pozorování mechanismů, aktivně zasahujících do výrobního procesu. Ve většině komerčně dostupných, konvenčních zařízení, se takto komplexní pozorovací soustava nevyskytuje.

V posledních letech se objevují i komplexní experimentální zařízení, vyvíjená akademickými institucemi, která již nejsou zaměřena pouze na jeden dílčí sledovaný jev, ale na širší výzkum nové generace LPBF systémů. Do této skupiny lze zařadit například projekt Rapture z univerzity ETH Zurich [12]. Tento systém je prezentován jako nová generace LPBF systému pro vývoj nových nanášecích metod, viz. obrázek 2-5c.

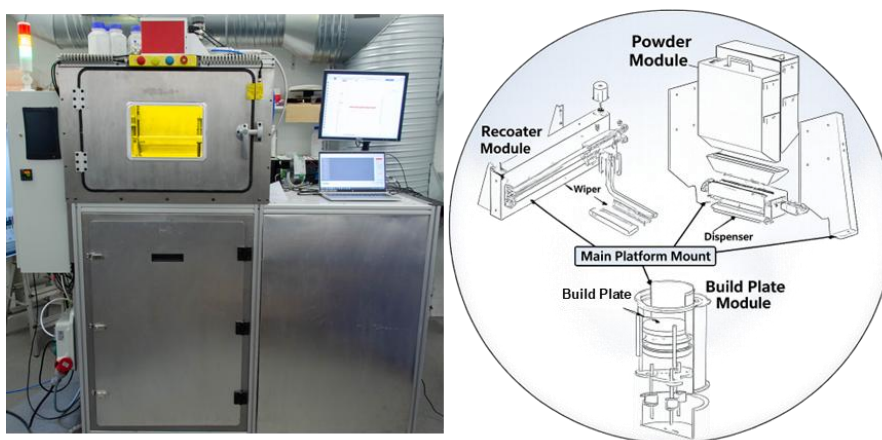


Obrázek 2-12 Systém “Rapture” z ETH Zurich [12] vlevo, reAM250 [17] vpravo

Podobně je koncipována open-source platforma “reAM250“, vyvíjená na Technické univerzitě v Mnichově. Tento systém je přímo označován jako “open-source powder bed fusion research platform“, určený pro výzkum a vývoj systémů monitoringu a řízení procesu. Komerční systémy byly v tomto případě autory shledány jako nedostatečně přístupné a málo adaptabilní pro experimentální účely, proto byla navržena vlastní optimalizovaná a částečně zjednodušená platforma. reAM250 díky tomu disponuje otevřenou a modulární architekturou. Zmíněný systém je zobrazen na obrázku 2-12 a v porovnání s dosud uvedenými zařízeními lze pozorovat značný nárůst komplexnosti.

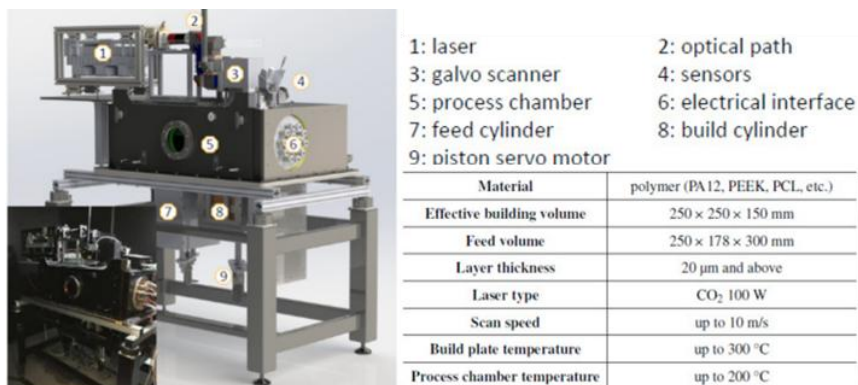
Systém “OpenLPBF v2“ [18], na Obrázku 2-13, je prezentován jako druhá generace LPBF platformy vyvíjené v rámci iniciativy DTU Open Additive, univerzity v Dánsku. Jako hlavní motiv vývoje je uváděna snaha zprostředkovat širší povědomí o technologii LPBF a vytvořit otevřenou infrastrukturu, která by umožnila implementaci a vývoj nových subsystémů. Celý návrh a dokumentace jsou zveřejněny pod licencí CERN-OHL-P v2, mohou tak být dále rozvíjeny [18]. Popsán je zde iterativní postup, využití modulárního členění systému, v němž jednotlivé subsystémy plní jasně vymezené funkce a mohou být snáze upravovány nebo nahrazovány.

Systém je výslovně označen jako experimentální výzkumné zařízení bez oficiální bezpečnostní certifikace, a proto je doporučeno jeho používání pouze s vysokou mírou opatrnosti. Popsán je i samostatný bezpečnostní subsystém, který řídí aktivaci pohonů a laseru pouze za definovaných podmínek (zámky dveří a bezpečnostní PLC ABB Pluto D20).



Obrázek 2-13 Systém OpenLPBF v2 a schematicky zobrazené subsystémy [18]

Do stejné kategorie lze zařadit i zařízení z Washingtonské univerzity v Seattlu [10], přestože se jedná o systém pro polymerní materiály. Význam zařízení pojednává v jeho návrhu jakožto experimentální platformy pro pozorování a zpracování obrazových dat z koaxiálního pozorovacího aparátu. Tato platforma je vhodným příkladem experimentálního zařízení, u něhož byla konstrukce primárně podřízena potřebám monitoringu a zpracování dat, nikoli univerzálnímu provozu.



Obrázek 2-14 PBF systém univerzity v Seattlu, USA [10]

2.1.3 Multi-materiálová výroba technologií LPBF

Možnost výroby dílů z více různých kompatibilních materiálů aditivními technologiemi je jedním z klíčových aspektů vývoje. Tímto způsobem je také možné u součástí dosahovat unikátních vlastností [19]. Selektivní přístup je nejkomplikovanější z hlediska procesu, protože je nutné dbát na kvalitu nanášení z hlediska kontaminace, přesnost laserového systému, kvalitu cirkulace inertní atmosféry kolem tiskové vrstvy a mnoho dalších.

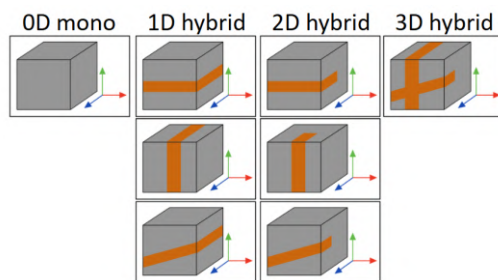
Mezi výzvy patří přesné rozmístění částecek po tiskové ploše a minimalizace vzájemné kontaminace, kontrola rozhraní mezi materiály nebo rozdílné teploty tavení. Pro minimalizaci těchto problémů je zapotřebí užívat sofistikované systémy nanášení nebo i adaptivní procesní parametry [19]. Je však vhodné zmínit, že následující část se nebude zabývat popisem procesních parametrů v kontextu multi-materiálové výroby. Jejím cílem je především poukázat na význam vývoje systémů pro multi-materiálovou výrobu a současně zpřesnit samotné vymezení pojmu multi-materiálového tisku, který je napříč současnou literaturou používán nejednoznačně.

Terminologie

V kontextu aditivní výroby je součást vyrobená ze dvou a více materiálů definovaná jako objekt tvořený funkčně gradovaným materiálem, dále FGM [20]. FGM jsou charakterizovány rozdílnými vlastnostmi napříč svým objemem. Dále se projevuje problematika definice, která se v rámci publikací vzájemně liší. Zjednodušeně lze označit dvě skupiny, kdy se výroba součástí ze dvou různých materiálů nazývá „hybridní“ a ze tří a více materiálů „multimateriálová“.

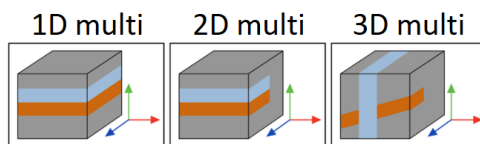
Výše zmíněná definice však pojednává pouze o materiálovém přechodu v jedné dimenzi. Pro přesnější definici je nutné ještě uvést, jak pojmenovat jednotlivé přechody v trojdimenzionální součásti, a poukázat, že přechodová oblast může nabývat formu plochy libovolného tvaru a tím se stává výrazně komplexní problematikou.

Napříč literaturou není terminologie přechodů jednoznačně definovaná, Smith [19] provedl porovnání terminologie napříč čtyřmi odbornými pracemi. Pro součást vyrobenou z jednoho materiálu se používá označení buď „mono-“ nebo „single-material“. V případě součástí vyrobených „hybridně“ se označují podle počtu přechodových rovin rovnoběžných s rovinami souřadnicového systému (Obrázek 2-15).



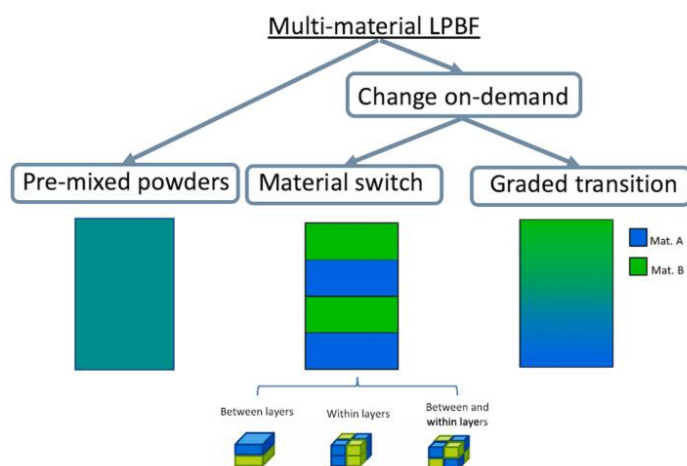
Obrázek 2-15 Přechody v terminologii hybridní aditivní výroby

V kontextu multi-materiálové výroby nastává označení identické s hybridními, avšak přibývá 1, či více druhů materiálů, které jsou navzájem provázány přechodovými oblastmi, viz. Obrázek 2-15 a 2-16.



Obrázek 2-16 Přechody v terminologii multi-materiálové aditivní výroby

Přechod mezi materiály v součásti lze obecně definovat na „diskrétní“ a „gradientní“. Diskrétní materiálový přechod je charakterizován téměř instantní změnou na hranici dvou materiálů, zatímco gradientní přechod uvažuje určité promíchání materiálů v přechodové oblasti [20]:



Obrázek 2-17 Znárodnění přechodů mezi materiály [20]

Kombinování materiálů

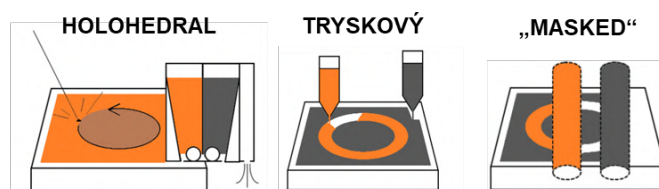
Schneck [20] ve svém průzkumu uvádí, že narůstá zájem o výzkum kombinování kovových slitin s různými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Důvodem je skutečnost, že ve většině dosavadních případů bylo možné kombinovat materiály pouze jako 1D hybridy, navíc jen s přechodovou oblastí rovnoběžnou s tiskovou podložkou. Modernější a pokročilejší nanášecí způsoby již umožňují kombinovat materiály ve všech směrech.

V zájmu o kombinování zcela odlišných kovových materiálů dominuje spojování slitin kovových a slitin na bázi mědi [20]. Za další populární zkoumané materiálové kombinace lze zmínit hliníkové slitiny v kombinacích s odlišnými kovovými slitinami, často bázi niklu. Kombinování konstrukčně velmi populárních titanových slitin s jinými kovovými slitinami není příliš časté.

2.1.4 Konstrukční úpravy zařízení

Aby bylo možné ve standardních průmyslových a převážně experimentálních LPBF tiskárnách vyrábět součásti z více druhů kovových materiálů, musí být modifikované klíčové subsystémy zařízení. Z již zmíněných pěti základních prvků tiskové komory je nutné upravit hlavně nanášecí mechanismus a zásobník, ostatní subsystémy adaptibilní. V případě zásobníku se mění však pouze vnitřní konstrukce a uspořádání, mechanické rozhraní s komorou zůstává identické. V následující kapitole budou proto popsány různé způsoby nanášení více materiálů najednou, se soustředěním na systém holohedral a uvedení potřebných přídatných systémů oproti stávající konfiguraci.

V kontextu multi-materiálové výroby existují tři základní principy multimateriálového nanášení kovových prášků, konkrétně holohedral (plošné) nanášení, nanášení tryškou a nanášení přes masku [20].



Obrázek 2-18 Základní rozdělení multi-materiálových nanášecích systémů

Jako hlavní porovnávací kritéria bývají uváděny zejména míra nanášení prášku, dosažitelné rozlišení a úroveň technologické připravenosti, vyjadřovaná pomocí ukazatele „Manufacturing Readiness Level“ (MRL). Míra nanášení vyjadřuje množství materiálu, které je nanášec schopen přenést na tiskovou podložku za určitý časový úsek, obvykle v jednotkách $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Rozlišení lze posuzovat podle minimální velikosti vyrobených struktur, které lze daným způsobem nanesení spolehlivě vytvořit.

		Manufacturing readiness level MRL									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Reference											
	PBF-LB										
	PBF-EB										
2D Multi-Material											
	2D hybrid										
	2D full AM										
3D Multi-Material											
	Holohedral										
	Nozzle										
	Masked (Pressure-based)										
	Masked (Photoconductor)										

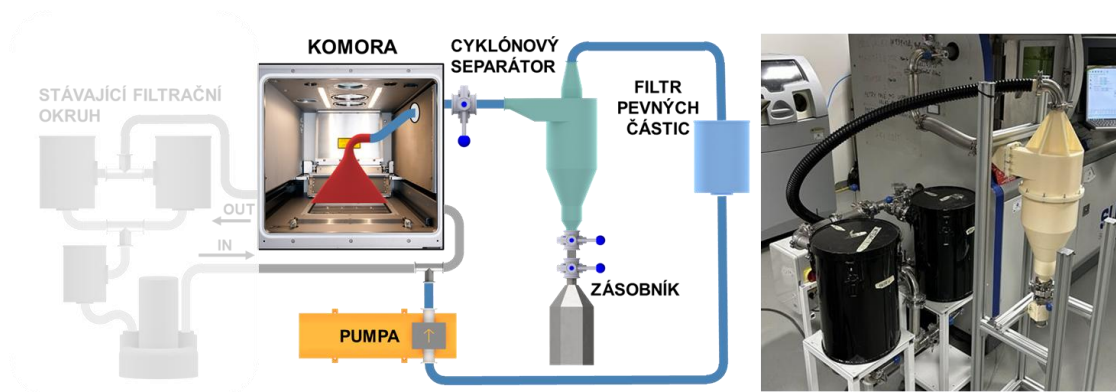
Obrázek 2-19 Tabulka připravenosti multi-materiálových nanášecích systémů [20]

Holohedral systémy představují z konstrukčního hlediska řešení nejbližší standartnímu nanášecímu procesu. V základním uspořádání systém disponuje mírně komplexnějším nanášečem, který obsahuje oddělené komory pro jednotlivé materiály. Principiálně je nejprve nanesen jeden materiál a příslušná geometrie je lokálně vytavena. Následuje odsátí nespečeného materiálu z poslední nanesené vrstvy a do zbývajících oblastí je nanesen odlišný materiál. Tento postup může být v rámci jedné vrstvy opakován vícekrát. Princip je znázorněn na obrázku 2-20, přičemž tento cyklus se opakuje každou nanášenou vrstvou.



Obrázek 2-20 Princip holohedral nanášení: 1) Nanesení materiálu A, 2) Vypálení geometrie materiálu A, 3) Odsátí přebytečného materiálu A, 4) Nanesení materiálu B, 5) Vypálení geometrie materiálu B, 6) Odsátí přebytečného materiálu B

Výhodou holohedral principu je vysoká kompatibilita s existující architekturou LPBF strojů, jediná výrazná modifikace je implementace modulu přidavného odsávání. Současně však dochází ke značnému prodloužení výrobního času a velmi výraznému zvýšení spotřeby materiálu. Pro holohedral systémy jsou uváděny depoziční rychlosti přibližně $60\text{--}140\text{ mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a minimální rozměr vytvářených struktur přibližně $130\text{--}240\text{ }\mu\text{m}$ [20].



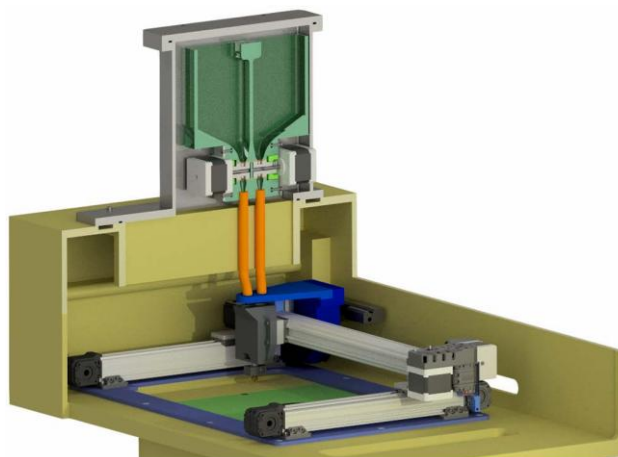
Obrázek 2-21 Schématické zobrazení přidavných prvků pro nanášení principem holohedral a vpravo realizovaná podoba v rámci projektu FSI z roku 2025 (foto autora)

Oproti standardní konfiguraci vyžaduje samotný nanášec implementaci odsávací trysky, kterou médium se značným množstvím kovového prášku putuje pomocí podtlaku přidavného dmýchadla přes dvojici filtračních prvků. Pokud by byly v rámci filtračního systému obsaženy pouze standardní prvky s výměnnými filtračními kazetami, docházelo by k mnohonásobně častějšímu znečištění a ekonomicky nevýhodnému intervalu výměny kazet. Z tohoto důvodu bývá představený prvek, jehož funkcí je z odsávaného média odstranit maximum částic kovového prášku a prodloužit tak životnost filtrů, případně umožnit i částečnou recyklaci odsávaného prášku. Pro tento účel byl jako nejvhodnější způsob zvolen cyklonový mechanický odlučovač, jehož první iterace je zobrazena na Obrázku 2-21.

V neposlední řadě vyžaduje tento princip nanášení sekundární vyhrazenou jednotku dmýchadla, která dále vhání médium zpět do základního okruhu vedení inertní atmosféry v rámci zařízení.

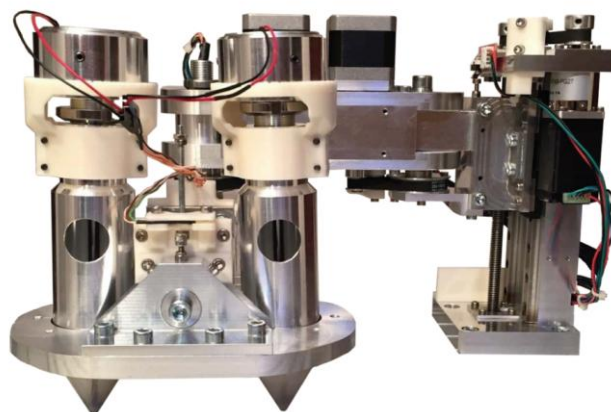
Dále existují tryskové systémy, které jsou založeny na lokálním dávkování prášku pomocí jedné nebo více trysek, pohybujících se v horizontální rovině nad tiskovou platformou. V jedné vrstvě tak mohou být vytvářeny zóny z odlišných materiálů bez nutnosti plošného pokrytí celého práškového lóže [20]. Tento přístup je koncepčně relativně jednoduchý, jeho praktická realizace je však komplikována vlastnostmi jemných kovových prášků. Samovolnému uvolnění prášku z trysky brání mezičásticové síly, a proto musí být prášek aktivně rozpohybován, například vibračním nebo piezoelektrickým aktuátorem [20]. Hlavní výhodou tohoto principu je vysoká lokální přesnost, nevýhodou naopak velmi nízká produktivita. Pro tryskové systémy jsou uváděny rychlosti posuvu přibližně $5\text{--}15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a objemové depoziční rychlosti pouze $0,4\text{--}4,1\text{ mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ [20].

V diplomové práci z roku 2019 bylo na VUT v Brně navrženo a odzkoušeno zařízení tohoto principu, kompatibilní se zařízením SLM280 HL. Systém byl založen na selektivním nanášení dvou kovových prášků pomocí nanášecí hlavičky s tryskou a vibračním motorkem, viz. Obrázek 2-22. Zařízení bylo implementováno do tiskárny a byla prokázána možnost nanesení jedné multimateriálové vrstvy o minimální tloušťce $50\text{ }\mu\text{m}$ i výroby 3D multimateriálového dílu tvořeného až 200 vrstvami se změnou materiálu ve všech osách [21].



Obrázek 2-22 Tryskový nanášecí systém pro SLM280 HL z roku 2017 [21]

Odlišný přístup k této koncepci je viditelný v publikaci Girntha [19], kde je uvedeno testování selektivního nanášení pomocí speciálně navrženého horizontálního kloubového ramene s dávkovacím členem, viz. Obrázek 2-23. Systém byl integrován do stroje Realizer SLM125 a byl navržen tak, aby nezasahoval do dráhy laserového paprsku. Tato koncepce představuje pokročilejší variantu lokálního nanášení, kde už nejde pouze o jednoduchou trysku, připomínající konstrukci tiskárny na principu FDM, ale o komplexně ovládaný robotický nanášecí systém.



Obrázek 2-23 Tryskový nanášecí systém se zjednodušeným robotické rameno [19]

Třetí skupinu tvoří “masked” nanášecí systémy, tedy systémy nanášení “přes masku“. U těchto metod je vytvářen požadovaný vzor prášku pomocí selektivního přenosu dvěma základními principy. U elektrofotografického principu je využíván lokálně vytvořený náboj na bubnu, na který se selektivně zachytává prášek. Vzniklý práškový obraz je poté přenesen na platformu. U mechanického maskování pomocí podtlaku je na povrchu rotačního bubnu vytvářen práškový film, který je lokálně uvolňován soustavou ventilů. Význam těchto systémů spočívá zejména ve vysoké rychlosti nanášení. Pro prakticky rozvíjené varianty jsou uváděny schopnosti depoziční rychlosti přibližně $130\text{--}290\text{ mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Nevýhodou je naopak hrubší rozlišení, typicky přibližně $0,8\text{--}1,6\text{ mm}$ [20]. Z obrázku 2-24 je patrné, že tento typ nanášecích systémů je v porovnání s předchozími násobně rozměrnější a obtížněji implementovatelný.



Obrázek 2-24 Nanášecí systém společnosti Aerosint [22]

Pokročilé nanášecí systémy vykazují v porovnání s originální konfigurací, jejíž příklad je zjednodušeně zobrazen na obrázku 2-1, výrazný nárůst zástavbového prostoru. Jedná se o klíčové úskalí návrhu nanášecích systémů, které lze testovat pouze v dostupném průmyslovém zařízení. Vývoj je proto často limitován a kvůli absenci experimentálního zařízení řešení nenabývají plných potenciálů koncepcí.

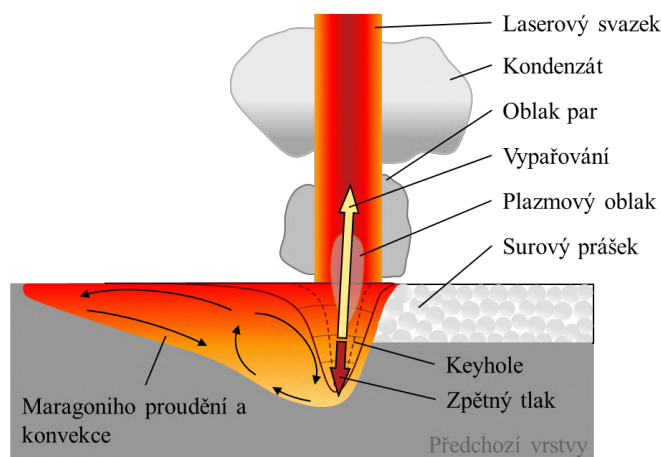
2.2 Jevy vznikající při procesu výroby technologií LPBF

Jevy vznikající při výrobním procesu technologie LPBF jsou silně závislé na procesních parametrech, kterých mohou být desítky, až nižší stovky. Z důvodu extrémní komplexnosti a vzájemné závislosti procesních parametrů je v mnohých případech chování bez experimentálních pozorování, či simulace zcela nepředvídatelné.

Bez přehledu pozorovatelných jevů by v rámci zbytku této práce nebylo možné dostatečně argumentovat specifický přístup k návrhu, podobu ani umístění konkrétních konstrukčních prvků a mechanických rozhraní. Přínos této kapitoly je zejména v představení rozsahu doprovodných jevů výrobního procesu LPBF a uvedení způsobů jejich pozorování. Je vhodné zmínit, že návrh a výběr jednotlivých prvků energetického modulu i navazující kompletní pozorovací aparatury je sám o sobě rozsáhlou problematikou a částečně přesahuje náplň této závěrečné práce. Protože cílem není tvorba kompletního senzorického systému, bude tato problematika řešena v rámci následného návrhu pouze na koncepční úrovni.

2.2.1 Tavná lázeň

V momentě, kdy je nanesená vrstva kovového prášku lokálně natavena dostatečně výkonným laserovým paprskem, dojde ke vzniku tavné lázně. Dynamika tavné lázně je poháněna gradientem povrchových napětí, které jsou výsledkem extrémních teplotních gradientů v místě dopadu laserového paprsku. Tento komplexní proces má občas za následek fluktuaci stability tavné lázně a vyvolává jevy, které lze různými způsoby pozorovat [23].



Obrázek 2-25 Schématické zobrazení tavné lázně

Vlastnosti a sledované jevy

Během tavení kovového prášku dochází v procesu k několika termodynamickým jevům. Klíčový je přechod kovu z pevného do kapalného stavu, při dostatečně vysoké teplotě může dojít i k jeho vypařování. Pokud laser dodá více energie, než je nutné k tavení, teplota v místě

dopadu může přesáhnout bod varu slitiny. [24]. Součástí procesu je i rozstříkávání částic z tavné lázně, způsobené interakcí laseru, taveniny a uvolněné páry. Tyto rozstříky mohou negativně ovlivnit kvalitu povrchu i homogenitu dalších vrstev [24].

Tavná lázeň, tvořená roztaveným kovem v místě dopadu laseru, má rozměry určené šířkou, hloubkou a délkou (danou rychlostí pohybu laseru). Horizontální rozpínání je výsledkem Maragoniho proudění – tečného proudění způsobeného gradientem povrchového napětí, který přenáší roztavený kov od středu k okrajům [25]. Hloubku lázně ovlivňuje konvekce, zpětný tlak a vztlaková síla, která vzniká kvůli snižující se hustotě při vyšší teplotě [25].

V procesu tavení hraje přenos tepla klíčovou roli, hlavní formy přenosu jsou kondukce a konvekce. Kondukce je dominantní u neroztavených částic kovového prášku. V momentě, kdy dojde k tavení materiálu, okolní částice začnou přenášet vzniklé teplo do okolí prostřednictvím kontaktů mezi částicemi – tedy kondukcí. Konvekce je způsobena pohybem taveniny a umožňuje distribuci tepla a rovnoměrné tavení. Protože je tavná lázeň tvořena hlavně taveninou, konvekce bude mít dominantní vliv.

Maragoniho proudění a zpětný tlak jsou jedny z nejdůležitějších sil působících v tavné lázni a ovlivňující výsledek tavného procesu. U většiny tavených kovových prášků klesá povrchové napětí s rostoucí teplotou, a naopak roste v místech s nižšími teplotami. Díky tomuto vlivu je tavenina tlačena ze středu k okrajům – jev se nazývá Maragoniho efekt (proudění). Maragoniho proudění je tedy tečné napětí působící na tavnou lázeň jako následek teplotního gradientu [25].

Zpětný tlak vzniká v případě, že vzniklá teplota překročí teplotu vypařování materiálu. Kovová pára, která prudce uniká z povrchu kapaliny, vyvíjí na taveninu mechanický tlak směrem dolů. Ten způsobuje stlačování a prohlubování tavné lázně až do bodu, kdy může vzniknout úzká hluboká dutina – keyhole [25].

Vztlaková síla vzniká klesající hustotou kovu jako reakcí na zvyšující se teplotu. V tavné lázni se tak objevuje i vztlakové proudění, které má tendenci vracet tekutinu ze spodní části tavné lázně na její povrch. Tato síla tak mimo jiné přímo ovlivňuje tok kovu uvnitř tavné lázně a teplotní gradient. Zjednodušeně je však možné uvažovat její efekt v porovnání s tečným napětím jako zanedbatelný [25].

Oblak par je komplexní oblast, která je primárně poháněna konvekcí proudu vypařeného kovu. Parametry proudu kovové páry jsou závislé hlavně na teplotě povrchu tavné lázně, hustotě výparů a tlaku okolní atmosféry. Oblak par vzniká v místě, kde laser dopadá na práškové lôže a zároveň ionizuje okolní atmosféru. Ionizované kovové nanočástice mají typickou velikost o 3 řády nižší než odletující částice taveniny – kolem 10–150 nm.

Rychlost proudu par od místa vzniku klesá exponenciálně, nad výškou přes 3 mm. Oblast, kde by rychlost proudu páry byla větší než $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, však nepřekročí výšku 0,5 mm od plochy odpařování – může za to extrémně rapidní pokles rychlosti. Pro představu, jakou rychlost může tento vzniklý proud par mít, autoři uvádí zjednodušený výpočet uvažující

ustálený stav, jehož výsledkem je maximální rychlost proudu vypařené taveniny téměř na hranici rychlosti zvuku.

Navíc je uvedena ještě Knudsenova vrstva – tenká vrstvička vznikající těsně nad povrchem, ze které se odpařuje kovová tavenina. Kjer [1] ve své práci udává, že kromě zmíněných vlivů má na tvorbu odletujících částic a tvar oblaku par vliv i atomární hmotnost okolního inertního plynu s poznámkou, že vyšší tlak společně s plyny o nižší atomární hmotnosti má tendenci mírnit proces vypařování. Lehčí plyny navíc snižují poloměr proudu páry, díky čemuž je v publikaci uvedena hypotéza, že část odletujících částic by měla být zpětně pohlcena do tavné lázně [1].

I když objem vypařného kovu není nijak velký, jeho výskyt nad tavnou lázní silně ovlivňuje množství energie dopadající do místa tavení. Jeho vlastnosti a tvar silně ovlivňují procesní parametry a v případě, že oblak či proud par absorbují část energie laserového paprsku, může se přetransformovat až v plazmu.

Seznam pozorovatelných jevů a parametrů tavné lázně by pro komplexnější pochopení problematiky pokračoval dále. Zde je uveden pro uvedení do problematiky a naznačení počtu a různorodosti jevů, které mají vliv na výslednou kvalitu součásti.

2.2.2 Tisková platforma

Velice podstatným aspektem technologie LPBF je dodržení konstantní kvality skrze součást, na což přímo navazuje nutnost homogenně nanášených vrstev kovového prášku. Typická výška každé vrstvy se pohybuje mezi 30 a 120 μm . Fluktuace výšky může mít za následek bezpočet vad a ovlivnit schopnost vrstvy rovnoměrně pohlcovat laserový paprsek [9].

Vlastnosti a sledované jevy

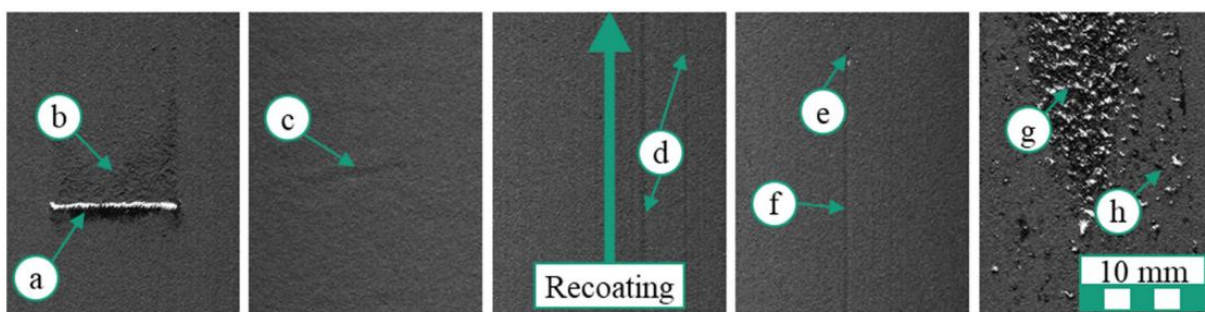
Prvotní problémy mohou vzniknout již z vlastností samotného kovového prášku. I když jsou kovové prášky vyráběny s určitou rozměrovou tolerancí jednotlivých částic, ne všechny mají pravidelný tvar, a hlavně mohou na práškovém lóže tvořit náhodné shluky.

Podle geometrie vyráběné součásti, mohou vznikat defekty již kvůli tepelné roztažnosti materiálů. Tenké stěny a hrany se mohou začít kroutit a tím i vyčnívat až o několik stovek μm nad pracovní rovinu. Když tento jev nastane, může nanášec narazit o vyčnívající část a poškodit sebe, či rozpráshit okolní prášek vlivem stlačení a následného vrácení do původního tvaru. Tato deformace se může zdát malá, ale díky malým rozměrům, a hlavně hmotnosti částic kovových prášků může i nepatrný pohyb narušit poslední nanesenou vrstvu.

S nanášečem jsou spojené i další vady. V případě nedostatečně přesného a tuhého uchycení a vedení nanášeče může jeho nepravidelný pohyb připomínající skoky způsobit prohlubně. Díky faktu, že je hustota lóže kovového prášku pouhých 40 % oproti plnému kusu materiálu, nerovnosti ve vedení nemusí být nijak znatelné a stejně vyvolají tento nechtěný jev. Když

už je nanášec v provozu delší dobu, může jeho spodní hrana (stěrka) ztratit původní geometrii a nerovnosti začít tvořit rýhy. Stejně rýhy mohou však vzniknout i v případě, že nanášec zachytí například vystřelenou částici z tavné lázně a dále ji táhne po povrchu.

Před nanesením další vrstvy prášku po vypálení stávající jsou vytavená místa níže než okolní prášek. V případě, že by nanášeci nebylo dopraveno dostatečné množství materiálu pro rozetření, mohou vzniknout místa, kde prášek nebyl nanesen vůbec, viz. obrázek 2-26g). Poslední zmíněný defekt je spojený s hloubkou tavné lázně. Balling efekt neboli tvoření kapek, je jev, při kterém nedostatečná hloubka svarové lázně způsobí, že maličká vyvýšení (<1 mm v průměru) začnou vyčnívat nad úroveň vrstvy prášku stejně jako vyčnívající hrana [9]. Rozdílem je typicky menší rozměr a náhodné umístění, kapky nemusí vznikat pouze na hranách, ale kdekoli na ploše momentálně vypalované vrstvy.



Obrázek 2-26 Nepravidelnosti práškového lože: a) Vyčnívající prvek součásti, b) Nepravidelně rozmístěný prášek, c) Vlnění, d) Hřeben, e) Vymršťené částice, f) Rýha, g) Nedostatečné množství rozprostřeného prášku, h) Balling [9]

Nedostatečně kvalitně nanesená vrstva kovového prášku je oproti jevům uvnitř tavné lázně dobře a přesně detekovatelná i za provozu, protože mezi nanesením a vypalováním je několika sekundová časová prodleva. Tato prodleva může být využita pro tzv. in-situ pozorování neboli pozorování konkrétních míst během provozu a v případě potřeby lze navýšit množství dopraveného prášku před nanášeč, či úplné zastavení výroby pro úsporu odpadního materiálu.

2.2.3 Proudící inertní atmosféra v pracovním prostoru

Proudění inertní atmosféry uvnitř pracovního prostoru komor tiskáren technologie LPBF je poměrně dlouho a podrobně studováno, studie se liší komplexností a nároky na pozorovací techniku. Pro tuto práci budou nejpodstatnější analýzy rychlostního pole proudící inertní atmosféry, společně se základními poznatky ohledně odletujících částic. Další publikace se například zabývaly komplexními simulacemi tavné lázně a oblaku par, nebo komplexnímu pozorování a simulacím odletujících částic v závislosti na rychlosti proudu plynu, skenovací strategii a dále.

Vyplnění tiskové komory inertním plynem vytváří chemicky nereaktivní atmosféru. Stejně jako u určitých technologií svařování kovů je nepostradatelná jakožto bariéra oddělující tavnou lázeň od okolní reaktivní atmosféry. Příkladem mohou být tisk titanových slitin, které mají extrémní náchylnost k oxidaci. U aditivních technologií jsou nejvíce rozšířené inertní plyny argon a dusík, přičemž se v experimentálních případech objevují i příměsi. Příkladem lze uvést publikaci Pauzóna [26], kde je zmíněno, že přimícháním hélia do cirkulující atmosféry (argonu) lze dosáhnout snížení množství odletujících částic až o 30 % a dále zvýšení intenzity chlazení tisknutých vrstev.

Inertní atmosféra kromě své chemické neaktivity zastává hned několik rolí v rámci výrobního procesu. Odnáší teplo nucenou konvekci, díky čemuž se zvyšující rychlostí proudění urychluje chladnutí jednotlivých vrstev a dále odstraňuje veškeré částice v prostoru nad tiskovou platformou, které by mohly laseru bránit předat energii tavné lázni [27], či jej dokonce rozptýlovat a měnit poloměr dopadajícího paprsku.

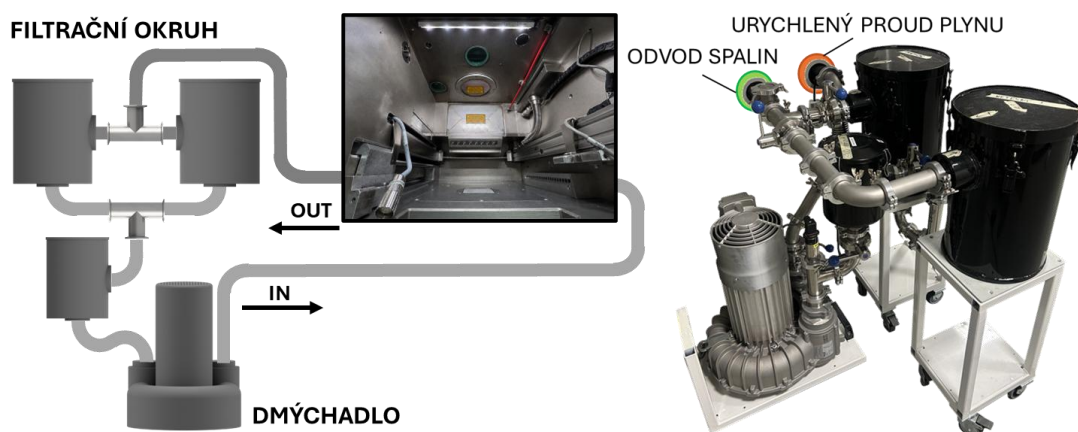
Přechod k reálným aplikacím a podobám systémů bude znázorněn na fakultním zařízení SLM280 HL. Zde je celý pracovní prostor, včetně přívodního potrubí, před začátkem výroby zaplaven inertním plynem, a zároveň je recirkulován prostřednictvím distributorů, viz. obrázek 2-28 a recirkulačním dmýchadlem. Přívod inertní atmosféry je umožněn pomocí hlavního (spodního) distributoru, zvýrazněného tyrkysovou barvou na obrázku 2-27, a sekundárního (vedlejšího) distributoru, zvýrazněného modrou barvou. Odtah následně umožňuje distributor na protilehlé straně komory, jehož geometrie je násobně jednodušší oproti distributorům, které inertní atmosféru napouští do pracovního prostoru.



Obrázek 2-27 Pracovní prostor SLM280 HL se zvýrazněnými distributory

Téměř celý okruh vedení inertní atmosféry je realizován pomocí normovaného potrubí ISO-KF, velikosti 40, která značí vnitřní průměr potrubí. Geometrie a vzdálenosti jednotlivých prvků jsou dány dostupnými rozměry jednotlivých typů potrubí, které se zjednodušeně dělí na rovné potrubí, kolena a rozdělení typu T a X. Na obrázku 2-28 je ukázáno schématické

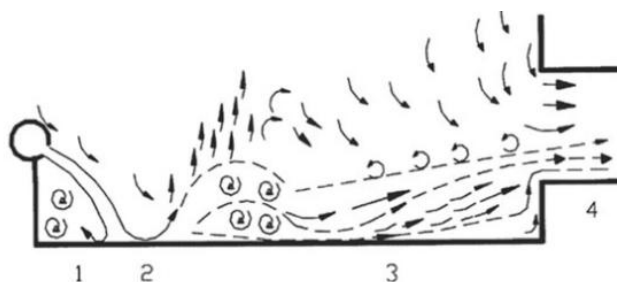
znázornění, doplněné o reálnou podobu současné konfigurace filtračního systému zařízení SLM280 HL.



Obrázek 2-28 Schématické znázornění a podoba filtračního systému zařízení SLM280 HL

Vývoj charakteru proudění napříč pracovním prostorem

Užitím publikace Wanga [28] lze rozlišit postupně vyvíjející proud inertní atmosféry primární vpustí, nad tiskovou platformou, do čtyř charakteristických oblastí.



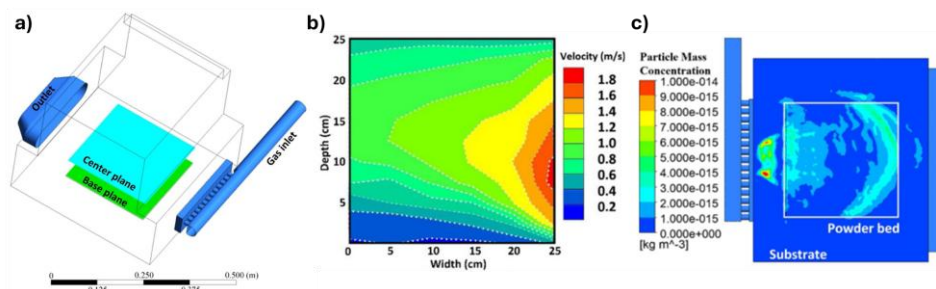
Obrázek 2-29 Vývoj proudu I.A.: 1) Zpětný proud, 2) První kontakt s pracovní plochou, 3) Přetvořený proud, 4) Odsávání [28]

V případě, že je vpust' umístěna v blízkosti dna komory, kdy konkrétní hranice není v literatuře přesně definována, může mít proud tendenci začít ulpívat ke dnu. Přímo pod vpustí tak vzniká tlaková níže a první prvek, který může i dokonale laminární proud začít vířit a zpomalovat, viz. obrázek 2-29. Druhou oblastí je dopadová plocha proudu na dno komory, či samotné práškové lóže. Zde v ideálním případě dojde pouze k přesměrování proudu pod určitým úhlem směrem ode dna, ale při vyšších rychlostech může dojít i k narušení práškové lóže tiskové platformy. Druhá oblast způsobuje ve srovnání s ostatními největší rozptýlení a zároveň zpomalení proudu plynu. Terciální oblast popisuje přesměrovanou, nerozvířenou část proudu, který postupně směřuje do poslední oblasti, ve které je nasáván do filtračního systému prostřednictvím distributoru odtahu.

Klíčovým aspektem, při návrhu recirkulačního okruhu a samotných distributorů inertní atmosféry, uvnitř tiskové komory, je homogenita, nebo také uniformita, ať už z hlediska

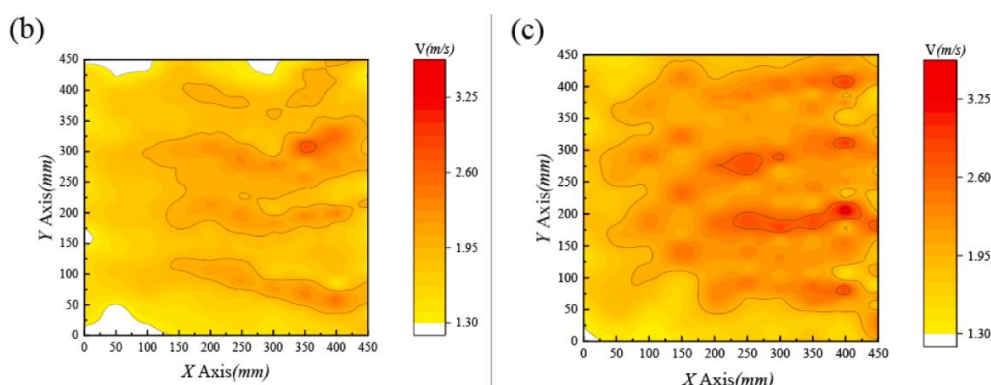
složení, rychlosti, či směru proudění [1]. Nejkritičtější oblast, kde musí být uniformita dodržena je v těsné blízkosti tiskové podložky mezi vpustí a odsáváním.

Zhang [29], v publikaci zabývající se odstraňováním vedlejších produktů z prostoru nad tiskovou platformou, uvádí znázornění jejich konfigurace nedostatečně optimalizovaného distributoru vpusti. Z obrázku 2-30 lze usuzovat, že nerovnoměrné rozložení výstupní rychlosti proudu po šířce distributoru má za důsledek vznik oblastí hromadění nečistot na práškovém lóže.



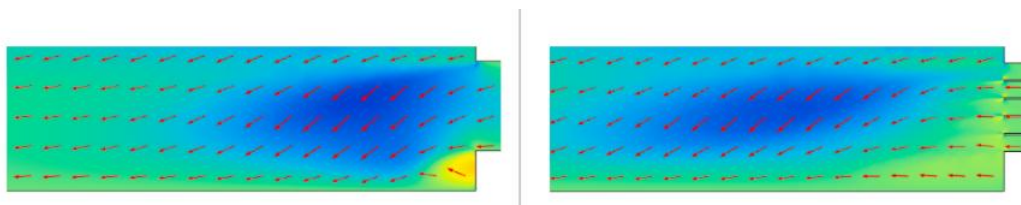
Obrázek 2-30 Proudění pracovním prostorem: a) Model, b) Experimentální měření „Center plane“, c) Koncentrace nečistot [29]

Yang [30], v publikaci z roku 2020, uvádí, že obtížnost tvorby homogenního proudu, napříč tiskovým prostorem, neroste pouze s rozměry distributoru, ale i s jeho přiblížením ke dnu tiskové komory. Valná většina publikací se zabývá návrhem pole pro tiskový prostor, jehož platforma nepřesahuje rozměry 300×300 mm. Tato publikace se však zabývala návrhem pro nadrozměrnou platformu, konkrétně 450×450 mm. S nárůstem plochy, kterou je nutné pokrýt ochranným proudem, je přímo spojen i nárůst potřebného výkonu recirkulačního dmýchadla. Pro plochy větší, než 300×300 jsou proto potřebná dmýchadla, která dokážou poskytnout průtok potrubím větší než $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. V této publikaci je uvedeno dosažení alespoň částečné homogenity v porovnání s [1] a [29], ale na úkor zvýšeného průtoku až na $210 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Na obrázku 2-31 jsou však stále viditelné oblasti, kde je rychlost proudu výrazně vyšší, těmito rychlostním extrémům je nutné v návrhu co nejvíce zamezit [30].



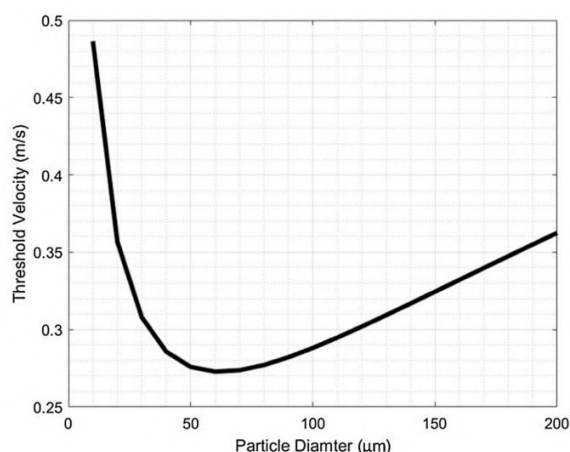
Obrázek 2-31 Optimalizované rychlostní pole nad nadrozměrnou tiskovou platformou publikace [30]

Doposud byla zmiňována hlavně homogenita po šířce distributoru neboli v horizontálním směru proudu, co však způsobuje nehomogenitu ve vertikálním směru? Primárním důvodem je Coandův jev [29]. Jedná se o tendenci proudu plynu ulpívat k rovinným, či konvexním povrchům a je spojený s oblastí tlakové níže, viz. obrázek 2-29. Dostatečné homogenity nelze dosáhnout pouhou geometrií distributoru a navyšování rychlosti [1], ale je nutné minimalizovat tendenci plynu směřovat, po vniku do pracovního prostoru, směrem dolů, ke dnu komory. Mezi další prvky, způsobující nehomogenitu ve vertikálním směru, mohou být například geometrie přívodního potrubí, či kolize s vířivými proudy ve zbytku rozsáhlého pracovního prostoru komory. Jedním ze způsobů, jak minimalizovat důsledky Coandova jevu je úprava geometrie distributoru, na obrázku 2-32 [30] je znázorněná implementace horizontálních žeber.



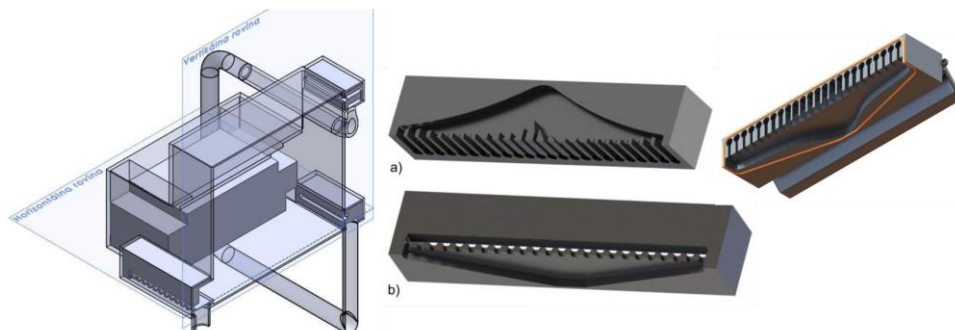
Obrázek 2-32 Vliv horizontálních žeber v geometrii hlavního distributoru napouštění na vznik oblasti tlakové níže, vlevo bez žeber, vpravo s implementovanými žebry [30]

Proud inertní atmosféry by měl mít v ideálním případě maximální rychlost při dodržení laminárního proudění. Pomalý proud se označuje do rychlostí $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale dle odlišné publikace je vhodnější až do $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, protože tuto rychlost [29] uvádí jako mez, kdy nebylo možné dostatečně odvádět spaliny z prostoru nad tiskovou platformou. Za hranici střední rychlosti proudění je považována rychlost do $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a jako rychlý proud jsou označovány rychlosti přesahující $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [1]. U vysokých rychlostí však dochází k riziku narušení práškového lóže, v publikaci [29] je uveden graf pro přibližné určení třecí rychlosti, která závisí na průměru částic a materiálu.



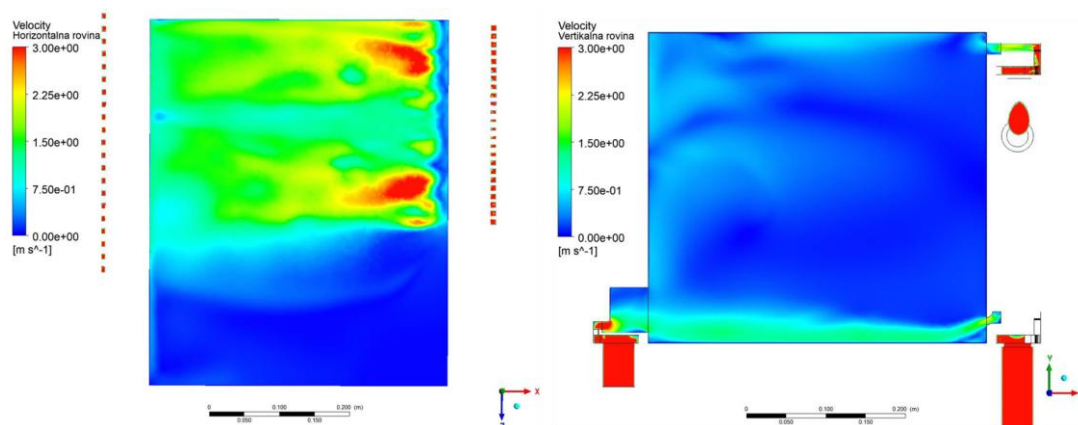
Obrázek 2-33 Graf závislosti kritické třecí na průměru částic materiálu 316L [29]

CFD numerické simulace originální konfigurace distributorů zařízení SLM280 HL, zobrazených na úvodním obrázku 2-27, byly zpracovány již v roce 2020 [31]. Samotné distributory jsou natolik geometricky komplexní, že bylo možné jejich vnitřní geometrii získat až reverzním modelováním pomocí naskenovaného reálného dílu [31], viz. obrázek 2-34.



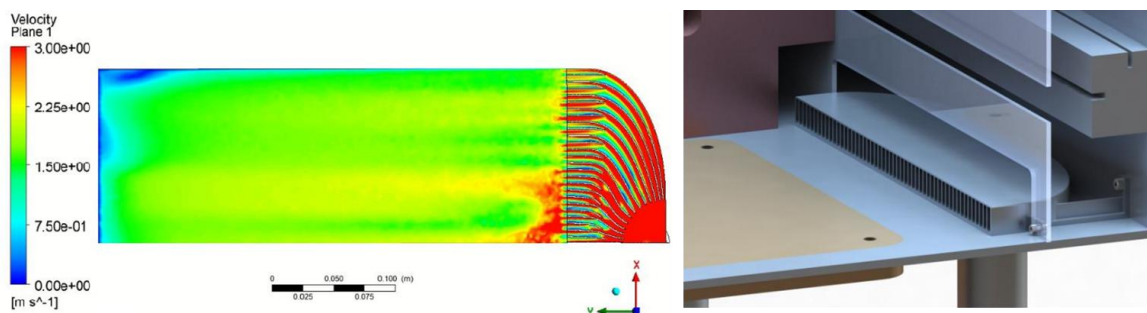
Obrázek 2-34 Vnitřní geometrie originálních distributorů zařízení SLM280 HL [31]

Simulace zmíněné originální konfigurace vykazuje špatnou schopnost tvorby homogenního proudu inertní atmosféry nad práškovým lóže i přes silně komplexní geometrii distributorů. Na obrázku 2-35 lze dokonce pozorovat, že se maximální hodnoty rychlostního pole nacházejí na krajích distributorů a vysoce podstatná plocha uprostřed vykazuje znatelný pokles rychlosti neboli přesný opak částečně optimálního řešení z předem zmíněných publikací.



