



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky

Diplomová práce

Konstrukce zasouvací stanice k difuzní peci a analýza proudění v pracovní oblasti

Zadání

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi dávali cenné rady a připomínky, nebo mě jakkoli podpořili při psaní této diplomové práce. Zejména děkuji svému vedoucímu Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D., a zaměstnancům firmy ABB s.r.o. Polovodiče Novodvorská, za spolupráci a odborné vedení, které mi pomohlo tuto práci zkompletovat. Poděkování patří rovněž rodině, blízkým přátelům a mojí přítelkyni, neboť ti všichni mi při psaní práce byli velkou oporou.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne.....

.....

Michal Tilšer

Anotace

Tématem této diplomové práce je konstrukce zasouvací stanice a zejména tedy samotného zasouvadla, či zakladače, který automaticky zasouvá křemíkové destičky do topných kazet difuzní pece a analýza bočního proudění vzduchu, které proudí po čas zasouvání a vysouvání kolem desek.

Klíčová slova: Difuzní pec, Difúze, Load station, Zasouvací stanice, Loader, Zakladač, P-N přechod, Čisté prostory, Výkonové polovodičové součástky, Polovodič

Abstract

Theme of this diploma thesis is a construction of Load station and especially part of Load station called Loader which automatically insert the silicon wafers into diffusion furnace processe tube and also the analysis of the lateral air flow which flows during loading and ejecting around the wafers.

Keywords: Difusion furnace, Difusion, Load station, Loader, P-N junction, Clean room, Power semiconductors, Semiconductor

Seznam obrázků a tabulek

obr. 1 Systém difuzní pece ABB2	11
obr. 2 Princip měření hmotnostního průtoku na základě teploty [3].....	12
obr. 3 Gas panel	13
obr. 4 Trojice topných kazet v difuzní peci DA62 s pohledem do dutiny kazety z čistého prostoru	14
obr. 5 Rozdělení teplotních zón topné kazety a rozmístění termočlánků (spike)	14
obr. 6 Teplotní profil ve střední zóně.....	15
obr. 7 Skleněná aparatura [7] a připojení plynů ke křemikové aparatuře	16
obr. 8 Model Gas cabinetu + pece DA62 (vlevo) a reálná fotka servisního prostoru a systému DA62 (vpravo)	17
obr. 9 Load station SVCS s kolejovým zakladačem (vlevo), Load station ABB s vetknutým zakladačem Sandvik-MRL (vpravo) a detail křemikového pádla s výrobní vsázkou	18
obr. 10 Skupina rychlých diod (vlevo), standardních diod (uprostřed) a svářecích diod ABB (vpravo) [12]	19
obr. 11 Struktura a schematická značka bipolárního tranzistoru NPN v zapojení se společným emitorem (vlevo) a PNP (vpravo) [13].....	20
obr. 12 Průřez tranzistoru JFET s kanálem N a P [10].....	21
obr. 13 Struktura tyristoru (vlevo), individuální katodový segment GTO tyristoru v řezu (uprostřed) a pohled shora na destičku GTO tyristoru (vlevo) [10]	22
obr. 14 Přechod PN a jeho pásové schéma (vlevo), PN přechod v závěrném a propustném směru (vpravo) [11]	25
obr. 15 Fotolitografický postup vytvoření masky z SiO ₂ [13]	27
obr. 16 K vysvětlení základnímu popisu difúze [22].....	29
obr. 17 Schéma dopravy dopantu POCl ₃ do procesní aparatury [23]	29
obr. 18 Bubbler s kapalným difuzantem (dopantem) POCl ₃	30
obr. 19 Vysouvání Si desek z Difúzní pece [19].....	33
obr. 20 Čisté prostory.....	34
obr. 21 Provizorní Load station pece DA62	36
obr. 22 Zakladače MRL (vlevo), kolejové zakladače (vpravo) a detail hlavy zakladače MRL	37
obr. 23 Koncepce řešení Loaderu ABB	38
obr. 24 Rám Loaderu ABB.....	39
obr. 25 Bosh RexrothBall Runner Block SNS [25]	39
obr. 26 Porovnání technického řešení náhonu ABB (vlevo) a MRL (vpravo).....	41
obr. 27 Uložení ozubených koleček ABB (vlevo) a MRL (vpravo).....	41
obr. 28 Systém CP604 [26] a schéma řízení Loaderu ABB	42
obr. 29 Spodní (vlevo) a horní (vpravo) část zakladače MRL	43
obr. 30 Konstrukce základní desky zakladače	43
obr. 31 Detail řešení uložení stavěcího šroubu	44
obr. 32 Horní část hlavy zakladače ABB	45
obr. 33 Spodní část hlavy zakladače ABB	45
obr. 34 Sestava hlavy zakladače ABB (nahore) s řezem hlavy ABB v rovině symetrie (dole)	46
obr. 35 Montážní konzole MRL	46
obr. 36 Design montážní konzole Loaderu ABB.....	47
obr. 37 Load station k difúzní peci DA62.....	48
obr. 38 Idealizovaná sestava	49
obr. 39 Model s aplikovanou sítí.....	50
obr. 40 Použité vazby	50
obr. 41 Pevné vazby.....	51
obr. 42 Zatížení.....	51
obr. 43 Průhyby v ose x.....	52
obr. 44 Výsledné napětí.....	53

obr. 45	Maximální napětí na pouzdře lineárního vedení	53
obr. 46	Napětí v upevňovací konzoli zakladače	54
obr. 47	Graf únosnosti pouzdrového lineárního vedení (vlevo) a definice hlavního směru působení síly (vpravo)	55
obr. 48	Schéma řešení únosnosti pouzdrového lineárního vedení	56
obr. 49	Technické řešení proudové cesty	58

tab. 1	Třídy čistoty dle FS 209 E [24].....	32
---------------	---	-----------

Obsah

TEORETICKÁ ČÁST	10
1. Úvod.....	10
1.1 Systém difuzní pece	11
1.1.1 Skříň rozvodních plynů (Gas cabinet).....	11
1.1.2 Difuzní pec (Furnance) a Scavenger	13
1.1.3. Zasouvací stanice (Load station).....	17
2. Výkonové polovodičové součástky v ABB s.r.o. Polovodiče Novodvorská	19
2.1 Diody.....	19
2.2 Tranzistory	20
2.3 Tyristory	21
3. P-N přechod a základy technologie výkonové polovodičové součástky.....	23
3.1 Základy výroby monokrystalického křemíku.....	26
3.2 Základy technologického oxidačního procesu	27
3.3 Základy technologického difuzního procesu.....	28
4. Metodika řešení a provozování čistých prostorů v elektrotechnickém průmyslu	31
4.1 Částice	31
4.2 Čistá zóna	31
4.3 Čistý prostor	31
4.4 Třída čistoty	31
4.5 Velikost částice	31
4.6 Třídy čistoty čistých prostorů dle FS 209 E.....	32
4.7 Proudění a třída čistoty vzduchu v pracovní oblast Load stationu.....	32
4.8 Filtrace vzduchu	34
PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
5. Zakladač (Loader) a Load station k difuzní peci.....	36
5.1 Reverse engineering a aplikace požadovaných specifikací podniku.....	37
5.1.2 Koncepce řešení lineárního pohybu	38
5.1.2 Rám zakladače a volba lineárního vedení	39
5.1.3 Pohonná jednotka zakladače a řízení.....	40
5.1.4 Hlava a základní deska zakladače	42
5.1.5 Montážní konzole.....	46
5.1.6 Load station	47
5.2 Ověření pevnosti a tuhosti klíčových částí Loaderu	48
5.2.1 Komplexní pevnostní a tuhostí analýza modelu Loaderu pomocí MKP.....	49

5.2.2 Dodatečné analytické ověření pevnosti vybraných částí Loaderu.....	54
6. Pracovní oblast Load stationu	57
6.1 Filtrační prostředky a ventilátor	57
6.2 Technické řešení proudové cesty	57
6.3 Ověření laminárního proudění v pracovní oblasti Load stationu pro vybranou variantu ventilátoru a filtračních prostředků.....	59
7. Závěr	60
Literatura	61

TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Asi v polovině mého bakalářského studia jsem začal pracovat v podniku ABB s.r.o. Polovodiče Novodvorská, který formálně vznikl v roce 2010 jako důsledek akvizice společnosti ABB se závodem Polovodiče a.s. Avšak historie vývoje a výroby výkonových polovodičových součástek v České republice sahá přibližně až do roku 1956, kdy v závodě ČKD Elektrotechnika vývoj započal. Nový obor se začal rozvíjet vysokým tempem a v důsledku nedostatku výrobních kapacit závodu se roku 1963 zakládá podnik ČKD Polovodiče, ze kterého se postupem času roku 1994 stal již zmiňovaný podnik Polovodiče a.s. Společnost ABB se po akvizici rozhodla podstoupit celkovou rekonstrukci závodu a v roce 2012 završila investici ve výši 240 milionů Kč. Plocha závodu má přibližně 9500 m² a investice se projeví zejména ve změnách organizace výroby a v rozšíření v oblasti čisté produkce o 15 %.

[1] [2]