Obrázek 2-35 CFD simulace originální konfigurace SLM280 HL [31]

Optimálního rozložení rychlostního pole plynu, proudícího hlavním distributorem vpusti, se podařilo dosáhnout až 21. iterací distributoru s komplexními geometriemi vnitřních lamel. Během návrhu byl identifikován extrémní nedostatek zástavbového prostoru a distributor musel nakonec částečně zasahovat i do vnitřního pracovního prostoru komory, viz. obrázek 2-36. Z výsledků simulací lze vyvodit hypotézu, že hlavním důvodem problematické tvorby homogenního rychlostního pole je orientace přívodu plynu do spodního distributoru.



Obrázek 2-36 Optimalizovaná geometrie distributoru z publikace [31]

Optimalizovaná geometrie distributoru vykazala významné zvýšení rovnoměrnosti rychlostního pole a posun extrémů z krajů distributoru na jeho střední část, avšak na úkor poklesu rychlosti na krajích a poměrně rychlým poklesem rychlosti po vstupu do otevřeného prostoru tiskového prostoru. Jak plyne z předchozích publikací, optimální rychlost proudu plynu musí být vyšší než $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro alespoň částečné odstranění odletujících částic. Uvedené provedení toto kritérium na většině plochy tiskové podložky splňuje jen částečně. Okrajová podmínka vstupní rychlosti proudu do potrubí byla v tomto případě nastavena na $6,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rovnoměrnost rychlostního pole je často vyjadřována pomocí FUI (Flow Uniformity Index). Vzorec pro FUI porovnává průměrné rychlosti jednotlivých segmentů s průměrnou rychlostí celé vyhodnocované oblasti. Ve vztahu (1) je obecně zahrnuta i plocha jednotlivých segmentů, kdy větší segmenty mají při hodnocení větší vliv na výslednou hodnotu, avšak pokud mají všechny segmenty stejný rozměr, není nutné je ve výpočtu uvádět.

$$FUI = \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \sum_{i=1}^n \frac{|w_i - \bar{w}|}{\bar{w}} \right) \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde: n – počet segmentů [-]

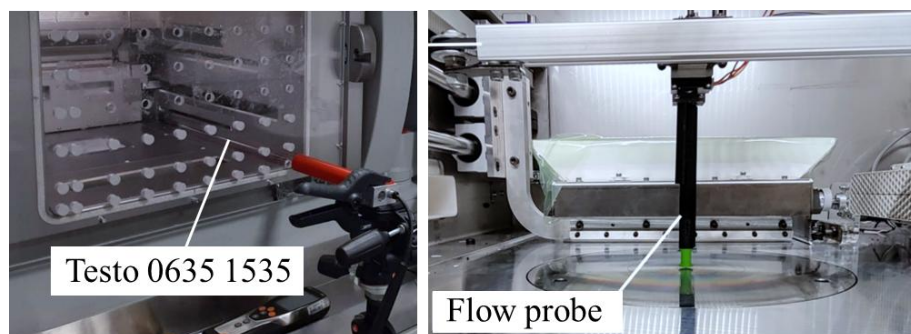
w_i – průměrné rychlosti napříč jednotlivými segmenty [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

w – průměrná rychlost napříč celou vyhodnocovanou oblastí [mm^2]

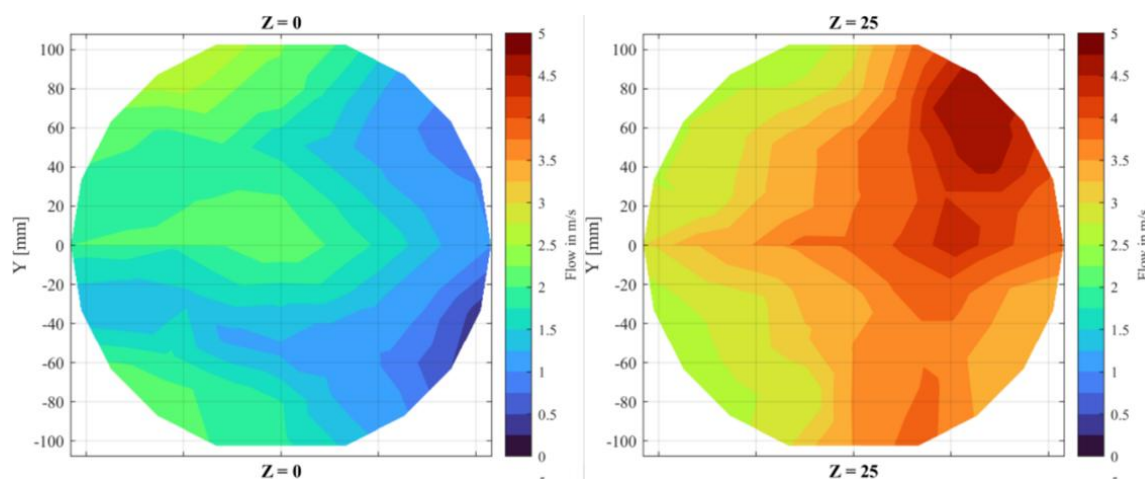
Z dostupných dat bylo možné určit přibližnou hodnotu rovnoměrnosti rychlostního pole optimalizovaného distributoru. Fluktuační průměrných rychlostí mezi jednotlivými segmenty se pohybovaly mezi $0,68$ až $1,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnota FUI se v takovém případě pohybuje mezi 95 a 97 %. Z obrázku simulace vtoku do pracovního prostoru na obrázku 2-36 je však patrné, že tato hodnota příliš neodpovídá výslednému postupnému vývoji proudu napříč pracovním prostorem.

Měření plošné rychlostní charakteristiky proudu inertoní atmosféry nad práškovým lóže a v jeho blízkosti lze provádět dvěma základními způsoby. Na obrázku 2-37 je zobrazeno polohování sondy z prostoru vně tiskového prostoru [31] skrze speciálně upravenou těsnicí desku s průchozími otvory, dále je uvedena pohyblivě uložená a ovládaná sonda uvnitř

samotného zařízení OpenLPBF v2 [18]. Výsledkem měření pomocí zmíněné sondy jsou mapy kontur, které se nejvíc přehledně zobrazují jako 2D mapy v konkrétní vzdálenosti od práškového lóže, viz. obrázek 2-38.



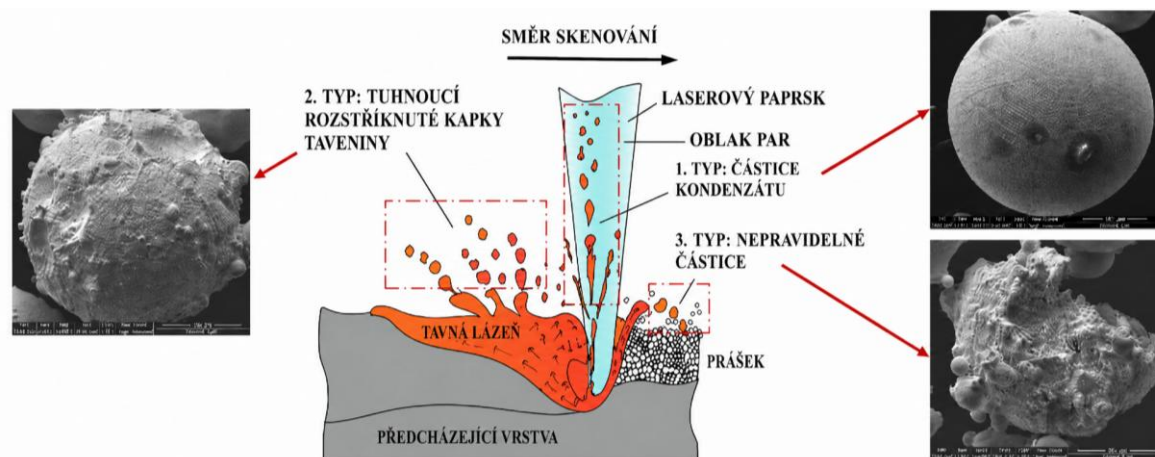
Obrázek 2-37 Sonda pro měření proudu I.A. originální konfigurace SLM280 HL vlevo [31]upraveno, sonda zařízení OpenLPBFv2 vpravo [1]upraveno



Obrázek 2-38 Mapy kontur získané měřením sondy OpenLPBFv2 [1]

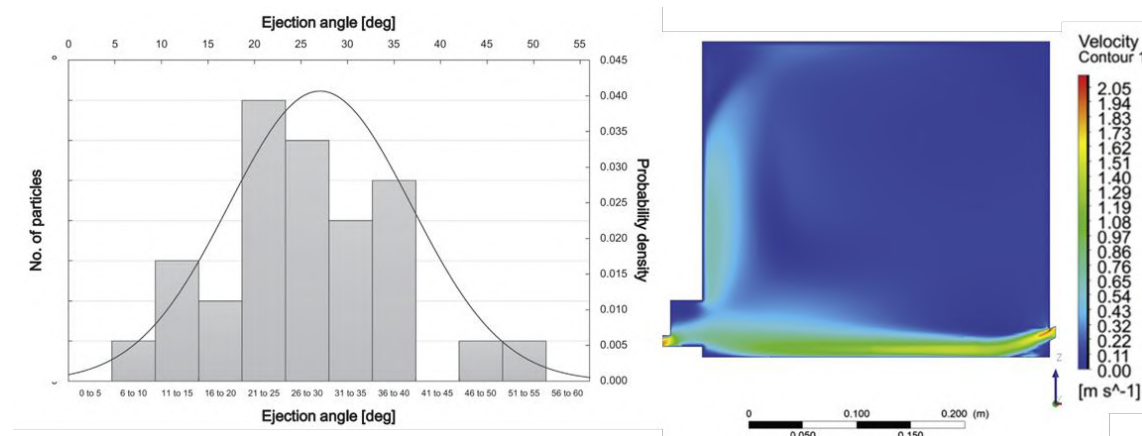
Odletující částice

Odvod spalin z pracovního prostoru technologie LPBF je jedním z nejlépe pozorovatelných jevů doprovázející proces LPBF. Odletující částice z tavné lázně mohou mít počáteční rychlost až $900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [15], avšak rychlost přesahující $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dosahují pouze na prvních $500 \mu\text{m}$ jejich trajektorie. Rychlosti odletujících částic mohou být taktéž na určitých místech shodné s rychlostmi proudu par, uvedených v kapitole 2.3.1. Na prvních třech milimetrech své trajektorie mají částice takovou rychlost, že je proud inertní atmosféry nemá šanci ovlivnit [15]. Odletující částice však nejsou jediným prvkem, který je nutné odvádět z pracovního prostoru, důležitý je i odvod samotného oblaku par tavné lázně. V případě, že lze laserový paprsek vidět pouhým okem, ve vyšší vzdálenosti nad tiskovou platformou, znamená to, že se v atmosféře nachází velmi malé cirkulující částičky prášku a kondenzát není dostatečně kvalitně odváděn do filtračního systému. Kvůli extrémní komplexnosti vzniku, vývoji a zániku oblaku par je téměř nemožné určit ideální parametry ochranného proudu inertní atmosféry [15].



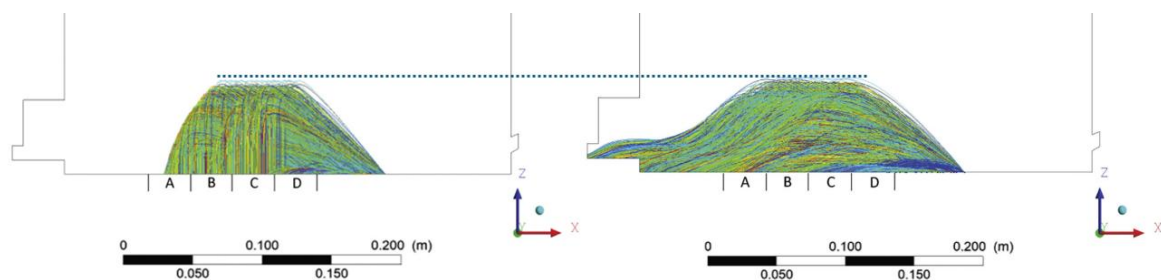
Obrázek 2-39 Druhy odletujících částic, Somora [31]upraveno

Směr a rozsah pohybu odletujících částic je uveden například v publikaci Anwara [32], z roku 2019, kde byly porovnány simulace s dřívějším experimentem. Částice vystřelují z oblasti tavné lázně s největší četností pod úhlem 20-30 ° vůči vertikální ose [32], viz. obrázek 2-40, přesné hodnoty jsou však silně ovlivněny procesními parametry.



Obrázek 2-40 Úhel trajektorie odletujících částic a numerická simulace komory [32]

Úhel a trajektorie částic je silně závislý na proudu inertní atmosféry, jehož úkolem je zabránit těmto částicím různého typu zabránit v opětovném dopadu na práškové lóže. V této publikaci byly taktéž porovnány simulace bez proudu inertní atmosféry a s proudem o rychlosti přibližně $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak již bylo předem zmíněno, tato rychlost spadá do kategorie pomalého proudění a na obrázku 2-41 lze vidět, že částice nejsou dostatečně odváděny a dopadají zpět na práškové lóže tiskové platformy. Trajektorie v tomto případě končily v rozmezí vzdáleností 150–200 mm od místa tavné lázně a maximální výška trajektorie není značně ovlivněna směřovaným proudem inertní atmosféry. Částice v obou případech vystřelovaly do výšky 50–70 mm od referenční roviny práškového lóže, v publikaci, se kterou jsou tyto hodnoty porovnávány, je uvedena hodnota přibližné maximální výšky trajektorie odletujících částic 67 mm od práškového lóže.



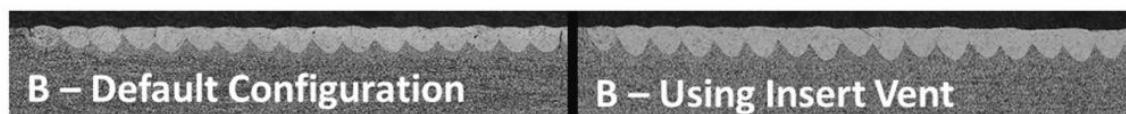
Obrázek 2-41 Odletující částice bez proudu inertní atmosféry vlevo, s proudem o rychlosti $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vpravo [32]

Většina výzkumných prací se proto soustředí na optimalizaci geometrie vtokového difuzéru, případně i jeho vertikální polohy a případným zvětšením počtu míst, kterými se do pracovní komory inertní atmosféra dopravuje [27].

Uvedená kapitola poskytuje podstatné informace pro budoucí iterace komplexnějších distributorů inertní atmosféry. Pro možnost porovnání bude v rámci návrhu zpracováno řešení s totožnou vertikální výstupní charakteristikou, jako geometricky optimalizovaný distributor na obrázku 2-36. Informace ohledně výšky odletujících částic však vybízejí na navýšení průtoku plynu vedením inertní atmosféry do distributoru a navýšení jeho výstupní plochy ve vertikálním směru. Díky této modifikaci je možné očekávat unášení částic proudem inertní atmosféry na větší části jejich trajektorie a tím i snížit množství částic dopadajících na práškové lože. Příklady rozměrnějších distributorů i z dalších publikací budou uvedeny i dále v kapitole o předběžném návrhu distributorů.

Následky neoptimálního ochranného proudu inertní atmosféry

Ve výčtu následků, které mohou v rámci výrobního procesu LPBF při nedostatečné kvalitě odvodu spalin nastat, je možné jako první uvést nedostatečnou hloubku vytavení předchozích vrstev [27]. V konkrétní publikaci je uveden pokles hloubky provaření s nerovnoměrným prouděním nad daným místem tiskové platformy až o 23 %. Tímto způsobem mohou být silně ovlivněny vlastnosti konečných součástí.



Obrázek 2-42 Vliv kvality odvodu spalin na hloubku provaření [27]

Mezi další následky lze uvést zvýšenou porozitu, kterou se taktéž podrobně zabýval ve své práci Ing. Somora [31] a nekonzistentní hustotu struktur součástí. Částice dopadající na práškové lože, obrázek 2-26e, přináší riziko poškození nanášecího mechanismu a dále špatně optimalizovaná cirkulace atmosféry uvnitř celého pracovního prostoru, zobrazeno na obr. 2-35 a 2-40, přináší riziko kontaminace průhledových čoček energetického modulu.

2.3 Pokročilé pozorování výrobního procesu LPBF

Z výčtu jevů, vznikajících během výrobního procesu technologie LPBF, v předchozí kapitole, je patrná širší problematika a samotný popis, společně s doprovodnými informacemi, není pro návrh experimentálního zařízení dostačující. Pokud má být návrh využitelný pro experimentální a vývojové účely, musí být současně alespoň rámcově stanoveno jakým způsobem je možné získávat informace o probíhajících dějích.

Zařízení SLM280 HL je z hlediska vizuální a virtuální kontroly základní, až podprůměrné. Integrovaná náhledová kamera ve vrchní části zařízení umožňuje pořizovat pouze doprovodné snímky o nižší kvalitě, které zobrazují stav výroby, případně zdali nedošlo k selhání stavby. Druhá kamera, využívající kombinaci snímků, nasvícených z různých směrů, pro rekonstrukci podoby detailní nanesené vrstvy, či vytavené vrstvy není univerzální. Dále je zařízení opatřeno jediným, avšak poměrně velkým, průzorem na přístupných dveřích stroje, který se používá pro vizuální kontrolu, či omezenou dokumentaci nezávislými aparáty. Z hlediska konstrukce je důležité zmínit, že napříč většinou zařízení technologie LPBF jsou v základních konfiguracích prvky sensoriky umístěné výhradně na stropnici komory a tradičně obklopují energetický modul, jehož poloha je vůči středu tiskové platformy daná. Na následujícím obrázku 2-43 je zobrazená podoba sensorické soustavy SLM280 HL.

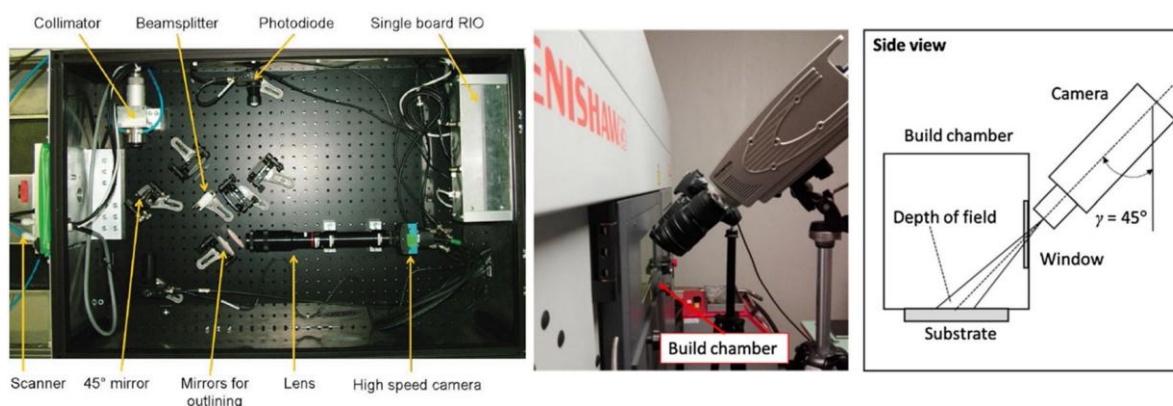


Obrázek 2-43 Sensorická soustava na stropnici zařízení SLM280 HL

Zbytek této kapitoly bude pojednávat o základních typech pozorovacích aparátů, jejich účelu a typickém umístění vůči tiskové platformě. Cílem zde není vybírat konkrétní modely pozorovacích aparátů, ani se zabývat následným zpracováním dat a vyhodnocování. V rámci této práce bude problematika řešena do úrovně mechanických rozhraní a polohy v prostoru.

Na začátek je nutné rozlišit dvě kategorie monitorování výrobního procesu, a sice pozorování v ose laserového paprsku (koaxiálně) a mimo osu, pod určitým úhlem vůči tiskové platformě.

Koaxiální systémy využívají optickou dráhu shodnou s osou laserového paprsku a zpracovávají zpětně odražené záření prostřednictvím polopropustného zrcadla skenovací hlavy, viz. obrázek 2-2. Tímto způsobem je například možné pozorovat tavnou lázeň s minimálním perspektivním zkreslením [33]. Největší komplikace nastávají při náročné integraci do optického řetězce stroje, pokud je daná skenovací hlava neumožňuje jako jednu ze základních funkcí. Off-axis je uživatelsky dostupnější varianta pozorování téměř všech procesů výroby, protože lze využívat i obyčejné průzory v plášti komory. Nastává zde však k prostorovému zkreslení způsobeného úhlem pohledu, osvětlením a problémům s rozlišením [34].



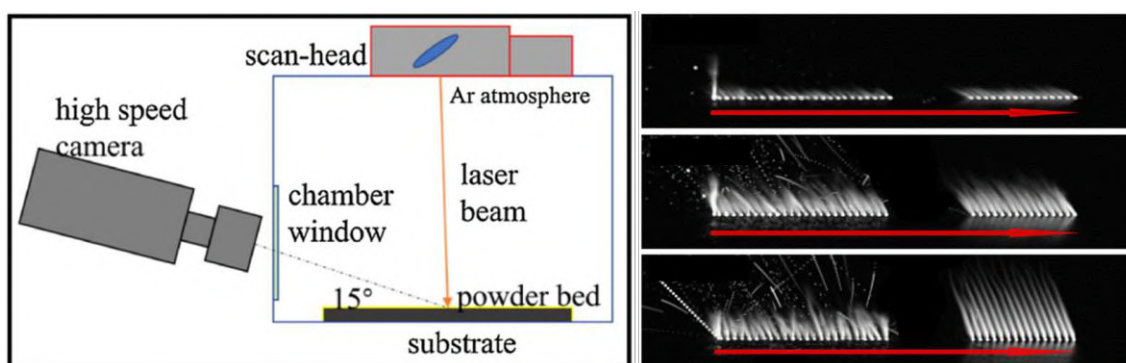
Obrázek 2-44 Vlevo fyzický příklad koaxiální konfigurace, vpravo pozorování práškového lože pod úhlem [35]

2.3.1 Základní typy pozorovacích aparátů

Příklady zařízení s pokročilými pozorovacími systémy byly zmíněny již v předešlých kapitolách. Zařízení na obrázku 2-11 obsahovalo trojici kamer, kde každá zastává svoji funkci, obrázek 2-14 zobrazuje pro změnu zařízení, kde byl kladen důraz na komplexní koaxiální systém. Přestože sensorika nebude v této práci zpracována v celém rozsahu, je vhodné rámcově určit, k čemu jsou jednotlivé typy pozorovacích aparátů vhodné a v jakých základních konfiguracích bývají vůči pracovní komoře umístěny. Publikace se obvykle nerozdělují pozorování například podle typu použitých kamer, ale podle sledovaných procesních jevů, například rozměrů tavné lázně, přehřívání, chladnutí, rozstříku, deformací nebo vad práškového lože [3]. Za základní typy lze považovat vysokorychlostní kamery, kamery s vysokým rozlišením, termokamery a dodatečné prvky.

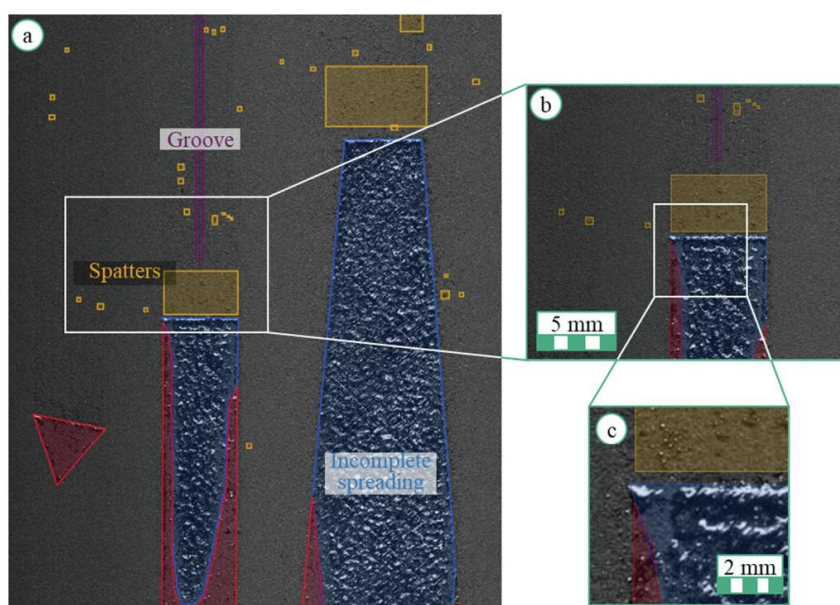
Vysokorychlostní kamery jsou vhodné především pro sledování rychlých dějů v okolí tavné lázně. Mezi pozorovatelné jevy patří zejména nestabilita tavení, vývoj oblaku par a odletující částice, které běžná inspekční kamera kvůli nízké snímací frekvenci zachytit nedokáže. V koaxiálním uspořádání mohou být použity pro sledování polohy, intenzity, velikosti a tvaru tavné lázně, zatímco pro sledování rozstříku částic nad tiskovou platformou jsou vhodnější v uspořádání pod úhlem [2]. Typické hodnoty snímání se mohou pohybovat v řádu tisíců až

desítek tisíc snímků za sekundu, avšak vždy za cenu omezeného rozlišení a malého zorného pole.



Obrázek 2-45 Konfigurace a příklad pořízených snímků proudů par a odletujících částic pomocí vysokorychlostní kamery [2]

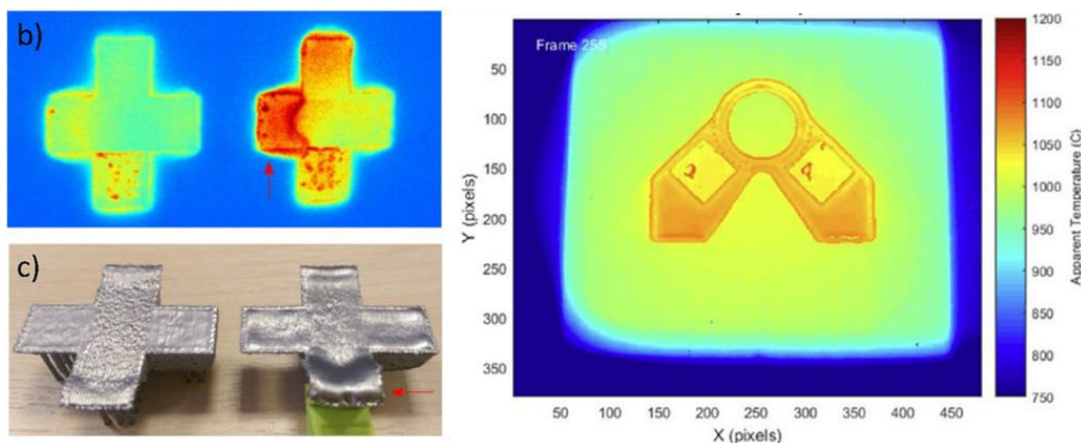
Kamery s vysokým rozlišením zastávají klíčovou roli při kontrole kvality jednotlivých vrstev na práškovém loži, ať čerstvě rozprostřených, či po vytavení. Používají se zpravidla v konfiguraci pod úhlem, nejčastěji přes průzor ve stropní nebo boční části komory [3] [9]. Ve srovnání s vysokorychlostními kamerami jsou jednodušší na integraci i datový záznam, ale jejich kvalita je silně závislá na osvětlení. Fisher [9] ve své publikaci v roce 2022 zobrazuje vyhodnocování stavu práškového lóže, přičemž na obrázku 2-46 lze pozorovat identifikované jevy z teoretické kapitoly 2.3.2, obrázek 2-26.



Obrázek 2-46 Identifikované vady práškového lóže na snímcích z kamery s vysokým rozlišením [9]

V některých publikacích bylo proto kromě samotné kamery řešeno také polarizované osvětlení, které zlepšuje kontrast mezi práškovým ložem a vytavenou trajektorií vyráběné součásti [37].

Infračervené a termografické kamery doplňují informace, související s tepelným stavem procesu. Podle spektrální oblasti se používají systémy SWIR (Short-wave-), MWIR (Medium-wave-) nebo LWIR (Long-wave-infra-red), přičemž jejich volba závisí na požadovaném rozsahu teplot a rychlosti snímání [3]. V realitě se SWIR záření podobá zpětně odraženému záření a vyžaduje žhavý objekt pro správnou funkci, pomocí MWIR a LWIR lze lépe snímat tepelné vyzařování. Pomocí termokamer lze sledovat tavnou lázeň, chladnutí vrstev, akumulaci tepla, přehřívání a mnoho dalšího [3].



Obrázek 2-47 Příklad snímků chladnutí pomocí infračervené kamery [38]

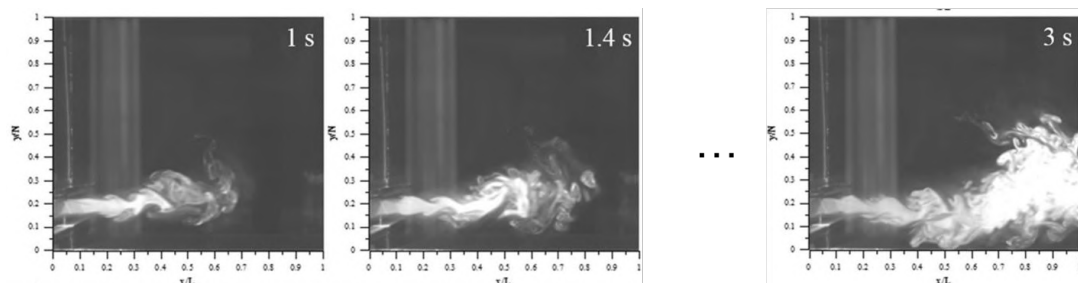
Z hlediska integrace mají podobné požadavky jako ostatní kamery, ale navíc je nutno brát zvýšený důraz na správnou propustnost průzoru pro zvolenou infračervenou oblast, protože běžné sklo nemusí být pro všechny oblasti IR spektra vhodné.

Pyrometry, fotodiody a další bodové radiační senzory lze chápat jako ryze doplňkové prvky. Neposkytují plnohodnotný obraz pracovní oblasti, ale mohou zaznamenávat velmi rychlou změnu intenzity záření nebo konkrétní signál z omezeného místa. Nevýhodou je u těchto prvků omezená prostorová informace, protože bez doplňující optiky není zřejmé, jak je signál rozložen po ploše tavné lázně nebo celého lóže [3].

2.3.2 Vizualizace proudění inertní atmosféry

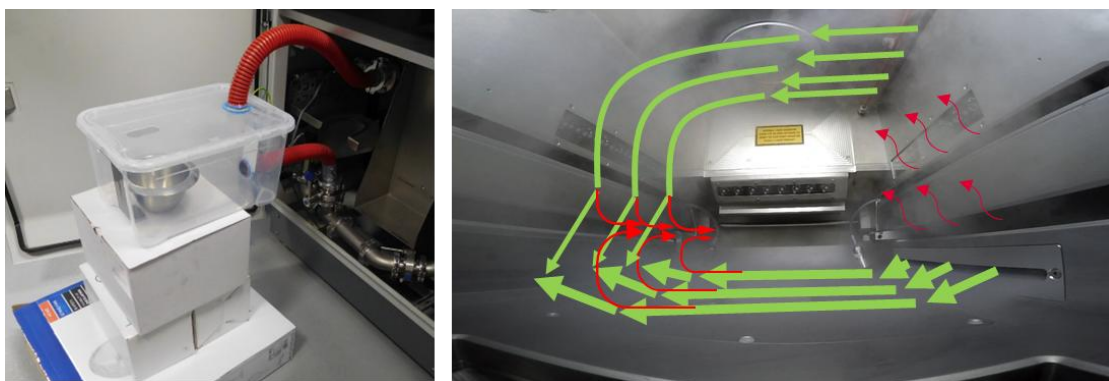
Na rozdíl od předchozí kapitoly bude tato zaměřena na pozorování konkrétního jevu a jeho vizualizace. Proudění ochranného plynu rozhoduje o odvodu kovových par, kondenzátu, rozstřiku a odletujících částic pryč z prostoru nad tiskovou platformou a nabízí se možnost částečného vizuálního vyhodnocení. Existují však způsoby, jak tyto jevy zvýraznit, například pomocí kouřové vizualizace, schlieren metody nebo bodového měření rychlosti. Obecně se jedná o cílené vizualizace proudových polí, které umožňují určit, zda nevznikají například oblasti se zápornou rychlostí nebo cirkulace mezi tiskovou platformou a energetickým modulem.

Jeden z jednodušších způsobů je kouřová vizualizace, v publikaci [28] byla využita pro validaci simulací a posouzení rovnoměrnosti proudění ve zjednodušeném modelu komory. Tato metoda je z konstrukčního hlediska velmi přívětivá, ve zmíněné publikaci spočívala v pouhé integraci kouřového generátoru do jednoho z rozdělovacích prvků potrubí sestavy. Díky integraci bylo možné mimo samotných proudových polí zjistit také vývoj proudu plynu v čase po vstupu do prostoru komory, viz. obrázek 2-48.



Obrázek 2-48 Zobrazení vývoje proudu plynu v čase pomocí kouřové vizualizace [28]

Podobný experiment byl proveden na FSI v roce 2017 [39], který spočíval v integraci nádoby se suchým ledem. Obdobně jako předešlá publikace byla vizualizace použita pro validaci CFD numerických simulací, přičemž zde byly identifikovány i problémy spojené s integrací znečišťujícího prvku do průmyslového zařízení.



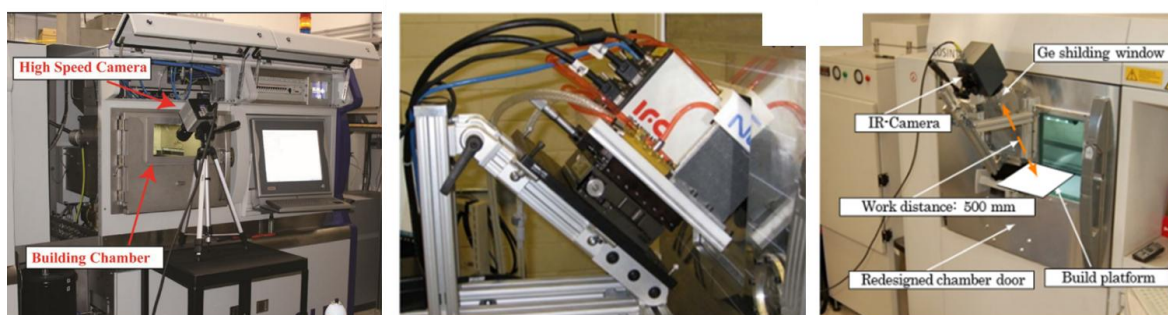
Obrázek 2-49 Vizualizace pomocí suchého ledu v rámci projektu FSI z roku 2017 [39]

Odlišnou skupinou jsou metody založené na zvýraznění pomocí změn indexu lomu, příkladem lze uvést „schlieren imaging“. Metodu lze přeložit jako šlírové zobrazení a je realizována pomocí kolimovaného světla napříč sledovanou oblastí a jeho následným částečným odstíněním clonou, umístěnou před vysokorychlostní monochromatickou kamerou [15]. V publikaci Bitharase [15] byla využita i k zobrazování vlivu směru pohybu laserového paprsku na trajektorie odletujících částic.

Ze zmíněných metod vyplývá důležitý požadavek pro konstrukci experimentální komory. Jestliže je jedním ze směrů vývoje i optimalizace proudu inertní atmosféry, musí být umožněno pozorování kolmo na směr proudění a ideálně ve stejné výšce od práškového lóže jako distributory pro minimalizaci vlivu prostorového zkreslení.

2.3.3 Integrace pozorovací techniky

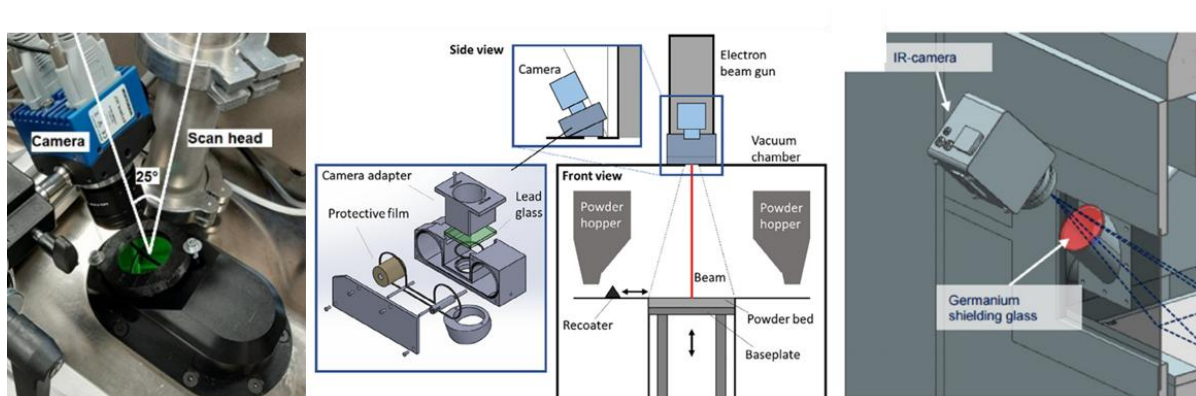
U většiny zařízení je experimentální pozorování procesu realizováno především přes hlavní, a často jediný, inspekční průzor tiskové komory. Pozorovací aparáty jsou v takovém případě umístěny vně komory, nejčastěji na samostatně stojícím stojanu, nebo pomocném rámu, viz. obrázek 2-50. V publikacích lze často pozorovat odlišná uspořádání, kde není konzistentní úhel osy pozorovacího aparátu vůči tiskové platformě, která záleží na možnostech konkrétních zařízení a dostupném prostoru. U těchto experimentů je nejproblematictější jejich opakovatelnost. Opakovatelně přesné poloha ustavení pozorovacího aparátu a zařízení je bez připojení přes mechanické rozhraní v okolí průzoru zařízení téměř nedosažitelná. Existují případy, kdy zařízení tato mechanická rozhraní obsahují, ale rozhodně nejsou u průmyslových zařízení standardem.



Obrázek 2-50 Příklady samostatně stojících aparátů před hlavním průzorem a vpravo ojedinělý případ mechanického rozhraní pro připojení kamery na zařízení [35] [40]

Odlišná situace nastává u koaxiálních systémů, sledující proces pomocí optické cesty energetického modulu. Tyto konfigurace nejsou sice omezené polohou průzorů, avšak jejich integrace vyžaduje násobně větší zástavbový prostor v okolí energetického modulu na stropnici zařízení. V případě integrace tohoto způsobu pozorování je obecně možné tvrdit, že bude zapotřebí zástavbový prostor celé vrchní plochy zařízení. V rámci návrhu experimentální komory tak bude vhodné všechny prvky, které přítomnost na zmíněném místě nevyžadují, umístit na ostatní plochy zařízení. Příklad koaxiálního systému je zobrazen na obrázku 2-44.

Pokud není pro experiment možné, či vhodné, využít stávající průzory zařízení, nebo koaxiální optickou cestu, zůstávají v zásadě dvě možnosti integrace pozorovací aparatury. První možností je tvorba individuálních průzorů, u kterých byl v publikacích identifikovaný trend umístění průzorového skla kolmo k ose pozorování, viz. obrázek 2-51. Tímto řešením se redukuje geometrické zkreslení obrazu a nežádoucí odrazy při průchodu průzorem. Pro metody, u kterých je následně vyhodnocován tvar, či poloha je tento způsob integrace výhodný.



Obrázek 2-51 Příklady implementovaných průzorů [23] [41] [42]

Druhou možností je integrace pozorovacího aparátu, či komplexního modulu, přímo do vnitřního pracovního prostoru komory. Tato varianta umožňuje částečně eliminovat prostorové zkreslení a problémy s nízkým rozlišením. Velkou nevýhodou tohoto způsobu integrace je však přímé vystavení procesního prostředí s vířícími částicemi prášku, kondenzátem, zvýšenými teplotami a inertní atmosférou. Moduly proto musí být buď dostatečně chráněné, nebo se používají ve fázích výroby, kdy tyto provozní podmínky nejsou přítomné, například přerušení stavby, vložení modulu, pořízení snímků a následné vyjmutí modulu před pokračováním procesu výroby. Dále musí být moduly umístěné tak, aby, v případě měření za chodu, fyzicky nezasahovaly do dráhy nanášecího mechanismu a nebránily v průchodu laserovému paprsku nad tiskovou platformou. V literatuře byly identifikovány příklady těchto modulů jako například integrace fotoaparátu [24] pro získání snímků práškového lóže před a po vytavení laserovým paprskem (obrázek 2-52 vlevo). Dále komplexní modul obsahující různé druhy osvětlení, také pro pořizování snímků práškového lóže (obrázek 2-52 vpravo).



Obrázek 2-52 Příklady modulů integrovaných do pracovního prostoru komory [9][24]

Implementace pozorovací techniky není pouze otázkou výběru aparátu, ale taktéž umožnění její integrace do zařízení. Pro návrh experimentálního zařízení je tak vhodné uvažovat s více optickými drahami, jak na vrchní stěně zařízení, tak v úrovni práškového lóže. Důležité je, aby komora byla připravena na širší rozsah pozorovacích metod.

2.4 Shrnutí současného stavu poznání

V předchozích kapitolách rešerše byly postupně vysvětlen princip a jednotlivé subsystémy zařízení technologie LPBF, rozdily mezi jednotlivými typy zařízení a konfigurací, včetně doprovodných jevů. Zmíněné oblasti spolu úzce souvisí, jelikož tisková komora není pouze ochranný kryt zařízení, nýbrž komplexní konstrukční celek, který tvoří platformu pro propojení všech prvků zařízení.

Z dostupných příkladů je zřejmé, že experimentální zařízení mají význam zejména v případech, kdy běžná komerční zařízení neumožňují integraci objemnějších subsystémů, ani zásah do konstrukce [14] [15][16]. Jednoúčelové aparatury poskytují vysokou volnost konstrukčních úprav, ale často za cenu silně zmenšené pracovní oblasti a zaměření na jeden konkrétní pozorovaný jev. Z komplexních výzkumných platforem [17] [18] vyplývá, že není zcela vhodné duplikovat průmyslové zařízení pro vlastní účely, je nutné zahrnout vysokou míru modularity

Možnost úprav a modularity se vysoce projevuje v prostoru kolem tiskové platformy. Multi-materiálová výroba sice nutně nevyžaduje zcela odlišné zásobníky prášku, které by navzájem nebyly kompatibilní, ale silně mění princip výroby. Je proto nutné počítat s objemnějším nanášecím systémem, který vyžaduje nábytek zástavbového prostoru ve všech směrech. Tisková platforma sice nevyžaduje modifikace ohledem multi-materiálové výroby, ale jedná se o jeden ze tří naprosto klíčových prvků zařízení, které mohou časem procházet modifikacemi. Vývoj platformy směrem zvýšené teploty výhřevu [13] není jediná modifikace, která může nastat. Do platformy mohou být nutné implementovat různé senzory nebo redukční prvky, proto je nutné brát v potaz modularitu i základních prvků.

Současně platí i částečně opačný požadavek, nejen že musí být komora dostatečně upravitelná, ale vnitřní prostor nesmí být zbytečně členitý. Práce a častá změna napříč různými materiály zvyšuje riziko vzájemné kontaminace a každý nedosažitelný záběh, dutina, či kapsa se může stát místem, kde zbude zachycený prášek z posledního experimentu. Z tohoto důvodu je nutné, aby byly prvky jako pohony a doprovodné rozvody odstíněny od hlavního pracovního prostoru. V rešerši byla identifikována řada zařízení, která tento problém zcela ignorovala [5][15] [16].

Systému dopravy inertní atmosféry je v této závěrečné práci věnována zvýšená pozornost. Rešerše prokázala, že proudění inertní atmosféry nad tiskovou platformou přímo ovlivňuje efektivitu odvodu kovových par, kondenzátu a odletujících částic a brání výrobek před kontaminací [1] [27]. Umístění hlavních přívodů, společně s počtem a geometrií distributorů jsou proto důležité konstrukční parametry, nikoliv pouhé doprovodné subsystémy.

Z hlediska sensoriky je nejpodstatnější vrchní část komory. Energetický modul má pevně danou polohu nad pracovní rovinou vzájemná tuhost se zbytkem konstrukce je z hlediska opakovatelnosti kritická. Pokud by byla tato plocha komory zaplněna prvky, které mohou

být umístěny na odlišných částech zařízení, například vývody kabeláže, či přídavné distributory inertní atmosféry, výrazně by se tam omezila možnost budoucího rozšíření pozorovací soustavy. Z hlediska komplexnosti problematiky, kterou řešerše naznačila, tak bude vhodné brát horní část komory jako zcela samostatnou, odnímatelnou část, která bude konstrukčně zpracována až v následujících fázích vývoje zařízení.

Z řešerše nevychází jedna konkrétní nejvhodnější geometrie komory, vše totiž částečně záleží i na dostupných subsystémech a ekonomických zdrojích. Lze však tvrdit, že řešerše poskytuje vhodný základ pro stanovení umístění a rozměrových nároků jednotlivých subsystémů, společně s vysokým množstvím inspirace o umístění mechanických rozhraní pro napojení nejrozličnějších prvků.

2.5 Identifikace novosti a příležitostí

V provedené řešerši je patrné, že vývoj aditivních technologií v oblasti LPBF vykazuje vzestup snahy o výrobu multi-materiálových rozhraní a součástí. Současně však neexistuje univerzální přístup, ani dostupné kompletní zařízení, které by splňovalo veškeré požadavky vývoje multi-materiálových subsystémů a mělo dostatečnou úroveň modularity. Dostupné systémy plošného nanášení s přídavným odsáváním mají odlišné nároky na zástavbový prostor a umístění vývodů z pracovního prostoru.

Z tohoto důvodu se jako hlavní příležitost jeví návrh komory, která umožní postupné validování různých nových subsystémů, jejichž vývoj nebude svojí geometrií silně omezovat. S tímto přímo souvisí i pokročilejší systém proudění inertní atmosféry, jehož výstupy do pracovního prostoru je potřebné přesně definovat a ovládat, navíc s vyšší úrovní modularity než stávající zařízení. Aby byl vnitřní prostor využit efektivně, nabízí se rozdělení distributorů na více částí, přičemž nábytek dráhy pro ustálení proudu může pokračovat i vně zařízení.

Stejný princip platí také pro pozorování procesů. Zvýšení počtu vhodně umístěných průzorů by umožnilo nejen sledování samotného výrobního procesu, ale i analýzu proudění nad tiskovou platformou. Dodatečná přítomnost mechanických rozhraní pro vnější připojení pozorovací techniky by zároveň zlepšila opakovatelnost experimentů z hlediska polohy aparatury vůči práškovému lóže.

Navrhovaná komora proto nespočívá ve zcela odlišném přístupu rozmístění subsystémů, ale ve splnění nejdůležitějších požadavků na funkčnost, společně s možností implementace nových vyvíjených prvků.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Vymezení problému

Technologie LPBF, označovaná také jako SLM, se dnes řadí mezi klíčové metody aditivní výroby kovových materiálů. Disponuje širokou variabilitou dostupných materiálů, vysokou flexibilitou kontroly procesu výroby i možností výroby tvarově složitých dílů. Průmyslová zařízení jsou proto obvykle navrhována jako uzavřené systémy, u kterých je hlavním cílem stabilita výrobního procesu, bezpečnost a spolehlivost. Takové řešení je vhodné pro běžnou výrobu, ale stává se silně omezujícím v okamžiku, kdy má zařízení být využito k vývojovým a experimentálním účelům, ať už hlediska omezené modularity, či možnosti širší inspekce pracovního prostoru.

Hlavní problém spočívá v tom, že komerční zařízení nejsou uzpůsobena pro zásah do konstrukce ze strany uživatele. Poloha základních subsystémů, jako je energetický modul, tisková platforma a zásobník z vývojového hlediska omezující není, avšak trajektorie dopravy inertní atmosféry napříč zařízením, četnost mechanických rozhraní, vývodů a průzorů již ano.

Tento problém se projevuje zejména při vývoji systémů umožňujících multi-materiálovou výrobu. Přidání více druhů materiálů lze realizovat rozšířením, či modifikací vnitřní části stávajícího zásobníku, avšak různé principy nanášení vyžadují větší zástavbový prostor a přítomnost prvků, se kterými standardní konfigurace průmyslových zařízení vůbec nepočítala. Pokud je zařízení navrženo pro standardní výrobní proces z jediného druhu materiálu, tyto systémy lze implementovat velmi omezeně a je zde vysoce snížena volnost v návrhu jejich konstrukce.

Současně je nutné zohlednit, že požadavek na vysokou míru modularity nesmí vést k obtížně udržitelnému pracovnímu prostoru. Právě v tomto ohledu mají ověřené průmyslové koncepce výraznou výhodu. Návrh musí shledat kompromis mezi dostatečnou prostorovou rezervou pro budoucí vyvíjené subsystémy a co geometricky nejjednodušší geometrií vnitřního prostoru komory, ve kterém probíhá samotný výrobní proces. Stejně tak nelze odsunout do pozadí ani systém rozvodu inertní atmosféry do pracovního prostoru a pozorování výrobního procesu. Ochranný inertní plyn neslouží pouze k tvorbě chemicky nereaktivního prostředí, ale přímo ovlivňuje kvalitu výrobku odvodem kovových par, kondenzátu a odletujících částic z oblasti nad tiskovou platformou. Pokud má být navíc proudění v budoucnu optimalizováno a validováno, musí komora umožňovat dostatečnou volnost návrhu geometrií distributorů a poskytovat dostatek vhodně umístěných průzorů pro sledování dějů.

Celkově se ukazuje, že problém není v samotné technologii, ale v přístupu ke konstrukci zařízení. Experimentální zařízení je nutné pojmut jako modulární upravitelnou platformu, na kterou bude možné budovat a navazovat, nikoliv jako uzavřený produkt. Toto je hlavní důvod, proč inspirace průmyslovými zařízeními může být z velké části pouze na koncepční úrovni.

Tab. 3-1 Seznam charakteristik (C – cíle, O – omezení, F – funkce, Z – způsoby)

Charakteristika	C	O	F	Z
Vytvořit základní platformu experimentálního LPBF zařízení	■			
Umožnit integraci systémů pro multi-materiálový tisk	■		■	
Zajistit stabilní proudění inertní atmosféry v pracovním prostoru	■		■	
Umožnit výměnu a úpravu vybraných subsystémů	■		■	
Zajisti dostatečný vnitřní zástavbový prostor	■	■		
Vyrobitelnost jednotlivých dílů konstrukce i subsystémů	■	■		
Připravit rozhraní pro pokročilé pozorování	■		■	
Zajistit dostatečný počet ploch pro průzory a průchodky	■		■	
Umožnit výměnu a úpravu distributorů inertní atmosféry			■	■
Minimalizovat množství ploch pro usazování prášku	■	■		
Zabezpečit možnost čištění celého vnitřního prostoru komory	■	■	■	
Zajistit základní provozní bezpečnost při práci s komorou		■		
Umožnit užití obou uvažovaných inertních plynů (Ar, N ₂)		■	■	
Odolnost vůči zvýšené provozní teplotě v pracovním prostoru		■		
Zajistit tuhost konstrukce pro přesné polohování nanášече	■	■	■	

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh experimentální komory pro multi-materiálovou aditivní výrobu na principu technologie LPBF. Komora má sloužit jako základní platforma pro integraci vybraných existujících i nově vyvíjených subsystémů, hlavně redukčního rámečku tiskové platformy zařízení SLM280 HL, nanášecího mechanismu a prvků systému proudění inertní atmosféry. Návrh nemá představovat pouze uzavřený pracovní prostor, nýbrž modulární konstrukční celek umožňující budoucí vývoj zařízení.

Vyvíjená experimentální komora by měla splňovat následující parametry:

- Umožnit vytvoření stabilního prostředí s ochrannou inertní atmosférou
- Disponovat dostatečným zástavbovým prostorem pro vyvíjené subsystémy
- Umožnit implementaci navrhovaného multi-materiálového i stávajícího nanášече
- Zajistit optimální proudění inertní atmosféry
- Zajistit možnost budoucí implementace pokročilé senzoriky

Dílkými cíli diplomové práce jsou:

- Identifikovat konstrukční koncepce současných a experimentálních LPBF zařízení
- Stanovit hlavní funkční požadavky a konstrukční omezení
- Navrhnout koncepční varianty řešení komory
- Zpracovat detailní konstrukční návrh zvolené koncepce s využitím dostupných, či předpokládaných komponent
- Navrhnout rozhraní pro integraci multi-materiálového nanášecího systému a jeho podpůrných subsystémů
- Navrhnout systém vedení inertní atmosféry, včetně možnosti výměny nebo úprav distributorů
- Ověřit funkci vybraných klíčových komponent

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Kapitola se bude zabývat převodem poznatků z řešeršní části do konkrétních požadavků pro tvorbu koncepčních variant vyvíjené experimentální komory. V první části budou blíže rozvedeny cíle práce a vyplývající konstrukční omezení. Dále jsou požadavky jako modularita, vedení inertní atmosféry a integrace subsystémů vztaženy k předpokládanému uspořádání. Výsledkem je soubor návrhových kritérií, podle kterých budou následně koncepční varianty posouzeny. Zvolená vhodná koncepce bude následně rozpracována až do detailního návrhu.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Identifikace konstrukčních možností experimentální komory

Průmyslová zařízení LPBF nejsou primárně určena pro experimentální zásahy do konstrukce, ani častou výměnu subsystémů. V koncepční fázi návrhu mohou však sloužit jako vhodná inspirace v kontextu vzájemného umístění hlavních konstrukčních celků. Experimentální zařízení hrála klíčovou roli v identifikaci odlišných přístupů ke konstrukci oproti konzervativním průmyslovým provedením, zejména větší přístupnosti pracovního prostoru a orientace pozorovacích prvků.