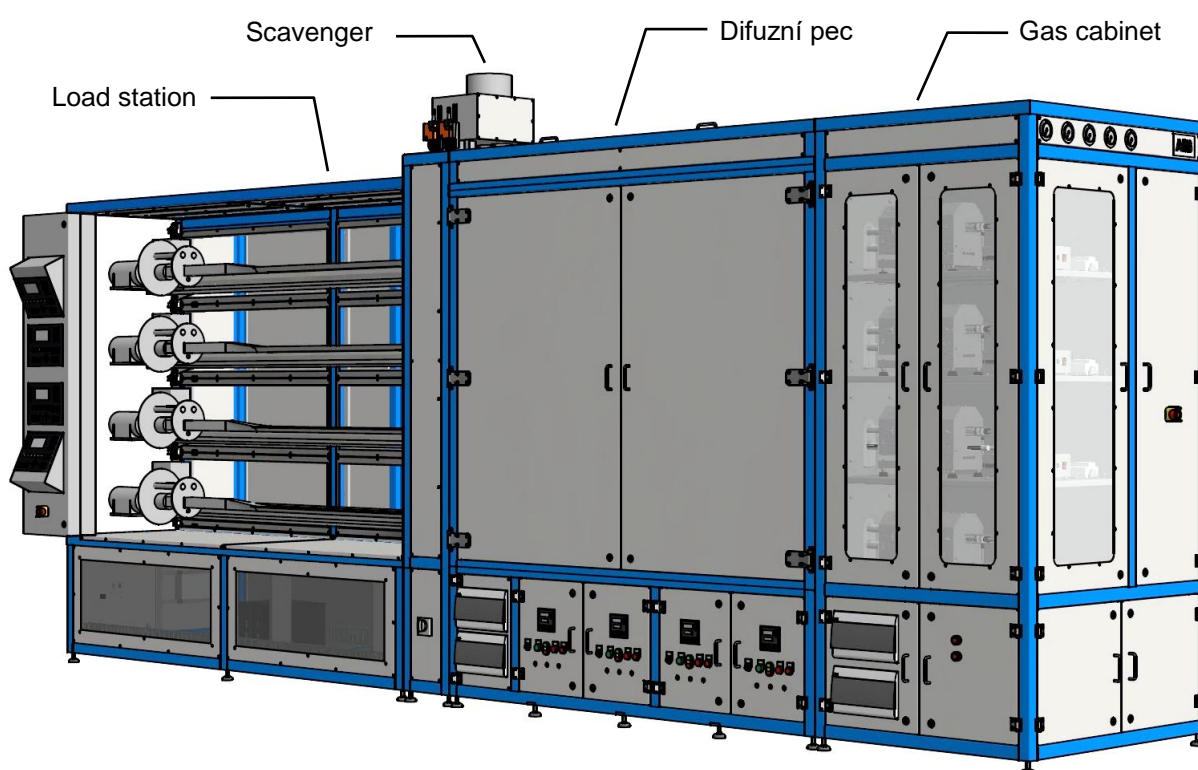
Nicméně i nadále se různá interní firemní oddělení, zejména tedy R&D, tj. výzkumné a vývojové oddělení, podílí na postupné renovaci a údržbě zařízení, které v podniku i po rekonstrukci objektu zůstaly. V zimě roku 2011 byl schválen investiční plán na rekonstrukci difuzní pece DA62, která byla vyrobena v 80. letech 20. století v Německé demokratické republice. Technický stav již neumožňoval dosahovat požadované hodnoty teplotních parametrů. Zejména tedy šlo o problémy s regulací a s teplotní stabilitou, jež je velmi důležitým faktorem při výrobě polovodičových součástek. Po rekonstrukci byla pec umístěna do nově zrekonstruovaných prostor a spolehlivě slouží dál potřebám podniku.

Součástí difuzní pece DA62 je i tzv. Gas cabinet, resp. skříň rozvodných technologických plynů, které jsou při dané technologii výroby polovodičových součástek potřeba dodávat do difuzní pece, aby vznikl polovodičový přechod. Dva roky po rekonstrukci pece DA62 tedy vznikl další investiční plán na rekonstrukci zastaralého Gas cabinetu, který příslušel zrekonstruované peci DA62. Rekonstrukce plně zautomatizovala systém dávkování plynů bez nutnosti obsluhy operátora a celkově zmodernizovala zastaralý systém průtokoměrů, ventilů a rozvodů. Navíc byly přidány i bezpečnostní prvky, které jsou schopny zasáhnout při náhodném výpadku, či při nárůstu kritických parametrů. Tímto se zjednodušila obsluha a dosáhlo se větší výtěžnosti na vyráběných součástkách.

V průběhu bakalářského studia jsem v podniku konstruoval menší díly či přípravky, ale zejména jsem pracoval na tvorbě výkresových a jiných dokumentů potřebných k předávací dokumentaci systému pece DA62. V průběhu magisterského studia jsem dostal za úkol zpracovat poslední část systému pece DA62, kterým je Load station neboli zakládací stanice a zejména samotný Loader, tedy zakladač, který křemíkové destičky uspořádané na nosníku zasune do prostoru difuzní pece, kde probíhá samotná difúze. V současnosti systém DA62 disponuje pouze provizorním poloautomatickým zasouvacím systémem, kde je nutný zásah operátora, který musí provést několik kroků, než skutečně samotné zasunutí desek do pece, a je zde tudíž zvýšené riziko úrazu popálením. Navíc je zde úplná absence systému vzduchotechniky, která napomáhá k udržení vyšší třídy čistoty v pracovní oblasti, tedy oblasti, kde desky konají horizontální posuvný pohyb směrem do pece, resp. z pece, což zapříčiňuje nižší výtěžnost na vyráběných kusech.