Základní funkce komory

Primární funkcí komory je vytvořit uzavřený pracovní prostor, ve kterém bude možné realizovat plnohodnotný proces LPBF, za přítomnosti ochranné inertní atmosféry. Komora proto musí zajistit dostatečnou těsnost, tuhost a rozmístění hlavních konstrukčních prvků. Dále musí být připravena na nově vyvíjené subsystémy a obsahovat dostatečný počet rozhraní pro senzoriku a přívod inertní atmosféry.

Integrace subsystémů

Návrh komory musí počítat již v koncepční fázi s převzetím vybraných prvků zařízení SLM280 HL, zejména redukčního rámečku a platformy s pokročilým vyhříváním, stejně tak jako klasického nanášeče, ze kterého mutli-materiálový nanášeč vychází a sdílí s ním napojovací rozhraní. Současně v okolí nanášeče musí zůstat dostatečný zástavbový prostor pro doplňkové systémy. Mezi další předem uvažované prvky patří lineární aktuátory pro pohyb nanášeče a tiskové platformy. Konkrétní aktuátory byly dostupné již před zahájením návrhu a je vhodné je do konstrukce zahrnout z hlediska výrazného snížení finálních nákladů. Integrace však musí být podložena jejich ověřením z hlediska únosnosti a přesnosti polohování. Senzorika nebude v této fázi brána jako samostatný celek, ale pouze z hlediska

implementace vytipovaného energetického modulu a zachování dostatečného množství ploch pro integraci potřebných rozhraní a průzorů. Kvůli násobně vyšší pořizovací ceně prvků energetického modulu, ve srovnání se zbytkem subsystémů zařízení, vyžaduje jejich výběr realizaci výběrového řízení. Nelze proto s jistotou definovat, jaký modul bude do zařízení implementován, ani jaké bude mít připojovací rozměry a zástavbový prostor.

Systém proudění inertní atmosféry

V koncepční fázi nebude řešen kompletní systém cirkulace inertní atmosféry, protože jeho hlavní části, jako filtrační prvky, recirkulační dmýchadlo a většina vedení se nacházejí vně komory. Pro návrh komory jsou podstatné jen maximální rozměry, počet a možnost umístění distributorů inertní atmosféry.

Výrobní a provozní omezení

Při tvorbě budoucího kompletního řešení musí být současně zohledněno, že komora nesmí být tvořena monolitickými a obtížně upravitelnými díly, jelikož by to bylo v rozporu s požadovanou vysokou mírou modularity. Nejvhodnější bude konstrukce z částí, které bude možné v budoucnu nahrazovat, či upravovat pro odlišný účel než který uvažovat počáteční návrh. Je však nutné uvažovat možné budoucí průzory, místa potřebných vývodů a otvory pro snímací prvky senzoriky.

Současně však modularita nesmí být dosažena na úkor tuhosti a přesnosti. Nosná část komory musí zajistit dostatečně stabilní uložení kritické tiskové platformy a vedení nanášече. Z tohoto důvodu nejsou vhodné svařované a převážně plechové konstrukce, které lze pozorovat u některých experimentálních i průmyslových zařízení. Vhodnější je využití deskových polotovarů a obrobění funkčních ploch. Provozní omezení se promítají hlavně do požadavku demontovatelnosti a těsnosti.

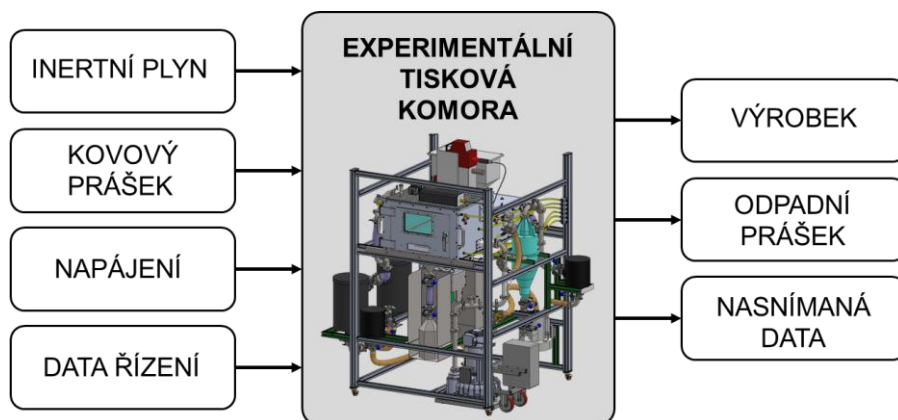
Samostatně je nutné uvažovat mechanická napojovací rozhraní systému inertní atmosféry. U některých zařízení, včetně SLM280 HL, bývají některé části potrubí navařeny přímo na konstrukci stěn komory, čímž je pevně definovaný směr navazujícího vedení. Pro experimentální a vývojové účely je vhodné identifikovat možnosti rozebíratelných napojovacích rozhraní, které umožní výměnu jak distributorů, tak veškerých prvků vedení. Toto řešení musí být zároveň kompatibilní s přejímaným filtračním systémem zařízení SLM280 HL.

Validace prvků inertní atmosféry

Pro zajištění stabilního a opakovatelného výrobního procesu je na počátku vývoje zařízení nejvhodnější zvolit a navrhnout první iterace geometrie distributorů vedení inertní atmosféry a ověřit je numerickými simulacemi. Odhalené nedostatky budou sloužit jako základ budoucích iterací. Výsledky budou zároveň sloužit pro porovnání se současnou původní konfigurací zařízení SLM280 HL.

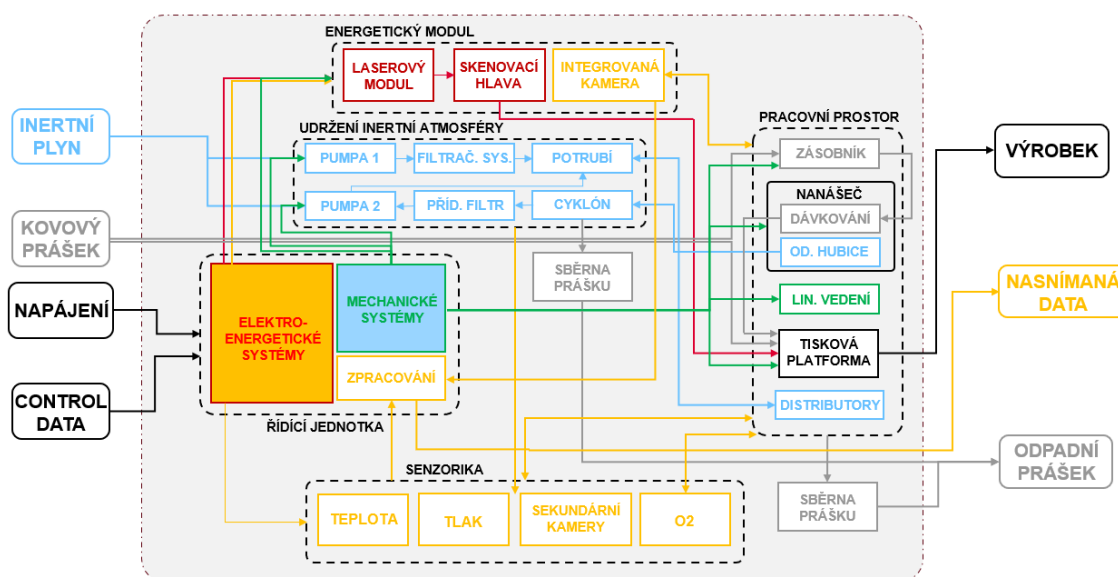
4.2 Technická funkční analýza

Funkční analýza slouží k znázornění jednotlivých subsystémů a chodu zařízení. Zařízení je posuzováno jako celek, v němž dochází k přenosu a transformaci energie, materiálu a instrukcí mezi jednotlivými subsystémy. Pro systematické vyjádření vazeb jsou obecně používány schémata „Black Box“ a „Glass Box“.



Obrázek 4-1 Black Box schéma

Black Box schéma slouží k základnímu funkčnímu popisu zařízení bez ohledu na vnitřní uspořádání konkrétních subsystémů. Tisková komora je v tomto případě brána jako funkční jednotka, která po přivedení elektrické energie transformuje vstupní materiál, ve formě kovového prášku, na komplexní kovovou součást. Mezi vstupy patří i ochranné provozní médium, jehož úkolem je při procesu tisku z výrobního prostoru odvádět odpařené a odletující produkty. Na výstupu ze systému se kromě zpracovaného materiálu objevuje i odpadní prášek. Součástí výstupů jsou však také procesní informace, které zpětně charakterizují průběh výrobního procesu. Získaná data mohou být jak ve formě senzorických, tak i obrazových výstupů.



Obrázek 4-2 Glass Box schéma

Pro detailnější rozbor jednotlivých procesů probíhajících uvnitř zařízení je následně využito schéma Glass Box, díky kterému lze znázornit konkrétní toky informací, energie a materiálů.

Hlavním vstupem do systému je stejně jako u všech komplexnějších zařízení elektrická energie ve formě napájení, distribuovaná do všech potřebných systémů. Tok materiálu je reprezentován manipulací s kovovým práškem. Prášek je dávkován ze zásobníku do pracovního prostoru, konkrétně do nanášedce, přes který se následně dostane až na samotnou tiskovou platformu. Zbytkový prášek je v průběhu procesu přesouván do sběren prášku, kde se z něho společně s práškem, odstraněným po skončení výrobního procesu z blízkosti vyrobené součásti, stává prášek odpadní. V rámci multi-materiálové výroby je nutné, aby nanášedce obsahoval ještě odsávací hubici, která kromě inertního plynu bude také odsávat i značné množství kovového prášku. Tento prvek tak teoreticky zapadá do transportu jak prášku, tak inertního plynu, avšak pro zjednodušení bude brána jako prvek odvodu pouze inertního plynu. Ve schématu je tak pouze naznačeno, že cyklonový separátor obsahuje taktéž sběrnu odpadního prášku.

Poměrně samostatnou funkční oblast tvoří subsystém udržení inertní atmosféry, v jehož rámci inertní plyn cirkuluje ve dvou vzájemně propojených okruzích. Hlavní okruh, vybavený pumpou s označením „1“ zajišťuje distribuci ochranné atmosféry a odvod odpařených a odletujících produktů výrobního procesu, především z prostoru nad tiskovou platformou. Protože tento okruh recirkuluje plyn i z celého vnitřního objemu komory, musí okruh obsahovat komplexnější filtrační systém. Vedlejší okruh je navržen specificky pro podporu holohedral způsobu nanášení. Pumpa s označením „2“ slouží pro vytvoření podtlaku umožňujícího odsávání přebytečného kovového prášku hubicí pryč z tiskové platformy, čímž je umožněno nanesení odlišného materiálu v rámci jedné vrstvy. Protože budou odsávány i desítky gramů kovového prášku v rámci jediného kroku, je vedlejší okruh doplněn o cyklonový separátor, který zajišťuje oddělení velké většiny částic před následnou filtrací a návratem plynu zpět do hlavního okruhu.

Součástí celku je i doplňková senzorická soustava, která zajišťuje průběžné sledování kritických provozních veličin v pracovním prostoru komory. Senzory teploty a tlaku na vyčleněných místech udávají aktuální informace o pracovních podmínkách. Na základě měření koncentrace kyslíku je možné určit okamžik dosažení požadované mezní hodnoty, jejíž splnění je podmínkou pro přechod do další fáze výrobního procesu.

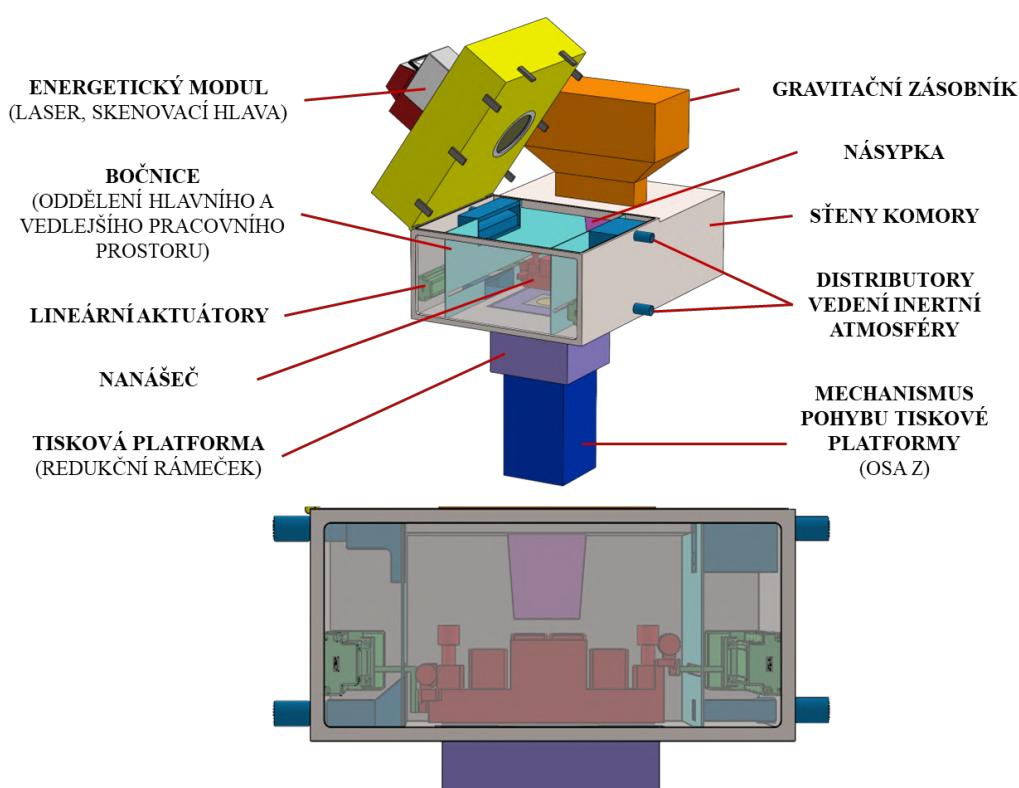
Energetický modul (skenovací hlava s laserovou jednotkou) je v rámci této funkční analýzy uvažována jako samostatný převzatý funkční celek. Její vnitřní architektura, způsob řízení a detailní integrace do nadřazeného řídicího systému nejsou v této fázi řešeny. Obdobně není podrobně rozpracována ani řídicí jednotka zařízení, jelikož návrh její struktury, algoritmů řízení je úzce vázán na finální mechanickou konfiguraci zařízení, včetně všech řízených os a doplňkových a ochranných prvků. Tyto části systému je účelné řešit až v navazující fázi po fyzické realizaci zařízení jako celku.

4.3 Návrh alternativních řešení

Všechna koncepční řešení vycházejí ze specifických reálných protějšků, kterými byla inspirována. Zároveň bude v rámci prvního konceptu proveden popis subsystémů, jejichž barevné značení bude shodné s ostatními variantami koncepce komory, obrázek 4-3.

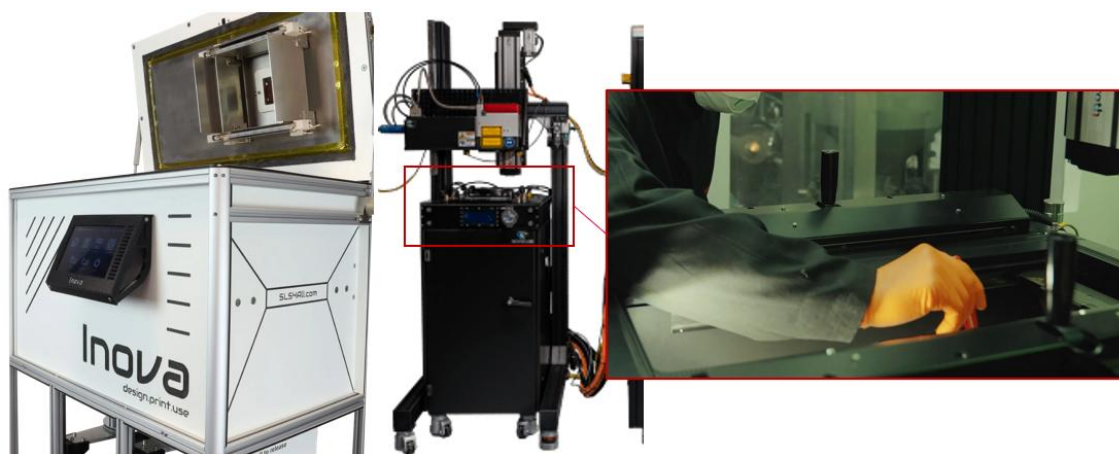
Koncept 1

Na obrázku 4-3 je znázorněna varianta inspirovaná existujícími zařízeními technologií SLS a LPBF s vrchním vstupem. Koncepce počítá s integrací části senzoriky a energetického modulu do komplexního víka, které překrývá celou vrchní hranu (stropnici) komory. Rozložení tiskové platformy a lineárního vedení bude napříč variantami dosti podobné, protože vyplývá z požadavku integrace převzatých součástí a funkčních celků.



Obrázek 4-3 Koncept 1

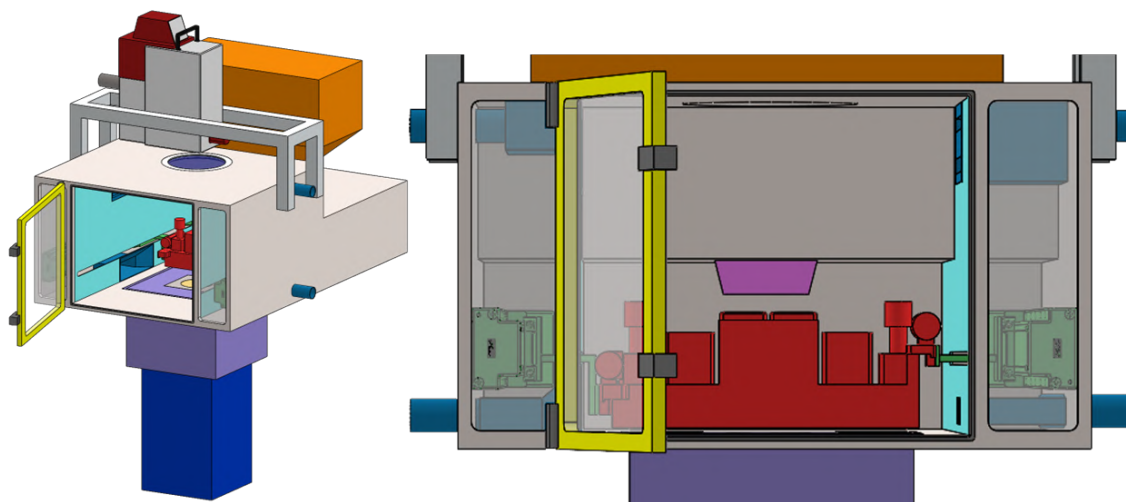
Koncept zároveň umožňuje integraci čtyř distributorů vedení inertní atmosféry a oproti SLM280 HL navíc zahrnuje jednu vertikální pevnou stěnu komory navíc, která by byla ideální pro implementaci dalších pozorovacích prvků. Vzhledem k nutnosti přesného ustavení skenovací hlavy vůči tiskové platformě klade toto provedení vysoké nároky na tuhost rotačního propojení víka se zbytkem komory, a i na spolehlivost jeho utěsnění. Obtížnost samotného utěsnění rozměrnějšího víka narůstá s délkou vkládaného těsnění a zejména z hlediska rovinnosti dosedacích ploch a zajištění dostatečného a rovnoměrného přitlaku.



Obrázek 4-4 Inspirace konceptu 1 vybranými SLS (vlevo) a LPBF (vpravo) tiskárnami [43][44][45]

Koncept 2

Druhý koncept vychází ze zařízení SLM280 HL, u kterého je konstrukční uspořádání dlouhodobě provozně ověřeno a konzervativní přístup zároveň minimalizuje konstrukční i provozní rizika. Zároveň je zde díky přítomnosti základní koncepce možno klást vyšší důraz na systematickou identifikaci možností rozšíření a úprav konstrukce, zejména z hlediska doplnění nových prvků, změn jejich polohy, a rozšíření vnitřního zástavbového prostoru. Lineární vedení má v konceptu 2 stejnou orientaci, jako v konceptu 1, zatímco základní koncepce bočnic odpovídá SLM280 HL. Koncept 2 lze považovat za blízký konstrukční ekvivalent stávajícího zařízení, přičemž zásadní rozdíly se projeví až v rámci případného předběžného návrhu při detailním rozpracování a systematickém odstraňování identifikovaných nedostatků.

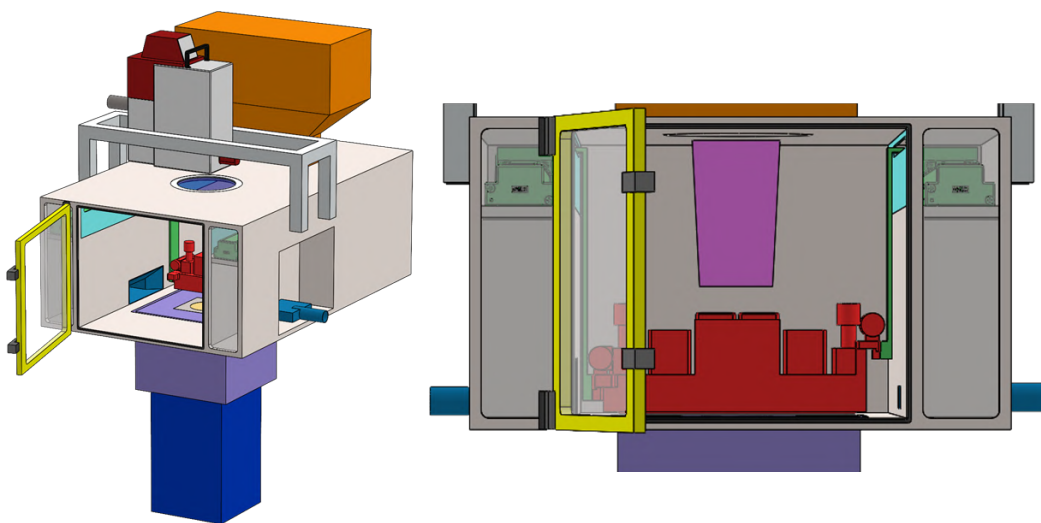


Obrázek 4-5 Koncept 2

Při porovnání s předchozím konceptem dochází k nárůstu výšky pracovního prostoru komory a celkové plochy bočnic. Koncepce však řeší problematiku pohyblivě uloženého energetického modulu, společně s menší vzdáleností mezi zásobníkem a nanášečem.

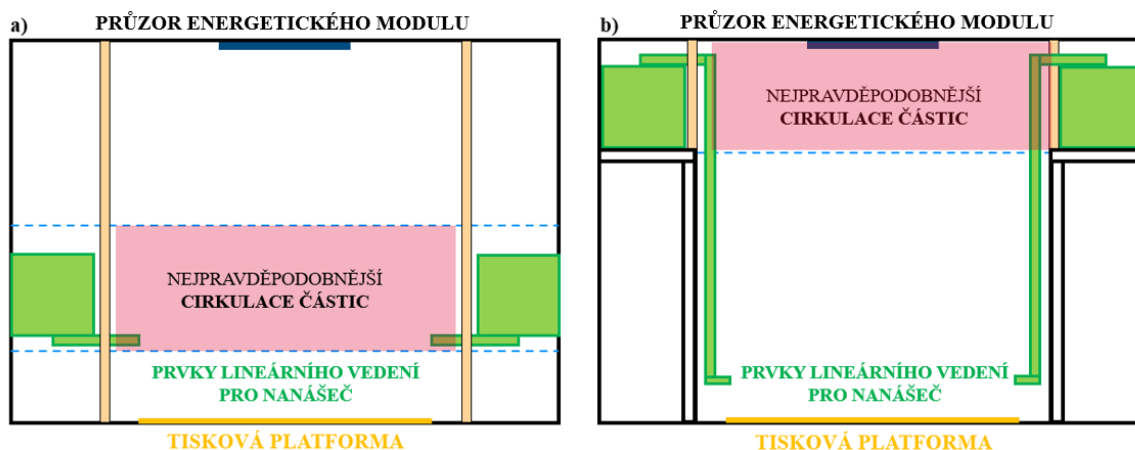
Koncept 3

Třetí koncept konfigurace komory vychází z druhého konceptu, avšak zásadně mění uspořádání hlavních funkčních prvků s cílem optimalizace proudění napříč pracovním prostorem.



Obrázek 4-6 Koncept 3

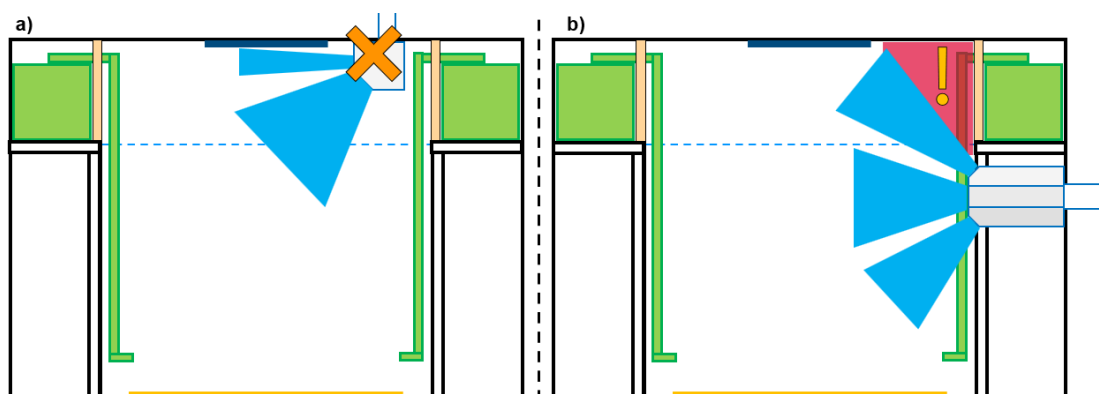
Klíčovou změnou je přemístění lineárního vedení nanášecího mechanismu do horní části komory, čímž se uvolňuje prostor v bočních stěnách a vzniká rozsáhlá, dobře přístupná plocha pro integraci senzoriky, distributorů inertní atmosféry a dalších doplňkových prvků.



Obrázek 4-7 Znáornění míst vnitřního pracovního prostoru komory s pravděpodobným vznikem turbulencí pro a) Koncept 1 a 2, b) Koncept 3

Odstraněním vedení z bočních stěn se však obtížně kontrolovatelná oblast očekávané cirkulace částic, označená na obrázku 4-7, přesouvá směrem vzhůru k průzoru energetického modulu. Tato oblast u předchozích konceptů představovala potenciální zdroj lokálních turbulencí a akumulace práškových částic, stejně je to i v případě konceptu 3. Protože prostor

v bezprostřední blízkosti průzoru vyžaduje absolutní absenci částic, které by mohly náhodně rozptylovat laserový paprsek, setkává se zde koncept s prvním zásadním problémem.



Obrázek 4-8 Koncept 3: a) Teoretické umístění distributoru na stropnici, b) Stálá absence „mrtvého místa“ i při implementaci komplexního vrchního distributoru

Nabízí se možnost orientovat vrchní distributor vpusti na stropnici komory, ta je však samostatný prvek, určený pouze pro umístění energetického modulu a senzoriky. V případě, že by se na stropnici umístily i prvky vedení inertní atmosféry, značně by to zmenšilo užžitnou plochu pro budoucí kompletní návrh stropnice, tento přístup byl z tohoto důvodu zamítnut (Obrázek 4-8a).

Druhá možnost je vložit vrchní distributor co možná nejvýše, přímo pod lineární vedení (Obrázek 4-8b). Tato orientace klade zvýšené nároky na návrh horního distributoru inertní atmosféry. I v takovém případě však nedojde k úplné eliminaci obtížně kontrolovatelné oblasti proudění v pravém horním rohu pracovního prostoru. Horní uložení vedení dále umožňuje zmenšit vedlejší pracovní prostor (prostor mezi bočnicí a vnější stěnou komory), zároveň je lineární vedení lépe odstíněné a dojde tak k minimalizaci expozice vedení částicím prášku. Zmíněná výhoda by však platila pouze za předpokladu, že by byl výrobní proces, konkrétně pohyb nanášecí, po nanesení a vytavení každé z vrstev pozastaven do doby, než by proud inertní atmosféry odvedl z pracovního prostoru veškeré poletující částice. Vzhledem k obecnému požadavku optimalizace výrobního času je tento požadavek nepřijatelný a řešení je tak taktéž zamítnuto.

Z konstrukčního hlediska představuje koncept 3 výrazný odklon od provedení s bočnicemi. Ty jsou nahrazeny přímo nosnými stěnami komory, přičemž samostatné boční prvky jsou zachovány pouze v horní části pro uzavření dutiny s lineárním vedením. Toto uspořádání umožňuje přímou integraci senzorů a průzorů z více směrů, avšak výrazně omezuje možnost dodatečných úprav, rozšiřování vnitřního prostoru a vytváření nových prostupů, které by nebylo nutné hermeticky utěsnit. Dalším zásadním omezením je nutnost použití výrazně prodloužených nosných prvků spojujících nanášecí mechanismus s vedením, které musí vykazovat velmi vysokou tuhost, aby nedocházelo k deformacím a ztrátě přesnosti. Spolu s komplikovanější integrací zásobníku prášku a zvýšenými nároky na těsnění členité konstrukce komory tak tento koncept přináší značnou konstrukční i provozní složitost.

4.4 Analýza řešení a výběr

Na základě popsaných konceptů je nutné provést zhodnocení hlavních požadavků, která by konstruovaná komora měla splňovat a umožňovat. Koncepty byly zhodnoceny na základě úrovně splnění jednotlivých požadavků.

Tabulka 4-1 Kriteriační porovnání navržených koncepčních řešení

KRITÉRIUM (1 = velmi špatné, 2 = spíše špatné, 3 = dobré, 4 velmi dobré, 5= ideální)	VHODNOST KONCEPTU		
	K1	K2	K3
Vhodnost pro experimentální účely	3	4	5
Jednoduchost konstrukce stěn komory	5	4	2
Objem vnitřního pracovního prostoru	3	3	4
Možnost integrace průzorů a průchodek	5	4	5
Realizovatelnost utěsnění hlavních dveří/víka	2	4	4
Modularita základní konstrukce	3	5	2
Vzájemné uspořádání zásobníku a nanášeče	2	4	1
Vhodnost geometrie pro proudění inertní atmosféry	4	3	2
Modularita distributorů inertní atmosféry	3	3	5
Přístup a náročnost údržby	2	3	4
Náročnost demontáže dveří a bočnic	1	4	4
Tuhost a stabilita uložení klíčových subsystémů	2	4	4
Celkové bodové ohodnocení	35	45	42

Na základě vícekritériálního hodnocení uvedeného v Tabulce 4-1 byl jako výchozí řešení pro další fázi návrhu zvolen koncept 2, který vykazuje nejvyváženější rozložení hodnocených parametrů napříč sledovanými kritérii. Tento výsledek potvrzuje, že konzervativní přístup, vycházející z konstrukčně ověřeného zařízení, představuje nejvyváženější kompromis mezi experimentální flexibilitou, konstrukční složitostí a budoucí provozní spolehlivostí

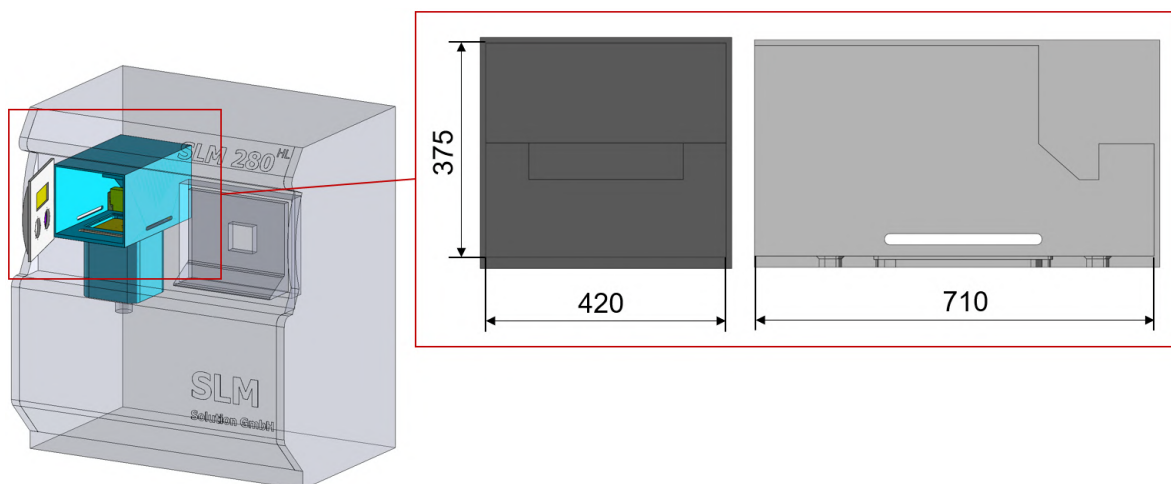
5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

V rámci kapitoly koncepční návrh byla vybrána cesta standardního rozložení prvků komory, podobně jako u ověřené konstrukce tiskárny SLM280 HL. Pro další postup v rámci vývoje experimentální komory je následujícím krokem vytvořit předběžný návrh, který bude definovat hlavní rozměry komory a následného zařízení, rozložení prvků a volbu materiálů, ze kterých budou jednotlivé části zhotoveny. Návrh byl následně podpořen analytickými výpočty a odhady pro následné potvrzení správnosti návrhu, či zjištění nedostatků pro následné úpravy před finálním konstrukčním řešením. V rámci první podkapitoly budou zmíněny jednotlivé stěny, ze kterých se komora sestává a funkce na nich umístěných prvků. Následně bude zpracován návrh vedení inertní atmosféry v rámci celého zařízení, kde budou následně stanoveny okrajové podmínky pro návrh distributorů a podobnost s konfigurací vedení atmosféry zařízení SLM280 HL.

5.1 Definice tvaru, rozměrů a materiálů komory

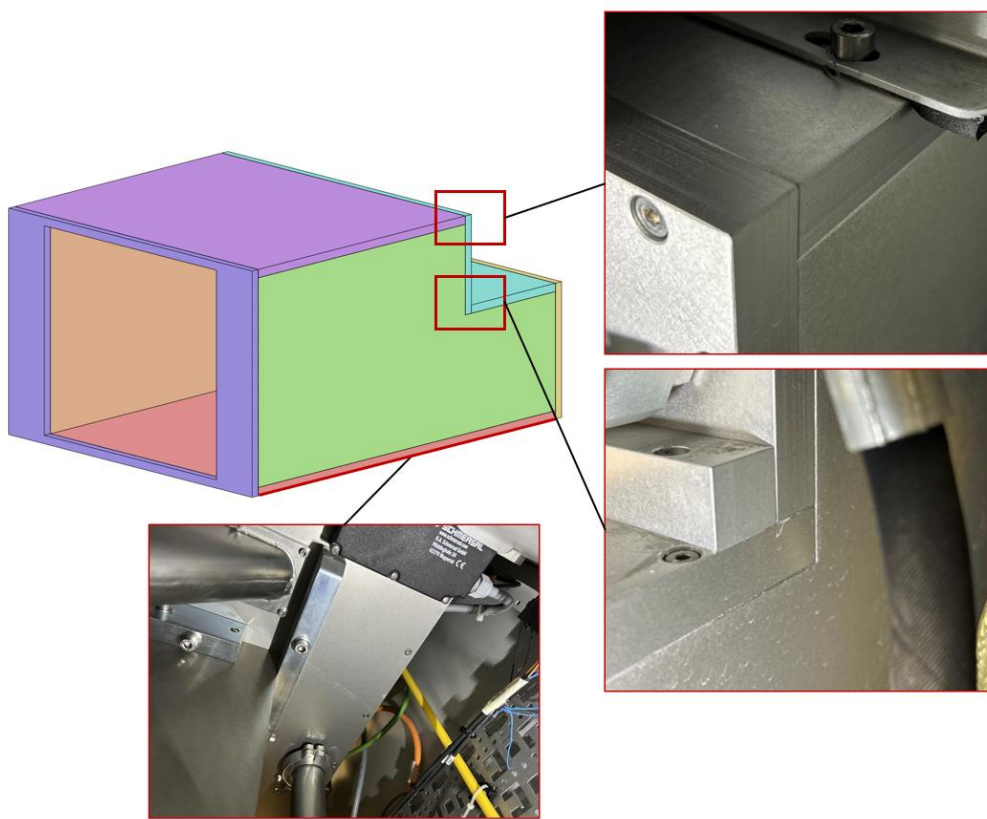
5.1.1 Definice tvaru

Základní tvar experimentální tiskové komory vychází ze současné geometrie tiskové komory SLM280 HL a je značně ovlivněn možnými konstrukčními provedeními prvků vedení atmosféry a pozorování, zmíněných v rámci systematické rešerše. Výchozím tvarem byl dostupný 3D model pracovního prostoru zařízení. Převzaty budou rozměry vnitřního prostoru a přibližná tloušťka stěny.



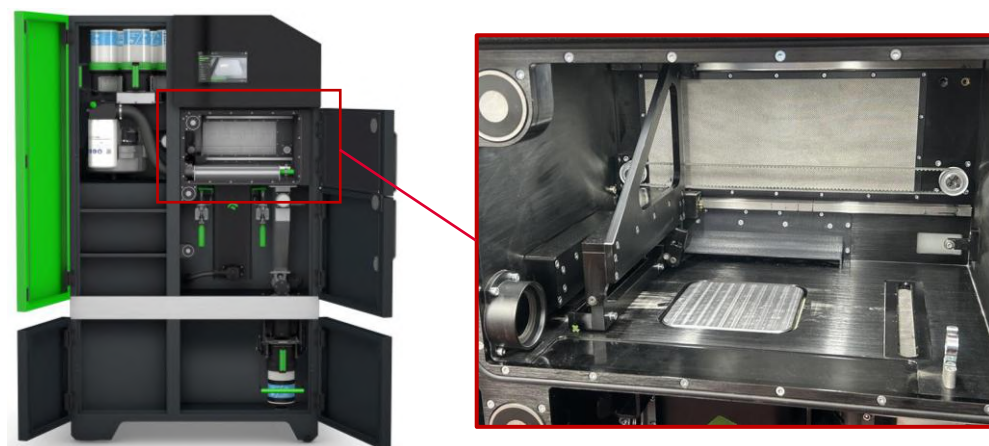
Obrázek 5-1 Dostupný model komory SLM280 HL

Model však neobsahuje konkrétní stavbu stěn tiskové komory, proto musela být provedena hlubší inspekce zařízení. Po zdokumentování potřebných detailů a rozměrů mohl být vytvořen podrobnější 3D model, který blíže odpovídá stavbě původní komory.



Obrázek 5-2 Inspekce napojení jednotlivých stěn zařízení SLM280HL

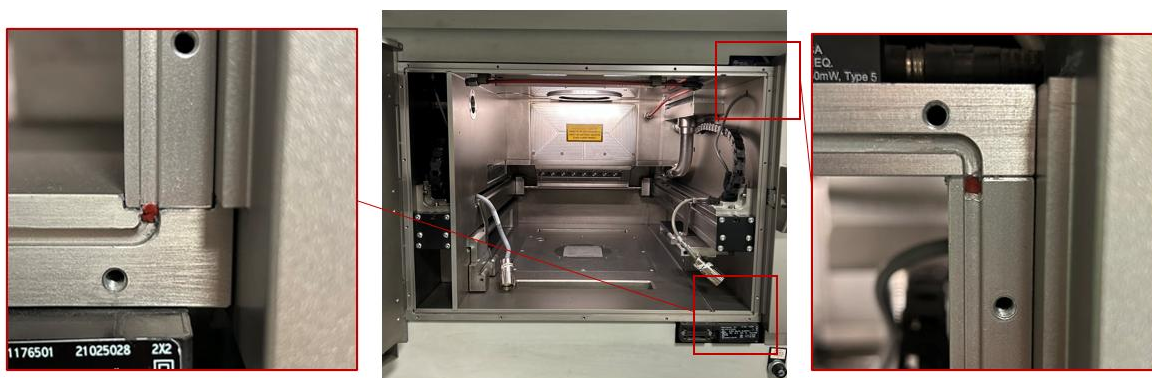
Na Obrázku 5-2 je zobrazený model napojení jednotlivých stěn. Na rozdíl od jiných komerčně dostupných LPBF zařízení využívá společnost SLM v rámci konstrukce tohoto konkrétního modelu vzájemně rozebíratelně spojované desky, na rozdíl například od zařízení společnosti OCM, kde je tisková komora zhotovena z kombinace svařovaných ocelových plechů a tenkých desek.



Obrázek 5-3 Pracovní prostor tiskárny OCM – MPRINT [46]

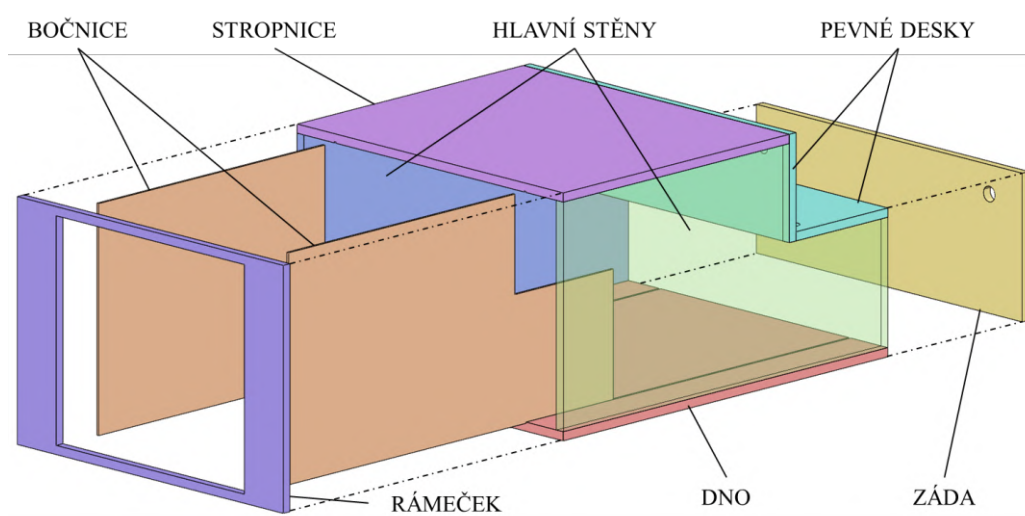
Pro zjednodušení výroby stěn experimentální komory je možné konstrukčně spojit natupo pomocí šroubových spojů v dostatečně jemné rozteči, což je z hlediska statiky i montáže dostačující. Z pohledu těsnosti je však vhodné tento spoj doplnit o pružný těsnicí prvek, který dokáže kompenzovat drobné odchylky vzniklé při výrobě nebo manipulaci. Typicky se jedná o lokální nerovnosti, nedodržení rovinnosti styčných ploch nebo nechtěné vtisky vzniklé při montáži.

Z přiloženého obrázku 5-4 je patrné, že ze samotné konstrukce zařízení nelze jednoznačně určit, zda byl při montáži kromě těsnění použit také těsnicí tmel, nebo zda bylo spolehnuto výhradně na těsnicí profil. V dalším návrhu se proto předpokládá, že samotné těsnění by teoreticky mohlo být funkčně dostačující, nicméně aplikace jemného filmu těsnicího tmelu při montáži je uvažována jako pojistný prvek, zvyšující robustnost řešení. Tento přístup odpovídá běžné praxi u obdobných konstrukcí, kde je kladen důraz na spolehlivost těsnosti i při méně ideálních výrobních a montážních podmínkách.



Obrázek 5-4 Způsob napojení hran stěn SLM280HL

Celou konstrukci stěn komory lze rozdělit na několik základních celků. Toto členění umožňuje přehledný popis a nezávislou úpravu nebo modifikaci v dalších fázích návrhu.



Obrázek 5-5 Členění stěn vyvíjené komory

Rozměry a tvarové proporce budou samostatně rozebrány v navazujících kapitolách.

Mezi největší desky patří dno, dvě symetrické boční stěny, stropnice a dodatečné zadní pevné desky. Jak dno, tak stropnice obsahují drážky pro zasunutí bočnic, které oddělují pracovní a vedlejší prostor tiskové komory. Současná konfigurace uvažuje pouze dvě pravidelně demontovatelné stěny, a sice rámeček pro možnost vysunutí bočnic a záda pro možnost přístupu ze zadní části zařízení do pracovního prostoru. Nutné však podotknout, že díky přítomnosti neodejímatelných potrubních prvků a hřídelí v zadní části pracovního prostoru je demontáž „zad“ velmi málo častá a náročná.

5.1.2 Definice rozměrů

Rozměr konstruované experimentální komory se odvíjel primárně od implementace vybraných prvků.

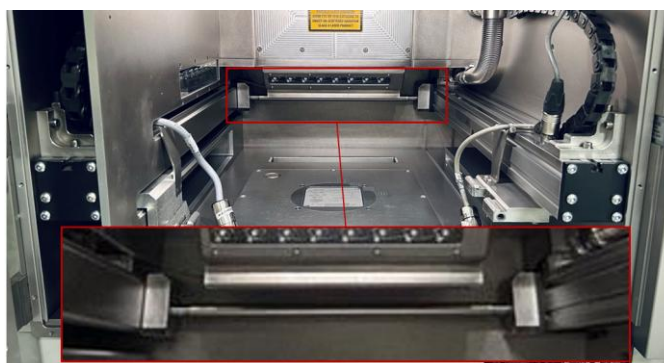
Hloubka komory

Primárním prvkem ovlivňující celkovou hloubku komory je lineární vedení pro pohyb nanášeče. Uvažovaný modul je jednotka lineárního aktuátoru od společnosti SMC, konkrétně model LEFS32-650-R36P3D. Možnost použití tohoto lineárního vedení by drasticky snížila náklady na konstrukci komory, v porovnání s lineárním vedením, obsaženým v SLM280 HL, se principem funkce navzájem liší.



Obrázek 5-6 Vlevo lineární vedení od společnosti BAHR, vpravo dostupné vedení od společnosti SMC [47]

V porovnání s lineárním vedením BAHR LLZ60, je dostupná lineární jednotka rozměrnější, s větší mírou přesnosti opakovatelnosti a je samostatně řízena. Vedení BAHR je pouze uložení pro ozubený řemen, který pohybuje jezdcem po vnitřní kolejnici. Pohyb je zajišťován hřídelí, která propojuje obě BAHR jednotky a napojuje se skrz stěnu na vně uložený servomotor.



Obrázek 5-7 Detail na hřídel propojující obě BAHR vedení tiskárny SLM280HL

Užití samostatně nepoháněných lineárních vedení má značnou výhodu v jednoduchosti synchronizace, obě jsou ovládány jediným motorem. Vzniká tím však zároveň i problém z hlediska hermetického utěsnění otvoru, ve kterém se nachází do obou stran rotující hřídel, kterou není možné dobře mazat kvůli prašnému prostředí. Vhodná řešení utěsnění rotující hřídele jsou málo dostupná a značně finančně náročná. Na druhou stranu je pro jednotky od společnosti SLM, kterými jsou samostatně poháněné motory, nutné obsáhnout průchodky pro kabeláž. Absence spojovací hřídele je tak kritickou výhodou při použití samostatně ovládaných lineárních vedení. Nejen, že je díky nim v prostoru zadní stěny více prostoru na další prvky, ale zároveň se bude lépe těsnit jejich vývod mimo komoru. Aktuátory od společnosti SMC lze snadno synchronizovat pomocí zapojení dvou jednotek do jednoho ovládacího driveru.

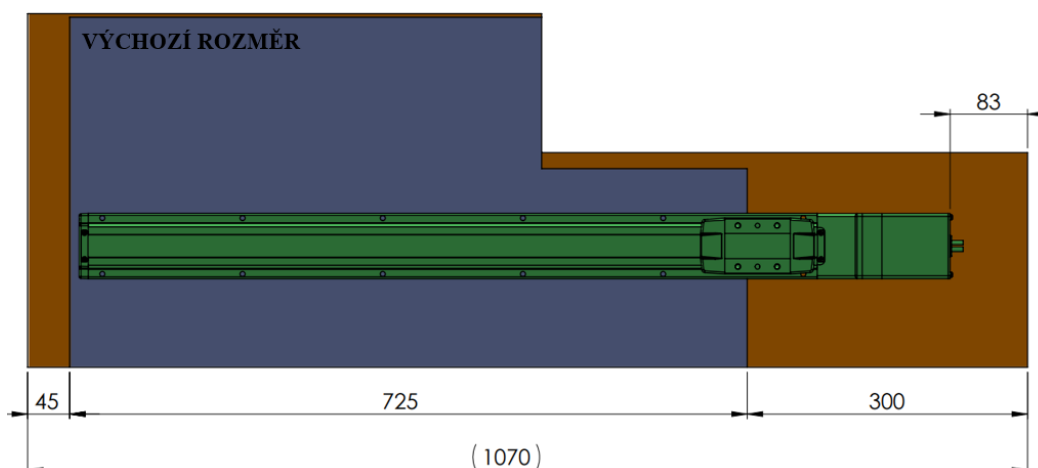
Porovnání hlavních parametrů lineárních vedení je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 5-1 Srovnání parametrů lineárních vedení [47][50]

Parametr	BAHR LLZ60-1022XX1-500	LEFS32A-650-R36P3D
Zástavbový průřez	60x60	70x80
Typ	Řemen	Kuličkový šroub
Opakovatelnost	0,1 mm	0,02 mm
Horizontální nosnost	1400 N	200 N
Vertikální nosnost	3520 N	450 N
Napájení	-	24VDC
Teplota prostředí	až 75°C	až 60 °C
Cena bez DPH	24 000 Kč	23 000 Kč

Z tabulky porovnání parametrů vybraných modelů lineárních jednotek je ověřena vhodnost uvažovaného modulu.

I když je v katalogu uváděna provozní teplota nižší, než jaká se očekává ve vnitřním prostoru zařízení, konkrétně 40 °C, lze po konzultaci se specialistou společnosti SMC konstatovat, že se jedná o konzervativní hodnotu. V praxi jsou tato vedení běžně používána až do teploty 80 °C, bez nutnosti přídavného chlazení motorové jednotky. Z katalogových dat dále vyplývá, že aktuátor SMC vykazuje relativně nižší únosnost, při použití dvou jednotek a jejich upevnění na stěnu by maximální statická nosnost odpovídala přibližně 40 kg, skutečná nosnost je však silně závislá na délce připojovacího ramene. Plně naložený sériový nanášeč zařízení SLM280 HL má hmotnost přibližně 12 kg, přičemž u multi-materiálového nanášeče může tato hodnota vzrůst až na zhruba 20 kg. I přes nižší únosnost je tak vedení nadále použitelné, neboť skutečné provozní zatížení nebude dosahovat dovoleného maxima.



Obrázek 5-8 Znáznornění hloubky komory

Na obrázku 5-8 je znázorněn nárůst hloubky komory v návaznosti na integraci lineárního vedení. Původní rozměr komory byl rozšířen v obou směrech, přičemž oproti výchozímu stavu bylo nutné prodloužení směrem ke dveřím přibližně o 50 mm. Toto rozšíření odstraňuje původní rozměrové omezení pro integraci přídatných modulů na nanášeč, které budou zobrazeny v detailním návrhu. Směrem do hloubky byla komora prodloužena o 300 mm. Toto prodloužení je primárně dáno potřebou vytvořit prostor mezi koncem lineárního vedení a zadní deskou komory. Zvětšení vzdálenosti slouží jednak pro bezpečný vývod kabeláže směrem kolmo do bočnice, tak pro vytvoření dostatečného instalačního prostoru pro přídatné moduly nanášeče. Ve srovnání s původní hloubkou komory, kde byl k dispozici prostor mezi hranou nanášeče a nejvzdálenější hranou 80 mm, vzniká tímto řešením instalační rezerva přibližně 200 mm.

Výška komory

Dalším prvkem, značně ovlivňujícím celkové rozměry tiskové komory, je skenovací hlava. Vytipovaný modul od společnosti Raylase s označením AM-MODULE III [6] je nutné umístit s dostatečnou tuhostí v určité výšce nad tiskovou platformou. V tabulce 5-2 jsou uvedeny pracovní vzdálenosti skenovací hlavy od výrobce.

Tabulka 5-2 Parametry skenovací hlavy v závislosti na vzdálenosti od tiskové platformy [6]

Vzdálenost výstupu od místa dopadu [mm]	Průměr paprsku v místě dopadu [μm]	Maximální zoom [-]	Maximální pracovní plocha [mm]
318	35 až 43	1,8	300x300
442	45 až 56	1,9	400x400
566	55 až 69	2,0	500x500
875	81 až 101	2,0	750x750
1061	97 až 121	2,0	900x900

Protože je montážní vzdálenost větší než výška k vnější hraně stropnice původní geometrie, která činí 390 mm, není nutné měnit výšku zařízení oproti původní konfiguraci.