1.1 Systém difuzní pece

Celé zařízení se sestává celkem ze čtyř celků, které jsou zobrazeny na (obr. 1). Na obrázku je 3D model systému difuzní pece ABB2, který vznikl na základě investičního návrhu začátkem jara roku 2015 a dokončen byl na přelomu roku 2016/17. Na projektu jsem se aktivně podílel a byl mi velkou studnicí zkušeností, které jsem následně mohl aplikovat při konstrukci Load stationu a Loaderu. Budeme-li postupovat zprava doleva, první skříň je Gas cabinet. Dále pak následuje samotná difuzní pec a Scavenger neboli odtah anorganických plynů, který má za úkol odvádět nežádoucí plyny z topných aparatur, popřípadě homogenizovat plynnou atmosféru uvnitř aparatury. Poslední částí je potom Load station osazený Loadery od americké firmy Sandvik Thermal Process Inc. Pec ABB2 je čtyřpozicovou pecí, což znamená, že dokáže naráz zpracovat čtyři vsázky křemíkových destiček. První tři zmíněné části systému difuzní pece jsou umístěny v tzv. šedé místnosti, tedy v místnosti, kde jsou sníženy nároky na čistotu. Naproti tomu poslední část, Load station, je umístěna v čistém prostoru s třídou čistoty 1 000. Problematika čistých prostor je popsána v kapitole 4.



obr. 1 Systém difuzní pece ABB2

1.1.1 Skříň rozvodních plynů (Gas cabinet)

Jak již bylo v úvodu nastíněno Gas cabinet je jednou ze čtyř součástí systému difuzní pece. Obsahuje veškeré náležitosti nutné k dodávce difuzantů a procesních plynů do topných kazet difuzní pece. Je koncipována jako ocelová konstrukce svařená z dutých čtvercových profilů a povrchovou úpravu tvoří práškový lak. Při návrhu se zejména kladl důraz na to, aby byly všechny komponenty Gas cabinetu dobře přístupné, čehož se docílilo aplikováním plechových dveří buď s průzorem, či bez, na třech stranách skříňe. Čtvrtá strana pak těsně přiléhá na čelo Difuzní pece.

Do cabinetu se procesní plyny přivádí z lokálního podnikového rozvodu plynů ve vrchní části kabinetu. V závislosti na použité technologii difúze (vybrané procesy popsány v kapitole 3.3) je pak kabinet osazen technologickými zařízeními. V základu ho ale vždycky tvoří manometry, které slouží k odečítání tlaku procesního plynu z centrálního rozvodu předtím, než je přiveden do gas panelů a regulátory rovněž sloužící k potřebným tlakovým regulacím plynu před vstupem do gas panelů.

Design gas panelu rovněž podléhá použité technologii difuze, nicméně v základu ho tvoří ruční uzavírací ventily, které mají význam pouze při údržbových pracích na gas panelu. Dále pak pneumatické ventily, které s ohledem na použité plyny nemohou být nahrazeny ventily elektromagnetickými, nýbrž by vznikalo riziko výbuchu či požáru. Srdcem řídicího systému gas cabinetu jsou pak digitální regulátory/měřáky hmotnostního průtoku, které fungují na principu rozdílu teplot dvou kontrolních míst, které jsou umístěny ve vedlejší laminární proudové cestě. V případě nulového průtoku vzduchu je $\Delta T = 0$. Bude-li však hmotnostní průtok plynu $\phi_m \neq 0$, kontrolní místo reprezentované teplotou T_1 , které je ofukováno dříve než kontrolní místo reprezentované teplotou T_2 , bude vykazovat nižší teplotu než v místě s teplotou T_2 . Hmotnostní průtok je pak dán vztahem (1.1), kde k_m představuje konstantu měřidla a c měrnou tepelnou kapacitu měřeného plynu. Princip je pak zobrazen na (obr. 2). [3]

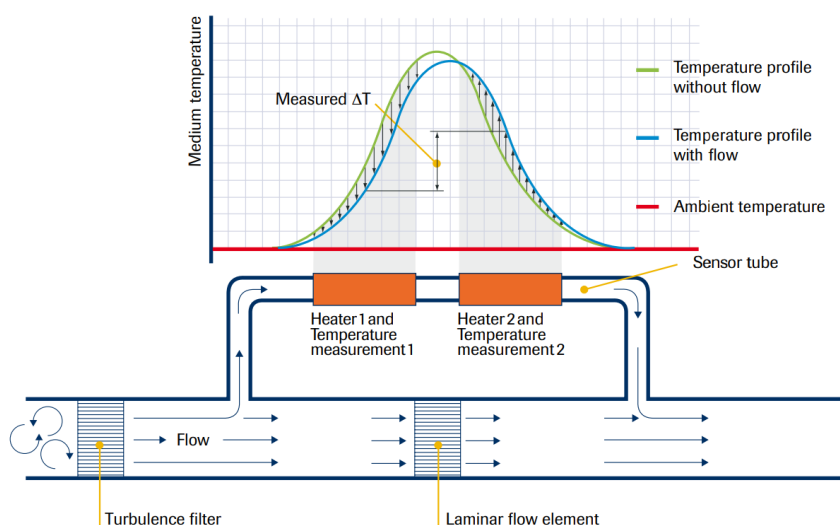
$$\phi_m = \frac{\Delta T}{k_m \cdot c} \quad (1.1)$$

Vzhledem k citlivosti difuzní operace na drobné odchylky od technologického procesu a velkých nároků na kvalitu je nutností do gas panelů aplikovat i speciální plynové filtry s nízkou tlakovou ztrátou a schopností odfiltrovat až 99,9999999% částic v rozmezí $0,003\mu m \div 0,08\mu m$. Jako filtrační prostředek je užito pouze niklového média. [4]

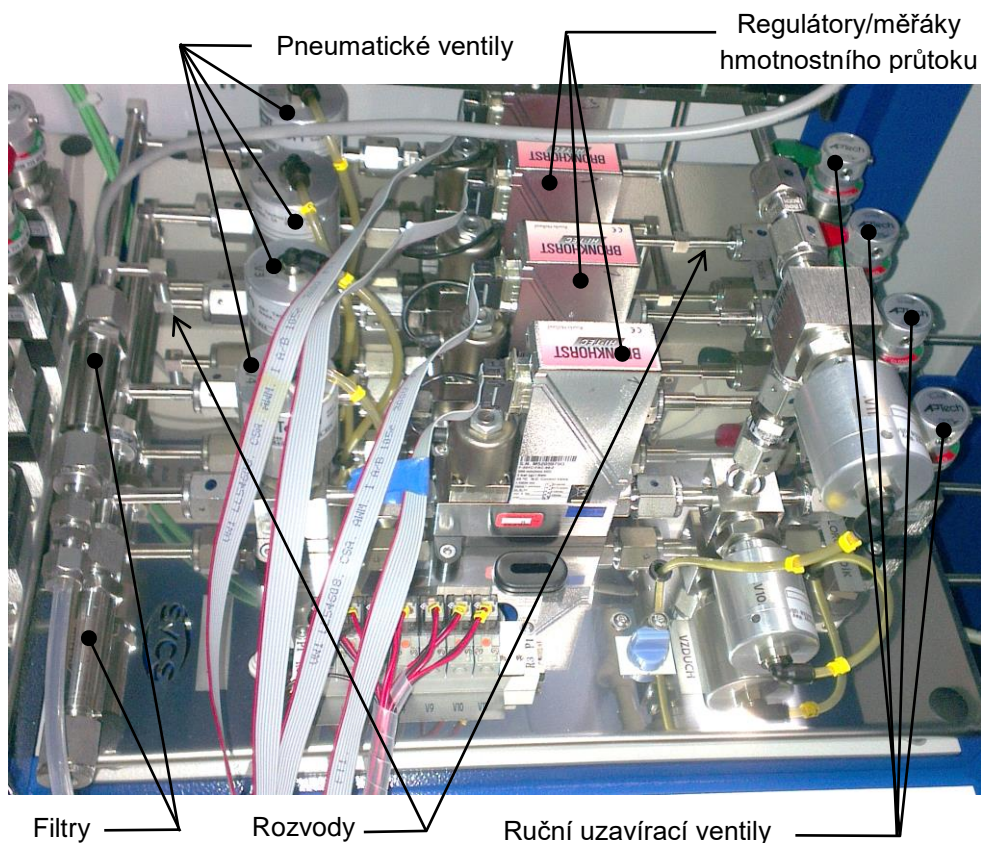
Veškeré více zmíněné komponenty gas panelu jsou s ohledem na čisté prostory vyráběny z nízko-uhlíkové chirurgické nerezové oceli třídy EN 1.4404 /AISI 316L, která se vyznačuje zvýšenou korozní odolností v kyselém prostředí. Rovněž i veškeré rozvodné potrubí, kolena a fitinky jsou z výše uvedené oceli. Jsou elektrolyticky leštěny jak na vnějších, tak i na vnitřních plochách až na Ra 5 a díly potrubí jsou spojovány orbitálními svary v ochranné atmosféře. Příklad gas panelu je uveden na (obr. 3)

Spodní část Gas cabinetu disponuje převážně elektronickými díly, jako jsou pojistné skříně, AD převodníky a různé měřicí karty potřebné k řízení difuzního procesu a bezpečnostní tlačítka.

[5]



obr. 2 Princip měření hmotnostního průtoku na základě teploty [3]



obr. 3 Gas panel

1.1.2 Difuzní pec (Furnance) a Scavenger

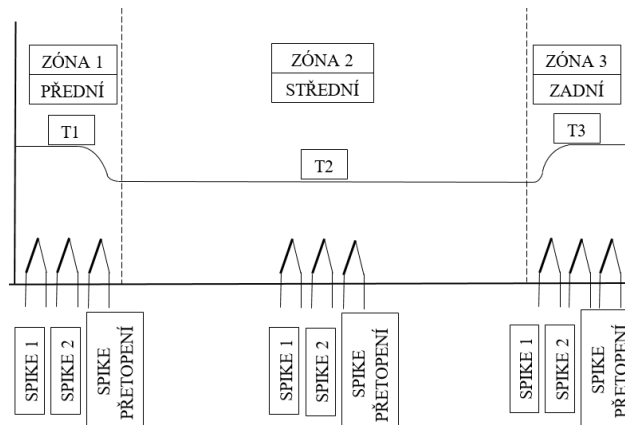
Jednu z hlavních rolí v celém systému vykonává samotná difuzní pec. V tomto zařízení se totiž odehrávají veškeré teplotní procesy nutné ke zpracování křemíkových polovodičových desek. Koncepte skříně je stejná jako u Gas cabinetu a jedná se tedy o ocelovou konstrukci svařenou z dutých čtvercových profilů povrchově chráněno práškovým lakem. V dutině dveří a krycích panelů je pak umístěna skelná vata krytá hliníkovým plechem, což funguje jako tepelná izolace od žaru topných kazet. Pec může být koncipována buď vertikálně, nebo horizontálně a je tím myšleno to, jakým způsobem je orientována osa topných kazet vůči podlaze. Ve velkých průmyslových aplikacích je výhodnější užívat horizontální koncepcce, jelikož je dispozičně mnohem vhodnější než vertikální koncepcce, která se hodí spíše pro menší zkušební laboratorní práce.