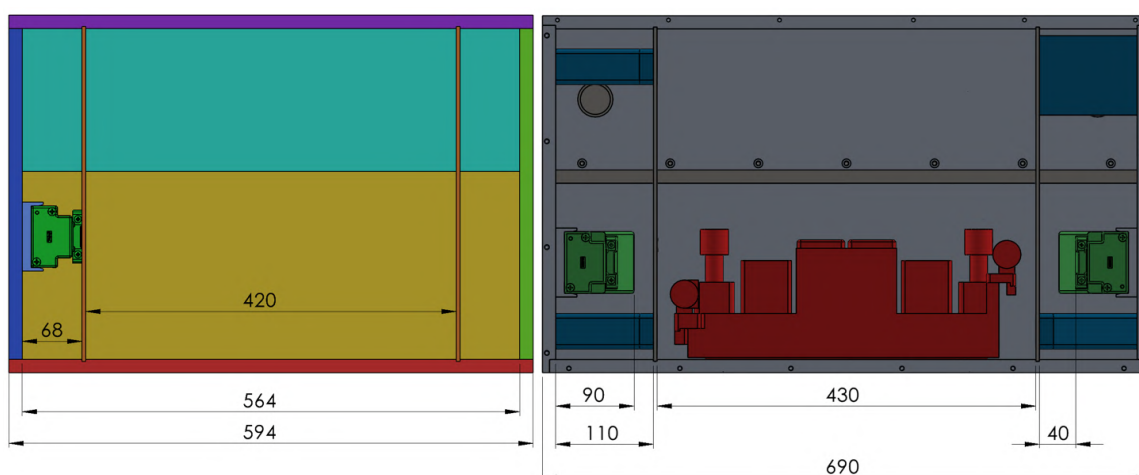
Nejnižší možná provozní vzdálenost skenovací hlavy od tiskové platformy nebyla uvažována z důvodu nekompatibility s tvarovým řešením koncepce komory.

Šířka komory

Šířka vnitřního prostoru komory je dána kombinací tří základních požadavků, a sice zástavbovým prostorem lineárního vedení, prostorem nezbytným pro instalaci distributorů inertní atmosféry a minimálním pracovním prostorem mezi bočnicemi, kterou udává šířka nanášeče.

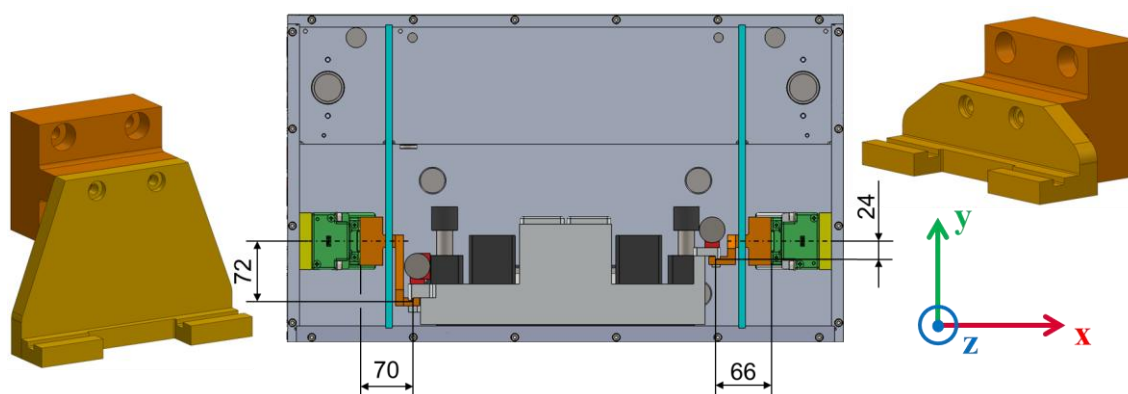
Obsažené lineární aktuátory SMC, společně s podstavci pro připevnění na stěnu komory (viz. Obrázek 5-9) nabývá šířky zástavby 90 mm. Původní vzdálenost mezi bočnicí a stěnou komory činila pouze 68 mm, při takovém zástavbovém prostoru by nebyla možná montáž vedení ani bez upínacího prvku. Upínací prvek představuje modulární zajištění kompatibility komory i s mírně odlišnými modely lineárních aktuátorů, v případě nutné budoucí výměny. Z rešerše zároveň vyplývá, že pro efektivní ustálení proudění inertní atmosféry mohou mít distributory výrazně větší zástavbové nároky, často přesahující 100 mm. Problematika distributorů je podrobněji popsána v navazující kapitole 5.2.1., zejména v publikaci [1].

Na základě těchto skutečností byla zvolena vzdálenost bočnice od vnější boční desky 110 mm, která poskytuje dostatečný prostor pro komplexní řešení distributorů a současně ponechává přibližně 40 mm pro upínací prvek nanášeče. Vnitřní prostor mezi bočnicemi nebyl záměrně zvětšován, šířka vnitřního pracovního prostoru byla navýšena pouze o 10 mm, opět pro usnadnění montáže přídatných modulů nanášeče.



Obrázek 5-9 Šířka komory: vlevo výchozí rozměry, vpravo současné rozměry

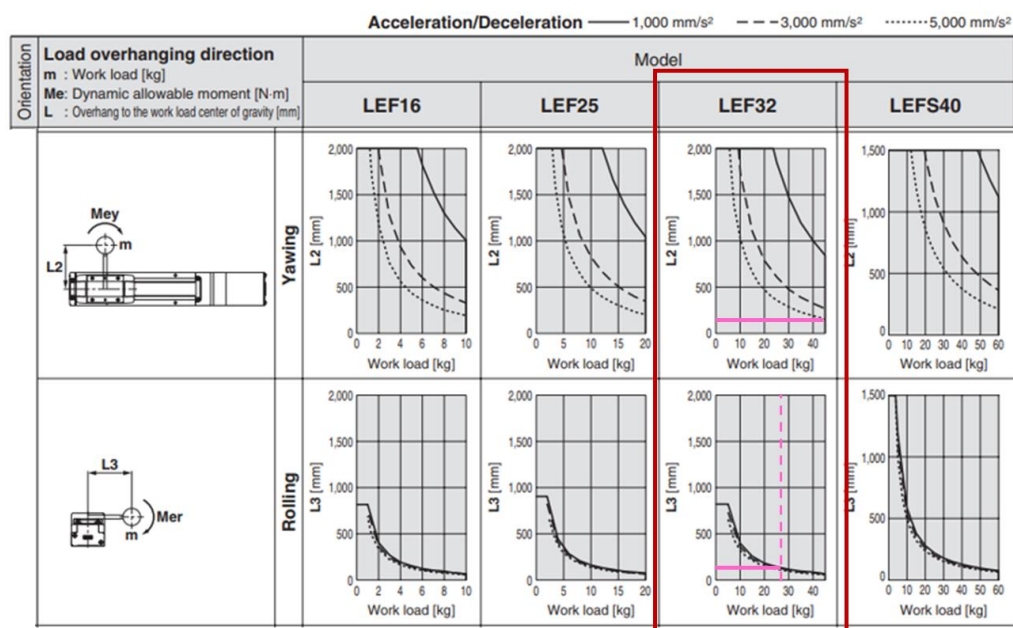
Při stanovení šířky komory a vzdáleností nanášeče a lineárních aktuátorů lze provést podrobnější validaci jejich užití.



Obrázek 5-10 Vizualizace návrhu držáků nanášече pro lineární vedení a rozměry pro validaci únosnosti

Protože napojovací plochy multi-materiálového nanášече, stejně jako standartního, nejsou symetrické, mechanické propojení s lineárním vedením vyžaduje dvojici upínacích prvků, viz. obrázek 5-10. U objemnějšího prvku (obrázek 5-10 vlevo), lze předpokládat nižší tuhost, která je způsobena delšími zatěžujícími rameny. Z toho důvodu bude provedena validace pouze tohoto prvku. Tloušťka materiálu byla v obou případech zvolena 10 mm, v případě naddimenzování zde bude v budoucnu prostor pro optimalizaci z hlediska maximálních deformací.

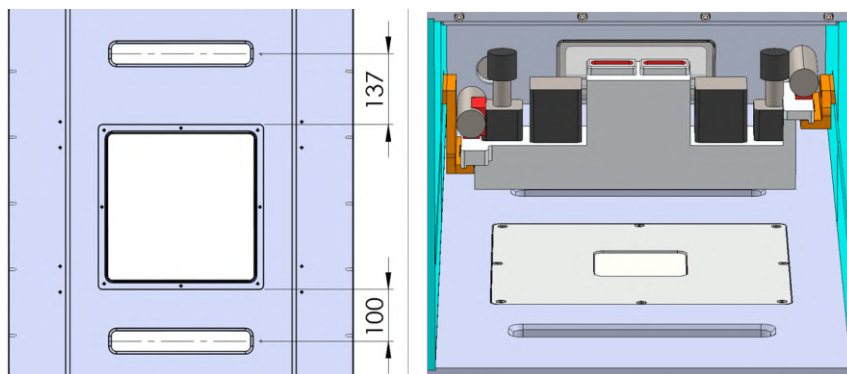
Nejprve bylo porovnáno namáhání lineárního vedení z hlediska únosnosti vůči tabulkovým hodnotám lineárních aktuátorů. Pro porovnání není nutné provádět přepočet na ohybové momenty, tabulky k lineárním aktuátorům totiž udávají maximální povolené zatížení v jednotkách kilogramů, v závislosti na délce ramene, viz. obrázek 5-11. Pro danou geometrii a délku ramene odpovídá maximální nosnost v ose Y přibližně 28 kg, ve směru osy Z přes 40 kg. Odečtené hodnoty odpovídají maximálnímu povolenému zrychlení aktuátoru $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$.



Obrázek 5-11 Tabulkové hodnoty únosnosti pro lineární aktuátory SMC [50]

Dle srovnání lze tvrdit, že únosnost aktuátorů je výrazně vyšší, než maximální zatížení od nanášedce a jejich využití je možné.

Protože konfigurace vyžaduje přepady pro odvod přebytečného prášku, jedná se o krajní body trajektorie nanášedce, do kterých musí při každém kroku výrobního procesu směřovat. Z dostupných interních informací byla zvolena referenční rychlost nanášedce $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 5-12 Umístění otvorů pro odvod přebytečného prášku vůči redukčnímu rámečku tiskové platformy

Jestliže bude uvažována poloha nanášedce nad přepadem, umístěným blíže tiskové platformy, ve vzdálenosti 100 mm od hranice pracovního prostoru, je možné orientačně stanovit zatížení, které může být při pohybu nanášedce přeneseno do držáků a vedení.

Minimální dráha, potřebná pro dosažení maximální rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ při daném zrychlení je přibližně 12 mm. Při plynulém rozjezdu je na nanášedce vyvozena zanedbatelná setrvačná síla. V případě neočekávané kolize je nutné uvažovat odlišný způsob zatížení, jehož odhad vychází ze změny hybnosti:

$$F_r = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m \cdot v}{\Delta t} \text{ [N]} \quad (2)$$

kde: F_r – přibližná rázová síla [N]

Δp – změna hybnosti tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

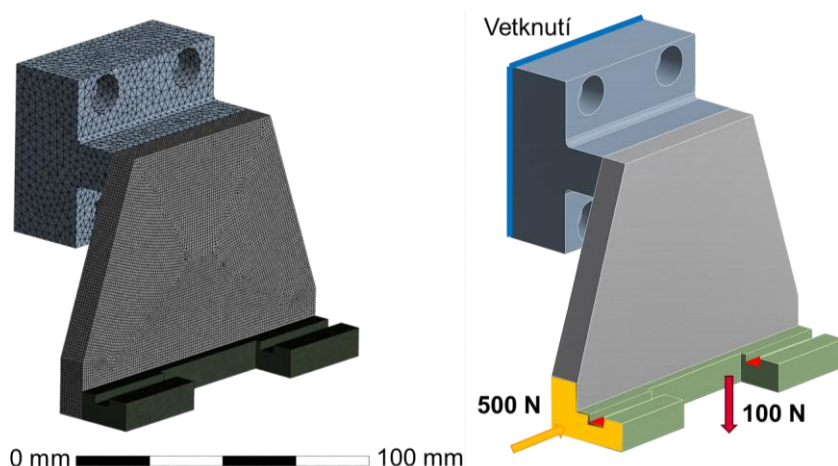
Δt – doba zastavení [s]

m – hmotnost nanášedce [kg]

v – rychlost nanášedce [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

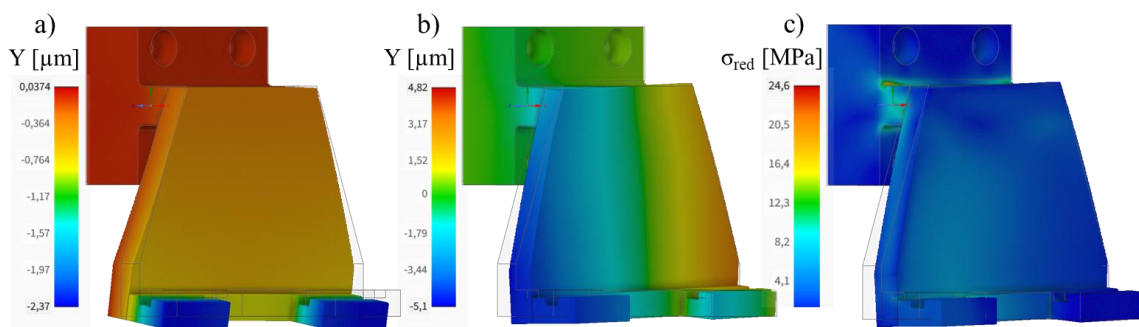
Při maximální hmotnosti nanášedce, rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a orientační doby kolize 3 ms, která představuje rázový děj, při které je část energie pohlcena například deformací možné vyčnívající hrany vyráběné součásti, kterou nelze považovat za dokonale tuhou překážku. Při těchto definovaných hodnotách je odpovídající odhad rázové síly 1000 N, nebo bočního zatížení 500 N na jeden držák nanášedce. Pokud by bylo uvažováno okamžité zastavení, vypočtená rázová síla by dosahovala nereálně vysokých hodnot, v takovém případě by navíc již pravděpodobně došlo k zásahu bezpečnostních limitů aktuátorů. Porovnání únosnosti v ose Z na obrázku 5-11 odpovídá hraniční hodnotě.

Pro ověření odezvy držáků na uvedené zatížení byla provedena kontrolní numerická analýza v prostředí Ansys Discovery.



Obrázek 5-13 Konečnoprvková síť a okrajové podmínky analýzy držáku

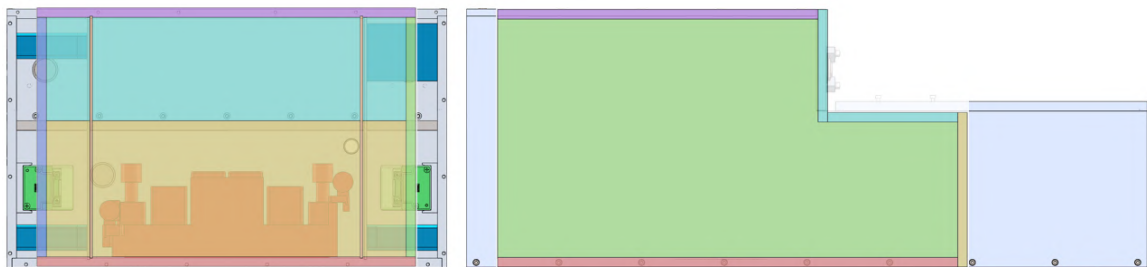
První případ uvažoval pouhé zatížení tíhou nanášeče, druhý navíc při působení boční síly. Konečnoprvková síť obsahuje lokálně zjemněné prvky o velikostech menších než 0,5 mm. Okrajové podmínky jsou uvedeny na obrázku 5-13. Z provozní přesnosti je rozhodující především deformace ve směru osy Y (obrázek 5-10). Tato složka přímo odpovídá vybočení nebo zamáčknutí břitů nanášeče do práškového lože. Jako materiál držáků byla zvolena běžná konstrukční ocel. Konkrétní způsob výroby, volba finálního materiálu ani optimalizace geometrie nebyly v této fázi návrhu předmětem řešení, proto byly použity konzervativní materiálové vlastnosti.



Obrázek 5-14 Pevnostní analýza držáku nanášeče: a) deformace při zatížení tíhou nanášeče, b) deformace zatížení tíhou a boční rázovou silou, c) redukované napětí případu b

Výsledky numerické validace ukazují, že držák nevykazuje při uvažovaném zatížení znatelnou odezvu. První případ lze považovat za referenční stav, jehož deformace v ose Y přibližně 2,5 μm bude vynulována během kalibrace. Ve druhém případě, kde je kromě tíhy nanášeče uvažována také boční rázová síla, dochází k dodatečné deformaci v řádu nižších jednotek mikrometrů. Při konzervativní tloušťce nanášené vrstvy 50 μm lze tuto hodnotu považovat za zanedbatelnou z hlediska zaboření nebo vychýlení břitů. Hodnota redukovaného napětí zůstává hluboko pod mezí kluzu běžných konstrukčních materiálů.

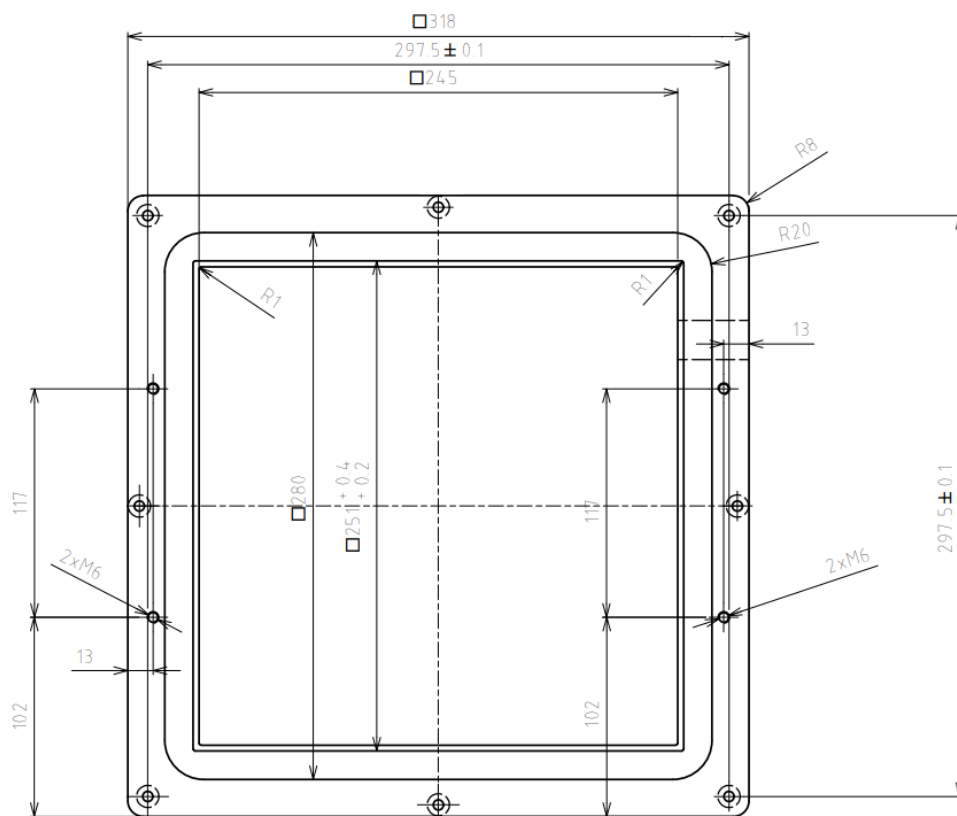
Celkové rozměry komory po validaci činí 690×1070×410 mm, v porovnání s výchozími rozměry 594×725×420 dochází k nárůstu vnitřního prostoru o přibližně 60 %. Přesné hodnoty všech rozměrů však budou záviset na dalších modulech, obsažených v kapitole 6.



Obrázek 5-15 Celkový nárůst rozměrů komory v porovnání s výchozími rozměry

Tisková platforma

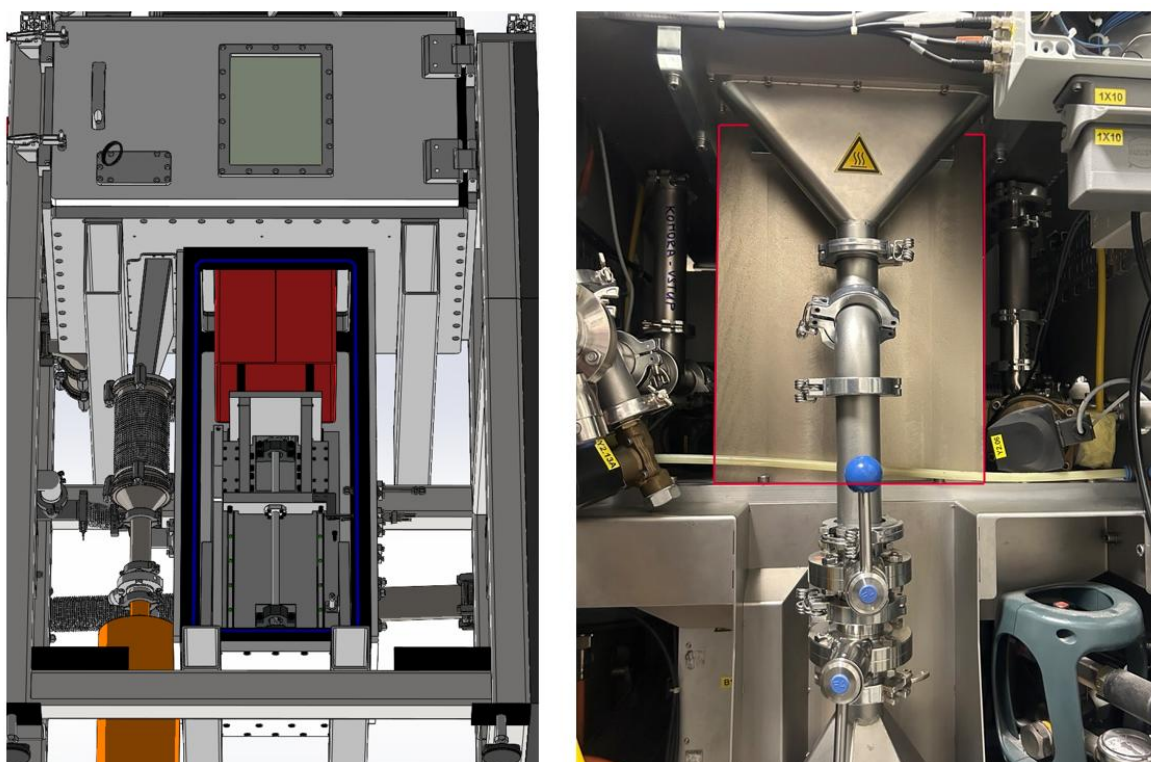
Dalším z implementovaných prvků je tisková platforma. V rámci této diplomové práce není uvažovaný návrh nové platformy, ani podrobný návrh výsuvného mechanismu. Cílem je však vytvořit mechanické rozhraní pro napojení stávajících platforem, které bude kompatibilní s redukčním rámečkem v SLM280 HL a vyhřívanou kruhovou platformou [13]. Referenční upínací rozměry oblasti v kontaktu se dnem komory jsou zobrazeny na obrázku 5-16 a vychází z výkresové dokumentace experimentální platformy.



Obrázek 5-16 Horizontální rozměry experimentální vyhřívané tiskové platformy [13]

Jak platforma, tak redukční rámeček, využívají pro spojení se dnem komory celkem sedmi metrických šroubů M6 se záпустnou hlavou. Z bezpečnostního hlediska jsou šrouby i v originální konfiguraci ve stroji SLM280 HL z plastového materiálu. Protože váha samotné platformy i redukčního rámečku vyvede dostatečnou sílu pro tlačení kruhového těsnění v kontaktní oblasti, šrouby slouží pouze jako bezpečnostní pojistka proti pohybu ve vertikálním směru vlivem tření pístu výsuvného mechanismu.

Platforma zároveň díky svým rozměrům definuje tloušťku spodní desky, která musí být oproti ostatním minimálně 20 mm. Z rešerše a inspekce tiskárny SLM280 HL dále plyne, že pro dostatečně tuhý a přesný pohyb musí být tiskárna vybavena mohutným vodícím rámečkem, viz. obrázek 5-17. Zároveň lze na obrázku 5-17 vidět jeden ze dvou případů odpadního prášku, které jej ukládají v zásobních nádobách.



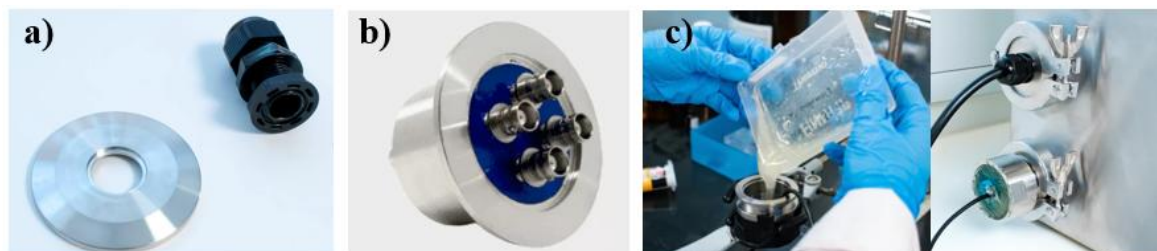
Obrázek 5-17 Vodící rámeček (vlevo tiskárny reAM-250, vpravo SLM 280 HL) [17]

Detailnější rozbor a popis geometrie komory bude uveden v navazujícím detailním návrhu. V rámci předběžného návrhu je nyní podstatné vybrat vhodné umístění a typ mechanických rozhraní jednotlivých typů.

5.1.3 Definice průchozích otvorů

Průchodky pro kabeláž

Průchodky se standardně rozlišují podle počtu vedených kabelů na varianty pro jeden kabel (Obrázek 5-18a) a více kabelů (Obrázek 5-18b a 5-18c). Při současném protažení více kabelů existují dvě řešení, buď musí být kabely rozděleny na více kusů (každý zvlášť do samostatného otvoru) v rámci průchodky (Obrázek 5-18b), nebo utěsněny zalitím těsnícím tmelem nebo pryskyřicí do normovaných přírub, přímo určených k napojení v rámci vakuového systému vedení inertní atmosféry (Obrázek 5-18c).



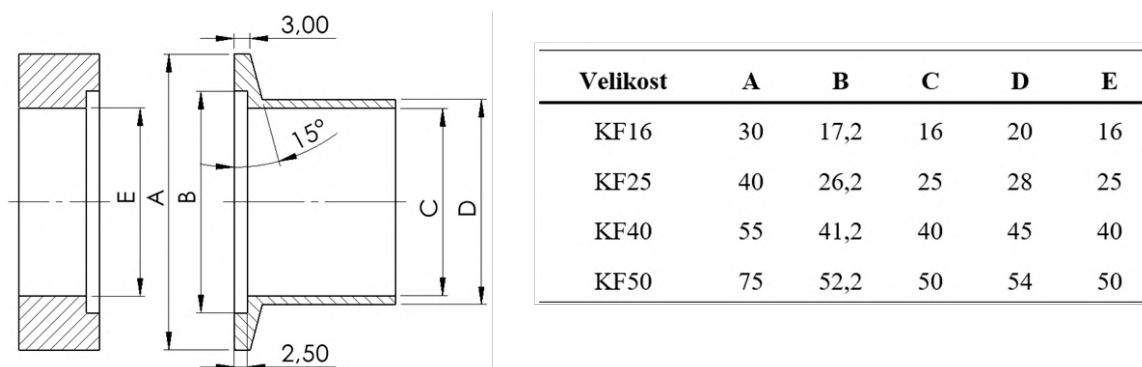
Obrázek 5-18 a) Průchodka pro jeden kabel, b) více kabelová průchodka, c) zalití do příruby těsnící hmotou [48][49]

Použití normovaného systému ISO-KF přináší výhodu v podobě snadno modifikovatelného rozhraní vůči okolí, které lze dle potřeby osazovat vyměnitelnými záslepkami, přírubami nebo specializovanými průchodkami. Stejný otvor tedy může být podle aktuální potřeby osazen buď jednoduchou kabelovou průchodkou, nebo nahrazen plnohodnotnou přírubou s odlišnou funkcí (např. více průchodů, konektory, měřicí port). Tím odpadá nutnost předem specifikovat přesný typ průchodky do konkrétního místa konstrukce a návrh se přizpůsobuje reálnému osazení během iterací.

Zalití kabelů těsnící hmotou (Obrázek 5-18c) se v praxi používá zejména u zařízení, u nichž se nepředpokládají následné modifikace uživatelem, typicky jde o prodávaná průmyslová zařízení. U experimentální komory je naopak žádoucí zachovat možnost rychlé výměny senzorů, kabeláže i rozmístění prvků bez větších zásahů do stěn komory. Průchodky s integrovanými konektory (Obrázek 5-18b) jsou navíc zpravidla ekonomicky nevýhodné a často vyžadují úpravy kabelů (specifické koncovky, zkracování, pájení), což zvyšuje nároky na plánování i modifikace. Konzervativnější a zároveň robustní přístup proto spočívá ve sjednocení rozhraní na standard ISO-KF.

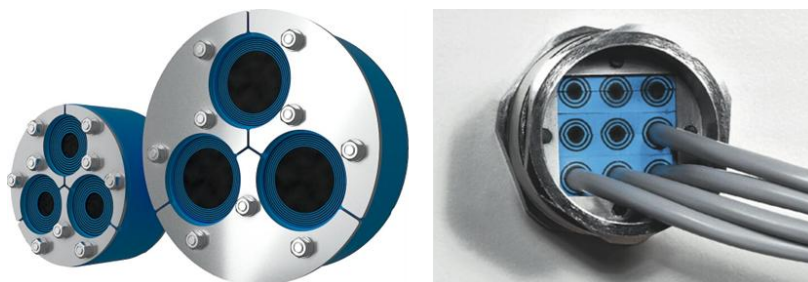
Před finálním návrhem je nutné rámcově stanovit pouze rozmístění očekávaných prvků a z něj vyplývající volbu velikosti rozhraní, tedy zejména KF25 nebo KF40. Varianta KF16 dále nebude uvažována, protože její praktické využití by se omezilo pouze na tenké hadice. Pro tyto případy je účelnější vytvořit menší průchod ve slepém prvku velikosti KF25, případně implementovat průchozí závitovou díru. Rozměry větší, než KF40 nejsou rovněž uvažovány. V aktuálním návrhu nebyl identifikován žádný prvek, který by jej vyžadoval.

Z těchto důvodů bude většina průchodů provedena v nejmodulárnější konfiguraci KF40, aby bylo možné v krajním případě osadit libovolný prvek, zatímco na vybraných pozicích s vysokou pravděpodobností využití pouze pro senzory nebo napouštění inertního plynu bude použito kompaktnější rozhraní KF25. Orientační rozměry jsou uvedeny na obrázku 5-19.



Obrázek 5-19 Orientační rozměry průchozích děr normy ISO-KF [51]

V praxi se často objevují ještě vysoce modulární kabelové průchodky s výměnnými pryžovými členy, například průchodky výrobce Roxtec (viz Obrázek 5-20) představují „vyšší ligu“ z hlediska variability a mechanického provedení, avšak v kontextu konstrukce komory narážejí na několik limitů.

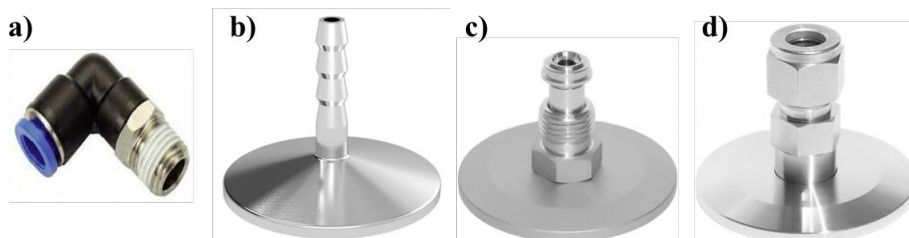


Obrázek 5-20 Kabelové průchodky Roxtec [52]

Plynotěsná provedení jsou obvykle určena pro větší průměry než referenční KF40 a významná část variant je certifikována primárně pro pracho – a vodotěsnost (IP/NEMA), nikoli pro plynotěsnost. Současně vyžadují přesně definovaný montážní otvor a jsou primárně navrženy pro instalaci do tenkých stěn nebo panelů (řádově jednotky mm). Pro stěny tloušťky 15 mm a více to znamená buď nutné lokální zeslabení stěny, nebo složité zapuštění a přesnou montážní geometrii. Z těchto důvodů je pro danou komoru výhodnější ponechat standardizované KF rozhraní a řešit průchody modulárně přes záslepky a adaptéry než fixovat velkorozměrový, drahý a na geometrii citlivý průchodový systém přímo do nosné stěny. Pokud by i přes vyšší finanční náročnost a specifické osazení bylo nutné v rámci komory obsáhnout i podobnou průchodku, jako je Roxtec, lze takové provedení realizovat rozšiřujícím adaptérem a speciální přírubou na napojení otvoru KF40.

Průchodky pro hadice

V závislosti na průměru a typu hadice lze rozdělit způsoby uchycení na dva typy. Polyetylenové hadice menších průměrů (<15 mm), určené primárně pro vedení stlačeného vzduchu a vybraných plynů, lze připojit pomocí standardních normalizovaných závitů přímo do stěny komory, či závitu záslepky. Pro potrubí normy KF však existují i specifické příruby určené přímo pro napojení tohoto typu hadice, viz. obrázek 5-21.



Obrázek 5-21 a) Nástrčná spojka, b) hadicový nátrubek, c) VCR konektor, d) Swagelok konektor [53]

Pro transportní hadice větších průměrů, se hadice pro ulehčení manipulace nejprve obstará kompatibilní přírubou velikosti K25, či KF40, která následně slouží pro připojení. Příruby jsou standardně buď hladké válcové, či nátrubkové.

Napojení na nátrubek je primárně určeno pro hadice z měkčích materiálů, transportující hlavně provozní médium (Obrázek 5-22). Napojení na hladkou přírubu se používá u hadic tvrdších určených pro transport jak média, tak sypkých materiálů. Tyto hadice jsou často tužší, ale díky odlišné konstrukci disponují menším poloměrem ohybu a tenčí tloušťkou stěny. Zásadním rozdílem je, že když se budou v hadici pohybovat částice prášku, z bezpečnostních důvodů je nutné uzemnit hadici, aby se zamezilo možnému vzniku náboje statické elektřiny. Oba typy hadic se na přírubu napojí stahovací objímkou a pokud nastanou komplikace, použijí se tyto svorky v páru v bezprostřední blízkosti pro dosažení požadovaného hermetického utěsnění.

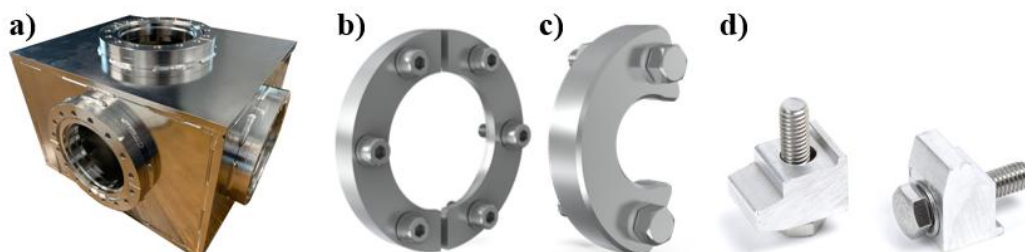


Obrázek 5-22 Vlevo hadice z měkčeného PVC [54], vpravo antistatická hadice AIRDUC PUR 351 EC pro transport brusiva s odizolovaným drátem

Napojení na kolmou plochu

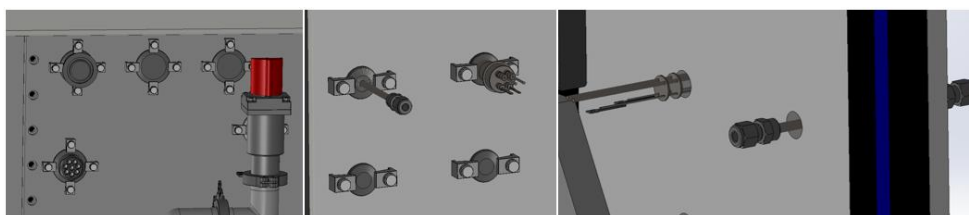
Volba napojení potrubních prvků na stěny komory je klíčovou fází návrhu, která přímo ovlivňuje náročnost následné montáže, výslednou těsnost i geometrii stěn komory. Možnost

pozdějších úprav je rovněž nutné zohlednit. Obecně lze k zařízení příruby buď přímo přivařit na stěnu (Obrázek 5-23a), či rozebíratelně napojit. Spoj musí obsahovat těsnící kroužek požadované velikosti a přítlačný prvek. Přítlak lze vyvodit několika druhy prvků, konkrétně existují průchodová svěrka (Obrázek 5-23b), svěrka typu C (Obrázek 5-23c), či drápková svěrka (Obrázek 5-23d).



Obrázek 5-23 Způsoby napojení příruby na stěnu [54]

První tři provedení na obrázku 5-23 mají jednu zásadní nevýhodu, značně nákladnou výrobu, či nákupní cenu. V rešerši bylo identifikováno, že svěrky typu „Claw Clamp“ se proto často používají u prototypových zařízení, díky jejich příznivé ceně, jednoduchému provedení a snadné montáži. Například na zařízení reAM-250 jsou tyto svorky použité v rámci velké většiny průchodek, viz. Obrázek 5-24.



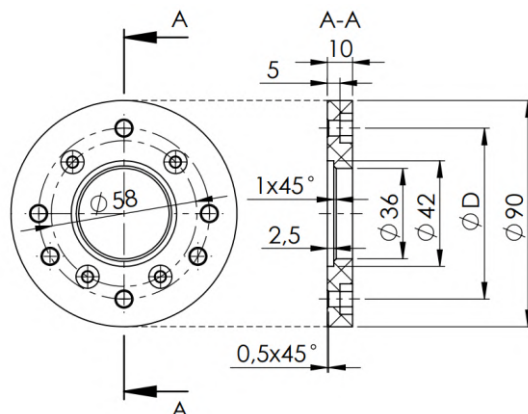
Obrázek 5-24 Příklad použití drápkových svěrek [17]

Geometrie drápkových svěrek uvádí téměř každý distributor, avšak montážní rozměry bývají kvůli drobným odlišnostem mezi jednotlivými výrobci buď neúplné, nebo se mírně liší. Získané montážní rozměry, konkrétně průměr roztečné kružnice pro napojení D, na které jsou umístěné dva, tři nebo čtyři připojovací kameny, jsou uvedeny v tabulce 5-3.

Tabulka 5-3 Porovnání roztečných kružnic otvorů pro připojení drápkových svěrek napříč distributory [17] [51]

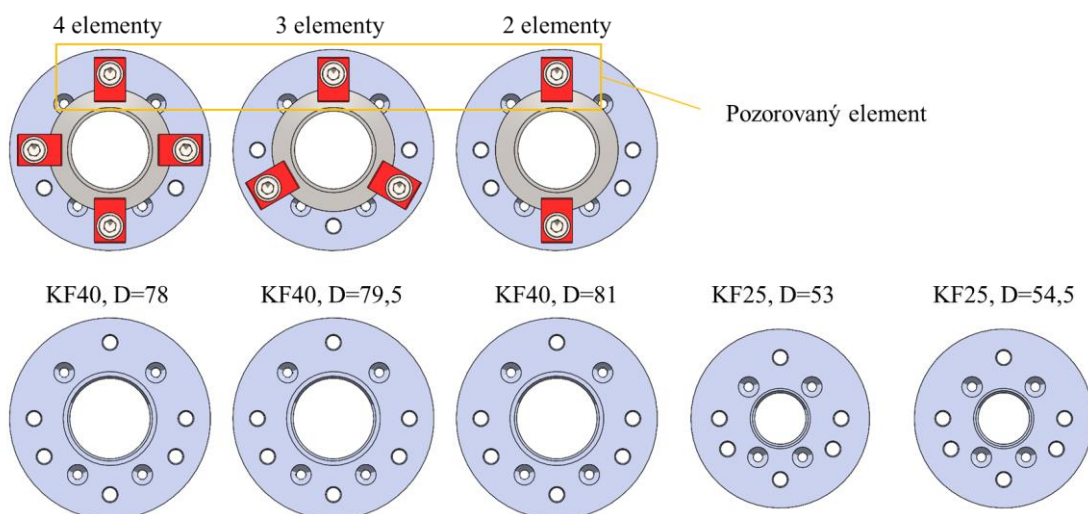
Zdroj	AVJS	LESKER	reAM	YQMM
Velikost	KF25/KF 40	KF25/KF 40	KF25/KF40	KF25/KF40
D [mm]	53 / 68	54,5 / 69,5	53 / 71	neuveveno
Podoba kamene			-	

Protože bude komora obsahovat větší počet průchozích otvorů, je nutné přesně stanovit rozměry napojovacích rozhraní již v této fázi, dodatečná úprava by byla po výrobě stěn velmi obtížná, až zcela nereálná. Po získání hodnot roztečných kružnic byly vytvořeny disky s předdefinovanými dírami a zahloubením pro těsnění, jejichž geometrie je znázorněna na obrázku 5-25.



Obrázek 5-25 Geometrie testovacího vzorku roztečné kružnice pro drápové spojky

V rámci testovacích „koleček“ byla kritická pouze rozteč D a prohlubeň o hloubce 2,5 mm dle geometrie ISO-KF40 a KF25 těsnění.

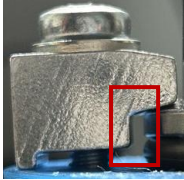
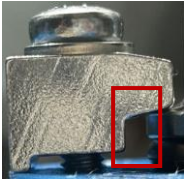
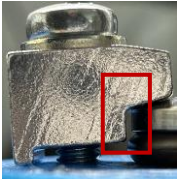
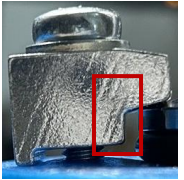


Obrázek 5-26 Testované konfigurace drápových spojek

Díky možnosti připevnění na podložku bylo možné otestovat nejen schopnost dostatečného přitlaku, ale i tuhost při ručním vyvolání ohybového momentu několika směry. Po manuálním otestování a zdokumentování všech kombinací na všech testovacích vzorcích bude možné určit optimální geometrii. Analýza testovaných upnutí je uvedena v následující tabulce 5-4. Tuhost spoje byla konzistentní při konfiguraci čtyř i tří elementů. Pokles tuhosti ve směru absence prvků při konfiguraci dvou svěrek má za následek nutnost implementace minimálně tří elementů, pokud není v rámci spoje uvažováno nulové namáhání spoje. Pro

napojení menších senzorů je možné zvolit i konfiguraci dvou svěrek při dodržení napojovací geometrie a správné orientace svěrek.

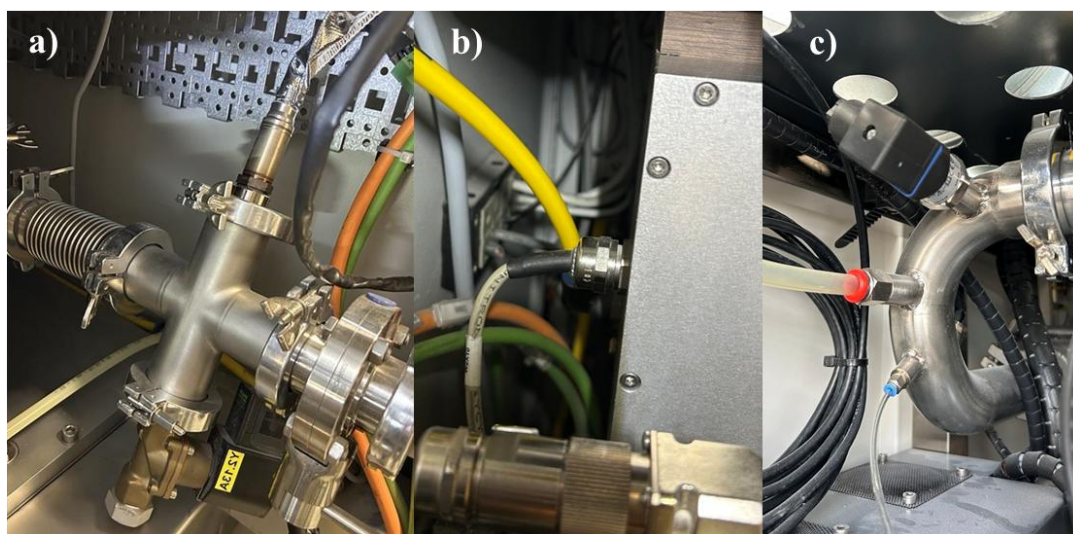
Tabulka 5-4 Fotodokumentace upnutí vzorků drápových svěrek

KF40, D=68 mm	KF40, D=69,5 mm	KF40, D=71 mm	KF25, D=53 mm	KF25, D=54,5 mm
				
				

Pro dosažení optimální mezery mezi spojovanou přírubou a kameny byly z tabulky 5-4 zvoleny průměry roztečných kružnic D pro velikost potrubí KF40 69,5 mm, pro velikost KF25 54,5 mm.

Implementace senzorů

Pro zajištění kontroly stavu inertní atmosféry a vybraných procesních veličin je nutné uvažovat také způsob fyzické integrace senzoriky. Možností jejího začlenění do potrubního systému existuje více, pro účely návrhu je lze zjednodušeně rozdělit do tří základních principů, viz. obrázek 5-27.

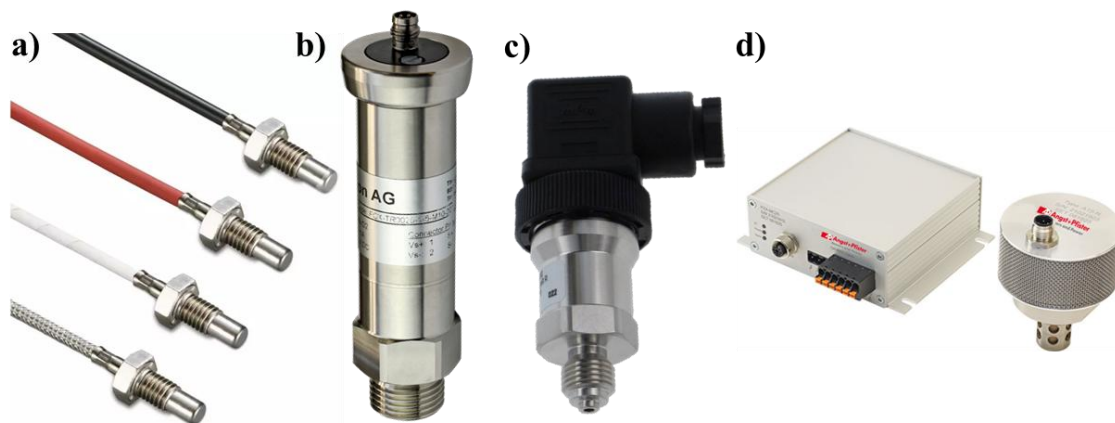


Obrázek 5-27 Integrace senzorů: a) skrz záslepku do potrubí ISO-KF, b) přímo do prostoru komory pomocí závitu ve stěně a plochého těsnění, c) přes přípravky přivařené přímo do potrubí ISO-KF

Z praktického hlediska budou v rámci návrhu tiskové komory uvažovány pouze první dvě možnosti, a sice integrace do potrubí a samotných stěn. Klíčovým parametrem zde bude modularita, otvory specifických rozměrů ve stěnách komory už zpětně nebude možné efektivně modifikovat. Na druhou stranu nelze předpokládat, že každý senzor bude možné a vhodné umístit přímo do potrubí vedení inertní atmosféry. Veličiny, které je v této fázi návrhu uvažovat jsou teplota, tlak a podíl O_2 v inertní atmosféře.

Dostupné zdroje a inspekce dostupných modelů experimentálních zařízení [12] [18] doplnily poznatky o zařízení SLM280 HL z hlediska umístění senzoriky. Sensory teploty je vhodné umístit primárně do pracovního prostoru. Jejich přesná poloha a počet závisí na druhu senzoru. Tlak je důležité monitorovat zejména v potrubním systému, kde odečítané hodnoty slouží k identifikaci míry zanesení filtračních prvků, určení tlakové ztráty celkového systému a validace geometrie distributorů. Doplnkové umístění senzoru tlaku v pracovním prostoru je nezbytné zejména z hlediska přípravných fází zaplavyování inertním plynem. Obsah kyslíku je vhodné monitorovat především v pracovním prostoru, typicky s umístěním na stropnici. Na obrázku 5-28 jsou uvedeny příklady senzorů uvažovaných pro návrh rozhraní. Jako příklad senzoru kyslíku lze uvést model FCX-TR0025, který umožňuje jednoduchou snadnou do řídicího systému. V rámci řešení byl v zařízení [17] identifikovaný také komplexnější a násobně nákladnější plynový senzorický modul PZA-MC25-N.

Počet i umístění se může prostřednictvím budoucích úprav měnit, uvedený přehled však dává dostatečnou představu pro specifikaci počtu a umístění potřebných průchozích otvorů v rámci konstrukce stěn komory.

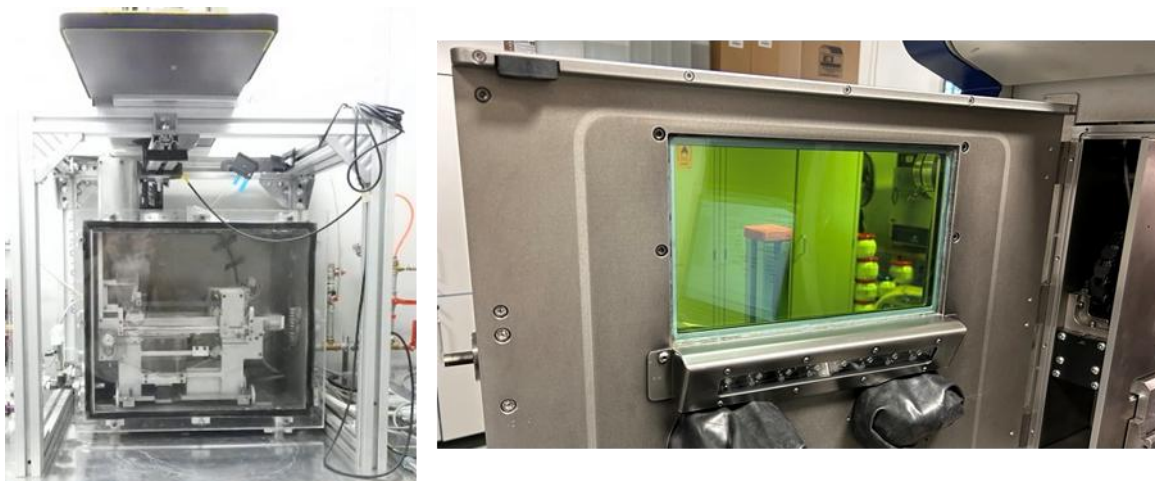


Obrázek 5-28 Zobrazení vytipovaných typů senzorů: a) Senzor teploty [55], b) převodník kyslíku FCX-TR0025 [55], c) převodník tlaku Baumer CTX-3.2.3.B76.0 [56], d) plynový senzorický modul PZA-MC25-N [55]

Implementace průzorů

Průzory představují specifickou skupinu průchozích otvorů, jejichž účelem není přímý přístup médií či komponentů, ale zajištění vizuálního kontaktu s vnitřním pracovním prostorem. Koncepce vychází ze stejných principů jako u ostatních otvorů ve stěnách komory, i zde dochází k přerušení nosné části konstrukce a ke vzniku rozhraní mezi vnitřním a vnějším prostředím. Rozdíl spočívá především v tom, že výsledný otvor není ponechán volný, ale je trvale vyplněn transparentním prvkem, který musí současně zajistit těsnost, mechanickou odolnost a dlouhodobou stabilitu v daných provozních podmínkách.

Záměr průzorů se však neomezuje pouze na roli jednoduchého kontrolního okna, jak je běžné u komerčních zařízení, kde je zpravidla použit jeden hlavní průzor určený primárně k vizuálnímu ověření průběhu procesu. V kontextu experimentální a výzkumné komory je žádoucí, aby byl průzor již v návrhu chápán jako plnohodnotné pozorovací rozhraní, umožňující případnou integraci kamerových a diagnostických systémů. Tím se omezuje nutnost dodatečně a často kompromisně hledat vhodnou polohu a pozorovací úhel pro sledování konkrétních dějů na tiskové platformě. Přestože jsou takové průzory typicky soustředěny do stropní části komory, která v tomto návrhu není řešena, je účelné uvažovat vybrané průzory i na dveřích a dalších stěnách komory, jak je dále popsáno.



Obrázek 5-29 Dva extrémy: vlevo téměř celá stěna komory z průhledného materiálu [57], vpravo jediný průhled zařízení SLM280 HL

Zařazení průzorů do konstrukce komory je současně omezeno fyzikální podstatou samotného procesu. Laserový zdroj používaný v LPBF technologii generuje intenzivní záření s charakterem srovnatelným se svařováním, což klade specifické nároky na optické vlastnosti použitých transparentních materiálů. Průzory proto nemohou být řešeny běžnými polymerními materiály typu plexiskla, ale vyžadují použití speciálních ochranných skel s definovanou spektrální propustností. Tato skutečnost významně zvyšuje jejich cenu a přirozeně vede k nutnosti hledat kompromis mezi rozsáhlou vizuální přístupností pracovního prostoru a minimalizací počtu a plochy průzorů. Na základě rešerše existujících zařízení a experimentálních potřeb je proto vhodné vymezit, ve kterých částech komory má průzor

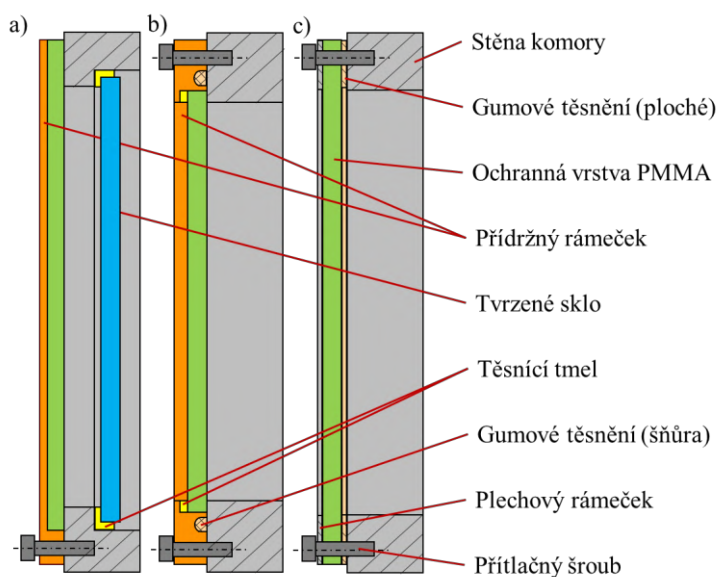
reálný přínos, jaký má mít rozměr a jaké provedení je pro danou aplikaci vhodné. Použitý vláknový laser v zařízení SLM280 HL generuje laserový svazek o vlnové délce přibližně 1070 nm [58].

Na rozdíl od běžných transparentních plastů, jako je polykarbonát nebo plexisklo, jsou laserově ochranná skla navržena cíleně pro práci v prostředí s intenzivním laserovým zářením. Zásadním rozdílem je definovaná spektrální propustnost a optická hustota (OD) pro konkrétní vlnové délky, kdy například hodnota OD 7 znamená útlum laserového záření o sedm řádů [59]. Zatímco standardní polykarbonátová nebo akrylátová deska plní pouze mechanickou a vizuální funkci a její chování vůči laserovému záření není řízené ani certifikované, laserové filtrační sklo je materiálově i opticky optimalizováno tak, aby nebezpečné záření v pásmu kolem 1070 nm účinně potlačilo. Pro laserové záření v oblasti blízkého infračerveného spektra kolem vlnové délky 1070 nm, typické pro vláknové lasery používané v LPBF zařízeních, je pro ochranu zraku nutné uvažovat průzory s dostatečnou optickou hustotou, přičemž za konstrukčně bezpečné minimum je považována hodnota OD 6, zatímco OD 7 představuje vhodnou rezervu umožňující bezpečné pozorování procesu i při výskytu intenzivních odrazů laserového záření.

Z konstrukčního hlediska je vhodné průzory rozdělit na dvě skupiny podle jejich funkce a nároků. Pro laserový paprsek je standardem kruhový průzor ve stropnici (optické okno v ose skenovací hlavy), který je dimenzován primárně podle optiky laseru a požadavků na ochranu. Tento prvek bude v budoucím vývoji zařízení implementovaný do stropnice zařízení prozatím nedefinovaným způsobem. Druhou skupinu tvoří průzory určené pro pozorování procesní zóny kamerami a diagnostikou. Zde se pro specifická spektra používají specializované materiály (např. ZnSe optika pro IR aplikace), typicky v kruhovém provedení v menších průměrech, jednak kvůli standardizaci a zároveň znační finanční nákladnosti [59]. Příklad lze pozorovat na obrázku 2-52. Pro běžné kontrolní průzory je naopak výhodnější vycházet z tabulového materiálu (akrylát/PMMA, případně minerální sklo), který umožňuje úpravu rozměrů při nízkých nákladech při iteracích návrhu. Pro ještě vyšší snížení nákladů se vyskytuje možnost lepení ochranných fólií na čirá polykarbonátová a klasická skla.

Z pohledu montáže se nabízejí tři základní řešení. První varianta uvažuje sklo v kontaktu s procesním prostředím, které je těsnícím tmelem vsazeno a drženo ve frézované drážce stěny komory. Následně je z vnější strany připojen přídržný rámeček, který obsahuje vsunutou ochrannou vrstvu. Další varianta předpokládá komplexnější přídržný rámeček, ve kterém je ochranná vrstva pevně vsazena a zatěsněna těsnícím tmelem, zároveň je rámeček přes kruhová těsnění přitlačen ke vnější straně stěny. Poslední varianta předpokládá ochrannou vrstvu s průchozími dírami a ploché těsnění po celém obvodu kontaktní oblasti, také s průchozími dírami. Tato konfigurace navíc vyžaduje přítomnost plechového rámečku pro zajištění optimálního přitlaku napříč průzorem. Vysokou výhodou první konfigurace je přítomnost dělicího prvku. Tvrzené sklo lépe snáší působení procesního prostředí a je

odolnější vůči poškrábání a případnému dopadu žhavých odletujících částic. Je proto tímto způsobem možné prodloužit životnost ochranné vrstvy.



Obrázek 5-30 Možné konfigurace struktury průzorů

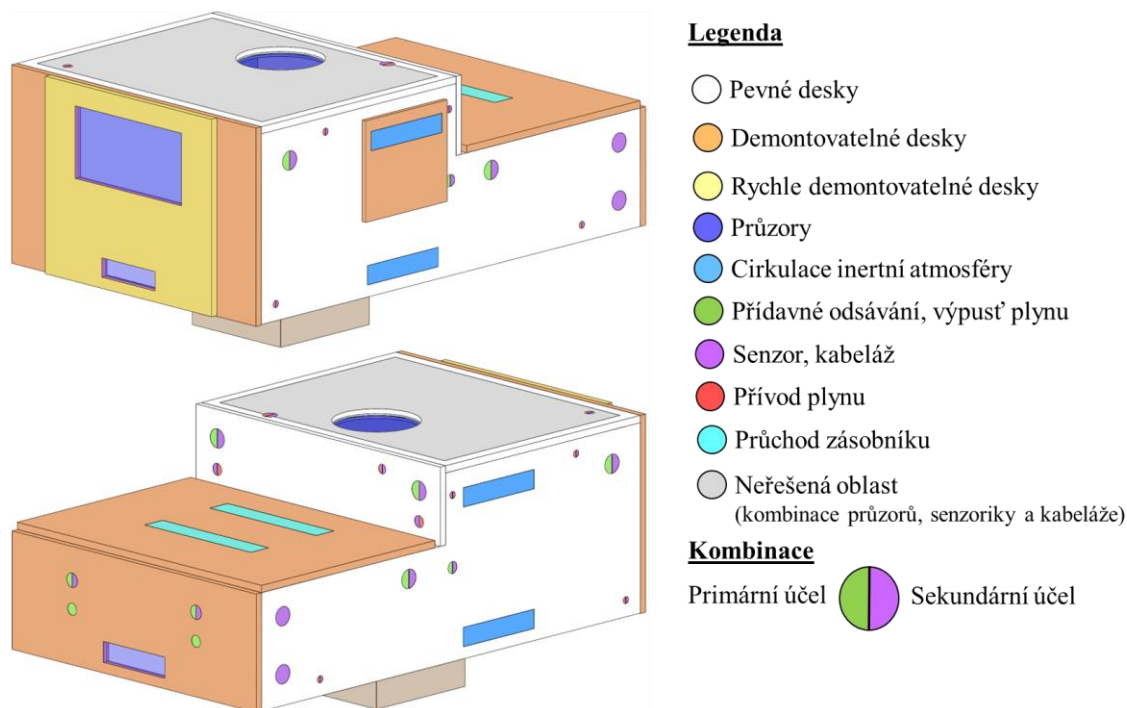
Pro detailní návrh bude uvažována první koncepce průzoru, kritické hledisko je velká homogenní kontaktní plocha, společně s vyšší mírou mechanické odolnosti.

Definice průchozích otvorů experimentální komory

Po předběžném stanovení celkových a dílčích rozměrů komory a základních typů jednotlivých druhů mechanických rozhraní je možné definovat orientační rozmístění a minimální počet jednotlivých typů průchozích otvorů ve stěnách navrhované komory.

Pro účely tohoto rozvržení byly jednotlivé desky komory rozděleny podle funkce a intervalu demontáže. Pevné desky tvoří základní nosnou konstrukci, zatímco demontovatelné desky představují části, u kterých je umožněna demontáž bez ovlivnění zbytku komory, případně které jsou uvažovány pro demontáž v rámci běžné údržby. Jako rychle demontovatelná deska jsou označeny hlavní dveře zařízení.

Rozmístění průchozích otvorů nevychází pouze z momentální konfigurace uvažovaných a doplňkových subsystémů, nýbrž z požadavku budoucí upravitelnosti. Příkladem je demontovatelná deska s průchody pro zásobník, která je v rámci návrhu uvažována jako vyměnitelná v případě, že se směr vývoje bude ubírat i cestou vývoje zásobníku se zcela odlišnou stavbou a tím i nároky na mechanické rozhraní. Rozhraní pro zásobník bude v návrhu muset být kompatibilní se stávajícími zásobníky pro jeden druh materiálu ze zařízení SLM280 HL. Rozhraní související se základními funkcemi, jako jsou například přívody a odvody inertní atmosféry v bočnicích komory, jsou umístěna z hlediska maximalizace potenciálu a minimalizace limitace návrhu distributorů z pohledu zástavbového prostoru.



Obrázek 5-31 Orientační počet a umístění průchozích otvorů komory

V návrhu jsou uvažovány celkem čtyři prostorné otvory pro přívod a odvod inertní atmosféry, společně s dalšími 10 otvory velikosti KF40, primárně určenými pro doprovodné subsystémy rozvodu inertní atmosféry. Na obrázku 5-31 je taktéž naznačena stropnice, na které nejsou uvažovány žádné prvky, mimo průchod pro energetický modul a menší senzoriku. Na vrchní demontovatelné desce je možno vidět dva otvory pro průchod zásobníku, přítomnost druhého otvoru je zvolena pro znázornění možnosti budoucího rozšíření. Na zadních částech bočnic jsou umístěny otvory pro vývod kabeláže lineárních aktuátorů a napříč celým zařízením je celkem minimálně 10 otvorů, které lze použít pro přívod a napouštění inertního plynu. Vyšší počet otvorů pro zaplavování pracovního prostoru je inspirován publikací [60], pojednávající o optimalizaci zaplavování ohraničeného prostoru. V rámci zmíněné studie bylo zjištěno, že nahrazení konfigurace s jedním napouštěcím a jedním vypouštěcím otvorem variantou se dvěma napouštěcími a třemi vypouštěcími otvory vedlo při dosažení stejné cílové koncentrace kyslíku ke snížení potřebného množství plynu o přibližně 37 %.

Otvory, jejichž umístění bylo nejvíce ovlivněné rešerší jsou kromě otvorů pro distributory také průzory přítomné v úrovni práškového lóže, a to jak na dveřích, tak na zadní demontovatelné stěně. Jejich přítomnost značí umožnění pozorování jevů jako jsou odletující částice z větší blízkosti a vhodnější pozice než bylo možné hlavním inspekčním průzorem.

5.1.4 Definice materiálů prvků komory

Volba materiálů byla provedena s ohledem na hmotnost komory, náročnost montáže, vyrobitelnost a požadovanou funkci těsnosti. Vzhledem ke koncepci komory, která se sestává primárně z rovinných desek, byla jedním z hlavních omezení minimální tloušťka stěn, která kromě dostatečné tuhosti musí umožnit vytvoření slepých závitových děr pro upínací prvky. Nejkritičtější jsou v tomto směru závity pro připojení potrubních prvků KF dráповými svěrkami přes závity velikosti M6, u kterých se při **uvažované tloušťce desek 15 mm** již pracuje s minimální rezervou vůči tabulkovým doporučením minimální délky závitů do měkčích konstrukčních materiálů. Na základě konzultace s výrobcí bylo potvrzeno, že toto řešení je při daném použití realizovatelné.

Použití konstrukční oceli pro desky komory bylo zamítnuto zejména z důvodu vysokého nárůstu hmotnosti. Orientační model ukázal, že by celková hmotnost samotných desek komory mohla být více než 300 kg, což by výrazně komplikovalo manipulaci, včetně montáže a demontáže zařízení. Jako vhodnější konstrukční materiál byly proto zvoleny **hliníkové slitiny**. Pro hlavní desky je po konzultaci s vybraným výrobcem Haba s.r.o. [61] zvolena slitina EN AW-5083, dostupná ve formě předfrézovaných deskových polotovarů s vhodnou rovinností a kvalitou hlavních ploch. Uváděná drsnost jemně frézovaných ploch polotovarů nabývajících hodnot Ra0,8 je z hlediska konstrukce výhodná hlavně kvůli dosedacím plochám pro těsnění upínaných prvků. Použití pevnějších hliníkových slitin řady EN AW-6xxx bylo zvažováno, ale výrobní cena by převýšila maximální předpokládaný rozpočet. Případnou nižší povrchovou odolnost hliníku lze v dalších iteracích řešit povrchovou úpravou, například eloxováním. Hliníkový materiál dráповých svěrek pro napojení ISO-KF prvků na stěny komory je dodatečně výhodný z hlediska montáže, protože při dotažení nehrozí výrazné lokální poškození dosedacích ploch jako při použití odlišných ocelových upínacích prvků.

Pro průzory bylo zvoleno vrstvené bezpečnostní sklo **VSG**. Oproti tvrzeným sklům je z hlediska bezpečnosti vhodnější zejména tím, že v případě VSG zůstávají při porušení úlomky skla zachyceny na mezivrstvě a nedojde k okamžité destrukci průzoru. Doplnkové a prototypové prvky, jako jsou pomocné držáky, kryty, zkušební iterace geometrií distributorů, či specifické prvky vedení inertní atmosféry mohou být v testovacích fázích vyráběny technologií FDM z materiálů ABS nebo PETG, díky jejich provozní stabilitě za teplot převyšujících 60 °C. V případě, že se nebude jednat o nosné prvky, je možnost záměny i za plastové díly. Příklad takové aplikace do potrubního systému lze vidět v publikaci [27].

Vzájemné hermetické utěsnění desek je uvažováno prostřednictvím kruhových silikonových těsnících prvků z materiálu **MVQ**. Běžné těsnící NBR o-kroužky se pro tuto aplikaci jeví jako příliš tuhé a vyžadovaly by zvýšený nárok na přesnou geometrii drážek. Před finální volbou rozměrů byly porovnány těsnící profily s průměry 2 až 6 mm. Jako doplnková možnost pro lokální dotěsnění menších spár bylo identifikováno anaerobní plošné těsnění Loctite 518, určené pro pružné vyplnění malých nerovností mezi dosedacími plochami.

5.2 Okruh rozvodu inertní atmosféry

Z pohledu návrhu okruhu inertní atmosféry je v rámci předběžného návrhu nejdůležitější porozumění orientace a trajektorie jednotlivých použitých prvků modulárního potrubí, společně s argumentací změny orientace a koncepce distributorů inertní atmosféry, které budou porovnány s optimalizovanou konfigurací pro zařízení SLM280 HL.

Okrajové podmínky

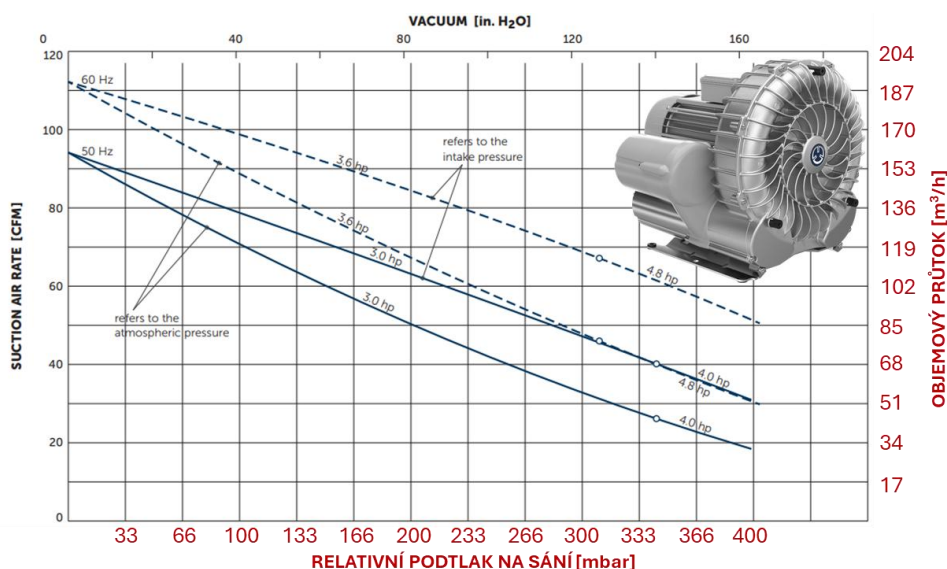
Aby bylo možné získané hodnoty porovnat s referencí optimalizované geometrie [31], je nutné definovat okrajové podmínky, které budou přenositelné i pro nově navrhovanou komoru. Skutečné hodnoty se budou mírně lišit a přesně stanovit je bude možné až měřením na kompletovaném zařízení, kde bude v budoucnu přítomna i senzorická soustava. Nejpodstatnější hodnoty jsou parametry recirkulačního dmýchadla, a okrajové podmínky pro hlavní a vedlejší distributory, včetně odtahu.

Maximální teplota provozního média je zvolena na 60 °C, současně jediné inertní plyny, které je v současných podmínkách v zařízení možné použít jsou argon a dusík. Všechny potřebné hodnoty, týkající se proudících médií jsou uvedeny v tabulce 5-5.

Tabulka 5-5 Vlastnosti inertních plynů [62]

Parametr	Argon	Dusík
Měrná plynová konstanta $R_i \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	208,1	296,8
Hustota (60 °C, p_{abs}) $\rho_i \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	1,494	1,048
Referenční dynamická viskozita $\eta_{i0} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$2,125 \cdot 10^{-5}$	$1,663 \cdot 10^{-5}$
Dynamická viskozita (60 °C) $\eta_i [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$2,502 \cdot 10^{-5}$	$1,937 \cdot 10^{-5}$

Hodnoty hustot a dynamických viskozit byly určeny při referenčním atmosférickém tlaku a teplotě 60 °C. Pro získání možného rozpětí průtoku proudícího média je třeba uvést parametry recirkulačního dmýchadla Becker SV 300/2 [62], kterým je vybaven stávající filtrační okruh na obrázku 2-28. Graf na obrázku 5-32 definuje závislost objemového průtoku na podtlaku na vstupu čerpadla. Podtlak je v originální podobě katalogu vyjádřen vodním sloupcem a jedná se o tlakový odpor, který musí dmýchadlo překonat. Sací objemový průtok je uveden v kubických stopách za minutu, proto byly do grafu vloženy lépe interpretovatelné hodnoty s přibližným přepočtem. Hodnoty předpokládají nastavení 100 % výkonu dmýchadla.



Obrázek 5-32 Parametry dmýchadla Becker SV 300/2 [62]upraveno

V rámci návrhu bude zvolen rozsah rychlostí vstupu proudění pouze na $1\text{--}15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z důvodu možnosti porovnání s výsledky [31], avšak pro pozdější úpravy a iterace bude výhodné využití vyššího potenciálu dmýchadla, které v době publikace [31] nebylo dostupné. Díky téměř dvojnásobnému možnému průtoku bude možné v budoucnu přejít na distributory s větší výstupní plochou při zachování podobného rychlostního pole. Průtok uvažován v potrubí o vnitřním průměru 40 mm.

Tabulka 5-6 Rozsah uvažovaných rychlostí na vstupu potrubí

Rychlost proudu plynu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Objemový průtok [m^3/h]	Objemový průtok [m^3/s]
1	4,52	0,00126
2	9,05	0,00251
3	13,57	0,00503
...	...	...
13	58,81	0,01634
14	63,33	0,01759
15	67,86	0,02011

Zároveň lze pro různé typy používaných materiálů pro výrobu součástí pomocí publikace [29] přibližně stanovit kritické rychlosti pro získání představy rozdílů možných rychlostí proudu plynu nad tiskovou platformou. Na základě analytického vztahu v publikaci [29] lze získat orientační kritickou třecí rychlost, při které se začne narušovat stabilita částice na povrchu lóže. Následně je proveden přepočít, kde se kritická třecí rychlost převede na kritickou rychlost proudu ve vzdálenosti 1 mm nad práškovým lóže pomocí logaritmického

rychlostního profilu, při které by již docházelo k narušení nanesené vrstvy proudem plynu, viz. rovnice (3), vycházející z publikace [64].

Tabulka 5-7 Kritické rychlosti proudění pro nejčastěji používané materiály na FSI

Materiál	Hustota materiálu [kg·m⁻³]	Medián průměru částic [μm]	Kritická třecí rychlost [m·s⁻¹]	Kritická rychlost proudu [m·s⁻¹]
Hliníková slitina (AlSi10Mg)	2670	41,6	0,251	4,13
Nerezová ocel (316L)	7900	32,0	0,300	5,13
Titanová slitina (Ti6Al4V)	4410	32,0	0,286	4,88
Měděná slitina (CuCr1Zr)	8910	35,1	0,297	5,01

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \approx \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z \cdot 30}{d_{50}}\right) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] \quad (3)$$

kde: v – rychlost proudu ve výšce z nad tiskovou platformou [m·s⁻¹]

u_* – kritická třecí rychlost [m·s⁻¹]

κ – Von Karmanova konstanta [-]

z – výška nad tiskovou platformou [m]

z_0 – parametr vyjadřující vliv drsnosti povrchu [m]

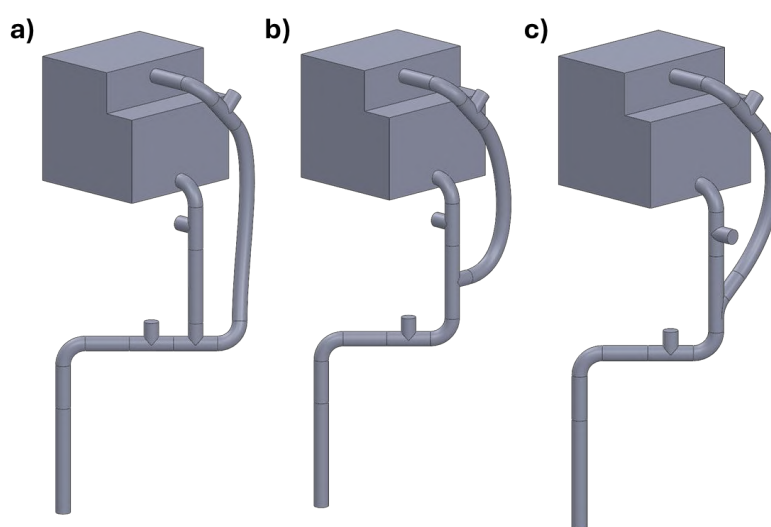
d_{50} – medián průměru částic prášku [m]

Analytický model

Analytický výpočet tlakových ztrát byl zvažován pouze jako orientační nástroj pro velmi jednoduché trasy potrubí. Již u základního přímého úseku však vznikají znatelné rozdíly mezi analytickým výpočtem a numerickou validací, způsobené zejména rozdílnou definicí rychlosti a vývojem rychlostního profilu u stěn potrubí. U složitějších prvků, jako jsou kolena, flexibilní hadice nebo větvení, by bylo nutné zavádět velké množství empirických součinitelů pro přibližné kompenzace. Tyto hodnoty jsou navíc silně závislé na konkrétní geometrii, průtoku a případně i vzájemném ovlivnění při dělení větví. Výsledný analytický model by proto rychle nabýval zbytečné komplexnosti, aniž by poskytoval dostatečnou přesnost. Pro návrh reálného systému rozvodu inertní atmosféry je proto vhodnější využít komplexnější numerické simulace, které umožní posoudit i rozdělení rychlostí a míru rovnoměrnosti proudění v jednotlivých částech.

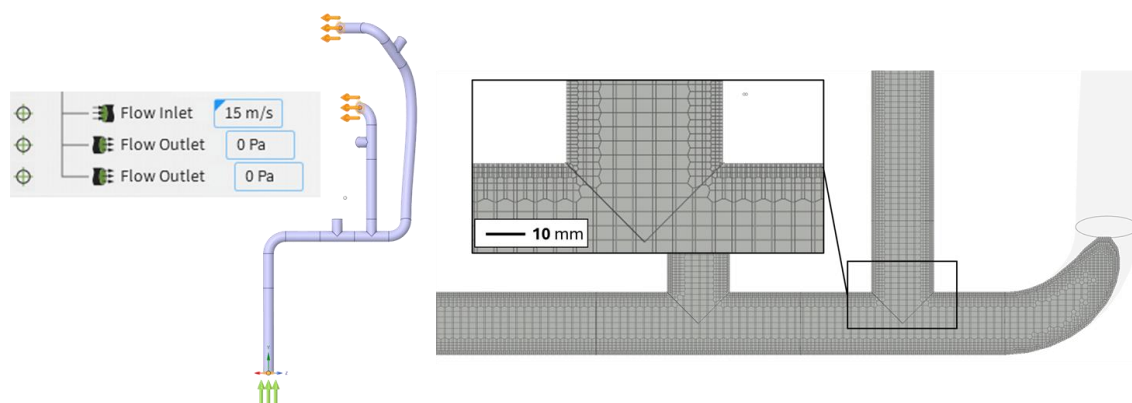
Rozdělení na více větví

Aby bylo možné simulovat prostředí uvnitř pracovního prostoru komory, je nutné navrhnout systém dopravy mezi recirkulačním dmýchadlem a experimentální komorou. Cílem simulací je určit poměry rozdělení proudu mezi jednotlivými větvemi v závislosti na konfiguracích. První varianta (obrázek 5-33a) odpovídá návrhu potrubí současné konfigurace zařízení SLM 280HL, druhá varianta pouze mění orientaci dělicího prvku a třetí uvažuje dělení pomocí prvku, který by šlo kategorizovat jako T-odbočka s obloukově napojenou vedlejší větví, nekonvenční v kontextu zařízení LPBF. Geometrie upraveného prvku vychází z publikace [65], kde je autorem uveden výrazný rozdíl z hlediska tlakových ztrát oproti obyčejným kolmým dělicím prvkům. Symetrické Y-rozdělení, které se v potrubních a pneumatických rozvodech využívá často, nebylo primárně uvažováno z důvodů větší zástavby a bez možnosti záměny za jednoduché T-rozdělení.



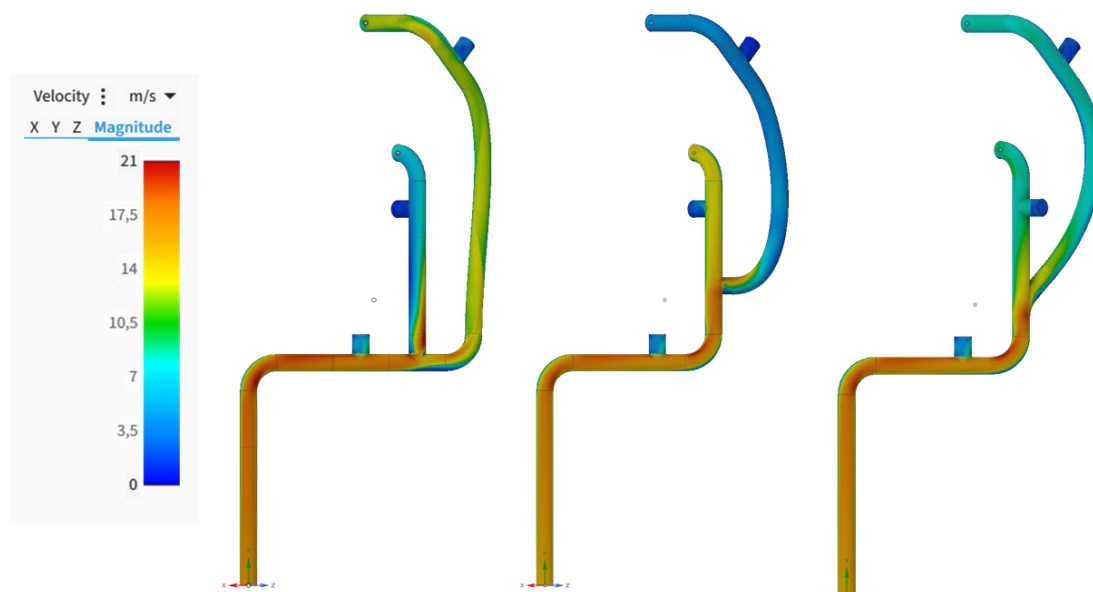
Obrázek 5-33 Konfigurace pro simulace poměru průtoku při rozdělení větví

Při CFD simulacích potrubních prvků je důležité, aby byla síť lokálně plynule zjemněna v oblasti u stěn, pro vyšší možnost zachytit vznikající rychlostní gradienty. Na obrázku 5-34 je znázorněné nastavení okrajových podmínek simulací vpustí, na které byl využitý nástroj Ansys Discovery.



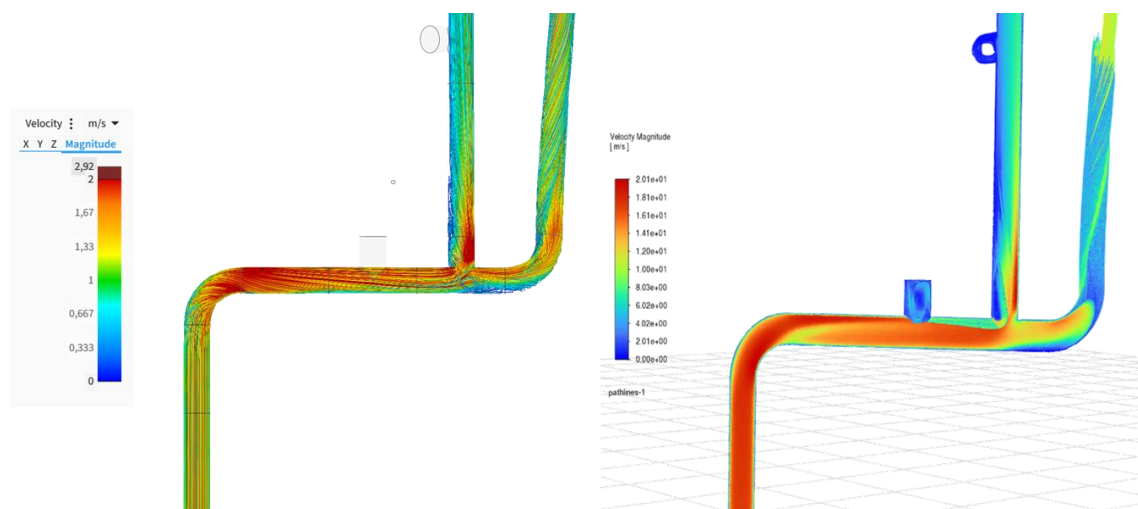
Obrázek 5-34 Okrajové podmínky simulace dělení potrubí

Výsledkem simulací je znázornění poměru rozložení vtoku mezi obě větve, a to v závislosti na rychlosti na vpusti i typu použitého inertního plynu (obrázek 5-42). Uvedené podoby dělení proudu inertní atmosféry jsou znázorněny při maximální rychlosti proudu na vpusti $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, proudící médium argon.



Obrázek 5-35 Simulace dělení vtoku inertní atmosféry při proudícím argonu o rychlosti $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Pro posouzení vhodnosti použitého nástroje pro simulace byla provedena i simulace v prostředí Ansys Fluent, kde lze přesněji nastavit konečnoprvkovou síť a pravděpodobnost vzniku turbulencí, konkrétně na hodnotu 5 %. Další použité okrajové podmínky byly turbulentní model k-omega a implementace drsnosti stěn, která je zahrnuta i v nástroji Ansys Discovery. Na obrázku 5-36 je znázorněno porovnání grafické podoby simulací obou nástrojů, kde Ansys Fluent vykazuje například výrazně názornější a vyšší počet proudnic, zároveň s výše zpřesněnými extrémy. V obou případech byl zvolen inertní plyn argon s hustotou definovanou při provozní teplotě $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlostí $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obrázek 5-36 Porovnání nástroje Ansys Discovery vlevo a Ansys Fluent vpravo

Při srovnání výsledků obou nástrojů je důležité zmínit, že přesnější nastavení simulace v tomto konkrétním případě pouze více prohlubuje dominanci jedné z větví a trendově charakter nemění. V tabulce 5-8 lze pozorovat, že při vyšších rychlostech, které v zařízení reálně budou nastávat, dochází k zpřesnění výsledků o přibližně 3-5 %, což lze pro získání povědomí o povaze vlivu potrubí v návrhové fázi považovat za zanedbatelné. V momentě, kdy už bude trasa přesně definována, opatřena snímači tlaku a koncovými distributory, které budou výrazně ovlivňovat tlakové ztráty větví, bude vhodnější pro přesnou simulaci použít nástroj Ansys Fluent. Do té doby je vhodnější pro rychlou a poměrně přesnou validaci, v rámci iteračního a předběžného návrhu, dále využívat nástroj Ansys Discovery.

Tabulka 5-8 Hodnoty simulací z obou výpočetních nástrojů

Vstupní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Ansys Discovery		Ansys Fluent		Rozdíl Discovery – Fluent [%]
	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	
11	35,7	64,3	33,9	66,1	-5,0 %
13	34,9	65,1	33,2	66,8	-4,9 %
15	33,4	66,6	32,5	67,5	-2,7 %

Na následujících tabulkách 5-9 až 5-119 jsou uvedeny výsledky simulací pro každou konfiguraci zvlášť, kde je podstatné vzájemné srovnání z hlediska závislosti na použitém inertním plynu a vstupní rychlosti. Nejpodstatnějším zjištěním je určení přibližných poměrů dělení toku mezi hlavní a vedlejší trasou, které bude následně přenositelné pro návrh distributorů a podoby okruhů. Jako hlavní trasa je označena výpusť plynu do distributoru vpusti ve spodní části komory, na obrázku 5-35 i 5-36 ji představuje kratší trasa po rozdělení. Jako vedlejší trasa je poté označen přívod plynu do vrchního, přídatného distributoru.

Tabulka 5-9 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti A

Vstupní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Argon		Dusík		Rozdíl Ar-N ₂ [%]
	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	
1	44,6	55,4	45,1	54,9	0,44
2	42,0	58,0	42,4	57,6	0,37
3–8	39,4	60,6	39,6	60,4	0,21
9–11	37,7	62,3	38,0	62,0	0,30
12–15	36,8	63,2	37,1	62,9	0,31

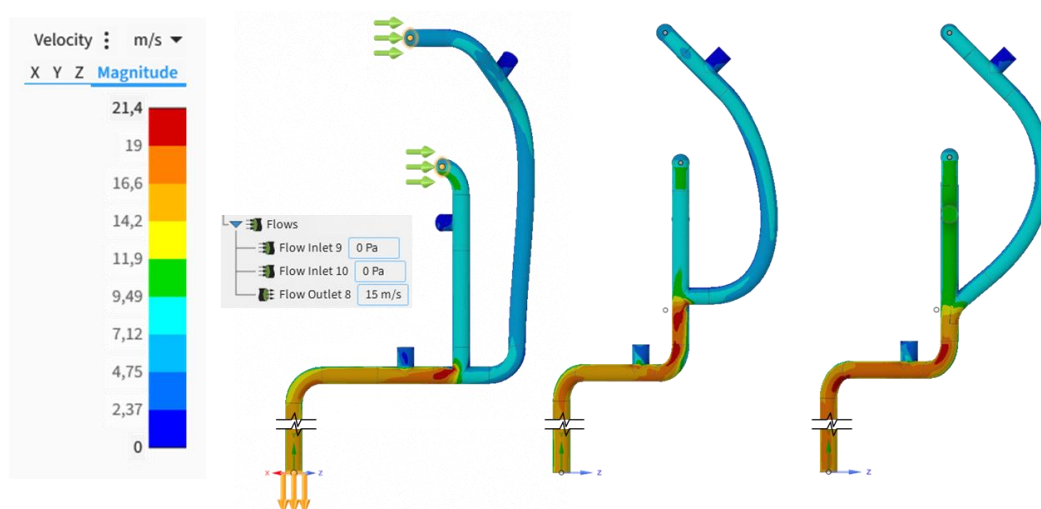
Tabulka 5-10 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti B

Argon			Dusík		Rozdíl Ar-N ₂ [%]
Vstupní rychlost [m·s ⁻¹]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	
1	74,6	25,4	74,6	25,4	0,01
2	74,9	25,1	75,0	25,0	0,03
3–8	74,6	25,4	74,6	25,4	0,02
9–11	75,4	24,6	75,2	24,8	0,24
12–15	76,1	23,9	75,9	24,1	0,19

Tabulka 5-11 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti C

Argon			Dusík		Rozdíl Ar-N ₂ [%]
Vstupní rychlost [m·s ⁻¹]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	
1	63,0	37,0	63,1	36,9	0,12
2	59,4	40,6	60,3	39,7	0,81
3–8	53,7	46,3	54,0	46,0	0,31
9–11	51,9	48,1	52,1	47,9	0,17
12–15	51,8	48,2	51,8	48,2	0,01

V neposlední řadě bylo stejným typem simulace určeno, zdali zjištěné trendy platí i v opačném použití, a sice u odsávání. Potrubní systém na opačné straně zařízení se od vpustí nebude rámcově výrazně lišit a pravděpodobně bude totožný s jednou z navržených konfigurací.

Obrázek 5-37 Simulace dělení vtoku při odsávání argonu rychlostí 15 m·s⁻¹

Vzájemné srovnání konfigurací udává několik poznatků. U první a třetí konfigurace lze pozorovat nestabilitu při nižších rychlostech. Konfigurace s T dělicím prvkem, umístěným v opačné orientaci, než je tomu v SLM280 HL, vykazuje nejvyšší stabilitu trendu napříč rychlostmi a zároveň i nejvyšší stabilitu. Při poměru hlavní a vedlejší větve přibližně 3:1 ji lze však považovat v této fázi návrhu za nevhodnou, protože by do přídavného distributoru neproudilo provozní médium dostatečnou rychlostí. U přídavného distributoru lze předpokládat srovnatelnou, či vyšší výstupní plochu než u hlavního. V případě, že nebude zařízení na začátku vývoje osazeno kompletní sensorikou, rozdělení s obloukovým napojením vykazuje nejrovnoměrnější rozdělení mezi obě větve a je tak vhodné pro testování díky lépe specifikovanému trendu. Třetí konfigurace zároveň vykazovala nejvyšší stabilitu mezi použitými inertními plyny při vysokých rychlostech.

V případě odsávání záleží na geometrii potrubí násobně méně než v případě vpustí, viz. tabulka 5-13. Konfigurace se mezi sebou liší jen v nižších jednotkách procent a výrazně vyšší význam zde bude mít například míra ulpívání odsávaných částic.

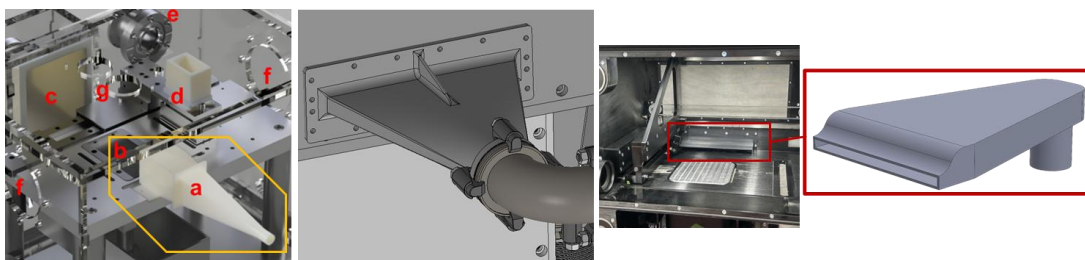
Tabulka 5-12 Výsledky CFD simulací konfigurací při odsávání

KONFIG. 1			KONFIG. 2		KONFIG. 3	
Vstupní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]	Hlavní trasa [%]	Vedlejší trasa [%]
15	57,3	42,7	56,8	43,2	55,2	44,8

Konfigurace odsávání vykazuje výrazně vyšší stabilitu trendu mezi konfiguracemi. Díky této informaci lze určit, že podobu trasy a orientaci prvků potrubního systému je možné definovat nikoliv pro maximalizaci rovnoměrnosti dělení mezi větvemi, ale z hlediska minimalizace ulpívání prášku v potrubí, které nastává při malém sklonu vůči horizontální rovině.

5.2.1 Návrh distributorů

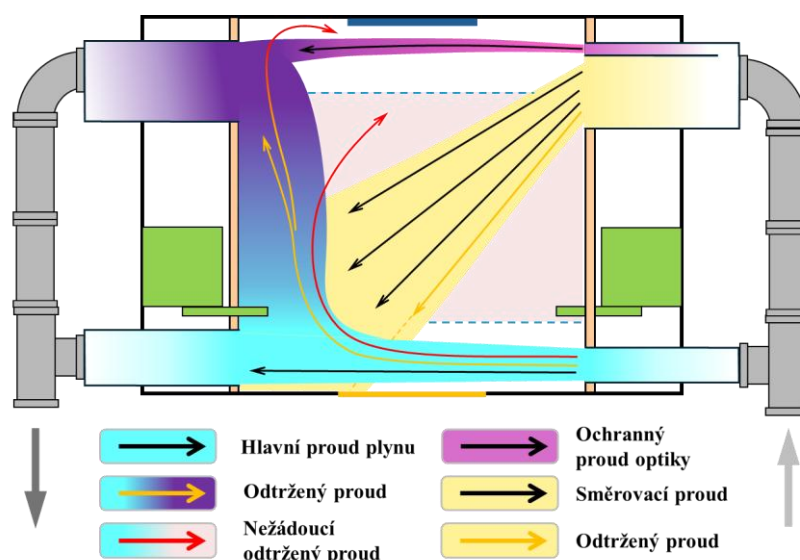
Rešerše odhalila různá experimentální i částečně průmyslová zařízení, která kvalitu proudu inertní atmosféry pro odvod spalin berou jako klíčové kritérium už při konstrukčním návrhu, díky čemuž mohou být distributory mnohonásobně rozměrnější. Lze identifikovat trend poměrně jednoduché geometrie, bez vnitřních prvků, na úkor prodloužení ve směru kolmém ke stěně komory.



Obrázek 5-38 Podoby distributorů u identifikovaných zařízení [12] [15] [46]

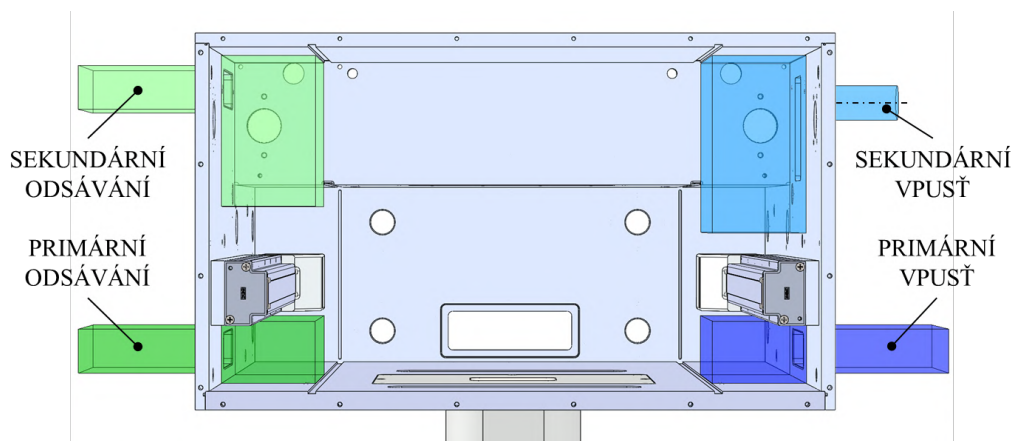
Zástavbový prostor

Ideální případ proudící inertní atmosféry napříč práškovým ložem a zbytkem pracovního prostoru lze popsat jako kombinaci stabilního hlavního proudu nad tiskovou platformou a řízeného odvodu zbytkových proudů z horní oblasti komory. Spodní distributor tvoří kontinuální proud, který odvádí veškeré spaliny odletující z tavné lázně. Část proudu se však může odtrhnout směrem vzhůru podél stěny komory a unášet menší částice kondenzátu. Pro tento případ je přítomen sekundární odtah v levém horním rohu komory, který jednak pohlcuje zbytky hlavního proudu a za druhé odsává ochranný proud optiky, který má znatelně menší objem než hlavní. V neposlední řadě dostupná literatura naznačuje, že usměrněný plošný proud vedený šikmo nebo rovně napříč pracovním prostorem, má pozitivní vliv na eliminaci víření mezi optikou a tiskovou platformou, znázorněno na obrázku 5-39.



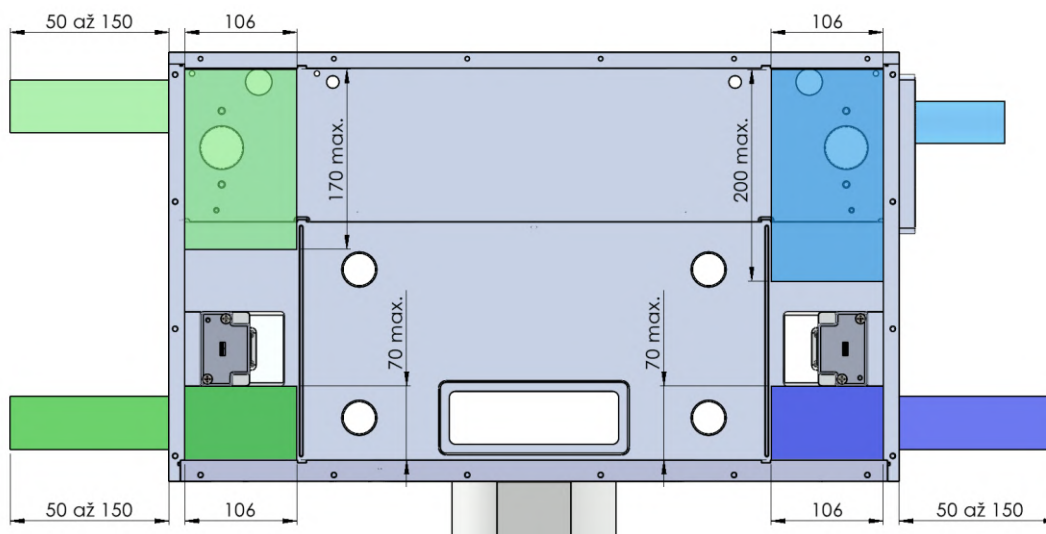
Obrázek 5-39 Schématické znázornění ideálního systému proudění napříč pracovním prostorem

V rámci předběžného návrhu byly distributory rozděleny na vpusti a odsávání, druhotně na primární a sekundární, nebo také hlavní a vedlejší, viz. obrázek 5-40. Orientace vpusti všech distributorů je zvolena ve směru výstupního proudu.



Obrázek 5-40 Rozdělení distributorů v rámci pracovního prostoru

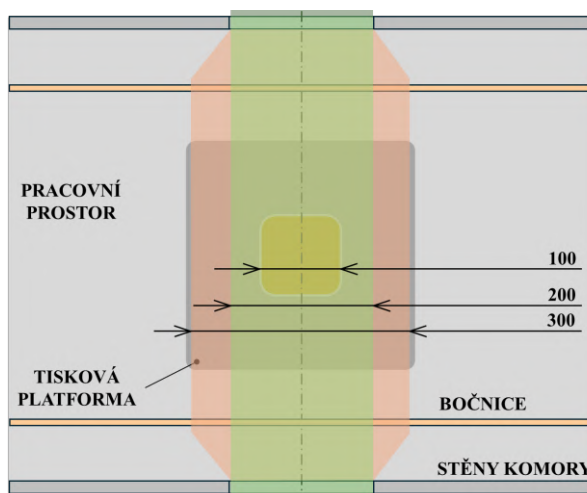
Maximální možná celková šířka sekundárních distributorů je 300 mm, primární distributory nejsou v tomto směru omezeny vůbec. Výstupní délky předpokládají napojení na koleno o 90 ° sklonu, v případě, že by koleno obsaženo nebylo, mohl by distributor narůstat délky vně komory až 200 mm.



Obrázek 5-41 Maximální zástavbový prostor

Nejpodstatnější z hlediska návrhu a výsledné modularity distributorů je, možnost rozšiřovat proud po šířce distributoru nejen po vstupu do komory, ale i vně, jak je tomu u identifikovaných geometrií obrázku 5-38. Díky této koncepci lze distributory dělit na více částí, kde bude každá část ovlivňovat konkrétní vlastnost proudu z hlediska rovnoměrnosti rozložení.

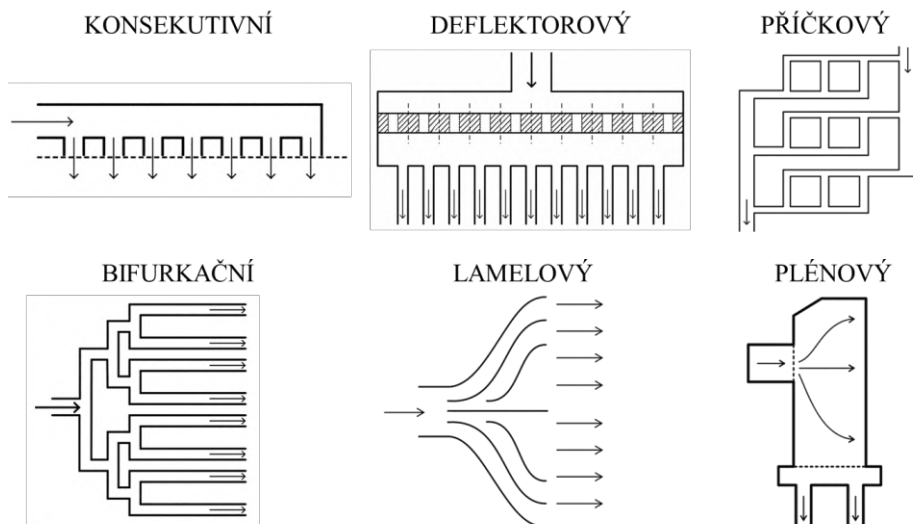
Šíře průchozího otvoru u hlavního distributoru vpusti a obou distributorů odsávání byla určena při srovnání s mírou pokrytí plochy tiskové platformy. V případě použití redukčního rámečku, na který je komora primárně navrhována, a který disponuje šířkou 100 mm užité plochy, byla zvolena výstupní šíře plynu inertní atmosféry 200 mm, s budoucí možnou rozšiřitelností až na 300 mm.



Obrázek 5-42 Volba výstupní šíře plynu inertní atmosféry primárního distributoru vpusti

Typy distributorů

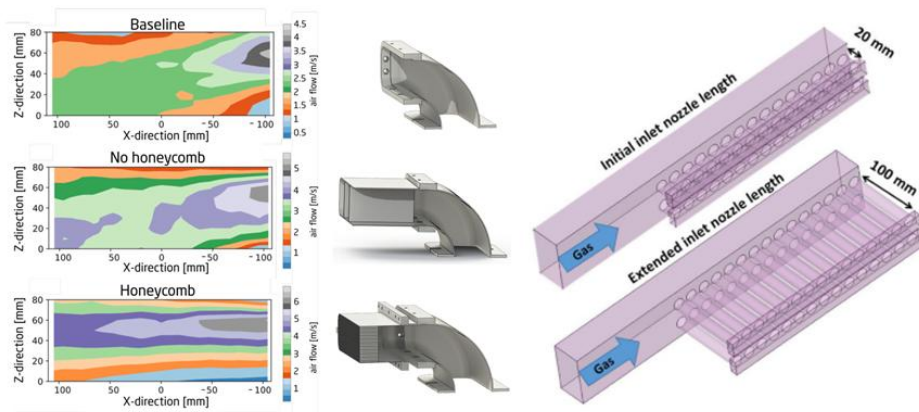
V rámci iteračního procesu vývoje distributorů Somora [31] z dostupných zdrojů identifikoval celkem pět základních koncepcí distributorů proudění, a sice konsektivní, deflektorový, příčkový a bifurkační a lamelový, viz. obrázek 5-43. Výčet je navíc doplněn o plénový typ distributoru, jehož příklad je možné vidět na obrázku 5-38 vpravo.



Obrázek 5-43 Základní koncepce distributorů [31]upraveno

U starších publikací, ohledně experimentálních zařízení, je možné často vidět i základní divergentní (jednoduché, postupně rozšiřující se, bez vnitřních prvků) distributory (obrázek 2-30a), avšak je dokázáno, že daná geometrie nedokáže vytvořit homogenní rychlostní pole při napouštění, ani při odstávání.

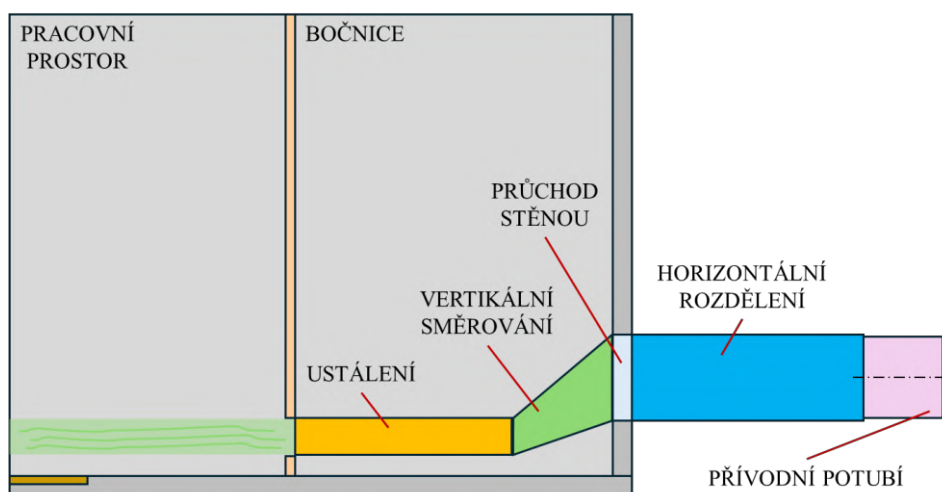
Z důvodů silně omezeného zástavbového prostoru velké většiny průmyslových zařízení LPBF jsou v publikacích nejčastěji zmiňovány konsektivní distributory menších průřezů. Pro dosažení rovnoměrného ustáleného proudu, z distributoru vystupujícího, jsou však nutné buď nástavce, na principu deflektorového distributoru, viz. obrázek 5-44 vlevo, nebo prodloužení výstupních otvorů, obrázek 5-44 vpravo. Nejedná se však o komplexní tvarové optimalizace.



Obrázek 5-44 Časté identifikované modifikace základních typů distributorů [1], [29]

Deflektorové a příčkové distributory jsou v kontextu LPBF používány minimálně, důvodem je větší potřebný zástavbový prostor. U bifurkačních distributorů je obdobně potřebný větší zástavbový prostor, a navíc je zde téměř nemožná výroba konvenčními metodami, jejich realizace je proto odkázána na maximální možné rozměry tiskových platform při výrobě aditivními technologiemi.