Topné kazety, zobrazeny na (obr. 4), jsou elektricky vytápěné zařízení válcového tvaru, jehož vnější obal tvoří plechový plášť z nerezové oceli. Pod pláštěm se nachází speciální vláknitý keramický materiál Fibrothal™ s nízkou tepelnou kapacitou a tepelnou vodivostí, schopný dlouhodobě odolávat teplotám do 1500°C. Vyznačuje se také velmi dobrou chemickou odolností a schopností zachovat si své fyzikální vlastnosti i při navlhnutí. Ve vnitřní dutině izolace je pak spirálovitě natočen odporový drát vyroben ze speciální slitiny zvané Kanthal®. Slitina tvořena z 22% chromem, (4,8 – 5,8%) hliníkem a zbytkovým podílem železa může při vhodných koncentracích legujících prvků dosahovat teploty tání okolo 1500 °C a díky svému vysokému elektrickému odporu je s hojností využívána v průmyslu především pro tvorbu odporových drátů. Do topných kazet se užívá především Kanthal A-1 s měrným tepelným odporem při pokojové teplotě $1,45 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ a schopností rozežhát se na teplotu až 1400 °C. Topné kazety jsou jako celek vyráběny firmou Kanthal, která je součástí společnosti Sandvik. Dodávají je jako „plug and heat“ systém, tudíž po zabudování do rámu pece se pouze připojí přívodní silové kabely a zařízení může být provozováno. [6]



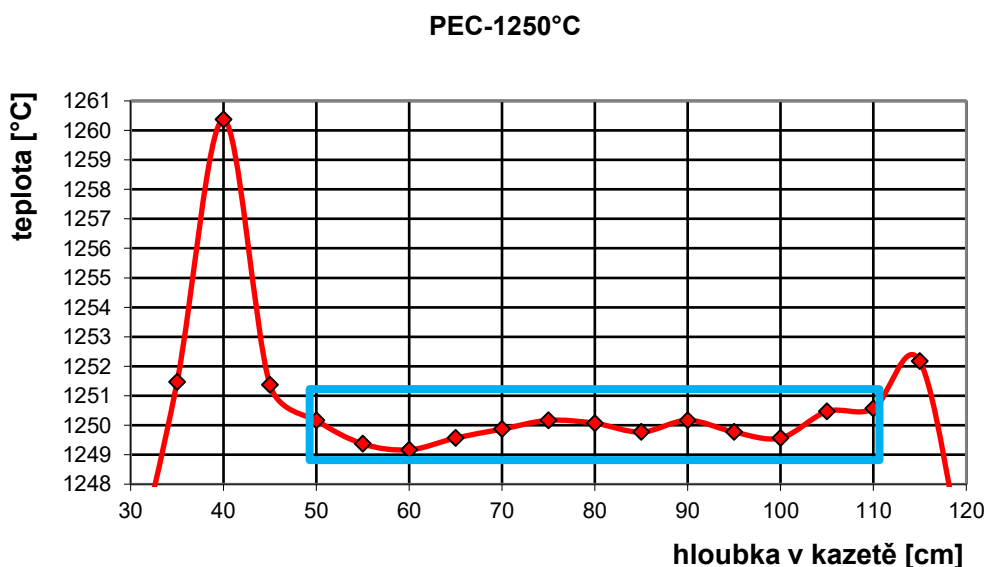
obr. 4 Trojice topných kazet v difuzní peci DA62 s pohledem do dutiny kazety z čistého prostoru

V difuzní peci probíhá regulace ve třech teplotních zónách, které se navzájem ovlivňují. Jsou jimi přední (load), střední (center) a zadní (source). Každá z topných kazet je podélně rozdělena na 3 zóny, které jsou samostatně vyhřívány viz. (obr. 5). Do střední zóny 2 se umísťují výrobní vsázky. Zóny 1 a 3 jsou pak nastaveny na vyšší teplotu a korigují ochlazování prostoru na obou koncích zóny 2 tak, aby její teplota byla po celé její délce konstantní. Potřebný rozdíl teplot mezi zónami se zjišťuje během profilace, což je děj, kdy se traverzuje termočlánkem podél osy topné kazety od konce zóny 1 do začátku zóny 3 a sleduje se, zda je v zóně 2 požadovaná teplota v mezích $\pm 1^\circ\text{C}$. Na (obr. 5) je dále vidět rozmístění termočlánků (spike) v jednotlivých zónách. Každá zóna obsahuje jeden havarijní termočlánek přetopení (spike – přetopení) a dva regulační termočlánky spike 1 a spike 2. Spike 1 se používá pro regulaci v běžném provozu, v případě jeho poruchy řídicí systém použije k regulaci spike 2. Časový průběh požadované teploty je řízen podle procesního programu, který je do řídicího systému zaváděn ze supervisoru na PC. Požadovaná teplota je dle procesního programu přepočítána přes tzv. profilační tabulky, které popisují kalibraci termočlánků a rozložení teplot v peci a následně zaslána do bloku regulace. Maximální teplota difuzní pece $\pm 1^\circ\text{C}$ je volena dle dané technologie výroby. Termočlánky spike přetopení jsou určeny pro měření teploty přetopení difuzní pece. Pokud dojde k překročení definované hodnoty přetopení (vzrůstu teploty nad definovanou hodnotu v kterékoliv ze zón) dochází k odpojení silového napájení topné kazety a tím k odstavení difuzní pece. Obvody přetopení jsou nezávislé na zbytku regulace a jeho vybavení znamená vždy odstavení pece a inicializace optické a akustické chybové hlášky.