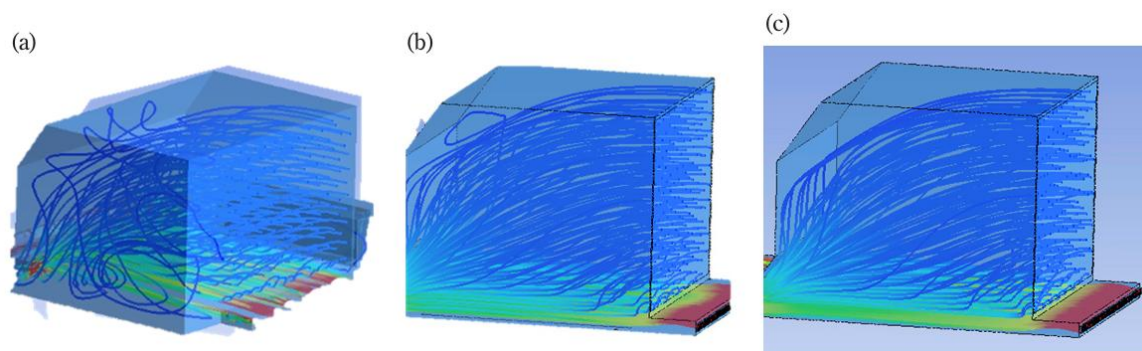
Pro maximalizaci modularity není vhodné, aby byl celý distributor jediným monolitickým komplexním dílem. V případě napouštění i odsávání je z geometrického hlediska vysoký počet možných variant a nutnost iterací, vyrábět při každé modifikaci nový distributor není z ekonomického, a hlavně časového hlediska, při vývoji výhodné. Základní distributory byly proto rozděleny na tři navazující části (obrázek 5-45). Úkolem části distributoru, nacházející se vně zařízení, je, co možná nejrovnoměrněji rozšířit proud inertní atmosféry po šířce neboli v horizontální rovině. Navazující část směřuje proud do dané výšky nad tiskovou platformou a může i dále potlačovat větší víření. Možnost obsazení dlouhé části pro ustálení před vstupem do pracovního prostoru je jeden z hlavních přínosů této koncepce. V různých publikovaných návrzích bylo nutné provést jak vertikální, tak horizontální usměrnění uvnitř zařízení, proto byla téměř úplná absence prvku, který by dokázal výchozí proud usměrnit ve směru rovnoběžném s tiskovou platformou a proud plynu se měl tendenci více rozšiřovat a zpomalovat, příkladem je distributor na obrázku 5-51 vpravo [29], kde byla testována konfigurace s prodloužením části distributoru pro ustálení až na 100 mm.



Obrázek 5-45 Koncepce rozdělení primárního distributoru vpusti na více částí

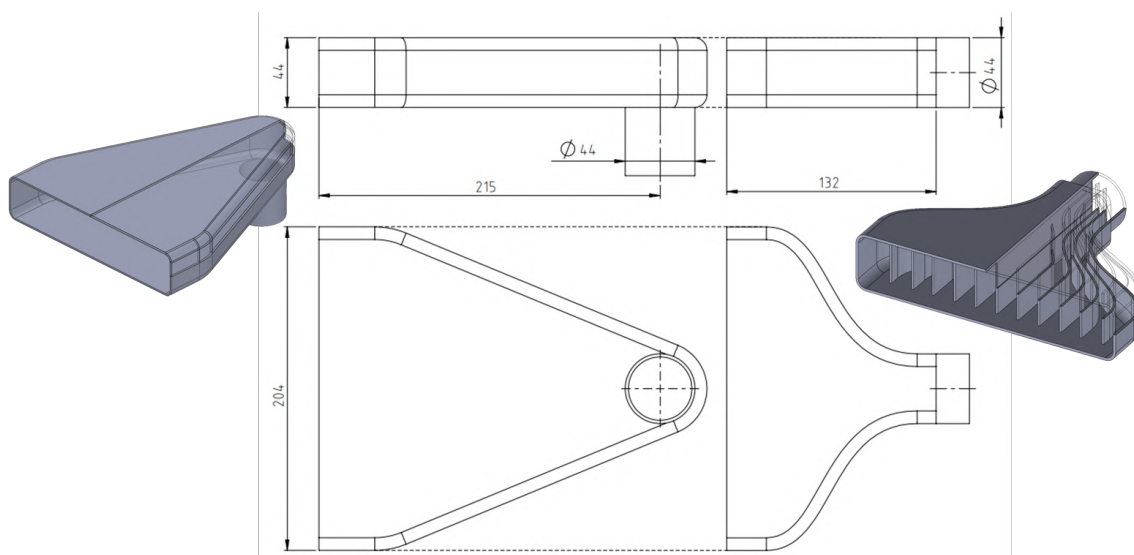
Z identifikovaných koncepcí distributorů budou při první iteraci návrhu uvažovány pouze lamelové a plénové. Dále by prostorový bifurkační typ distributoru byl vhodný pro předem zmíněnou tvorbu usměrněného proudu napříč komorou, jakožto sekundární vpust'. Vzhledem k postupně rozšiřující se geometrii do všech směrů bylo nutné obsáhnout větší průchozí otvor pro jeho možný budoucí vývoj a integraci, viz. demontovatelná deska na bočnici obrázku 5-31. Vzhledem k jeho komplexní geometrii byl uvažován pouze koncepčně a přibližně určen potřebný průchozí průřez 80×100 mm.

Problematikou distributoru o velké výstupní ploše se v rámci vývoje věnuje i společnost Nikon [66], která představila návrh distributoru pro velkoformátovou tiskárnu NXG600E ve formě tzv. perforované stěny. Dostupné výsledky simulací, zobrazené na obrázku 5-46, prokazují, že tento způsob je z hlediska odvodu spalín z pracovního prostoru efektivnější než standartní řešení, a navíc dochází k minimalizaci rizika vzniku vířivých proudů.



Obrázek 5-46 Simulace upravené geometrie s perforovanou stěnou [66]

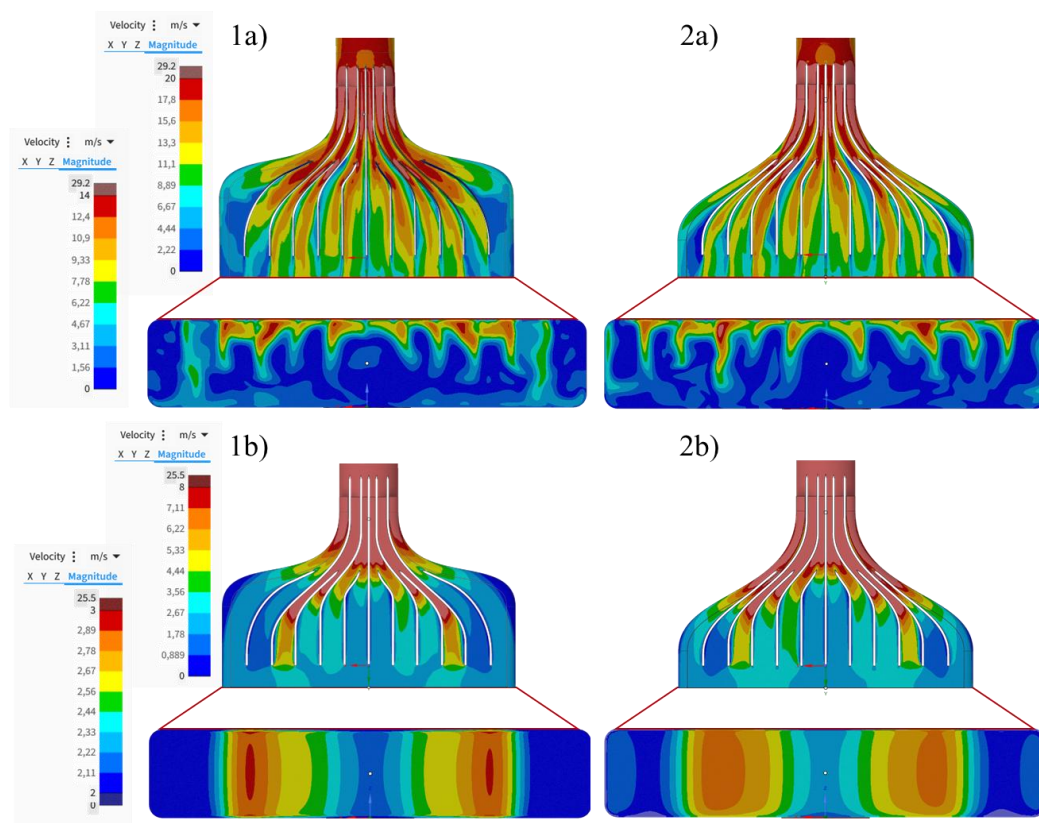
Nevýhoda lamelového distributoru je obtížná a časově náročná postupná iterace geometrie a poloh jednotlivých lamel uvnitř distributoru, Somora [31] uvádí optimální geometrii až jako 21. iteraci. Plénový distributor je možné pozorovat i na průmyslových zařízeních, avšak v publikacích není jejich geometrie specifikovaná. Návrh geometrie lamelového distributoru lze proto považovat za časově náročný a s potřebou vysokého počtu iterací. Oproti tomu geometrie plénového distributoru vykazuje menší komplexnost, avšak bez dostupných konkrétních rozměrů a informací ohledně návrhu.



Obrázek 5-47 Celkové rozměry výchozích tvarů zvolených distributorů

Lamelový distributor

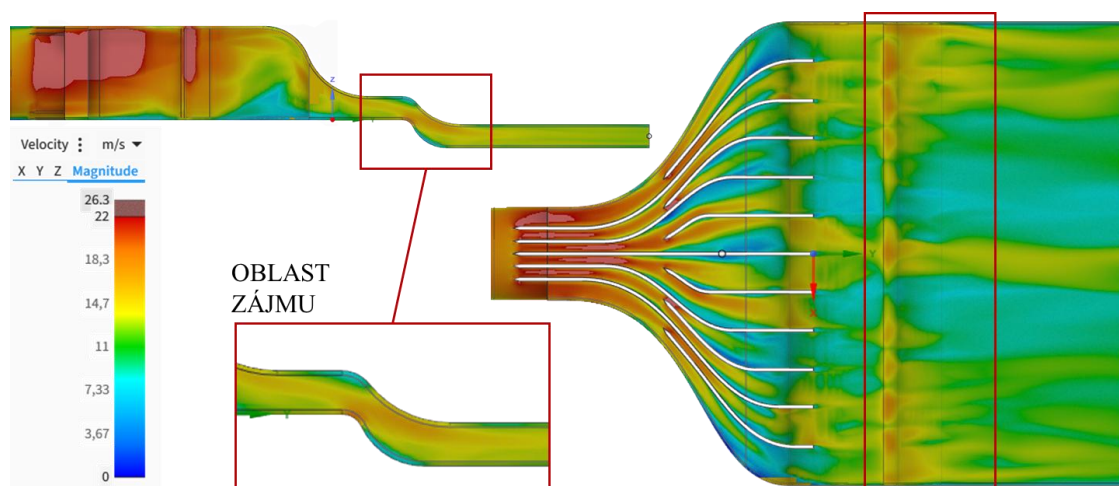
Návrh geometrie lamelového i plenového distributoru je realizován převážně koncepční formou. V případě lamelového distributoru byl v první řadě specifikován vliv míry odchýlení od kuželového tvaru na komplexnost návrhu lamel, viz. obrázek 5-48. Konfigurace pod označením 1 na obrázku 5-48 odpovídá silnému odklonu od kuželového tvaru, konfigurace 2 přiměřenému a plynulému. Index a značí okrajové podmínky vpouštění, index b odsávání. Vyhodnocení vlivu je prostřednictvím rychlostních map ve střední rovině distributoru, společně s homogenitou proudu na výstupu.



Obrázek 5-48 Vliv míry odchýlení od kuželového tvaru na komplexnost návrhu lamel distributoru

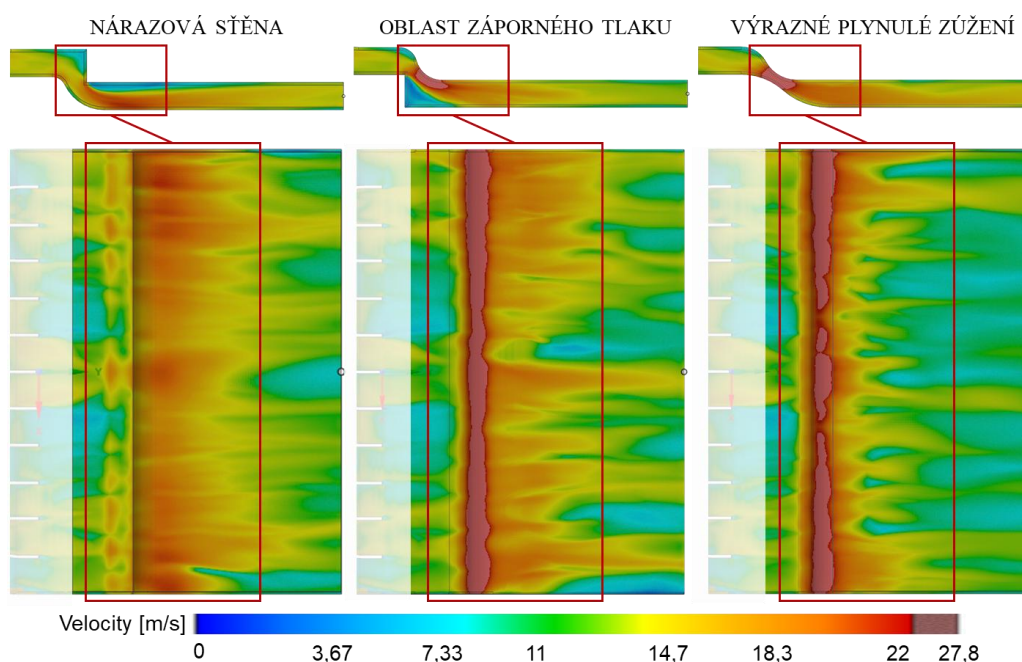
Hned první iterace vykazuje komplexnější problematiku lamel první konfigurace. V krajních segmentech distributoru vznikají oblasti nulových rychlostí a lamely jsou více závislé na iteračních modifikacích pozice a geometrie téměř každé z vnitřních lamel. Pro pokračování návrhu byla zvolena druhá konfigurace, iterace pro zvýšení rovnoměrnosti na výstupu však nebyly uvažovány z důvodu časové náročnosti a zvýraznění vlivu navazujícího segmentu. Již v této fázi návrhu lze považovat lamelový distributor za nevhodný pro použití v konfiguraci odsávání, obrázek 5-48b. Pro distributory odsávání je nutné zvolit geometrii s minimem vnitřních prvků pro usnadnění procesu údržby, konkrétně čištění reziduí prášku při výměně za jiný materiál.

Pro možnost relativního srovnání výsledků rovnoměrnosti proudu na výstupu distributoru, s distributorem [31], bylo zvoleno zúžení proudu navazujícím segmentem ve vertikálním směru na 10 mm a nasměrování do výšky 3 mm od dna komory.



Obrázek 5-49 Vliv druhého segmentu distributoru

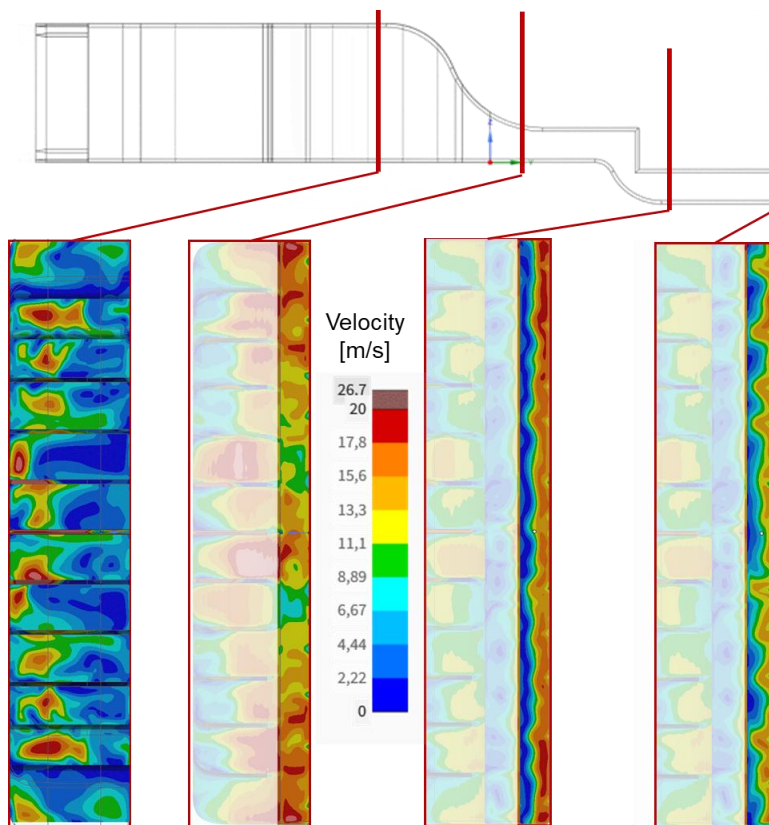
Účelem druhého segmentu je nasměrovat proud plynu do dané výšky nad tiskovou platformou a částečně eliminovat extrémní rychlostní pole proudícího plynu. Uvažovaná je pouze konfigurace napouštění, distributory odsávání vyžadují odlišnou geometrii uvnitř pracovního prostoru. Na obrázku 5-49 lze pozorovat, že pouhé posunutí proudu do potřebné výšky dvěma plochami s plynulým přechodem nemá na minimalizaci extrémů téměř žádný efekt. Pro optimalizaci tohoto problému byly zvoleny tři koncepce: nárazová plocha ve směru proudu, tvorba oblasti záporného tlaku a plynulé zúžení na principu dýzy, zobrazeno na obrázku 5-50.



Obrázek 5-50 Koncepce druhého segmentu primárního distributoru vpusti

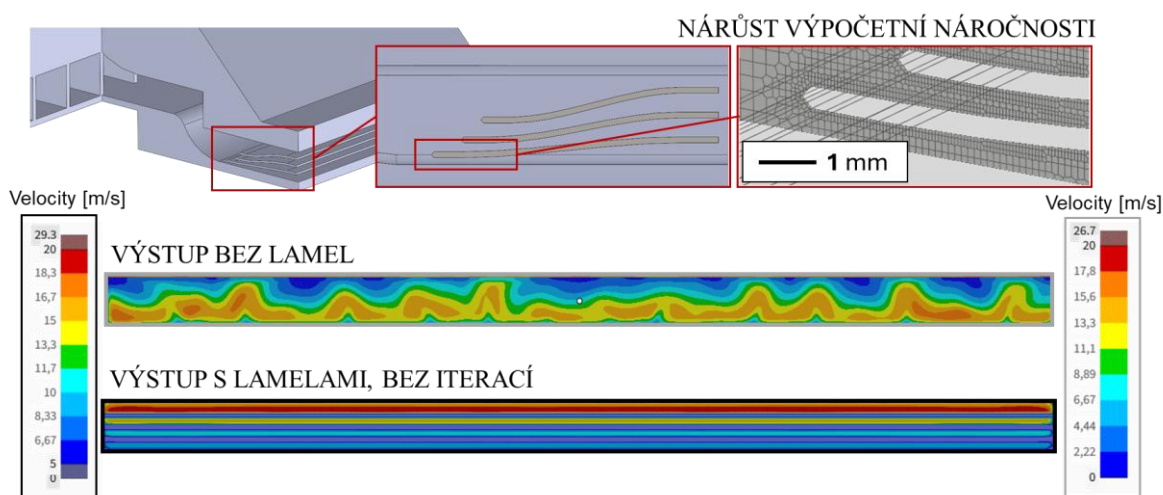
Ze zvolených koncepcí eliminuje nejlépe extrémny prvek s nárazovou stěnou, při pohledu z boku na oblast částečně rovnoměrného proudění v horizontálním směru lze však identifikovat nerovnoměrnost ve vertikálním směru. Mimo vyznačenou oblast na obrázku 5-50 navíc dochází ke snížení rovnoměrnosti proudu plynu.

Stejnou charakteristiku lze pozorovat i při pohledech na jednotlivá místa distributoru v řezu kolmém ke směru proudícího plynu, viz. obrázek 5-51.



Obrázek 5-51 Řezy a proudové mapy jednotlivých míst napříč segmenty distributoru

Problém nerovnoměrnosti ve vertikálním směru a úbytku rovnoměrnosti v horizontálním směru by bylo možné řešit komplexní optimalizací geometrie nárazové stěny a následujícího kanálu pro ustálení. V rámci řešerše však nebyly identifikovány žádné pomocné zdroje tohoto problému. Jedním z možných způsobů optimalizace této části by byla opětovná implementace lamel, viz. obrázek 5-52. V případě nižší výšky výstupního kanálu se zde však začínají projevovat limity výrobních možností, jako je minimální tloušťka stěny aditivních technologií, v případě LPBF je limit minimální tloušťky stěny 0,7-1 mm dle aplikace. Taktéž je v případě kanálů menších průřezů nutné lokální zjemnění konečnoprvkové sítě. Pro numerickou validaci bylo provedeno zjemnění na hranách lamel a tím navýšení výpočetní náročnosti. Na obrázku 5-52 je zobrazen nárůst prvků konečnoprvkové sítě modelu z původních 1,5 milionu až na více než 13 milionů prvků. Dále zde nastává stejný problém, jako při návrhu distributoru [31], a to sice nutnost velkého množství iterací pro dosažení optimálního řešení. Z toho důvodu jsou proto lamely uvedeny jako jedna z možností, jak lze do budoucna zvýšit homogenitu proudu na výstupu hlavního distributoru vpusti.

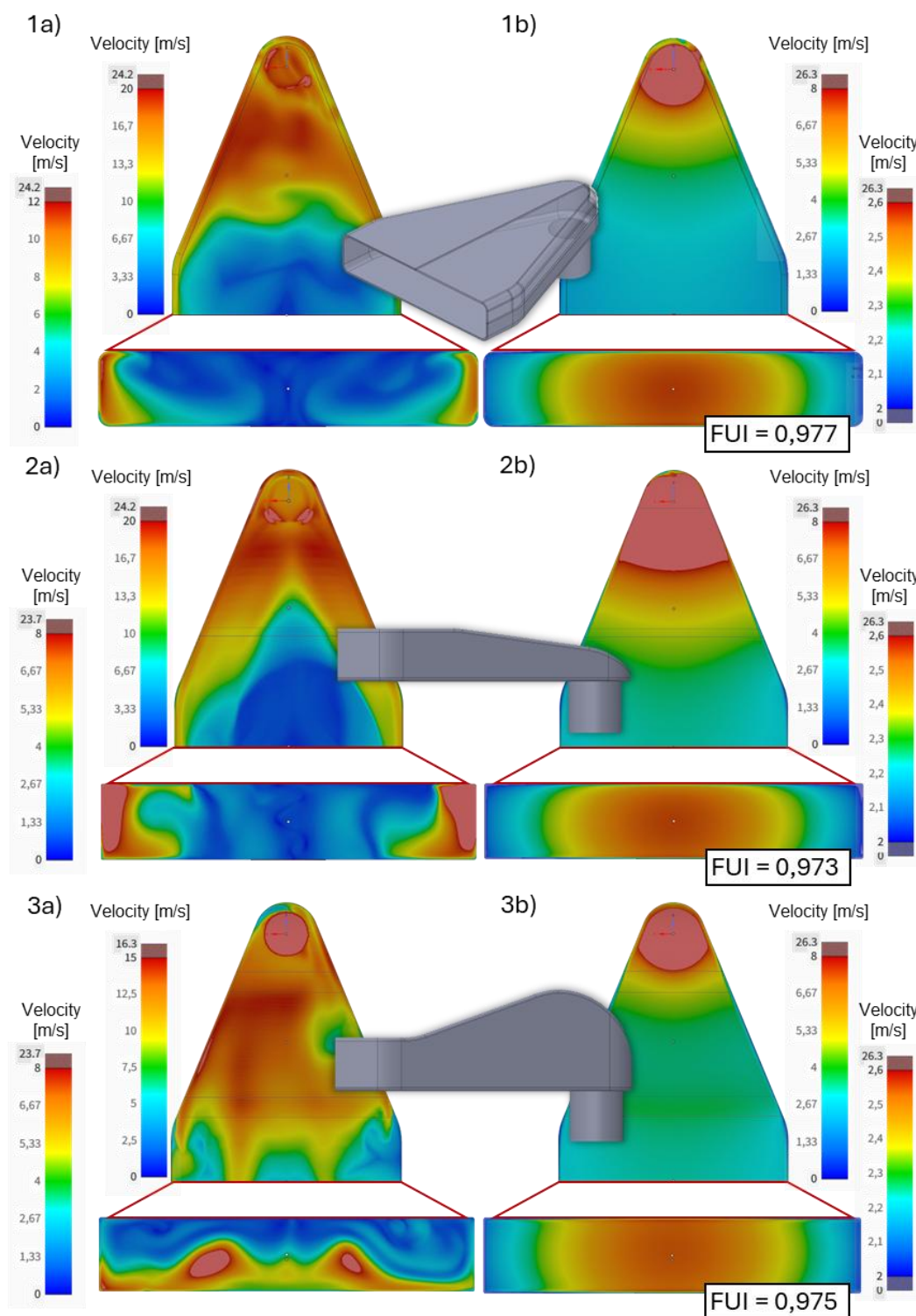


Obrázek 5-52 Znáznornění implementace horizontálních lamel do druhého segmentu

Plenový distributor

Druhá uvažovaná geometrie vychází z koncepce plénového distributoru. Na rozdíl od koncepce lamelového není proud rozdělován pomocí vnitřních žeber, nýbrž vstupuje do rozšířeného vnitřního objemu a k prostorovému rozptýlení dochází pomocí dopadu na horní stěnu distributoru. Z důvodu získání povědomí o vlivu geometrie byly následně validovány vlivy úprav geometrie na obrázcích 5-53 a 5-54. Cílem je taktéž zjistit, zda-li bude na rozdíl od předešlého možné využít tuto koncepci tvaru distributoru vně komory i pro funkci odsávání. Byly uvažovány varianty s odlišným tvarem vrchní stěny, konkrétně snížení (obrázek 5-53-2) a vyboulení (obrázek 5-53-3). I když koncepce v základu neuvažuje implementaci lamel, v rámci validace numerickými simulacemi byly uvažované i varianty s různě tvarovanými vnitřními lamelami. Celkově má plénová koncepce větší míru tvarové variability než koncepce lamelového distributoru. Pro dodržení relevance napříč geometrickými úpravami byla zvolena konstantní výška výchozího těla distributoru na 40 mm, odpovídající maximálnímu rozměru průchozího otvoru ve stěnách komory.

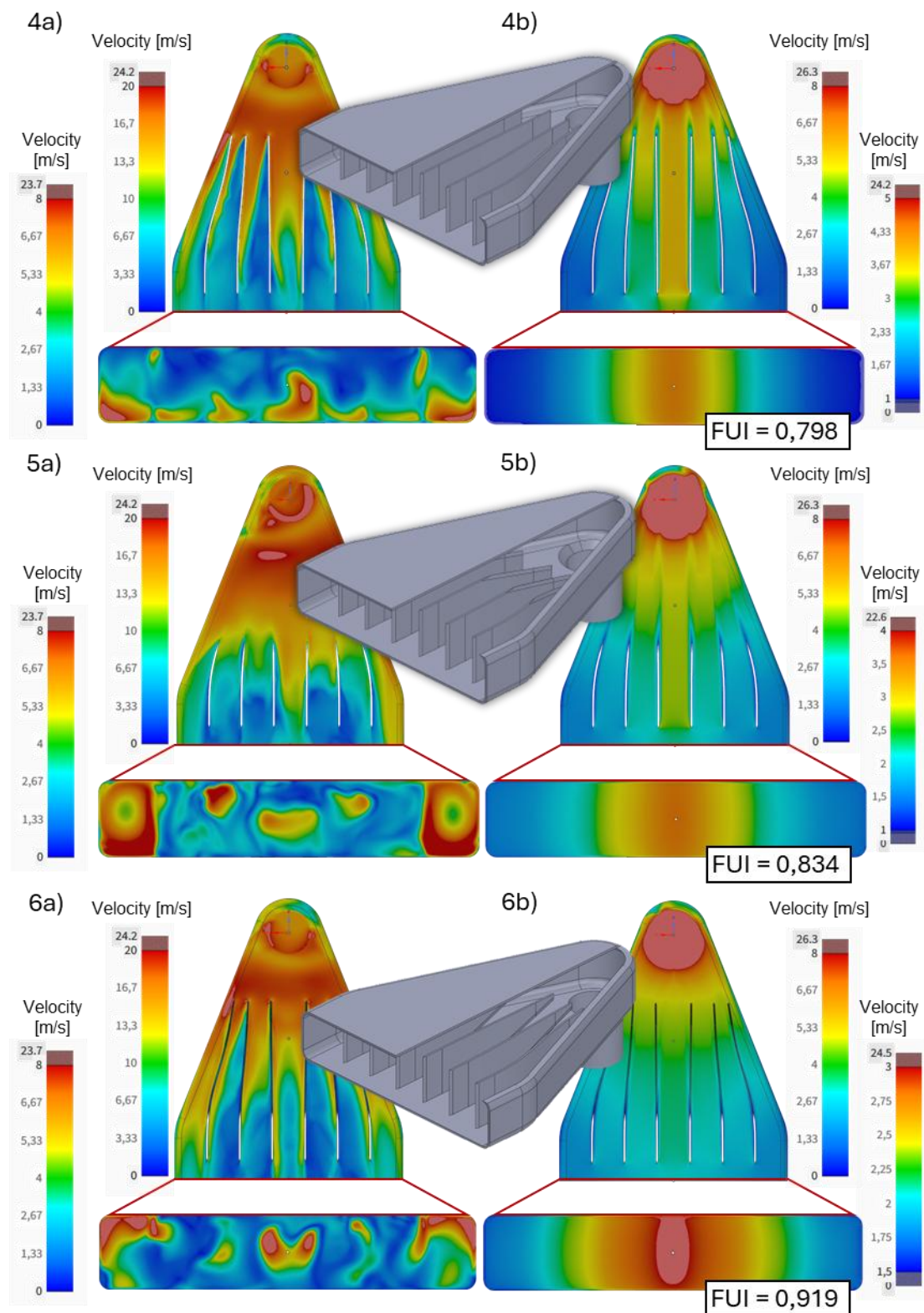
Implementace vertikálních lamel byla provedena třemi způsoby. Základní geometrie obsahuje lamely s kolmou krajní hranou vůči navazujícím stěnám. Vzhledem k principu distributoru, kdy je proud tlačén k vrchní stěně distributoru byly následně provedeny úpravy základních lamel, kdy byl proveden výřez s počátkem na vrchní stěně (obrázek 5-54-5) a na dnu vnitřního prostoru distributoru (obrázek 5-54-6). Princip volby modifikace lamel spočívá v předpokladu, že bude proud na výstupu vykazovat vyšší míru rovnoměrnosti v případě postupného rozčlenění mezi jednotlivé výstupní segmenty. V základní konfiguraci lze pozorovat v případě vpouštění plynu extrémní rychlostního pole na výstupu na bočních krajích distributoru. Cílem dalších variant je tuto vlastnost minimalizovat.



Obrázek 5-53 Variace plenového distributoru a) výchozí geometrie, b) zploštění, c) vyboulení

Lamelové distributory vykazovaly v případě napouštění i odsávání hodnot FUI menších než 0,8 ve všech variantách. Vyhodnocování pomocí FUI bylo proto neadekvátní, na obrázku 5-53 lze však pozorovat nárůst hodnot FUI při konfiguraci odsávání plenového distributoru. Srovnání vlivu změn geometrie pomocí FUI je zde proto opodstatněné.

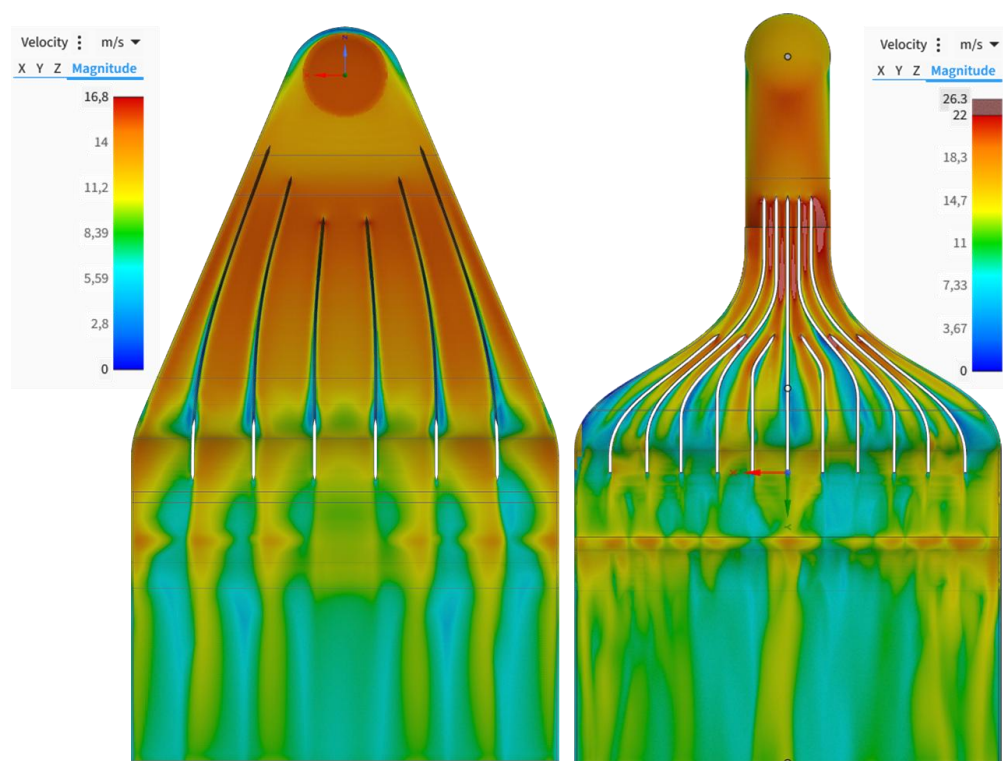
Při implementaci lamel lze pozorovat oproti výchozí konfiguraci snížení homogenity na výstupu v konfiguraci odsávání a celkovou změnu charakteristiky proudu na výstupu při napouštění.



Obrázek 5-54 Variace implementace lamel v rámci plenového distributoru

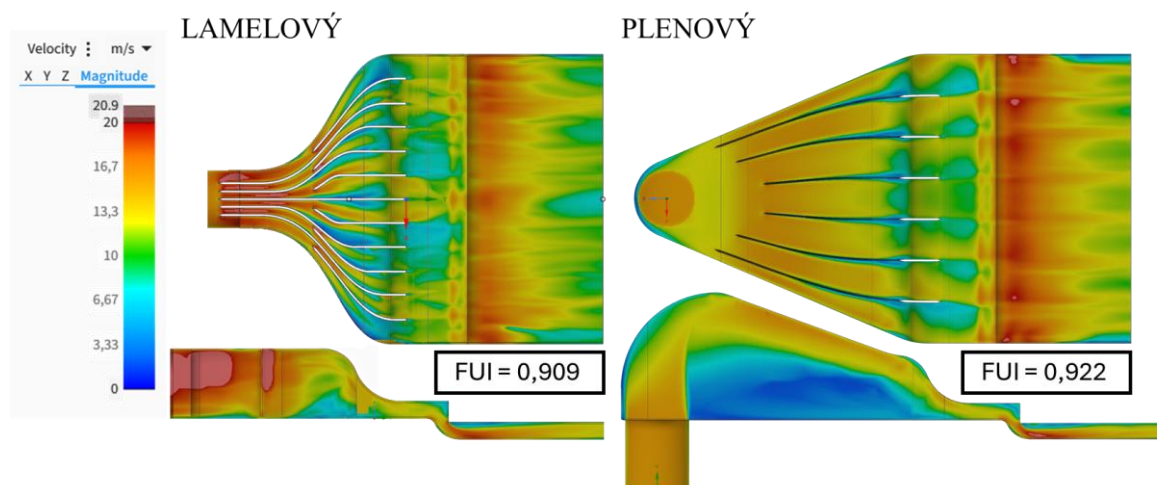
Výsledky numerických validací geometrických úprav výchozí geometrie plénového distributoru vykazují, že v případě napouštění dochází při vyboulení vnější geometrie ke změně charakteru proudu na výstupu a krajní extrémy se částečně přetransformují v rovnoměrnější, avšak stále neoptimální, po šířce distributoru. Z pohledu odsávání mají všechny modifikace geometrie, ať už vnější i vnitřní, negativní vliv na míru homogenity oproti výchozí konfiguraci. Díky validaci proto lze potvrdit úvahu, že díky jednoduché geometrii budou výchozí geometrie plénového distributoru vhodná pro části okruhu inertní atmosféry v kontaktu s nečistotami a odletujícími částicemi. Hodnota FUI dosáhla při vyšších rychlostech hodnot téměř 98 %. Pro porovnání, hodnoty FUI pod 90 % lze považovat za neadekvátní a hodnoty mezi 90 a 98 % za optimální konfiguraci. Všechny numerické CFD validace distributorů byly graficky znázorňovány při maximální povolené rychlosti na vstupu.

Přítomnost různých geometrií vnitřních lamel vykazuje rovněž změnu charakteru proudu na výstupu distributoru. Pro konfiguraci napouštění vykazuje pro další zpracování největší vhodnost konfigurace 6a na obrázku 5-54, jedním z hledisek této volby je geometrie následujícího segmentu.



Obrázek 5-55 Porovnání koncepcí při napouštění argonu

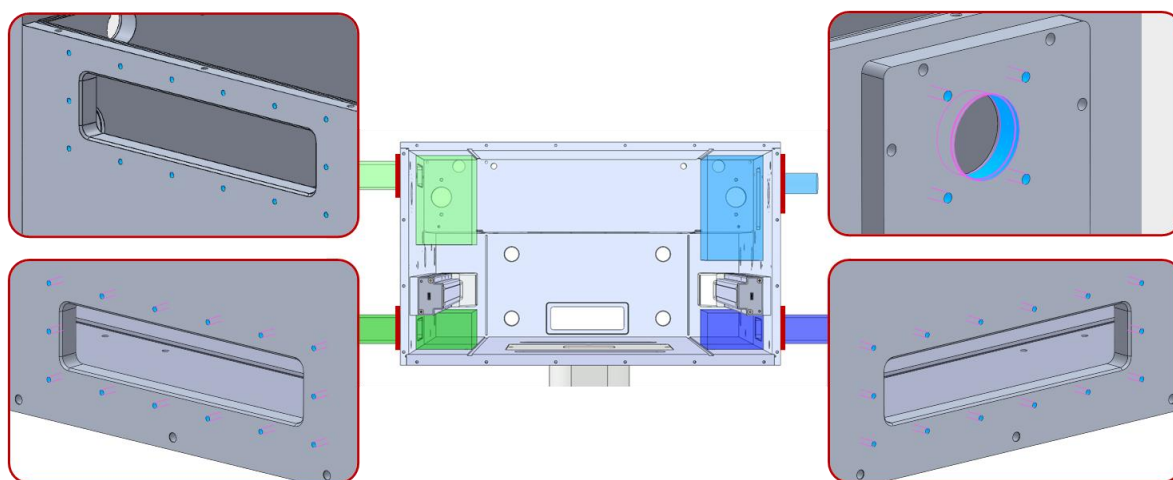
Vzájemné porovnání obou koncepcí distributorů, zobrazené na obrázku 5-55, opět znázorňuje náročnost optimalizace vnitřních prvků lamelové koncepce. Při srovnání vykazuje plénová koncepce vyšší míry homogenity i přes mnohem menší počet obsažených vnitřních elementů ve formě lamel.



Obrázek 5-56 Srovnání koncepcí při pohledu z boku

Z hlediska zástavbového prostoru lze plénovou koncepci považovat za náročnější, avšak díky absenci tohoto kritického omezení nemusí být koncepce opuštěna. Na obrázku 5-56 je znázorněné srovnání při bočním pohledu, na kterém lze pozorovat méně efektivně využitý zástavbový prostor upravené geometrie plénové koncepce. V porovnání s lehce optimalizovaným lamelovým distributorem však při obsazení vyrovnávacího kanálu a identického prostředního prvku vykazuje vyšší míru uniformity na výstupu a je proto definitivně shledána jako vhodnější pro detailní návrh, společně s výchozí geometrií v případě odsávání.

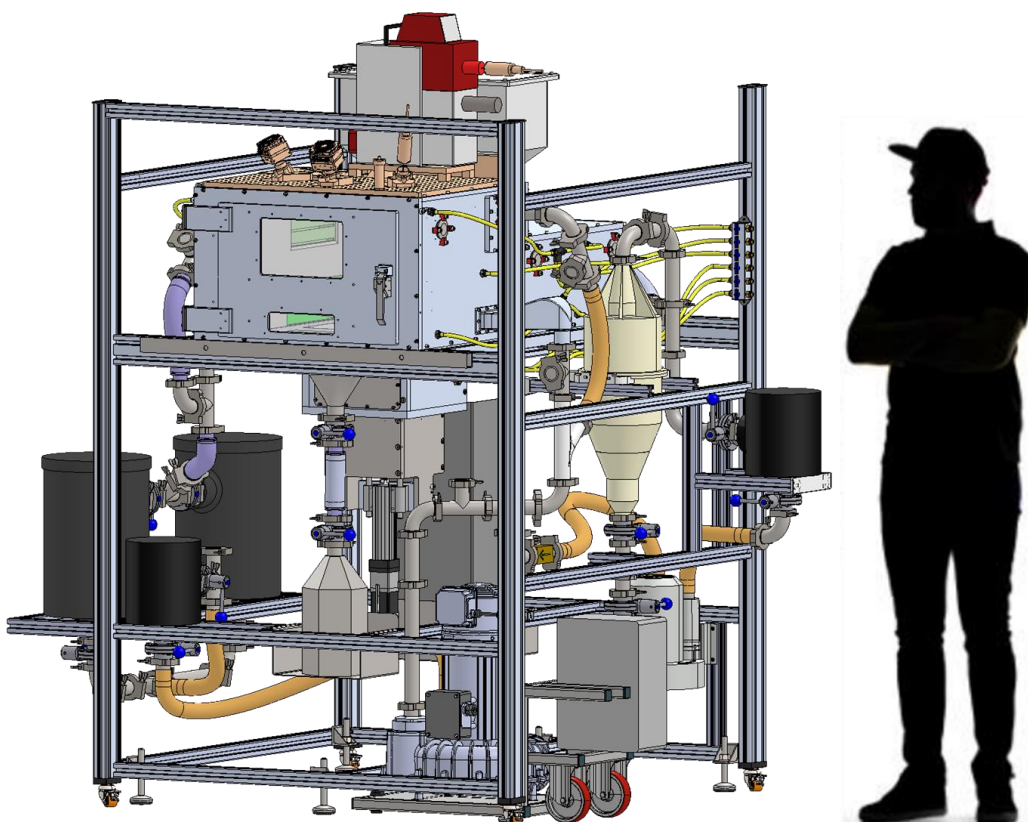
Simulace taktéž potvrdily vhodnou orientaci umístění distributorů na stěny komory. Napojení vnějších částí distributorů je realizováno prostřednictvím přírub, kde těsněním budou opatřeny protikusy dosedacích ploch na distributorech samotných. Rozteče děr byly u obdélníkových otvorů zvoleny na 30 až 44 mm, u sekundární vpusti zvolen otvor 100x120 mm. Víko, zaslepující vzniklý prostor, je opatřeno redukcí na připojení potrubí KF40.



Obrázek 5-57 Orientace a napojení vnějších částí distributorů na komoru

6 DETAILNÍ NÁVRH

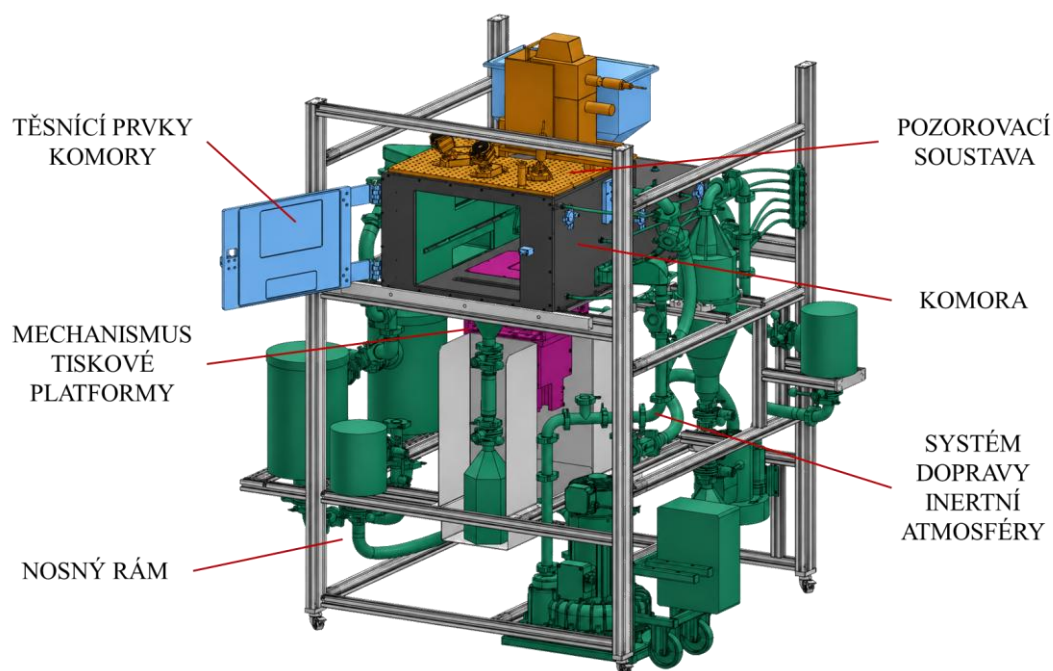
Tato kapitola bude pojednávat o detailním návrhu experimentální komory. Postupně budou představeny jednotlivé hlavní konstrukční celky, spolu s jejich popisem a argumentací modifikací. Další části kapitoly zahrnují cenovou rozvahu a v konečné fázi montáž s otestováním funkčnosti.



Obrázek 6-1 Exteriér detailního návrhu zařízení

6.1 Konstrukční návrh

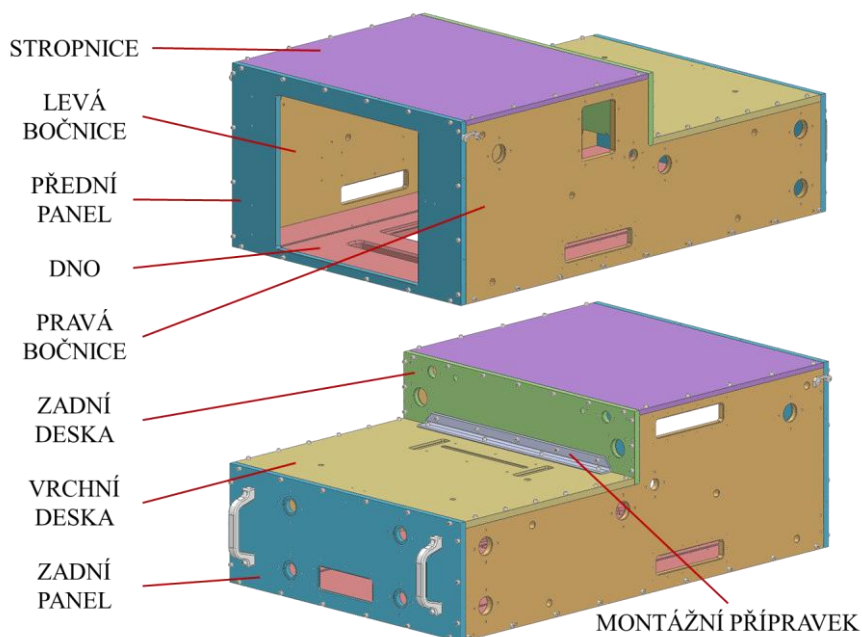
V rámci podkapitoly bude podrobně popsáno konstrukční řešení zařízení a jednotlivých subsystémů. Důraz je kladen na názornost vizualizace a funkční popis kritických prvků zařízení. Na obrázku 6-2 je znázorněno rozčlenění na kritické subsystémy, od kterých se budou následně odvíjet jednotlivé kapitoly konstrukčního návrhu. Členění systému současně z části odpovídá postoupnosti předběžného návrhu.



Obrázek 6-2 Základní rozčlenění subsystémů zařízení

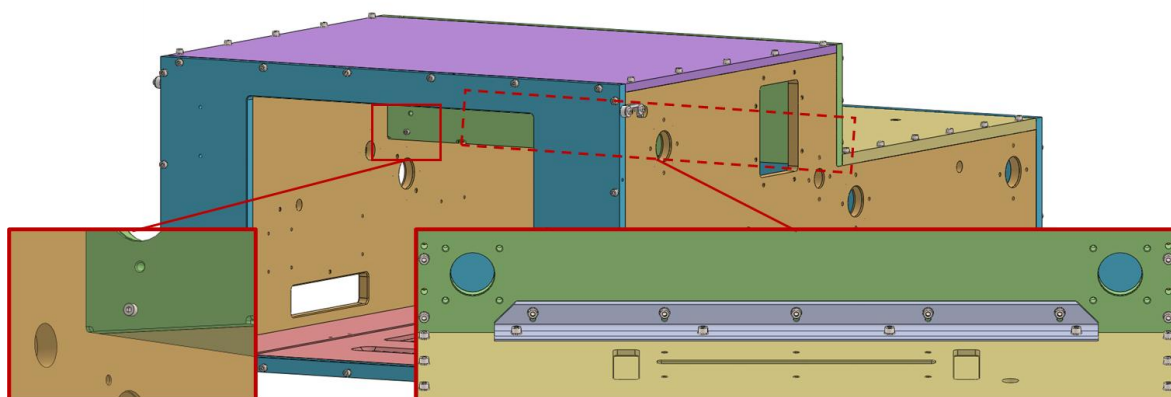
6.1.1 Komora

Komora představuje jádro a hlavní konstrukční celek celého experimentálního zařízení. Jedná se o část, která svojí geometrií vymezuje vnitřní pracovní prostor a zároveň tvoří rozhraní pro většinu navazujících subsystémů. V rámci předběžného návrhu byla tomuto klíčovému prvku dbána největší pozornost z důvodu realizace. Od geometrie komory se odvíjí její tuhost, míra těsnosti a dosedací plochy pro integraci tiskové platformy, lineárních aktuátorů, zásobníku, prvků inertní atmosféry a pozorovací soustavy.



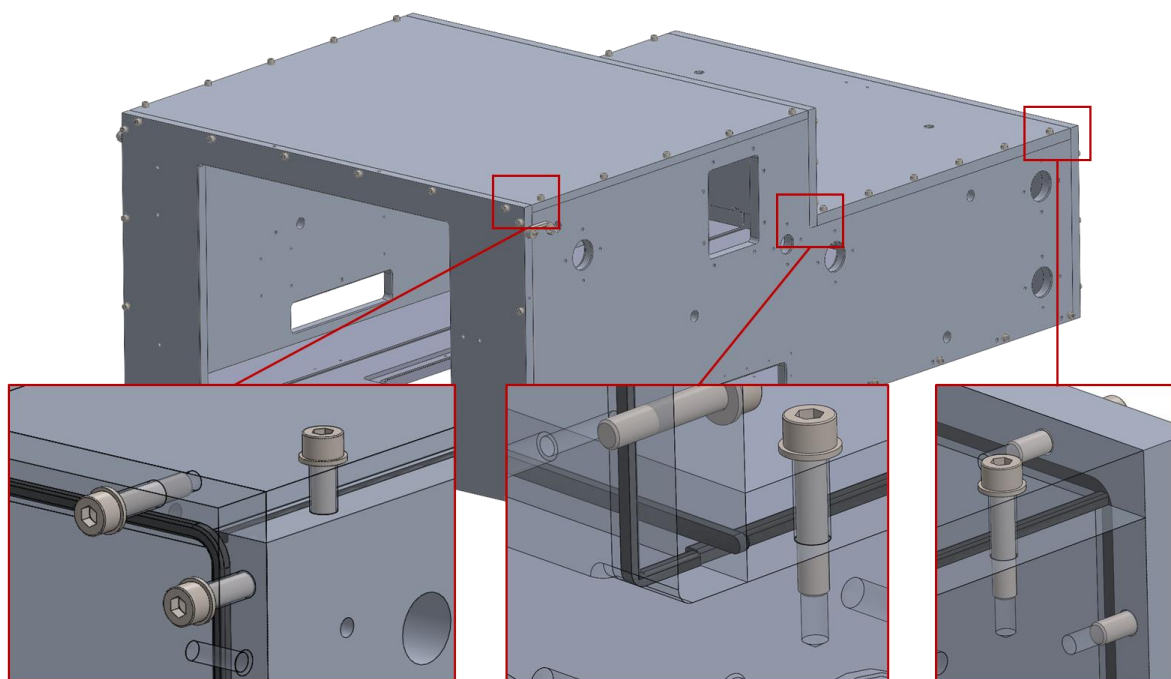
Obrázek 6-3 Rozčlenění desek komory

Napříč stěnami lze pozorovat modifikované rozložení průchozích otvorů, vycházející z obrázku 5-31. Orientace a způsob napojení v rámci zadní a vrchní desky odpovídá možnosti poměrně rychlé demontáže jak zadního panelu, tak zmíněné vrchní desky, která slouží jako dosedací plocha kompatibilních zásobníků.



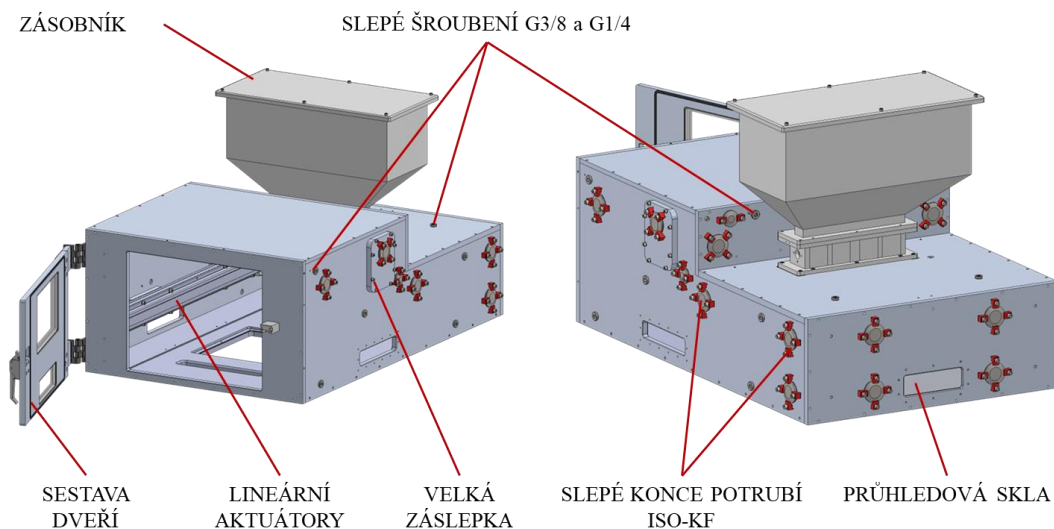
Obrázek 6-4 Napojení zadní desky na vrchní desku

Na obrázku 6-3 lze pozorovat montážní přípravek ve formě nerezového L-profilu, který je pevně uchycen na vrchní desce a slouží pro její přitlačení k zadní desce. Současně byla jako pojistný prvek implementována dvojice průchozích otvorů, umístěných ve vnitřním prostoru komory jako alternativa montážního přípravku v případě, že při fyzické realizaci bude potřebné ke spojení profilů vyvolat jen menší přitlačnou sílu. Zbytek kontaktních ploch napříč jednotlivými deskami nebyl natolik problematický a je vyřešen užitím drážek s pryžovým těsněním kruhového profilu o průměru 2 až 3,5 mm. Vedení těsnění na kontaktních plochách je znázorněno na obrázku 6-5.



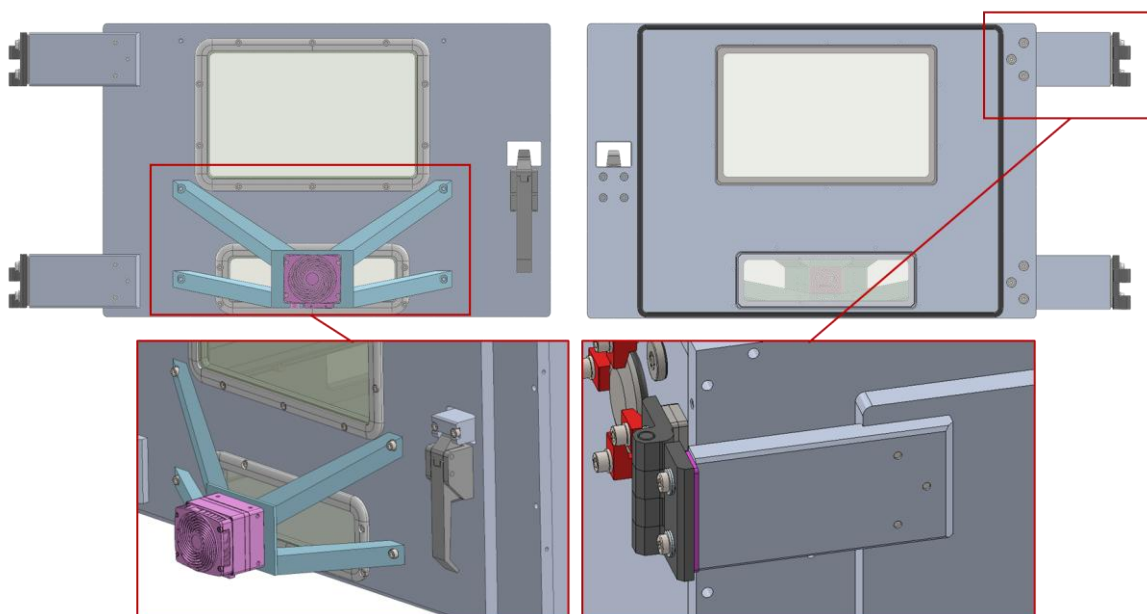
Obrázek 6-5 Příklad drážek pro těsnění kontaktních ploch mezi stěnami komory

Mezi klíčové přímo navazující prvky a doplňky komory lze považovat zásobník převzatý z konfigurace SLM280 HL s identickým mechanickým rozhraním, dále sestavu dveří a těsnící prvky průchozích otvorů.



Obrázek 6-6 Vnější těsnící a funkční prvky sestavy komory

Těsnící prvky mechanických rozhraní byly podrobně popsány v kapitole předběžného návrhu. Mechanické rozhraní pro propojení zásobníku s komorou realizuje šest závitových děr v protilehlé desce. Drážka pro těsnění je na kontaktní ploše zásobníku. Nejkomplexnějším těsnícím prvkem jsou dveře, zobrazení na obrázku 6-7.

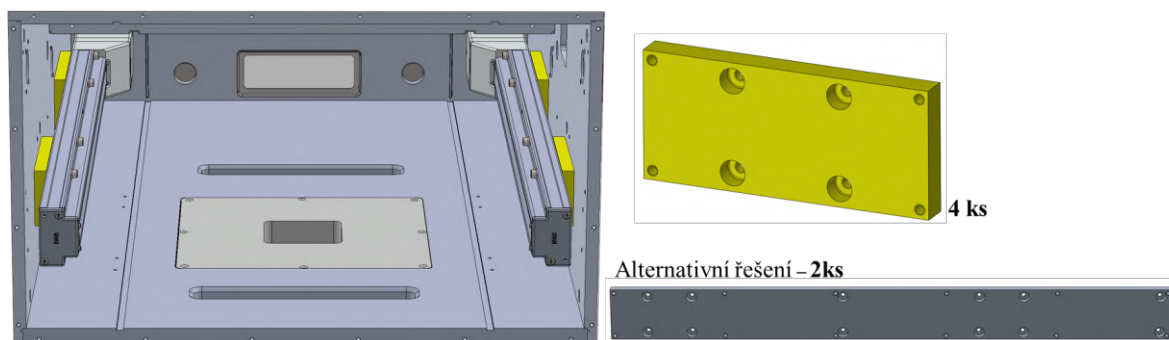


Obrázek 6-7 Zobrazení sestavy dveří, společně s detaily pantů a možnosti návrhu speciálního držáku kamery

Dveře obsahují dvojici prodlužujících prvků, díky kterým je možné dveře napojit nikoliv na přední panel, ale levou bočnici. Tato konfigurace umožňuje během údržby odjímat pouze zmíněný přední panel, v opačném případě by soubor předního panelu a kompletní sestavy

dveří dohromady převyšoval hmotnost 8 kg a demontáž by byla uživatelsky méně přívětivá. Jako další prvky lze identifikovat komplexní přítlačnou páku, která snižuje množství upínacích prvků na minimum, dále je dvojice průzorů doplněná o ochranná skla, jejichž provedení odpovídá konfiguraci a) na obrázku 5-30. Dosud neuvažovanou možností je znázornění připravených mechanických rozhraní pro přímé napojení sledovacího aparátu v úrovni tiskové platformy. Držák by byl pravděpodobně opatřen i stínícím prvkem pro zamezení zkreslení okolním osvětlením. V neposlední řadě jsou dveře z vnitřní strany opatřeny drážkou o šířce 6,1 mm a hloubce 5 mm pro možnost implementace různých průměrů a materiálů těsnění. Předpokládané těsnění dveří je v rámci návrhu kruhový profil o průměru 6,3 mm z materiálu MVQ. Současně jako model pantu byl zvolen GN-235-ZD-76-65-B-SW od společnosti Elsa+Ganter [67], který je vyrobený ze zinkové slitiny a obsahuje aretační drážky pro možnost kalibrace těsnění modulu dveří při montáži.

V rámci modularity není vhodné upnout lineární aktuátory přímo na bočnice. V případě, že by bylo z určitých důvodů v budoucnu nutné lineární jednotku vyměnit za odlišnou, montážní díry odlišných modelů lineárních aktuátorů nebudou kompatibilní. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout upínací prvek, který se bude případně modifikovat při užití odlišného vedení místo výměny celé boční stěny. Druhotný efekt modulárního upevnění je ve zkrácení vzdálenosti mezi jezdcem aktuátoru a nanášečem.

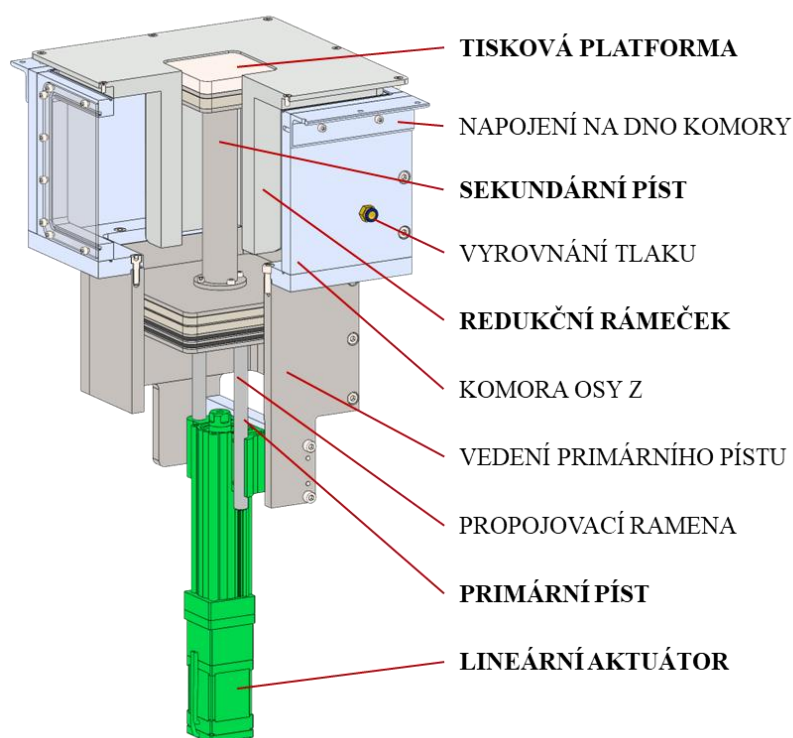


Obrázek 6-8 Znázornění modulárního upnutí aktuátorů

Lineární vedení obsahuje celkem 6 párů upínacích děr o průměru 6,6 mm. Při konzultaci se specialistou prodeje produktů SMC, byla získána informace, že pro dostatečně tuhé upnutí aktuátoru ke konstrukci stačí využití větší poloviny přípojných otvorů [50].

6.1.2 Koncepce mechanismu tiskové platformy

V předešlých kapitolách bylo nastíněno, že cílem této závěrečné práce není konstrukční návrh celkového mechanismu tiskové platformy, nýbrž umožnění implementace redukčního rámečku, či vyhřívané platformy, s dostatečným zástavbovým prostorem pro umožnění budoucí implementace výsuvného mechanismu a těsnících prvků platformy. V rámci návrhu dna komory bylo však vhodné implementovat přibližnou polohu napojovacích otvorů pro usnadnění budoucího napojení bez nutnosti kompletní demontáže a modifikace dna komory. Jedno z možných provedení výsuvného a těsnícího mechanismu tiskové platformy je schematicky znázorněno na obrázku 6-9.



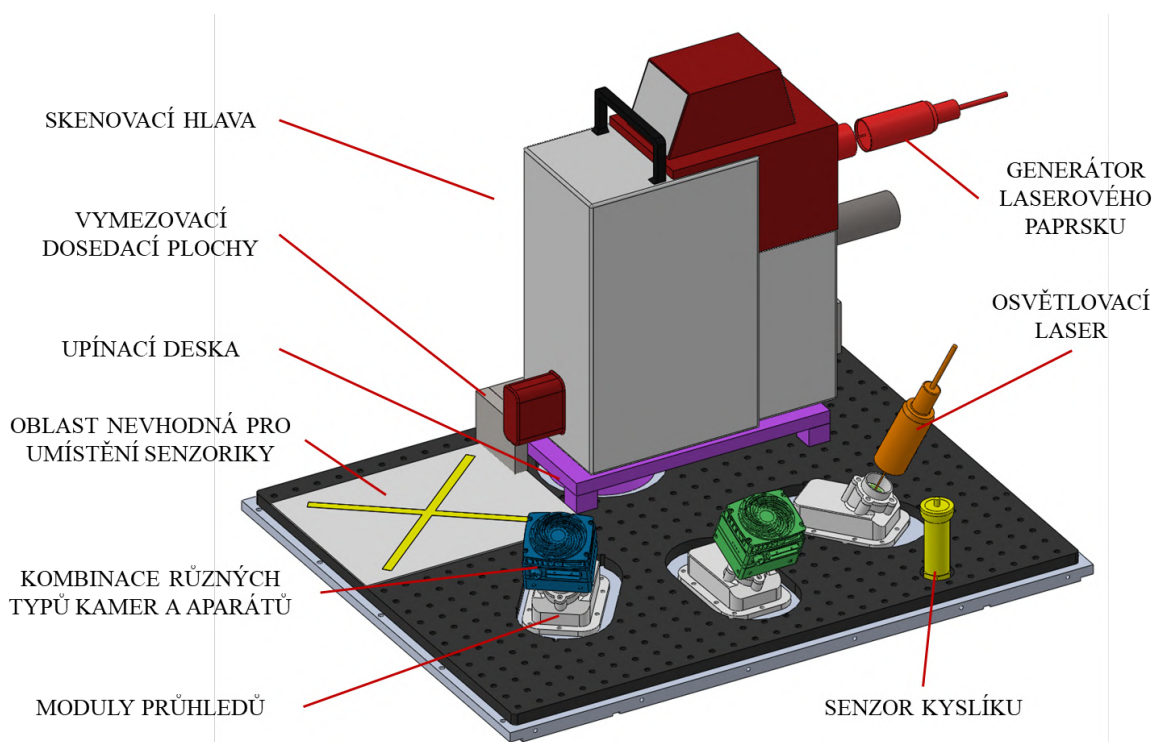
Obrázek 6-9 Schématické znázornění koncepce výsuvného mechanismu

Na obrázku 6-9 lze identifikovat několikrát zmíněný redukční rámeček. Koncepce uvažuje sekundární malou komoru, která je společně s dnem experimentální komory spojena pomocí dvou řad napojovacích otvorů a kruhového těsnění mezi kontaktními plochami. Na dno sekundární komory doléhá vedení výsuvného pístu, které je společně s primárním pístem těsnícím prvkem. Výsuvný mechanismus platformy uvažuje díky jejím menším rozměrům, hmotnosti i potřebné síle další model, již obstaraného, lineárního aktuátoru od společnosti SMC, konkrétně LEYG40MDB-100B [50]. Díky možnosti implementace zmíněného aktuátoru by byla výrazně snížena komplexnost synchronizace s pohony vedení nanášecího mechanismu. Primární píst musí být vybaven jak plstěnými těsníci prvky, z důvodu přítomnosti zbytkového množství prášku, které může vedením v redukčním rámečku

propadat, tak pryžovými, aby bylo dosaženo hermetického utěsnění systému. Mezi sekundární komorou osy Z a pracovním prostorem musí být vyrovnán tlak. Toho lze dosáhnout například propojením obou prostorů prostřednictvím stejných prvků, jako které jsou využity pro přívod inertního plnu do systému pracovního prostoru komory. Kvůli malé komerční dostupnosti pryžových těsnících prvků v geometrii znázorněné v koncepci, byl by zde výrazný prostor pro usnadnění výroby vedení primárního pístu i navýšení těsnosti systému při přechodu na koncepci kruhového pístu. Pryžových prvků pro těsnění pístních systémů je mnohem více druhů a jsou i finančně dostupnější než často na míru vyráběné těsnící prvky čtvercových pístních konfigurací.

6.1.3 Koncepce uspořádání pozorovací soustavy

Obdobně jako mechanismus tiskové platformy, i kompletní návrh pozorovací soustavy nebyl v rámci této diplomové práce realizován. Z rešerše je však možné vytvořit koncepční optimální uspořádání pozorovací soustavy na stropnici zařízení, zobrazené na obrázku 6-10.



Obrázek 6-10 Koncepční uspořádání pozorovací soustavy stropnice

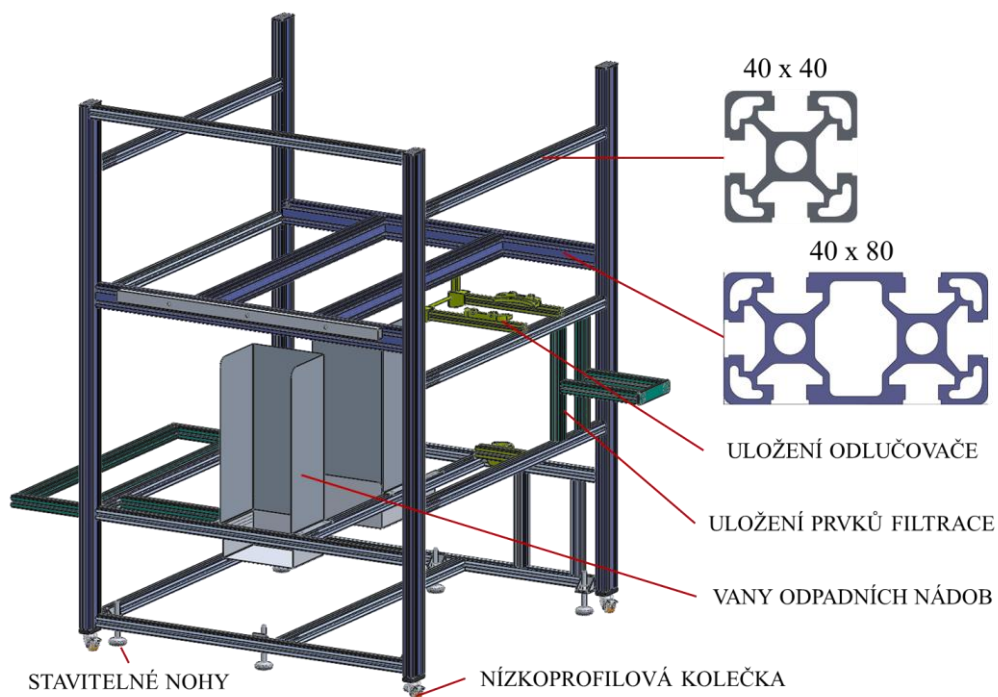
Obsažená je zde zmiňovaná skenovací hlava AM-MODULE III, vybavená upínací deskou pro přesné ustavení vůči tiskové platformě ve vertikálním směru. Horizontální polohu lze definovat například vymešovými dosedacími plochami. Pro usnadnění montáže, i přesného polohování velkého modulu skenovací hlavy, i jemných držáků pozorovacích aparátů, bylo by vhodné, aby byla stropnice vybavena rozhraním ve formě děrované závitové desky, kterou lze vidět v řadě publikací, pojednávajících o komplexních pozorovacích

systémech. Koncepce dále uvažuje předem neurčený počet různých druhů kamer a senzorů, každý vybavený vlastním modulem průzoru. Přesná poloha na ploše stropnice se bude odvíjet dle potřebného úhlu mezi osou tiskové platformy a osou pozorovacího aparátu, který nelze ani z dostupných publikací přesně definovat. Mezi další uvažované prvky patří například i osvětlovací laser pro zvýraznění oblasti dopadu laserového paprsku energetického modulu. Komplexní pozorovací soustavy bývají taktéž často vybaveny krytem, příklad lze pozorovat na zařízení na obrázku 2-12 vpravo. Opodstatnění umístění senzoru koncentrace kyslíku na stropnici zařízení může být například při případu zaplavování pracovního prostoru argonem, při kterém se budou zbytky kapes kyslíku shlukovat na vrchních plochách.

Zjištění z rešerše, které však v rámci konceptu lze aplikovat je oblast nevhodná pro umístění senzoriky. Při návrhu směru pozorování je nutné zohlednit také převažující směr odvodu odletujících částic, protože překrytí tavné lázně rozstříkem částic, či oblakem par může zhoršit vyhodnocování obrazového záznamu i přesnost měřených dat [23].

6.1.4 Rám

Dalším konstrukčním celkem byl návrh nosného rámu experimentální komory a doprovodných subsystémů. Koncepce je založena na modulárním systému hliníkových profilů BOSCH, které za pomoci napojovacích úhelníků umožňují snadnou budoucí upravitelnost, zobrazeno na obrázku 6-11. Pro zvýšení tuhosti byly zvoleny profily dvou rozměrů, sice 40×40 a 40×80 mm. Důvod použití objemnějších profilů na vybraných místech je zvýšení ohybové tuhosti a nárůst připojovacích ploch. Tvar a rozměry rámu byly zvoleny s důrazem na pozdější úpravy, proto je většina doplňkových profilů velikosti 4040 v délce 1200 mm, aby je bylo možné navzájem zaměňovat a v případě potřeby vyztužit konkrétní sekci zařízení. Konzistentní rozměr profilů navíc značně ulehčuje montáž. Maximální rozměry umožňují obsáhnout většinu prvků potrubí, i doplňkových systémů, jako například mechanický odlučovač, uvnitř prostoru konstrukce. Minimalizuje se tak riziko kontaktu s obsluhou a případné poškození. Vyčnívající části rámu vně základního kvádru slouží pro uložení prvků filtračního systému a v případě nutnosti je možné tyto prvky odstínit bariérou od zbytku zařízení. V případě čištění a výměny kazet by se snížilo riziko kontaminace vnitřních prvků zařízení, například recirkulační dmýchadla. Opláštění však nebylo uvažováno ani v rámci návrhu a byla zachována open-frame koncepce. Rozměry základního kvádru, definující základní celkový prostor zařízení, nabývají 1280×1360×1870 mm, přičemž vyčnívající prvky navyšují celkovou šířku zařízení až na 1866 mm.

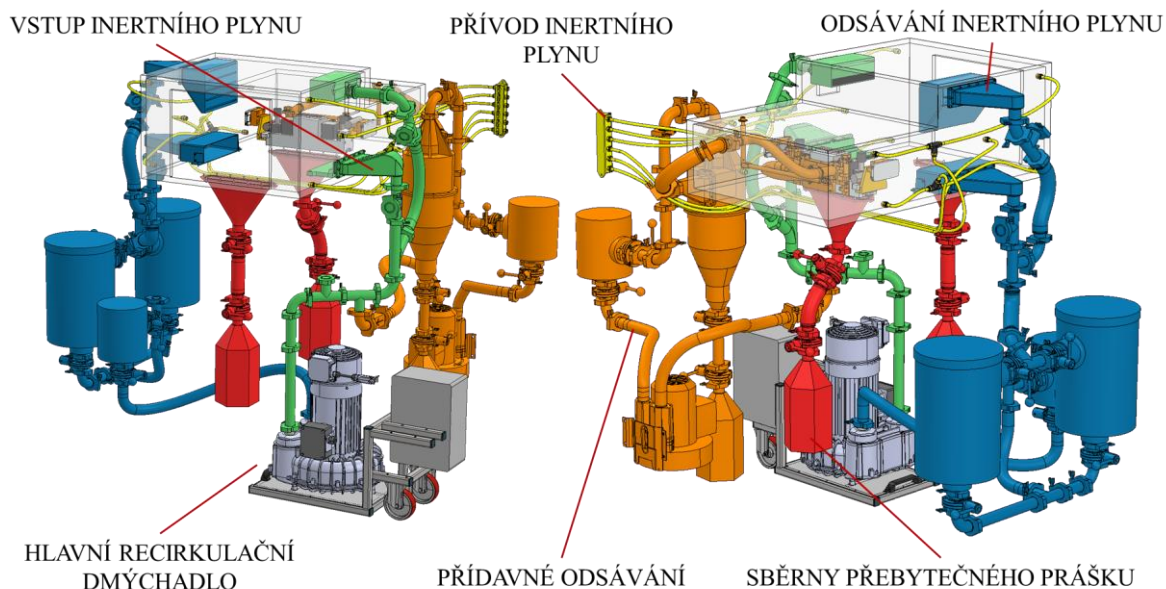


Obrázek 6-11 Nosný rám konstrukce komory

Pro navýšení stability pro trvalé umístění zařízení je nutné finální rám doplnit o 4 až 6 kusů stavitelných, rovnoměrně rozmístěných a výsuvných noh.

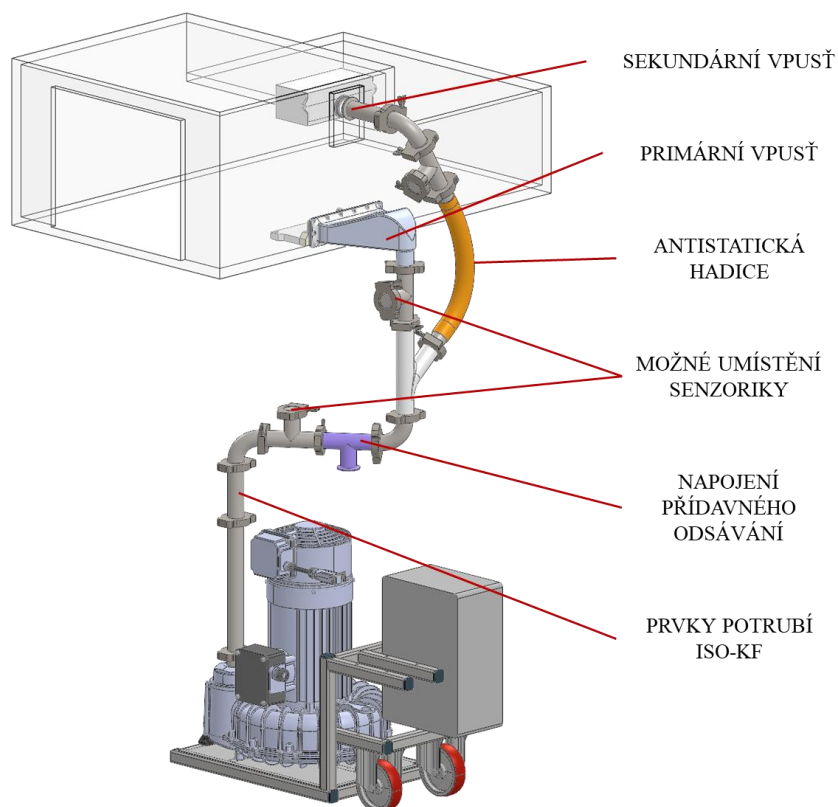
6.1.5 Systém dopravy inertní atmosféry

Na rozdíl od tiskové platformy a pozorovací soustavy byl v rámci této práce uvažován kompletní návrh systému dopravy inertní atmosféry, jehož rozdělení na základní celky je zobrazeno na obrázku 6-12.



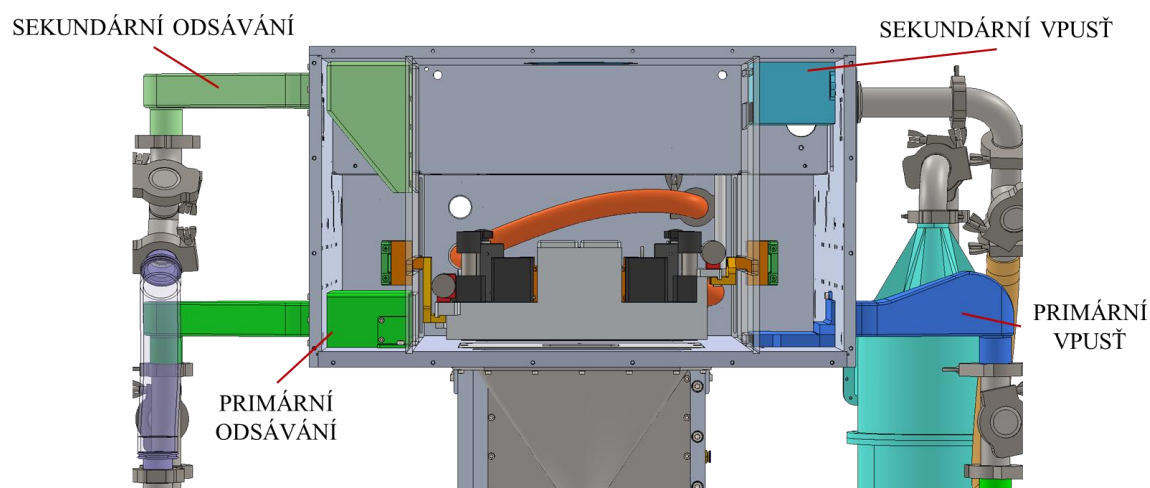
Obrázek 6-12 Rozdělení systému dopravy inertní atmosféry na základní celky

Na následujících vizualizacích budou postupně popsány jednotlivé větve a znázorněna finální podoba hlavního distributoru vedení inertní atmosféry, která byla z většiny zpracována v rámci předběžného návrhu. Systém pracuje s recirkulačním dmýchadlem stávajícího filtračního systému zařízení SLM280 HL, avšak se zcela odlišnou dopravní trasou mezi komorou a zbytkem prvků potrubního systému. Jednotlivé trasy jsou z velké části sestaveny z modulárního potrubí ISO-KF, konkrétně velikosti KF40. Jedná se o kombinaci přímých trubek o délkách 70-100 mm, dále délek 130 a 320 mm. Mezi další prvky potrubí patří kolena, T rozdělení, velký počet svěrek s těsnícími o-kroužky a zakončovacích přírub. Protože přívodem do pracovního prostoru proudí pouze médium filtrované od částic prášku, lze do trasy implementovat také již představené antistatické hadice, které jsou náchylnější na ulpívání částic prášku. V neposlední řadě lze v rámci části vpusti inertní atmosféry identifikovat prvek s plynulým odbočením, analyzovaný v rámci předběžného návrhu. Jeho vysoká míra rovnoměrnosti dělení proudu mezi obě větve, vycházející z numerických simulací, je motivací pro jeho výrobu a testování. V neposlední řadě jsou oba konce větví po rozdělení opatřeny distributory.



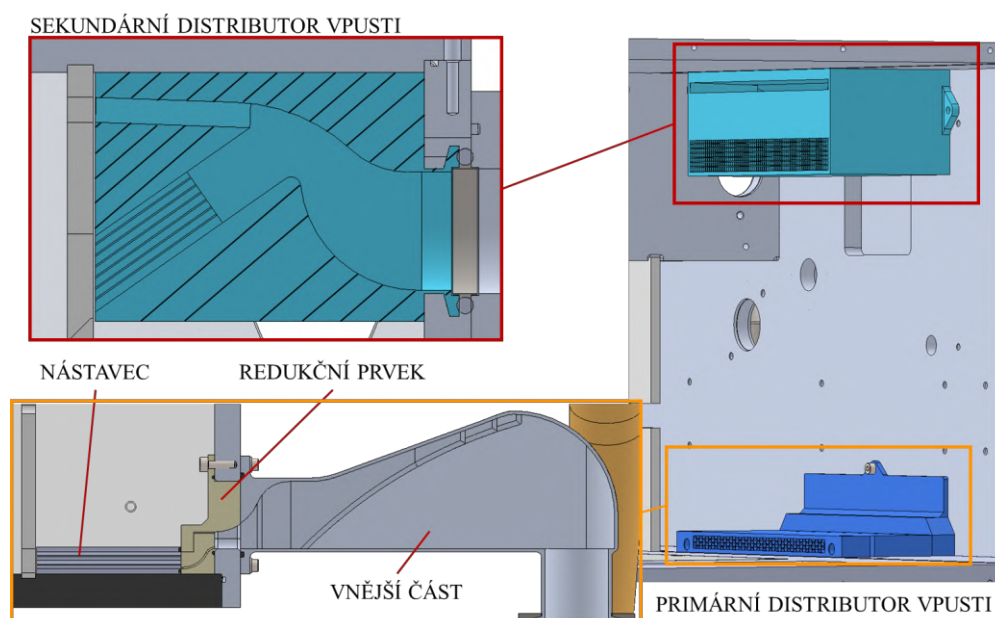
Obrázek 6-13 Znázornění systému dopravy inertní atmosféry ke vstupu do komory

Hlavní distributor byl koncepčně zpracován a částečně validován v rámci předběžného návrhu, jeho geometrii je proto možné určit s vyšší mírou jistoty než zbývající distributory. Konfigurace se oproti obrázku 5-40 nezměnila, jsou pouze znázorněny navržené či koncepčně vhodné geometrie distributorů vpustí i odtahu, viz. obrázek 6-14.



Obrázek 6-14 Podoba distributorů v rámci detailního návrhu

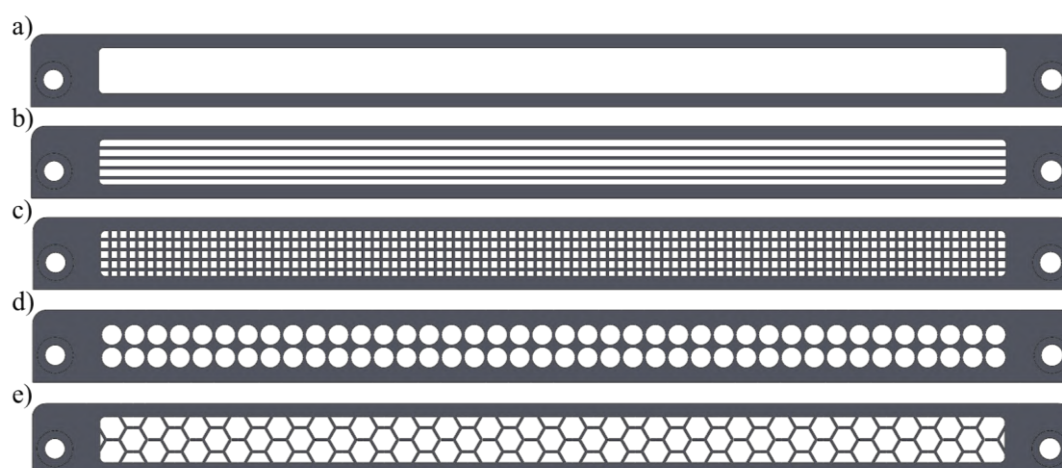
Podobu primárního distributoru vpusti lze vidět v detailním pohledu na následujícím obrázku 6-15. Kvůli potřebě dělit proud na vpusti do dvou větví v rámci sekundárního distributoru je jeho přesný návrh mnohem komplexnější a časově náročnější, než tomu tak bylo u primárního distributoru vpusti. Protože cílem práce není přesný návrh a validace všech distributorů vpusti, ale pouze validace a opodstatnění orientace jejich napojení, jsou další zpracovány pouze na konceptní úrovni. V případě sekundárního distributoru by bylo vhodné obsáhnout užší kanál pro odtah částic z prostoru kolem průzoru laserového modulu, společně s usměrněným proudem o větší výstupní ploše napříč pracovním prostorem, jak bylo uvažováno v koncepci na obrázku 5-39.



Obrázek 6-15 Detailní pohled na distributory vpusti

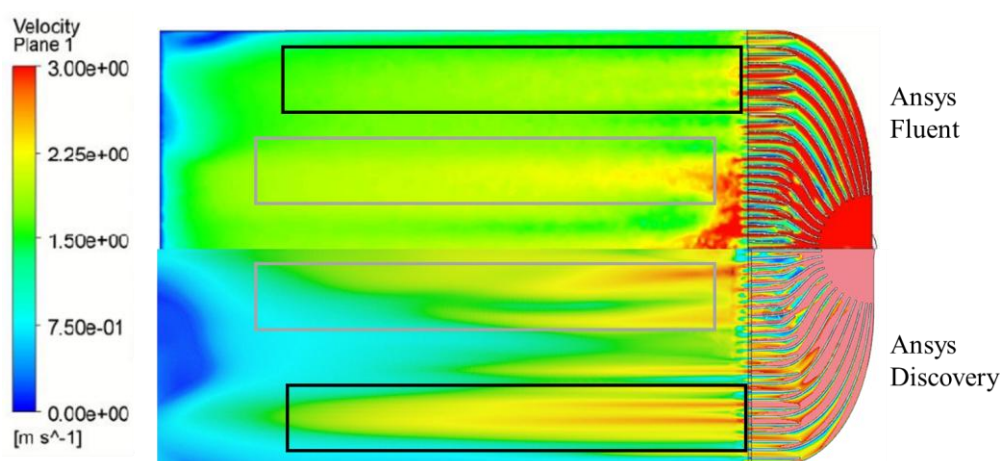
Připevnění distributorů na stěnu komory je uvažováno přes přírubu s těsněním na kontaktní ploše distributorů. V případě primárního distributoru vpusti by byly prvky nástavec a redukční prvek nejprve vzájemně spojeny, následně upevněny přes otvory ke dnu komory a část redukčního prvku by byla zasunuta do průchozí díry v bočnici komory.

Koncepce rozdělení distributorů na více sekcí umožňuje optimalizaci ve formě modifikace jednotlivých segmentů, není tak potřeba měnit celý distributor. V rámci redukčního prvku je prostor pro návrh horizontálních lamel, viz. obrázek 5-52 a dále možnost obměny různých geometrií nástavců. Geometrie kanálů nástavců, vhodné pro testování míry ustálení proudu inertní atmosféry byly identifikovány v rámci rešerše a jsou zobrazeny na obrázku 6-16, přesné rozměry je možné dohledat v rámci citovaných publikací.



Obrázek 6-16 Geometrie kanálů nástavců: a) dostatečně dlouhý, b) horizontální lamely [30], c) mřížka [30], d) řady kruhových otvorů [29], e) včelí plástev [1]

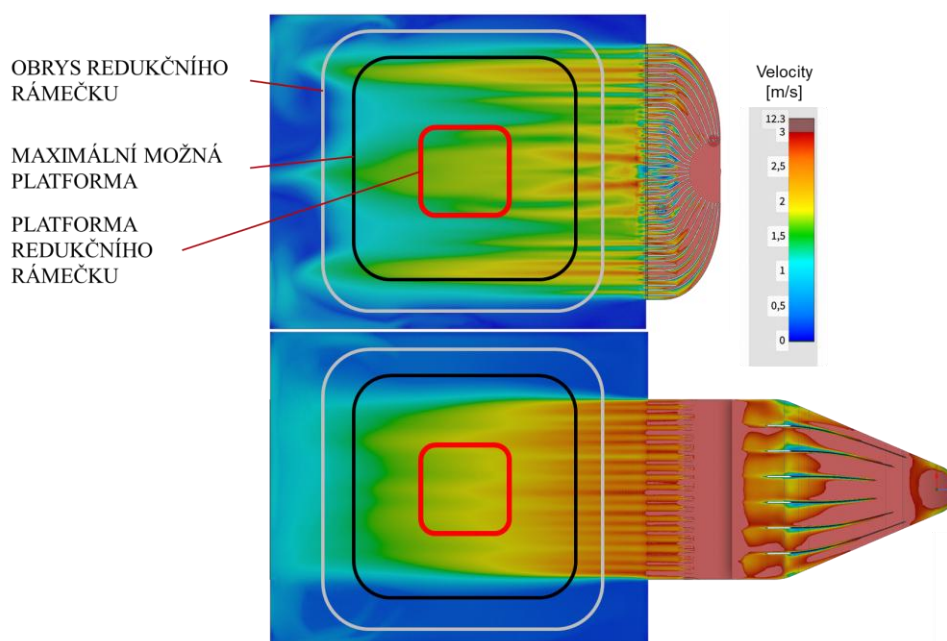
Protože budou porovnávány výsledky numerických simulací užitím různých nástrojů, byla provedena simulace předešlého distributoru navrženého Ing. Somorou taktéž pomocí Ansys Discovery a její výsledky byly srovnány s výsledky z Ansys Fluent.



Obrázek 6-17 Srovnání simulací předešlé geometrie pomocí Ansys Discovery s nástrojem Ansys Fluent

I přes mírné odlišnosti lze v obou případech na obrázku 6-17 identifikovat extrémní rychlostní pole na téměř totožných místech, společně se srovnatelnou charakteristikou napříč celým polem. Výsledky užitím Ansys Discovery lze proto brát jako relevantní a je možné je dále porovnat.

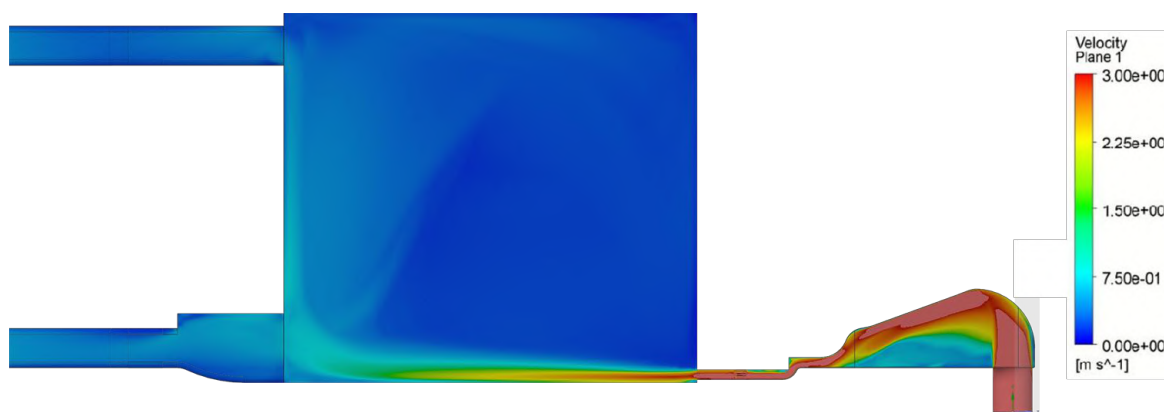
V rámci poslední fáze validačních numerických simulací byla zvolena kombinace nástavce s mřížkou, prostředního segmentu s nárazovou stěnou a vnějšího tvaru geometrie primárního distributoru vpustí spojením vyboulení a lamel v konfiguraci 6a), viz. obrázek 5-53 a 5-54. Kvůli omezené časové dotaci byla tato kombinace shledána jako první výhodná z omezeného počtu iterací, kdy se jednotlivé prvky navzájem vhodně doplňovaly. Výsledný efekt v porovnání s optimalizovaným distributorem lze pozorovat na obrázku 6-17. U nově navržené geometrie lze vidět menší četnost výrazných extrémů rychlostí napříč proudovým polem, dále menší tendenci plynu ztrácet rychlost při průchodu pracovním prostorem a vyšší rovnoměrnost napříč všemi segmenty. Je nutné podotknout, že předešlá geometrie má šířku 286 mm a byla simulována s okrajovou podmínkou rychlosti na vstupu do distributoru $6,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. U nově navrženého distributoru byla z důvodu menší celkové výstupní plochy úměrně snížena rychlost na přívodu na hodnotu $3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. I při téměř 40% poklesu rychlosti vykazuje nový distributor vyšší průměrné hodnoty rychlostního pole nad prostorem uvažovaného rozměru tiskové platformy ve formě redukčního rámečku.



Obrázek 6-18 Srovnání charakteristiky proudu po vstupu do pracovního prostoru předchozího optimalizovaného distributoru a nově navrženého

Předešlá geometrie vykazuje hodnoty rychlostí, nižších než $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, na velké části zmíněné oblasti, zvýrazněné na obrázku 6-17. Největší podíl na mírnějším poklesu rychlosti má zejména několikanásobně delší vzdálenost ustálení proudu před stupem do pracovního prostoru. Zmíněná oblast se v předešlé geometrii prakticky nevyskytuje. Je nutné zmínit, že zvolená geometrie nového distributoru není ideální. Existuje velký počet kombinací změn

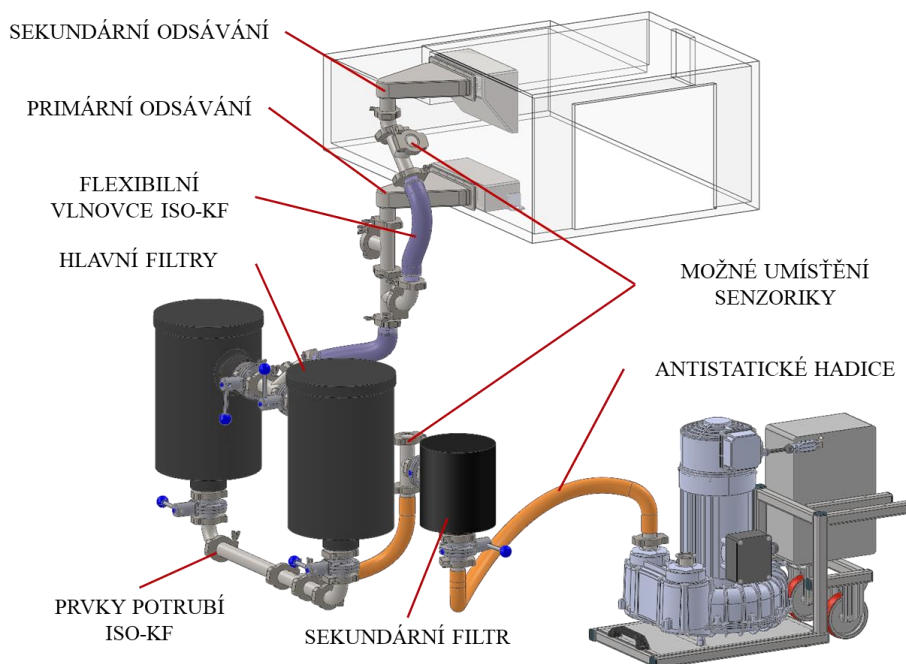
geometrií konkrétní koncepce, které nebyly v rámci této práce validovány numerickými simulacemi. Vhodnost koncepce oproti lamelové lze posoudit také pomocí počtu použitých iterací. V práci [31] je uvedena geometrie jakožto 21. iterace, finální koncepce nového plénového distributoru je přibližně pátou iterací tohoto tvaru. Nespornou výhodou během návrhu je taktéž téměř nelimitující zástavbový prostor, který má evidentně drastický vliv na výsledné možné geometrie, které budou limitované zejména pouze možnými výrobními metodami. Maximální možná velikost platformy byla uvedena pouze pro představu možnosti, či nutnosti budoucího rozšíření proudu na výstupu distributoru, její rozměr je přibližně 220×220 mm a odpovídá maximálnímu možnému zástavbovému prostoru v rámci otvoru tiskové platformy.



Obrázek 6-19 Boční pohled na pracovní prostor při vstupu proudu plynu ze spodního distributoru

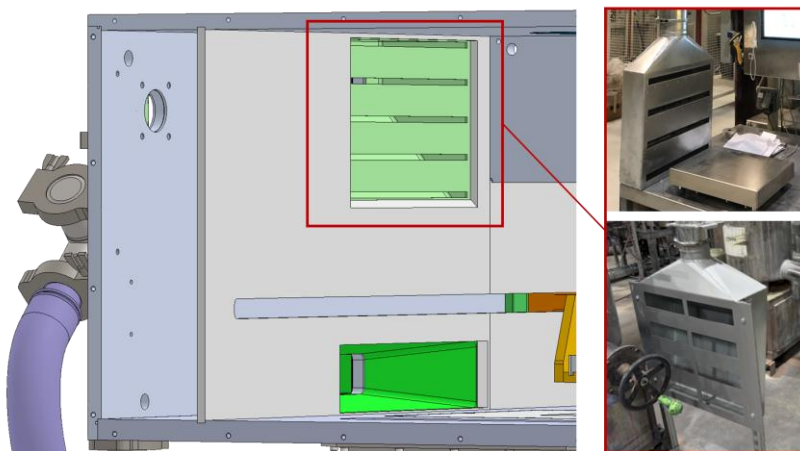
Dodatečně byla provedena zjednodušená simulace do vstupu pracovního prostoru experimentální komory. Při umístění vpusti blíže dnu, než je vidět na obrázku 2-35, lze pozorovat menší, či srovnatelnou tendenci plynu se rozšiřovat ve vertikálním směru. Taktéž lze konstatovat, že i zcela neoptimalizovaná geometrie distributorů odsávání vykazuje srovnatelnou míru odsávání proudu plynu a cirkulace napříč pracovním prostorem jako výchozí konfigurace. V tomto případě je přitom sekundární distributor tvořen pouhým otvorem o stejných rozměrech, jako mají napojovací otvory v bočnicích. Lze proto předpokládat, že následné iterace geometrie mohou nežádoucí cirkulaci proudu dále výrazně snížit.

Podoba části vedení inertní atmosféry, která zodpovídá za odsávání média a spalin z pracovního prostoru, je zobrazena na obrázku 5-20. Před vstupem do dmýchadla je nutné předsadit komplexní filtrační systém, který je převzat ze stávající konfigurace zařízení SLM280 HL a poloha prvků v prostoru je pouze upravena potřebám zařízení. Dmýchadlo zůstává upnuto na vlastním pohyblivém rámu původní konfigurace.



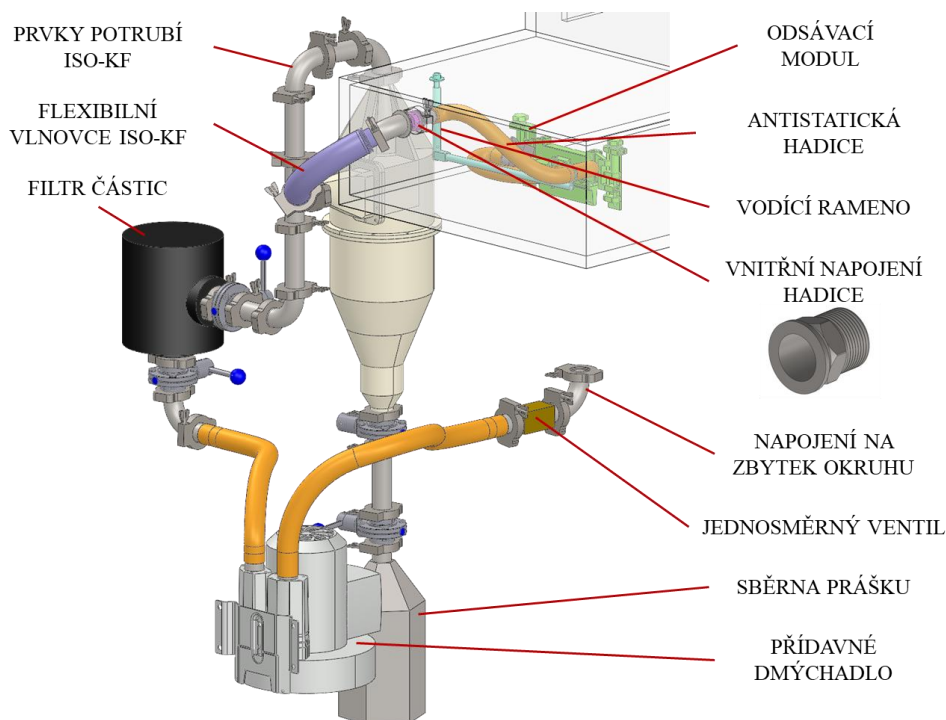
Obrázek 6-20 Znáznornění trasy odsávání spalin z pracovního prostoru

Na začátku trasy, po výstupu z prostoru komory, lze pozorovat dvojici vnějších částí distributorů, odpovídající vybrané výchozí geometrii z analýz v předběžném návrhu. Orientace zbytku potrubního systému je oproti trase za dmýchadlem orientovaná tím způsobem, aby byla minimalizována míra ulpívání odsávaných částic prášku na nenakloněných plochách potrubí. Značná část částic začne v menším průřezu potrubí klouzat po jeho stěnách a horizontálně umístěné prvky by se staly koncentrátory nánosu prášku. Kvůli větším vzdálenostem mezi dílčími prvky trasy za hlavními filtry odsávaného média lze pro propojení použít antistatické hadice z hlediska mnohonásobného snížení finančních nákladů. V neposlední řadě jsou na obrázku 2-21 uvedeny dodatečné pohledy na přibližný vnitřní tvar distributorů odsávání, společně s ukázkou inspirace geometrie sekundárního distributoru odsávání šterbinovými odsávacími nástavci, které jsou primárně určené pro odvod odletujících částic a spalin při broušení, řezání nebo svařování [68].



Obrázek 6-21 Možné geometrie vnitřních distributorů odsávání

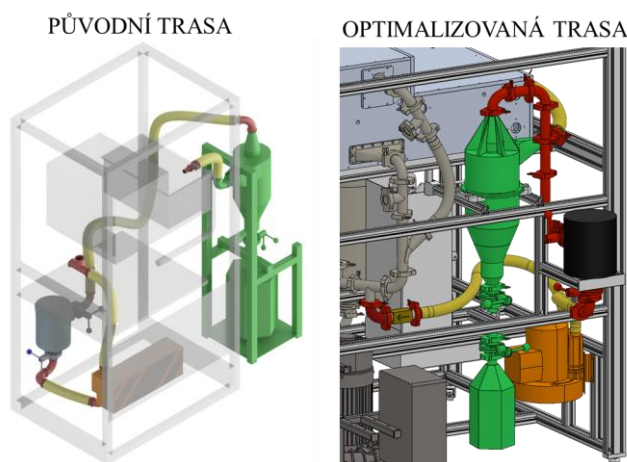
Přídavný systém odsávání multi-materiálového nanášedce je samostatný potrubní celek, který nevychází a ani není inspirován identifikovanými zařízeními. Struktura řetězce vychází čistě z principu nanášení typu holohedral a obsahuje mimo standardní potrubní prvky cyklonový mechanický odlučovač, sekundární dmýchadlo a jednosměrný ventil před napojením na okruh vpusti inertní atmosféry. Cyklonový odlučovač nebyl samostatně řešen v rámci řešerše ani předběžného návrhu, protože vývoj konkrétní geometrie probíhal v rámci týmově zpracovaného projektu v předmětu Výzkumný a vývojový projekt, kde byla také experimentálně ověřena jeho funkčnost. Jeho geometrie je proto do návrhu převzata obdobně jako geometrie nanášedce i odsávacího modulu.