obr. 5 Rozdělení teplotních zón topné kazety a rozmístění termočlánků (spike)

Za zmínku snad stojí ještě (obr. 6) na kterém je graficky znázorněno skutečné profilační měření na jedné pozici difuzní pece v podniku ABB. Na instalované 150 cm dlouhé kazetě, byla požadována v zóně 2 teplota $T_2 = 1250^{\circ}\text{C}$. Ve 40 a 115 cm jsou pak patrné gradienty teploty, které jsou zde důsledkem přetopení v zóně 1 a 3 s ohledem na ochlazování, ke kterému dochází na koncích topných kazet. Na teplotním profilu je pak patrné, že v zóně 2, která je vymezena modrým obdélníkem, je dodržen teplotní rozptyl $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a systém je dostatečně vyladěn.

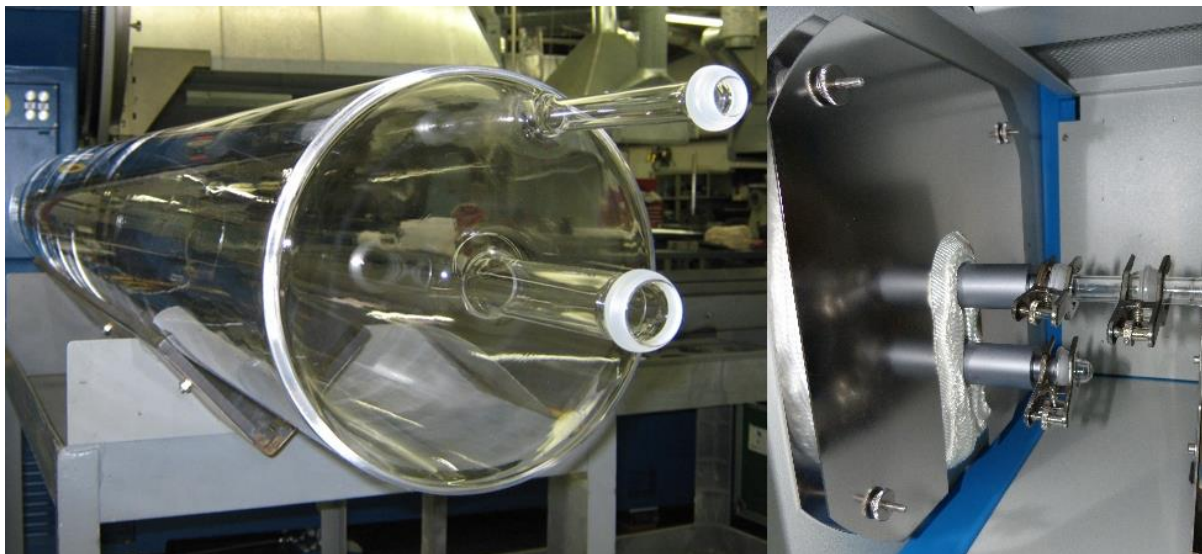


obr. 6 Teplotní profil ve střední zóně

S ohledem na množství odpadního tepla, které topné aparatury produkují, je nutné horký vzduch proudící směrem vzhůru ke stropu difuzní pece, ochlazovat. Nadbytečné teplo by totiž jinak značně narušovalo teplotní komfort v šedém prostoru, kde jsou zařízení umístěny. Proto se nad topné kazety umísťuje jednofázový žebrový výměník, kterým protéká chladicí voda. Nad samotným chladičem je pak soustava ventilátorů, které zajišťují odtah tepla z prostoru kazet přes výměník.