Obrázek 6-22 Struktura systému přídavného odsávání

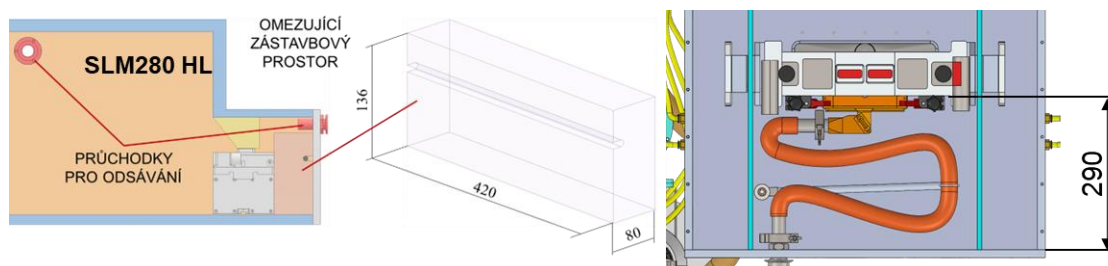
Ve výčtu dalších prvků systému přídavného odsávání lze zmínit speciální modulární průchodku s trubkovým závitem, umístěnou z vnitřní strany zadního demontovatelného panelu komory. Mezi odlučovačem a prvkem zastávající další filtraci je vhodné umístit pouze normalizované nerezové potrubní prvky, opět kvůli přítomnosti zbytku částic prášku. V rámci okruhu musí být obsaženo přídavné dmýchadlo, které tvoří podtlak v hubici odsávacího modulu. Jako model dmýchadla, srovnatelný s použitým dmýchadlem při testování hubice a cyklonového odlučovače, byl zvolen SKV-NS-95-3-716, od společnosti SKV-tec. Dmýchadlo disponuje maximálním průtokem $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a pořizovací cenou přibližně 400 euro. V neposlední řadě musí být vnější část okruhu propojena s pohybujícím se modulem odsávání, připevněným na stěně nanášedce. Zvolený způsob zahrnuje využití antistatické hadice o průměru odpovídajícím rozměru KF25, společně s rotačně uloženým vodícím ramenem. V budoucích fázích realizace bude vhodné lehce změnit koncepci uložení vodícího ramena z pouhého čepu v kluzném pouzdru například na uložení se spirálovou

torzní pružinou pro zamezení možnosti zaseknutí, či kolize ramene. Část okruhu, která nebyla dosud hlouběji analyzovaná je napojení na zbytek okruhu dopravy inertní atmosféry. Po fyzické kompletní realizaci zařízení, včetně okruhu dopravy inertní atmosféry, bude nutné experimentálně zjistit vliv přídavného dmýchadla na proudění v rámci pracovního prostoru. Z provozního hlediska není vhodné, aby docházelo ke stálému zapínání a vypínání přídavného dmýchadla. Je pravděpodobné, že místo pouhého jednosměrného ventilu, který zamezuje vtok proudícího média do systému přídavného odsávání, bude muset být zahrnut i kompenzační člen, či prostor, ve kterém bude docházet k redukci a rozplynutí rázových proudů, vycházejících ze subsystému.



Obrázek 6-23 Porovnání jediné testované konfigurace trasy přídavného odsávání a nový návrh [69]

Při jediném testu okruhu přídavného odsávání byl navíc identifikován problém při vyšších vzdálenostech mezi jednotlivými prvky z důvodu vysokého podílu částic prášku v odsávaném médiu. V návrhu trasy v rámci experimentálního zařízení byla proto implementována trasa s co možná nejmenší vzdáleností mezi klíčovými prvky odvodu většiny částic prášku. Na obrázku 6-22 i 6-23 si lze navíc povšimnout sběrný prášek, která je napojena na spodní část cyklonu. Odpadní prášek získaný tímto způsobem není možné zatím porovnat z hlediska recyklovatelnosti s práškem odvedeným do odpadních přepadů, viz. obrázek 6-12. V rámci popisu a přiblížení podoby okruhu odsávání je uvedeno navíc srovnání zástavbového prostoru zařízení SLM280 HL, ve kterém byla ve vývojové fázi uvažovaná implementace odsávací hadice, která se nakonec ukázala jako nereálná. Experimentální komora disponuje téměř čtyřnásobným zástavbovým prostorem ve směru pohybu, konkrétně mezi nejzazší pozicí a protilehlou stěnou, viz. obrázek 6-24.



Obrázek 6-24 Porovnání zástavbového prostoru pro implementaci hadice odsávání [69]

6.2 Cenová rozvaha

Na základě zpracovaného detailního konstrukčního návrhu klíčových částí zařízení byla vytvořena výrobní dokumentace, která následně sloužila jako podklad pro poptání a výrobu hlavních komponent. Jednalo se zejména o jednotlivé desky komory včetně sestavy dveří. Výroba nenormalizovaných součástí byla na základě poptávkového řízení zadána společnosti Haba s.r.o. [61]. Při výběru dodavatele byla zohledněna hlavně snaha o minimalizaci výrobních nákladů při zachování požadované přesnosti zpracování. Při tvorbě výrobní dokumentace bylo nutné věnovat pozornost vzájemnému napojení jednotlivých desek. Ačkoliv není tato část v textu samostatně rozebírána, u sestavy hrály důležitou roli kontaktní plochy a návaznost otvorů pro šroubové spoje. Průběžně byly iterovány dílčí rozměrové obvody mezi sousedními deskami, riziko problémů se smontovatelností bylo navíc omezeno vysokou přesností výrobních strojů dodavatele.

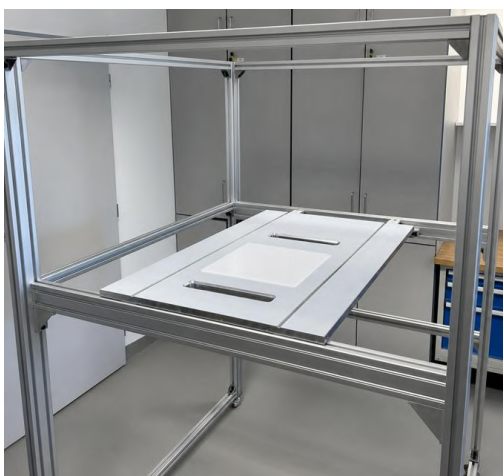
Současně byl realizován nákup normalizovaných a běžně dostupných prvků, potřebných pro sestavení zařízení. Do této skupiny patří hliníkové profily rámu, spojovací materiál, prvky potrubí ISO-KF, těsnící prvky, na míru řezaná skla dveří, kolečka, panty a další doplňkové komponenty. Protože byl během návrhu i realizace veden průběžný přehled nákladů, bylo možné na závěr sestavit orientační cenovou rozvahu částečně realizovaného experimentálního zařízení. Náklady na výrobu a nákup udává tabulka 6-1.

Tabulka 6-1 Cenová rozvaha

Subsystém	Prvek	Cena s DPH [Kč]
Komora	Vyráběné desky	70 000
	Doplňkové díly	8 000
Rám	Hliníkové profily	23 000
	Spojovací materiál	11 000
Vakuové komponenty	Potrubí	60 000
	Pneumatické prvky	16 000
	Ostatní	9 000
Součet:		197 000 Kč

6.3 Realizace

Montáž zařízení započala koncem jara roku 2026 a probíhala v laboratoři ústavu konstruování, v blízkosti pracovišť aditivních LPBF technologií. Po sestavení rámu zařízení bylo na dedikované místo umístěno dno experimentální komory. Další montáž spočívala v ustavení zbývajících nosných stěn komory, následném sestavení dílčích prvků a jejich umístění na komoru. Během montáže byly kontrolovány zejména navazující šroubové spoje, lícování desek a umístění těsnění. Veškeré kontaktní plochy musely být před montáží pečlivě očištěny acetonem kvůli nečistotám z výroby. V rámci návrhu byly uvažovány veškeré šroubové spoje s vnitřním šestihranem pro usnadnění montáže. Sestavu základu rámu lze vidět na obrázku 6-25.



Obrázek 6-25 Montáž rámu

Po očištění byly na stěny komor aplikovány veškeré těsnící prvky. Dveře a zadní panel byly osazeny VSG skly tloušťky 6,35 mm, které byly zatěsněny pomocí silikonu v dedikovaných drážkách.



Obrázek 6-26 Ustavení zbývajících stěn komory

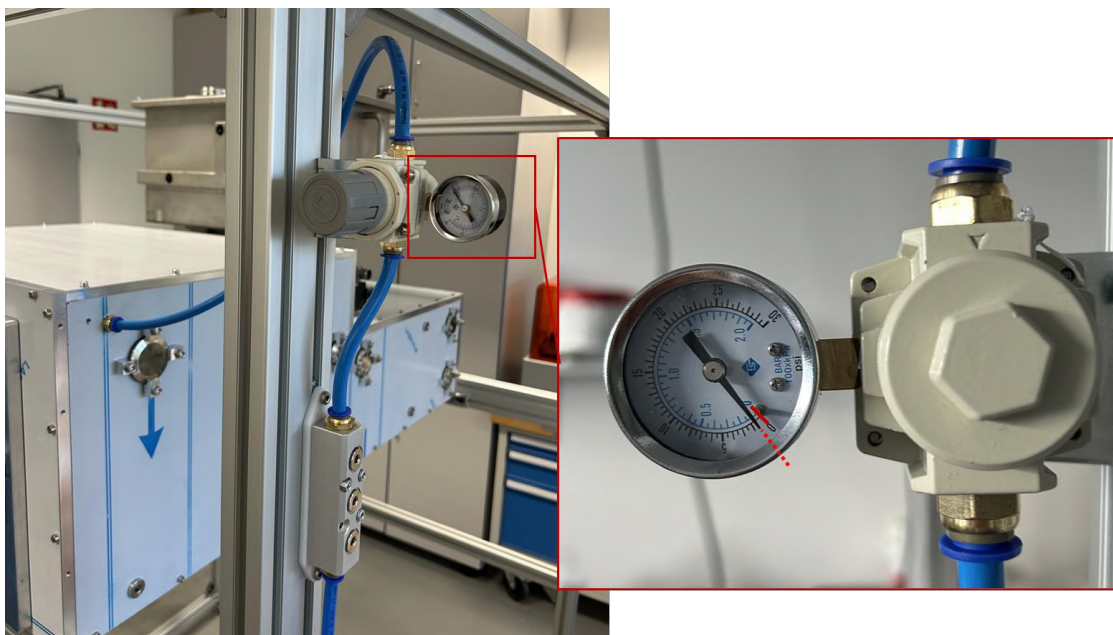
V prvotní fázi testování musely být nevyrobené prvky komory, jako například distributory inertní atmosféry a tisková platforma nahrazeny, polykarbonátovými deskami s drážkami pro kruhové těsnění po obvodu. Desky byly vyřezány z polykarbonátu tloušťky 6 až 8 mm na laserové řezačce. Příklad lze pozorovat na obrázku 6-26 vlevo, či 6-27 na bočních komory. V neposlední řadě byl na zadní vrchní desku uložen prázdný zásobník prášku.



Obrázek 6-27 Montáž těsnících prvků komory

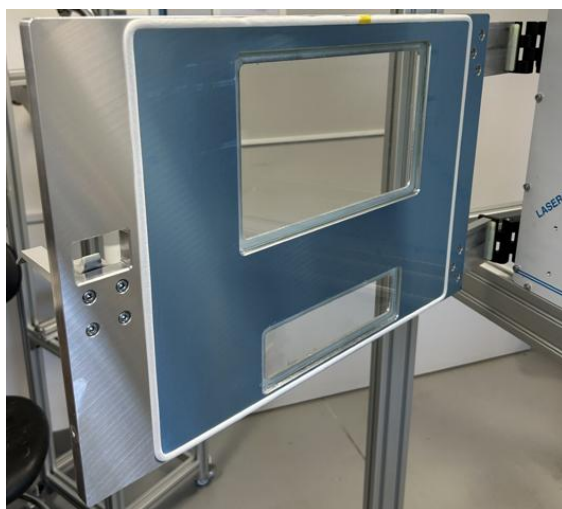
6.3.1 První test těsnosti

Po montáži zmíněné sestavy byla provedena kontrola těsnících prvků prostřednictvím zkušebního natlakování pracovního prostoru komory. Byl tento účel byl sestaven řetězec pneumatických prvků, zobrazený na obrázku 6-28, který pomocí hadic propojuje rozvody stlačeného vzduchu o přetlaku 8bar, přes rozvodní blok a rychlospojky pneumatického vedení s regulátorem průtoku, který v této fázi sloužil pouze jako barometr. Testování proběhlo pomocí regulačního ventilu před příívodem do rozvodního bloku, který byl s opatrností částečně otevírán pro nárůst vnitřního tlaku v komoře. Tento proces byl opakován se snahou navýšení vnitřního tlaku v komoře na měřitelnou hodnotu pomocí dostupného barometru s rozsahem 0-2 bar. Na obrázku 6-28 lze jako výsledek experimentu pozorovat, že se vnitřní tlak v komoře přibližně po 5 minutách od počátku zkoušky ustálil na měřitelné hodnotě, přičemž se po dobu následujících 15 minut pohyboval v rozmezí 40 a 100 mbar.



Obrázek 6-28 Přívod tlačného vzduchu do pracovního prostoru a ustálení vnitřního tlaku

Provozní tlak v referenčním zařízení SLM280 HL se pohybuje během výrobního procesu mezi 18 a 23 mbar, nárůst na hodnoty blízké 80 mbar nastává pouze v případě zaplavyování stroje inertním plynem před začátkem stavby a za cíl vytlačit zbytky vzduchových kapes ze všech vnitřních prostorů systému. Ustálení tlaku na hodnotě převyšující 40 mbar je proto v této fázi bráno za úspěšné ověření těsnosti systému. Během napouštění byla provedena rovněž zvuková kontrola veškerých těsnících prvků po všech stěnách komory, a kromě největší těsněné plochy prostřednictvím dveří zařízení nebyly detekované žádné úniky tlaku. Je nutné však zohlednit přesnost měřících prvků. Použitý barometr vykazoval omezenou přesnost a nedostatečnou rozlišovací schopnost pro spolehlivé vyhodnocení malých změn tlaku v řádu vyšších jednotek mbar. Pro budoucí trvalé ověřování těsnosti bude nutné systém doplnit o přesný měřící řetězec, ideálně s počítačově řízeným převodníkem tlaku dimenzovaným na rozsah menších desetin baru.



Obrázek 6-29 Znáznornění těsnění dveří komory

7 ZÁVĚR

Práce se zabývá konstrukčním návrhem experimentální komory pro multi-materiálovou aditivní výrobu technologií LPBF. Byla provedena rešerše současných experimentálních LPBF zařízení, multi-materiálových nanášecích systémů, prvků systému dopravy inertní atmosféry a možností pozorování výrobního procesu. Získané poznatky byly využity jako základ pro stanovení požadavků na návrh komory, zejména z hlediska modularity.

Na základě koncepčních variant byl vypracován konstrukční návrh experimentální komory, který vychází z ověřeného uspořádání prvků komerčních tiskáren, současně však rozšiřuje možnosti použití na experimentální účely. Oproti běžnému uspořádání byl výrazně zvětšen vnitřní pracovní prostor, doplněný o modulární mechanická rozhraní. Ta umožňují osazení stávajícího i nově vyvíjeného nanášeče, zásobníku prášku i kompatibilního potrubního systému. Navržené uspořádání tak zachovává kompatibilitu se zařízením SLM280 HL, ale současně poskytuje výrazně vyšší volnost pro další úpravy a testování.

Navržená komora je tvořena sestavou hliníkových desek, které zároveň tvoří nosnou konstrukci pracovního prostoru a napojovací rozhraní zbylých subsystémů. Významným rozdílem oproti běžným zařízením je přístupnost do pracovního prostoru z obou stran komory, která usnadňuje údržbu a montáž nanášecích systémů a jejich doplňků. Komora je dále doplněna o průzory v úrovni tiskové platformy, čímž vznikají vhodnější podmínky pro vizuální kontrolu a případnou integraci pozorovací techniky.

Zvláštní pozornost v rámci této závěrečné práce byla věnována systému dopravy inertní atmosféry, jelikož má proudění napříč pracovním prostorem zásadní vliv na odvod nežádoucích spalin, kondenzátu a odletujících částic. Jejich hromadění na tiskové platformě vede k výraznému poklesu kvality vyráběných součástí. Oproti původním řešením, která byla výrazně omezena z hlediska zástavbového prostoru, přináší návrh možnost implementace rozměrnějších a modulárnějších distributorů inertní atmosféry, jejichž orientace a základní potenciál byl ověřen užitím numerických simulací. Návrh zároveň umožňuje další optimalizaci distributorů bez nutnosti zásahu do konstrukce zařízení.

Výsledný detailní návrh zařízení představuje základ experimentální LPBF platformy, založený na zpracování jejích klíčových konstrukčních celků. Navržena je zejména samotná experimentální komora, nosný rám a okruh inertní atmosféry. Návrh byl doplněn o koncepční řešení pozorovací soustavy a výsuvného mechanismu tiskové platformy, které byly důležité pro specifikování potřebného zástavbového prostoru a mechanických rozhraní.

Těsnost komory a funkčnost mechanických rozhraní byla ověřena během montáže, přičemž první test těsnosti potvrdil funkci použitých těsnících prvků. Realizovaná sestava zařízení tak poskytuje podklad pro další etapy vývoje.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KJER, Magnus Bolt, Zhihao PAN, Venkata Karthik NADIMPALLI a David Bue PEDERSEN. Experimental Analysis and Spatial Component Impact of the Inert Cross Flow in Open-Architecture Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2023, 7(4), 143. ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp7040143 [cit. 2026-03-21]
- [2] ZHENG, Hang, Huaixue LI, Lihui LANG, Shuili GONG aj. Effects of scan speed on vapor plume behavior and spatter generation in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2018, 36, 60–67. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2018.09.011 [cit. 2026-03-21]
- [3] TAHERKHANI, Katayoon, Osazee ERO, Farima LIRAVI a Sahar TOORANDAZ aj. On the application of in-situ monitoring systems and machine learning algorithms for developing quality assurance platforms in laser powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2023, 99, 848–897. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2023.05.048 [cit. 2026-03-21].
- [4] FISCHER, Ralf D., Mahyar MOAVEN, Dustin KELLY a Sarah MORRIS aj. 3D tracking velocimetry of L-PBF spatter particles using a single high-speed plenoptic camera. *Additive Manufacturing Letters* [online]. 2022, 3, 100083. ISSN 2772-3690. Dostupné z: doi:10.1016/j.addlet.2022.100083 [cit. 2026-03-21].
- [5] COLOSIMO, B.M., E. GROSSI, Fabio CALTANISSETTA a M. GRASSO. Penelope: A Novel Prototype for In Situ Defect Removal in LPBF. *JOM* [online]. 2020, 72(3), 1332–1339. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-019-03964-0 [cit. 2026-03-21]
- [6] RAYLASE. AM-MODULE III. [online]. Dostupné z: <https://www.raylase.de/en/products/prefocusing-deflection-units/am-modul-III.html> [cit. 2026-03-21]
- [7] VALLABH, Chaitanya Krishna Prasad a Xiayun ZHAO. Continuous Comprehensive Monitoring of Melt Pool Morphology Under Realistic Printing Scenarios with Laser Powder Bed Fusion. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2023, 10(1), 101–110. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2021.0060 [cit. 2026-03-21]
- [8] PEREIRA, M. a U. THOMBANSEN. Contributions for the next generation of 3D metal printing machines. In: HELVAJIAN, Henry, Alberto PIQUÉ, Martin WEGENER a Bo GU, ed. *Laser 3D Manufacturing II* [online]. Bellingham: SPIE, 2015, sv. 9353, 935318. ISSN 0277-786X. Dostupné z: doi:10.1117/12.2079027 [cit. 2026-03-21]
- [9] FISCHER, Felix Gabriel, Max Gero ZIMMERMANN, Niklas PRAETZSCH a Christian KNAAK. Monitoring of the powder bed quality in metal additive manufacturing using deep transfer learning. *Materials and Design* [online]. 2022, 222, 111029. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2022.111029 [cit. 2026-03-21]

- [10] XIE, Jason, Tianyu JIANG a Xu CHEN. An Image Segmentation Framework for In-Situ Monitoring in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. IFAC-PapersOnLine [online]. 2022, 55(37), 800–806. ISSN 2405-8963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2022.11.280 [cit. 2026-03-21].
- [11] KHORASANI, Amir Masoud, Ian GIBSON, Jithin Kozhuthala VEETIL a Ali Hassan GHASEMI. A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2020, 108, 191–209. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05361-3 [cit. 2026-03-21].
- [12] RAPTURE. RAPTURE. ETH Zurich. [online]. Dostupné z: <https://rapture.ethz.ch/> [cit. 2026-03-21]
- [13] MALÝ, Martin. *Experimentální komora pro testování speciálních materiálů technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. Diplomová práce. [cit. 2025-12-31]
- [14] CHEN, Xiang-Xin a Wei-Cheng WANG. The applications of particle image velocimetry (PIV) to experimentally observe the flow behaviors inside the Selective Laser Melting (SLM) working chamber. Flow Measurement and Instrumentation [online]. 2020, 73, 101738. ISSN 0955-5986. Dostupné z: doi: 10.1016/j.flowmeasinst. 2020.101738 [cit. 2026-03-22]
- [15] BITHARAS, Ioannis, A. BURTON, A. J. ROSS a A. J. MOORE. Visualisation and numerical analysis of laser powder bed fusion under cross-flow. Additive Manufacturing [online]. 2021, 37, 101690. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101690 [cit. 2026-03-22]
- [16] DEMIR, Ali Gokhan, Jinwoo KIM, Fabio CALTANISSETTA a A. John HART aj. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2022, 301, 117439. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117439 [cit. 2026-03-22]
- [17] TYRER-JONES, Alex. Build Your Own Metal 3D Printer with the New Open-source reAM250 Project. 3D Printing Industry. [online]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/build-your-own-metal-3d-printer-with-the-new-open-source-ream250-project-234965/> [cit. 2026-03-22]
- [18] DTU OPENAM. OpenAM-PBF. GitHub. [online]. Dostupné z: <https://github.com/DTU-OpenAM/OpenAM-PBF> [cit. 2026-03-22]
- [19] GIRNTH, Simon, Julian KOOPMANN, Günter KLAWITTER a Nils WALDT. 3D hybrid-material processing in selective laser melting: implementation of a selective coating system. Progress in Additive Manufacturing [online]. 2019, 4, 399–409. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-019-00082-w [cit. 2026-03-22]

- [20] SCHNECK, M., M. HORN, M. SCHMITT a C. SEIDEL aj. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2021, 6, 881–894. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-021-00205-2 [cit. 2026-03-22]
- [21] GURÁŇ, Radoslav. Konstrukce nanášecího systému pro zpracování dvou kovových prášků pomocí 3D tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. Diplomová práce. [cit. 2026-03-22]
- [22] SCHAEFFLER. Additive Manufacturing. Schaeffler Special Machinery. [online]. Dostupné z: <https://www.schaeffler-special-machinery.de/en/products/additive-manufacturing/> [cit. 2026-03-22]
- [23] THANKI, Aditi, Carlos JORDAN, Brian G. BOOTH a Dries VERHEES aj. Off-axis high-speed camera-based real-time monitoring and simulation study for laser powder bed fusion of 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2023, 125(11–12), 4909–4924. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-11075-z [cit. 2026-03-22]
- [24] ANWAR, Ahmad Bin a Quang-Cuong PHAM. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 22, 86–97. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.04.036 [cit. 2026-03-22]
- [25] AHSAN, Faiyaz, Jafar RAZMI a Leila LADANI. Global local modeling of melt pool dynamics and bead formation in laser bed powder fusion additive manufacturing using a multi-physics thermo-fluid simulation. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2022, 7, 1275–1285. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-022-00302-w [cit. 2026-03-22]
- [26] PAUZON, Camille, B. HOPPE, T. PICHLER a Sophie DUBIEZ-LE GOFF aj. Reduction of incandescent spatter with helium addition to the process gas during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2021, 35, 371–378. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2021.07.004 [cit. 2026-03-21]
- [27] ELKINS, C. J., J. MIRELES, H. H. ESTRADA a D. W. MORGAN aj. Resolving the three-dimensional flow field within commercial metal additive manufacturing machines: Application of experimental Magnetic Resonance Velocimetry. *Additive Manufacturing* [online]. 2023, 73, 103651. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2023.103651 [cit. 2026-03-21]
- [28] WANG, Wei-Cheng a Chia-Yao CHANG. Flow analysis of the laminated manufacturing system with laser sintering of metal powder. Part I: flow uniformity inside the working chamber. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 92(1–4), 1299–1314. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0213-5 [cit. 2026-03-21]
- [29] ZHANG, Xiaobing, Bo CHENG a Charles TUFFILE. Simulation study of the spatter removal process and optimization design of gas flow system in laser powder bed fusion.

- Additive Manufacturing* [online]. 2020, 32, 101049. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101049 [cit. 2026-03-21]
- [30] YANG, Yongqiang, Ziyu CHEN, Zixin LIU a Han WANG aj. Influence of shielding gas flow consistency on parts quality consistency during large-scale laser powder bed fusion. *Optics & Laser Technology* [online]. 2023, 158, 108899. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2022.108899 [cit. 2026-03-21]
- [31] SOMORA, Jakub. *Úprava cirkulačního okruhu inertní atmosféry 3D tiskárny SLM 280HL*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. Diplomová práce. Dostupné z: interní elektronický dokument. [cit. 2025-12-31]
- [32] ANWAR, Ahmad Bin, Imran Halimi IBRAHIM a Quang-Cuong PHAM. Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study. *Powder Technology* [online]. 2019, 352, 103–116. ISSN 0032-5910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2019.04.044 [cit. 2026-03-21]
- [33] VALLABH, Chaitanya Krishna Prasad a Xiayun ZHAO. Continuous Comprehensive Monitoring of Melt Pool Morphology Under Realistic Printing Scenarios with Laser Powder Bed Fusion. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2023, 10(1), 101–110. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2021.0060 [cit. 2026-03-21]
- [34] ZHANG, Song, Tongfang FU, Anne JAHN a Andreas COLLET aj. Towards deep-learning-based image enhancement for optical camera-based monitoring system of laser powder bed fusion process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2023, 36(9), 1281–1294. ISSN 0951-192X. Dostupné z: doi:10.1080/0951192X.2022.2104461 [cit. 2026-03-21]
- [35] CHEN, Dongju, Peng WANG, Ri PAN a Chunqing ZHA aj. Research on in situ monitoring of selective laser melting: a state of the art review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, 113(11–12), 3121–3138. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06432-1 [cit. 2026-03-21]
- [36] TAHERKHANI, Katayoon, Osazee ERO, Farima LIRAVI a Sahar TOORANDAZ aj. On the application of in-situ monitoring systems and machine learning algorithms for developing quality assurance platforms in laser powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2023, 99, 848–897. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2023.05.048 [cit. 2026-03-21]
- [37] ZHANG, Song, Sebastian ENK, Moritz KOLTER a Johannes Henrich SCHLEIFENBAUM. Polarized Illumination for Optical Monitoring System in Laser Powder Bed Fusion. In: *2022 International Additive Manufacturing Conference* [online]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2022, V001T02A010. Dostupné z: doi:10.1115/IAM2022-94437 [cit. 2026-03-21]
- [38] GRASSO, Marco a Bianca Maria COLOSIMO. A review of the current state-of-the-art on in situ monitoring in electron beam powder bed fusion. *Progress in Additive*

- Manufacturing* [online]. 2024, 9, 1449–1466. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-024-00576-2 [cit. 2026-03-21]
- [39] ŠREIBR Vít, HRDONKA Štěpán, MĚCHURA Lukáš, JENIŠ Filip. Konstrukční úprava rozvodu inertní atmosféry SLM280 HL. Technická zpráva předmětu vývojový projekt. Brno: VUT v Brně. 2017.
- [40] ANDANI, Mohsen Taheri, Reza DEHGHANI, Mohammad Reza KARAMOOZ-RAVARI a Reza MIRZAEIFAR aj. A study on the effect of energy input on spatter particles creation during selective laser melting process. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 20, 33–43. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.12.009 [cit. 2026-03-21]
- [41] GRASSO, Marco, Giorgio VALSECCHI a Bianca Maria COLOSIMO. Powder bed irregularity and hot-spot detection in electron beam melting by means of in-situ video imaging. *Manufacturing Letters* [online]. 2020, 24, 47–51. ISSN 2213-8463. Dostupné z: doi:10.1016/j.mfglet.2020.03.011 [cit. 2026-03-21]
- [42] EVERTON, Sarah K., Matthias HIRSCH, Petros STRAVROULAKIS a Richard K. LEACH aj. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2016, 95, 431–445. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.01.099 [cit. 2026-03-21]
- [43] SLS4ALL. *SLS4All – World's Most Affordable SLS 3D Printer*. [online]. Dostupné z: <https://sls4all.com/>. [cit. 2025-12-31]
- [44] ACONITY3D GmbH. *Aconity3D – Metal Additive Manufacturing Solutions*. [online]. Dostupné z: <https://aconity3d.com/>. [cit. 2025-12-31]
- [45] AMAZEMET. *ACONITY MIDI – LPBF 3D Printing Technology* [video]. In: YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=C1atTsua3VA>. [cit. 2025-12-31]
- [46] OCM Metal 3D Printer – mPrint with Heating Module. Trimech Store. Dostupné z: <https://store.trimech.com/products/ocm-metal-3d-printer-mprint-with-heating-module?srsltid=AfmBOoqiRg85anARlYhTp2l5NTFS2UxWYO4TZtP3cbB0ygOWWUbEqqfY>. [cit. 2025-12-31]
- [47] BAHM-Modultechnik GmbH. *BAHM-Modultechnik – Präzisions- und Sonderteile aus Metall*. [online]. Dostupné z: <https://www.bahr-modultechnik.de>. [cit. 2025-12-31]
- [48] Douglas Electrical Products. *KF Feedthroughs – Douglas Electrical*. [online]. Dostupné z: <https://douglaselectrical.com/douglas-products/kf-feedthroughs/>. [cit. 2025-12-31]
- [49] Ossila Ltd. *Glove Box Electrical Feedthrough – Ossila*. [online]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/glove-box-electrical-feedthrough>. [cit. 2025-12-31]
- [50] SMC Europe B.V. *SMC – Pneumatics and Automation Solutions*. [online]. Dostupné z: <https://www.smc.eu/en-eu>. [cit. 2025-12-31]
- [51] YANGQUAN METALS & MINERALS CO., LTD. *KF, CF and ISO flanges and fittings*. [online]. Technický katalog. [s. l.], [s. a.]. [cit. 2025-12-31]

- [52] ROXTEC. *Těsnicí řešení pro kabely a potrubí*. [online]. Dostupné z: <https://www.roxtec.com/cz/>. [cit. 2026-05-17]
- [53] KYOYU STEEL. Vacuum Chamber Development – Kyoyu-SS [online]. Dostupné z: <https://kyoyu-ss.com/vacuum-chamber-development/> [cit. 2. 1. 2025].
- [54] IDEAL VACUUM. Ideal Vacuum [online]. Dostupné z: <https://www.idealvac.com/> [cit. 2. 1. 2025].
- [55] ANGST+PFISTER SENSORS AND POWER AG. *Angst+Pfister Sensors and Power: Sensors – Power Supplies*. [online]. Dostupné z: <https://sensorsandpower.angst-pfister.com/en/>. [cit. 2026-05-18]
- [56] TRANSFER MULTISORT ELEKTRONIK. *CTX-3.2.3.B76.0 BAUMER-Převodník tlaku*. [online] Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/ctx323b760/prevodniky-tlaku/baumer/ctx-3-2-3-b76-0/>. [cit. 2026-05-18]
- [57] VIALVA, Tia. *Researchers from Politecnico di Milano develop and patent self-correcting SLM 3D printer*. 3D Printing Industry. [online]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/researchers-from-politecnico-di-milano-develop-and-patent-self-correcting-slm-3d-printer-158919/>. [cit. 2026-05-18]
- [58] NIKON SLM SOLUTIONS AG. *Nikon SLM Solutions – Innovating the Future with Precision Metal 3D Printing*. [online]. Dostupné z: <https://nikon-slm-solutions.com/>. [cit. 2026-05-18]
- [59] MARK INDUSTRIES S.R.O. *Ochranná skla*. [online]. Dostupné z: <https://www.markindustries.cz/laserova-bezpecnost/ochranna-skla/>. [cit. 2026-05-18]
- [60] ALEXANDER, Rajath, Amit KAUSHAL a Kinshuk DASGUPTA. *CFD-enabled Optimization for Highly Efficient Purging in Glovebox used for CNT Fiber Production*. BARC Newsletter [online]. 2023, July–August, s. 29–32. [cit. 2026-05-21]
- [61] HABA s.r.o. HABA – Preciznost z hliníku a oceli [online]. Sudoměřice: HABA s.r.o. Dostupné z: <https://www.haba-sro.cz/> [cit. 2026-05-21]
- [62] ENGINEERING TOOLBOX. Individual and Universal Gas Constants [online]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/individual-universal-gas-constant-d_588.html [cit. 2026-05-21]
- [63] BECKER PUMPS CORPORATION. SV 300/2: Double-Stage Vacuum Pump [online]. Cuyahoga Falls: Becker Pumps Corporation. Dostupné z: <https://beckerpumps.com/products/industrial-vacuum-pumps/regenerative-blowers/double-stage-regenerative-blowers/sv-series/sv-300-2-2/> [cit. 2026-05-21]
- [64] ALQUAITY, A. B. S.; IORDANOFF, I.; BENAYOUN, S. a BALLARD, P. Investigation of Spatter Trajectories in an SLM Build Chamber under Argon Gas Flow. *Metals* [online]. 2022, 12(2), 343. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12020343 [cit. 2026-05-21]
- [65] LI, Xin a Shaoping WANG. Flow field and pressure loss analysis of junction and its structure optimization of aircraft hydraulic pipe system. *Chinese Journal of Aeronautics*

- [online]. 2013, 26(4), 1080–1092. ISSN 1000-9361. Dostupné z: doi:10.1016/j.cja.2013.04.004 [cit. 2026-05-21]
- [66] NIKON CORPORATION. Development of PBF Additive Manufacturing Machine NXG 600E. *Nikon Research Report*, roč. 6, 2024. [cit. 2025-05-02]
- [67] ELESA+GANTER. GN 235-ZD Panty zinková slitina [online]. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/Pr%C5%AFmyslove-panty--Panty--GN235-ZD> [cit. 2026-05-22]
- [68] POLLUTION CONTROL SYSTEMS. Slotted Hoods for Dust Collection: Improving Capture Efficiency for Pluming Dust [online]. 11. 3. 2026. Dostupné z: <https://www.pollutioncs.com/blog/> [cit. 2026-05-22]
- [69] JELEČEK Petr, OKÉNKA Jan, STRELA Dominik, VOSTRADOVSKÝ Tomáš. Vývoj systému odsávání prášku pro multi-materiálový 3D tisk. Technická zpráva předmětu vývojový projekt. Brno: VUT v Brně. 2025.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité zkratky

ABS	akrylonitrilbutadienstyren
AM	aditivní výroba
CFD	počítačová dynamika tekutin
DTU	Technická univerzita v Dánsku
ETH	Švýcarský federální technologický institut v Curichu
FDM	Fused Deposition Modeling
FGM	Funkčně Gradovaný Materiál
FSI	Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
FUI	index rovnoměrnosti rychlostního pole
IR	infračervené záření
ISO-KF	normalizovaný systém vakuových přírub potrubí
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
LWIR	dlouhovlnné infračervené záření
MRL	úroveň technologické připravenosti
MVQ	silikonová kaučuk
MWIR	středněvlnné infračervené záření
NBR	nitrilbutadienový kaučuk
PBF	Powder Bed Fusion
PETG	polyethylentereftalát glykol
PLC	Programmable Logic Controller
PMMA	polymethylmethakrylát
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid
SLM	Selective Laser Melting

SMC	výrobce pneumatických prvků a aktuátorů
SWIR	krátkovlnné infračervené záření
VCR	typ konektoru
VSG	vrstvené bezpečnostní sklo
VUT	Vysoké učení technické v Brně

9.2 Použité veličiny

d	průměr částice
d_{50}	medián průměru částic prášku
D	vnitřní průměr potrubí
F_r	přibližná rázová síla
F_y, F_z	složky zatížení ve směrech os
m	hmotnost nanášedce
n	počet vyhodnocovaných segmentů
p	tlak
p_{abs}	absolutní tlak
Q	objemový průtok
R_i	měrná plynová konstanta
T	teplota
u^*	kritická třecí rychlost
v	rychlost pohybu tělesa
$v(z)$	rychlost proudu plynu
w_i	průměrná rychlost proudu i-tého segmentu
$\bar{w}$	průměrná rychlost proudu ve vyhodnocované oblasti
z	výška nad tiskovou platformou
z_0	parametr vyjadřující vliv drsnosti povrchu
Δp	změna hybnosti tělesa
Δt	doba zastavení
η_i	dynamická viskozita inertního plynu
η_i	referenční dynamická viskozita inertního plynu
κ	von Kármánova konstanta
ρ_i	hustota inertního plynu
ρ_m	hustota materiálu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2-1 Zjednodušené zobrazení hlavních prvků tiskové komory LPBF	15
Obrázek 2-2 Příklad skenovací hlavy AM-MODULE III, společnosti RAYLASE.de [6]	16
Obrázek 2-3 Základní konfigurace nanášecích soustav technologie LPBF	17
Obrázek 2-4 Základní typy nanášeců: a) Válečkový, b) Tvrdá stěrka, c) Násypkový, d) Pružná stěrka [10]	17
Obrázek 2-5 Tiskové platformy: a) Čtvercová, tiskárny SLM280 HL, b) Redukční rámeček SLM280 HL, c) Příklad kruhové platformy tiskárny společnosti Rapture [12]	18
Obrázek 2-6 Experimentální vyhřívaná platforma pro zařízení SLM280 HL [13]	19
Obrázek 2-7 Schématické znázornění experimentálního zařízení pro pozorování proudění uvnitř pracovního prostoru vlevo, pohled na realizované zařízení vpravo [14]	21
Obrázek 2-8 CAD render LPBF systému s otevřenou architekturou [15]	22
Obrázek 2-9 Zařízení pro studium gradientního mísení materiálů [16]	22
Obrázek 2-10 Zjednodušené zobrazení a popis hlavních částí zařízení Penelope [5]	23
Obrázek 2-11 Znázornění pozorovací soustavy zařízení Penelope [5]	24
Obrázek 2-12 Systém “Rapture“ z ETH Zurich [12] vlevo, reAM250 [17] vpravo	24
Obrázek 2-13 Systém OpenLPBF v2 a schematicky zobrazené subsystémy [18]	25
Obrázek 2-14 PBF systém univerzity v Seattlu, USA [10]	25
Obrázek 2-15 Přechody v terminologii hybridní aditivní výroby	26
Obrázek 2-16 Přechody v terminologii multi-materiálové aditivní výroby	27
Obrázek 2-17 Znázornění přechodů mezi materiály [20]	27
Obrázek 2-18 Základní rozdělení multi-materiálových nanášecích systémů	28
Obrázek 2-19 Tabulka připravenosti multi-materiálových nanášecích systémů [20]	28
Obrázek 2-20 Princip holohedral nanášení: 1) Nanesení materiálu A, 2) Vypálení geometrie materiálu A, 3) Odsátí přebytečného materiálu A, 4) Nanesení materiálu B, 5) Vypálení geometrie materiálu B, 6) Odsátí přebytečného materiálu B	29
Obrázek 2-21 Schématické zobrazení přídavných prvků pro nanášení principem holohedral a vpravo realizovaná podoba v rámci projektu FSI z roku 2025 (foto autora)	29
Obrázek 2-22 Tryskový nanášecí systém pro SLM280 HL z roku 2017 [21]	30
Obrázek 2-23 Tryskový nanášecí systém se zjednodušeným robotické rameno [19]	31
Obrázek 2-24 Nanášecí systém společnosti Aerosint [22]	31
Obrázek 2-25 Schématické zobrazení tavné lázně	32

Obrázek 2-26 Nepravidelnosti práškového lože: a) Vyčnívající prvek součásti, b) Nepravidelně rozmístěný prášek, c) Vlnění, d) Hřeben, e) Vymršťené částice, f) Rýha, g) Nedostatečné množství rozprostřeného prášku, h) Balling [9]	35
Obrázek 2-27 Pracovní prostor SLM280 HL se zvýrazněnými distributory	36
Obrázek 2-28 Schématické znázornění a podoba filtračního systému zařízení SLM280 HL	37
Obrázek 2-29 Vývoj proudu I.A.: 1) Zpětný proud, 2) První kontakt s pracovní plochou, 3) Přetvořený proud, 4) Odsávání [28]	37
Obrázek 2-30 Proudění pracovním prostorem: a) Model, b) Experimentální měření „Center plane“, c) Koncentrace nečistot [29].....	38
Obrázek 2-31 Optimalizované rychlostní pole nad nadrozměrnou tiskovou platformou publikace [30]	38
Obrázek 2-32 Vliv horizontálních žebër v geometrii hlavního distributoru napouštění na vznik oblasti tlakové níže, vlevo bez žebër, vpravo s implementovanými žebry [30]	39
Obrázek 2-33 Graf závislosti kritické třecí na průměru částic materiálu 316L [29]	39
Obrázek 2-34 Vnitřní geometrie originálních distributorů zařízení SLM280 HL [31]	40
Obrázek 2-35 CFD simulace originální konfigurace SLM280 HL [31]	40
Obrázek 2-36 Optimalizovaná geometrie distributoru z publikace [31]	41
Obrázek 2-37 Sonda pro měření proudu I.A. originální konfigurace SLM280 HL vlevo [31]upraveno, sonda zařízení OpenLPBFv2 vpravo [1]upraveno	42
Obrázek 2-38 Mapy kontur získané měřením sondy OpenLPBFv2 [1].....	42
Obrázek 2-39 Druhy odletujících částic, Somora [31]upraveno	43
Obrázek 2-40 Úhel trajektorie odletujících částic a numerická simulace komory [32].....	43
Obrázek 2-41 Odletující částice bez proudu inertní atmosféry vlevo, s proudem o rychlosti $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vpravo [32].....	44
Obrázek 2-42 Vliv kvality odvodu spalín na hloubku provaření [27]	44
Obrázek 2-43 Senzorická soustava na stropnici zařízení SLM280 HL.....	45
Obrázek 2-44 Vlevo fyzický příklad koaxiální konfigurace, vpravo pozorování práškového lože pod úhlem [35]	46
Obrázek 2-45 Konfigurace a příklad pořízených snímků proudů par a odletujících částic pomocí vysokorychlostní kamery [2]	47
Obrázek 2-46 Identifikované vady práškového lože na snímcích z kamery s vysokým rozlišením [9]	47
Obrázek 2-47 Příklad snímků chladnutí pomocí infračervené kamery [38]	48
Obrázek 2-48 Zobrazení vývoje proudu plynu v čase pomocí kouřové vizualizace [28] ..	49

Obrázek 2-49 Vizualizace pomocí suchého ledu v rámci projektu FSI z roku 2017 [39]..	49
Obrázek 2-50 Příklady samostatně stojících aparátů před hlavním průzorem a vpravo ojedinělý případ mechanického rozhraní pro připojení kamery na zařízení [35, 40]	50
Obrázek 2-51 Příklady implementovaných průzorů [23] [41] [42]	51
Obrázek 2-52 Příklady modulů integrovaných do pracovního prostoru komory [9][24] ..	51
Obrázek 4-1 Black Box schéma	59
Obrázek 4-2 Glass Box schéma	59
Obrázek 4-3 Koncept 1	61
Obrázek 4-4 Inspirace konceptu 1 vybranými SLS (vlevo) a LPBF (vpravo) tiskárnami [43][44][45].....	62
Obrázek 4-5 Koncept 2	62
Obrázek 4-6 Koncept 3	63
Obrázek 4-7 Znázornění míst vnitřního pracovního prostoru komory s pravděpodobným vznikem turbulencí pro a) Koncept 1 a 2, b) Koncept 3	63
Obrázek 4-8 Koncept 3: a) Teoretické umístění distributoru na stropnici, b) Stálá absence „mrtvého místa“ i při implementaci komplexního vrchního distributoru.....	64
Obrázek 5-1 Dostupný model komory SLM280 HL.....	66
Obrázek 5-2 Inspekce napojení jednotlivých stěn zařízení SLM280HL	67
Obrázek 5-3 Pracovní prostor tiskárny OCM – MPRINT [46].....	67
Obrázek 5-4 Způsob napojení hran stěn SLM280HL.....	68
Obrázek 5-5 Členění stěn vyvíjené komory	68
Obrázek 5-6 Vlevo lineární vedení od společnosti BAHR, vpravo dostupné vedení od společnosti SMC [47]	69
Obrázek 5-7 Detail na hřídel propojující obě BAHR vedení tiskárny SLM280HL	69
Obrázek 5-8 Znázornění hloubky komory	71
Obrázek 5-9 Šířka komory: vlevo výchozí rozměry, vpravo současné rozměry	72
Obrázek 5-10 Vizualizace návrhu držáků nanášeče pro lineární vedení a rozměry pro validaci únosnosti.....	73
Obrázek 5-11 Tabulkové hodnoty únosnosti pro lineární aktuátory SMC [50]	73
Obrázek 5-12 Umístění otvorů pro odvod přebytečného prášku vůči redukčnímu rámečku tiskové platformy	74
Obrázek 5-13 Konečnoprvková síť a okrajové podmínky analýzy držáku.....	75
Obrázek 5-14 Pevnostní analýza držáku nanášeče: a) deformace při zatížení tíhou nanášeče, b) deformace zatížení tíhou a boční rázovou silou, c) redukováné napětí případu b	75

Obrázek 5-15 Celkový nárůst rozměrů komory v porovnání s výchozími rozměry	76
Obrázek 5-16 Horizontální rozměry experimentální vyhřívané tiskové platformy [13] ...	76
Obrázek 5-17 Vodící rámeček (vlevo tiskárny reAM-250, vpravo SLM 280 HL) [17]....	77
Obrázek 5-18 a) Průchodka pro jeden kabel, b) více kabelová průchodka, c) zalití do příruby těsnící hmotou [48][49]	78
Obrázek 5-19 Orientační rozměry průchozích děr normy ISO-KF [51]	79
Obrázek 5-20 Kabelové průchodky Roxtec [52]	79
Obrázek 5-21 a) Nástrčná spojka, b) hadicový nátrubek, c) VCR konektor, d) Swagelok konektor [53].....	80
Obrázek 5-22 Vlevo hadice z měkčeného PVC [54], vpravo antistatická hadice AIRDUC PUR 351 EC pro transport brusiva s odizolovaným drátem	80
Obrázek 5-23 Způsoby napojení příruby na stěnu [54]	81
Obrázek 5-24 Příklad použití drápkových svěrek [17].....	81
Obrázek 5-25 Geometrie testovacího vzorku roztečné kružnice pro drápkové spojky	82
Obrázek 5-26 Testované konfigurace drápkových spojek	82
Obrázek 5-27 Integrace senzorů: a) skrz záslepku do potrubí ISO-KF, b) přímo do prostoru komory pomocí závitu ve stěně a plochého těsnění, c) přes přípravky přivařené přímo do potrubí ISO-KF	83
Obrázek 5-28 Zobrazení vytipovaných typů senzorů: a) Senzor teploty [55], b) převodník kyslíku FCX-TR0025 [55], c) převodník tlaku Baumer CTX-3.2.3.B76.0 [56], d) plynový senzorický modul PZA-MC25-N [55]	84
Obrázek 5-29 Dva extrémy: vlevo téměř celá stěna komory z průhledného materiálu [57], vpravo jediný průhled zařízení SLM280 HL	85
Obrázek 5-30 Možné konfigurace struktury průzorů	87
Obrázek 5-31 Orientační počet a umístění průchozích otvorů komory	88
Obrázek 5-32 Parametry dmýchadla Becker SV 300/2 [63]upraveno	91
Obrázek 5-33 Konfigurace pro simulace poměru průtoku při rozdělení větví.....	93
Obrázek 5-34 Okrajové podmínky simulace dělení potrubí.....	93
Obrázek 5-35 Simulace dělení vtoku inertní atmosféry při proudícím argonu o rychlosti $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	94
Obrázek 5-36 Porovnání nástroje Ansys Discovery vlevo a Ansys Fluent vpravo.....	94
Obrázek 5-37 Simulace dělení vtoku při odsávání argonu rychlostí $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	96
Obrázek 5-38 Podoby distributorů u identifikovaných zařízení [12, 15, 46].....	97
Obrázek 5-39 Schématické znázornění ideálního systému proudění napříč pracovním prostorem.....	98

Obrázek 5-40 Rozdělení distributorů v rámci pracovního prostoru.....	98
Obrázek 5-41 Maximální zástavbový prostor	99
Obrázek 5-42 Volba výstupní šíře plynu inertní atmosféry primárního distributoru vpusti	99
Obrázek 5-43 Základní koncepce distributorů [31]upraveno	100
Obrázek 5-44 Časté identifikované modifikace základních typů distributorů [1, 29]	100
Obrázek 5-45 Koncepce rozdělení primárního distributoru vpusti na více částí	101
Obrázek 5-46 Simulace upravené geometrie s perforovanou stěnou [66]	102
Obrázek 5-47 Celkové rozměry výchozích tvarů zvolených distributorů	102
Obrázek 5-48 Vliv míry odchýlení od kuželového tvaru na komplexnost návrhu lamel distributoru.....	103
Obrázek 5-49 Vliv druhého segmentu distributoru	104
Obrázek 5-50 Koncepce druhého segmentu primárního distributoru vpusti.....	104
Obrázek 5-51 Řezy a proudové mapy jednotlivých míst napříč segmenty distributoru ..	105
Obrázek 5-52 Znázornění implementace horizontálních lamel do druhého segmentu	106
Obrázek 5-53 Variace plenového distributoru a) výchozí geometrie, b) zploštění, c) vyboulení	107
Obrázek 5-54 Variace implementace lamel v rámci plenového distributoru	108
Obrázek 5-55 Porovnání koncepcí při napouštění argonu	109
Obrázek 5-56 Srovnání koncepcí při pohledu z boku.....	110
Obrázek 5-57 Orientace a napojení vnějších částí distributorů na komoru	110
Obrázek 6-1 Exteriér detailního návrhu zařízení	111
Obrázek 6-2 Základní rozčlenění subsystémů zařízení.....	112
Obrázek 6-3 Rozčlenění desek komory	112
Obrázek 6-4 Napojení zadní desky na vrchní desku	113
Obrázek 6-5 Příklady drážek pro těsnění kontaktních ploch mezi stěnami komory	113
Obrázek 6-6 Vnější těsnící a funkční prvky sestavy komory	114
Obrázek 6-7 Zobrazení sestavy dveří, společně s detaily pantů a možnosti návrhu speciálního držáku kamery	114
Obrázek 6-8 Znázornění modulárního upnutí aktuátorů	115
Obrázek 6-9 Schématické znázornění koncepce výsuvného mechanismu	116
Obrázek 6-10 Koncepční uspořádání pozorovací soustavy stropnice	117
Obrázek 6-11 Nosný rám konstrukce komory.....	119
Obrázek 6-12 Rozdělení systému dopravy inertní atmosféry na základní celky	119

Obrázek 6-13 Znázornění systému dopravy inertní atmosféry ke vstupu do komory	120
Obrázek 6-14 Podoba distributorů v rámci detailního návrhu	121
Obrázek 6-15 Detailní pohled na distributory vpusti	121
Obrázek 6-16 Geometrie kanálů nástavců: a) dostatečně dlouhý, b) horizontální lamely [30], c) mřížka [30], d) řady kruhových otvorů [29], e) včelí plástev [1]	122
Obrázek 6-17 Srovnání simulací předešlé geometrie pomocí Ansys Discovery s nástrojem Ansys Fluent	122
Obrázek 6-18 Srovnání charakteristiky proudu po vstupu do pracovního prostoru předchozího optimalizovaného distributoru a nově navrženého	123
Obrázek 6-19 Boční pohled na pracovní prostor při vstupu proudu plynu ze spodního distributoru.....	124
Obrázek 6-20 Znázornění trasy odsávání spalín z pracovního prostoru	125
Obrázek 6-21 Možné geometrie vnitřních distributorů odsávání.....	125
Obrázek 6-22 Struktura systému přídavného odsávání	126
Obrázek 6-23 Porovnání jediné testované konfigurace trasy přídavného odsávání a nový návrh [69]	127
Obrázek 6-24 Porovnání zástavbového prostoru pro implementaci hadice odsávání [69]	127
Obrázek 6-25 Montáž rámu.....	129
Obrázek 6-26 Ustavení zbývajících stěn komory	129
Obrázek 6-27 Montáž těsnících prvků komory	130
Obrázek 6-28 Přívod tlačného vzduchu do pracovního prostoru a ustálení vnitřního tlaku	131
Obrázek 6-29 Znázornění těsnění dveří komory	131

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1 Rozdělení zařízení LPBF dle výkonnosti [11]	20
Tabulka 4-1 Kriteriační porovnání navržených koncepčních řešení	65
Tabulka 5-1 Srovnání parametrů lineárních vedení [47][50].....	70
Tabulka 5-2 Parametry skenovací hlavy v závislosti na vzdálenosti od tiskové platformy [6]	71
Tabulka 5-3 Porovnání roztečných kružnic otvorů pro připojení drápových svěrek napříč distributory [17, 51].....	81
Tabulka 5-4 Fotodokumentace upnutí vzorků drápových svěrek.....	83
Tabulka 5-5 Vlastnosti inertních plynů [62]	90
Tabulka 5-6 Rozsah uvažovaných rychlostí na vstupu potrubí.....	91
Tabulka 5-7 Kritické rychlosti proudění pro nejčastěji používané materiály na FSI	92
Tabulka 5-8 Hodnoty simulací z obou výpočetních nástrojů	95
Tabulka 5-9 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti A.....	95
Tabulka 5-10 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti B	96
Tabulka 5-11 Výsledky CFD simulací konfigurace vpusti C	96
Tabulka 5-12 Výsledky CFD simulací konfigurací při odsávání	97
Tabulka 6-1 Cenová rozvaha	128

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres sestavy – EKOM-ASM-000-A

Příloha 2 – Výkres podsestavy – EKOM-ASM-001-A

Příloha 3 – Výkresy součástí – EKOM-PRT-001 až 008