Dále si je nutno uvědomit, že technologické a procesní plyny, které je nutno dodávat do topné kazety v průběhu výroby součástek, nejsou přímo v kontaktu s vnitřním prostorem topné kazety. Vnitřní prostor topné kazety vyplňuje tzv. proces tube. Jedná se vlastně o jakýsi podlouhlý válec, který izoluje veškeré procesy od „nečistého“ vnitřního prostředí topné aparatury. Procesní aparatura je opatřena na straně blíže ke gas cabinetu tzv. ball jointy, které jsou normalizované a slouží k připojení plynů z Gas panelů přes speciální chemicky čisté fitinky vyrobené z Virgin PTFE, nebo přes tzv. socket jointy vyráběné z křemenného skla. Strana blíže k Load stationu a čistým prostorům není nijak zvláště upravována. Je prostě kolmo uříznutá tak, aby do ní šla pohodlně zasouvat vsázka. Aparatura je následně uzavřena dvířky, či nárazníkem z křemenného skla, jenž je součástí každého Loaderu. Aparatury jsou vyráběny především z čistého křemíku, který nejlépe odolává teplotním cyklům a má největší životnost. Tyto aparatury jsou taky jedny z nejdražších, které se užívají. Nevýhodou je, že mohou obsahovat různé organické nečistoty, či cizí kovy, které mohou chemicky znečistit vyráběné součástky. Tato chemická nečistota lze ale odstranit vyleptáním před výrobním procesem. Existují také aparatury z karbidu křemíku. Méně časté jsou aparatury vyráběné z křemenného skla HSQ 300, které je velmi opticky, ale hlavně chemicky čisté. Jejich hlavní nevýhodou je degradace skla. Po více výrobních cyklech má tendenci křehnout a zkrupičkovatět, až se úplně rozsype. Nicméně chemická čistota této aparatury je nejlepší a je třeba najít jakýsi kompromis a zohlednit veškeré výhody a nevýhody, které nám jednotlivé

aparatury při dané technologii nabízí. Pro lepší představu je na (obr. 7) vyobrazena standardní skleněná aparatura z křemenného skla a detail připojení procesních plynů, pomocí ball jointu, na křemíkové aparatuře opatřené již krycím plechem s izolací. Ball joint, který se nenachází v ose aparatury slouží k zasunutí profilačního termočládku.

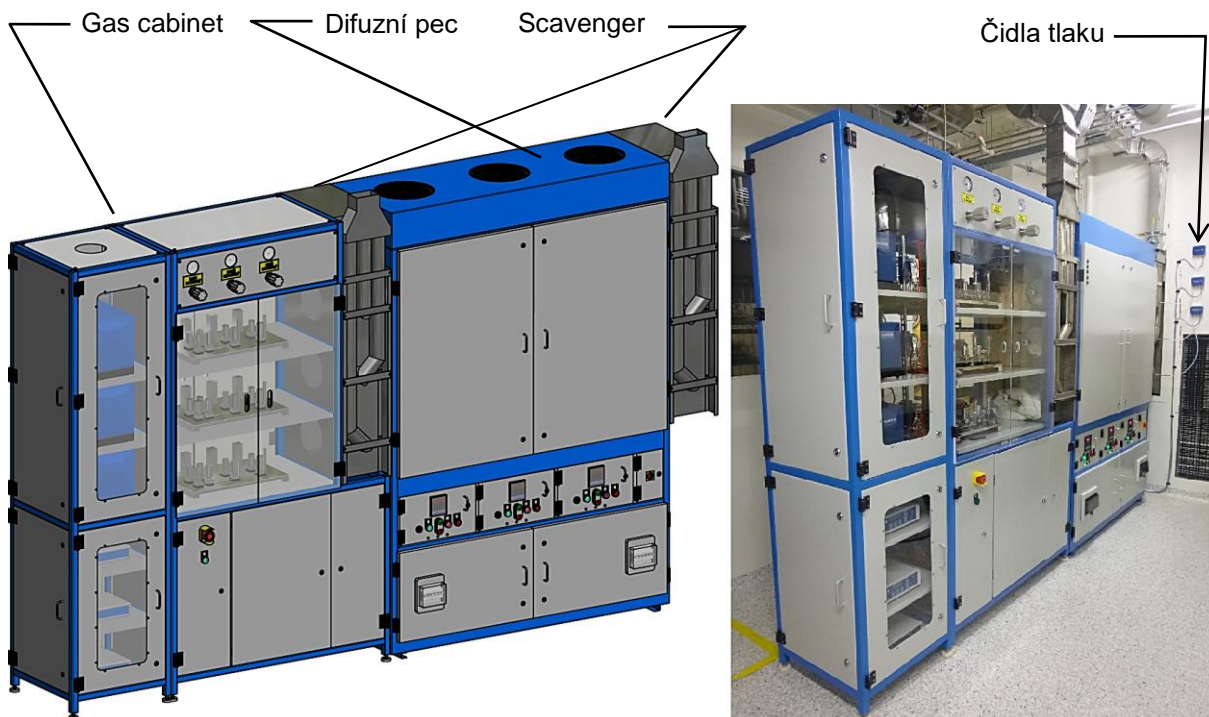


obr. 7 Skleněná aparatura [7] a připojení plynů ke křemíkové aparatuře

Scavenger neboli odtah anorganických plynů je důležitou součástí difuzní pece. Nejčastěji je design Scavengeru řešen jako volně stojící skříň přiléhající ke straně difuzní pece, která je nejbližší čistým prostorům, viz. (obr. 1). Může ovšem být řešen jen jako svařenec z plechových dílů, který je k rámu difuzní pece přišroubován a někdy může být přítomný i na obou stranách pece, jako je tomu u difuzní pece DA62, která je vyobrazena na (obr. 8). Jak už bylo předesláno, hlavním úkolem je odtah nežádoucích kyselých a někdy i toxických plynů, které při difuzních a jiných technologických procesech vznikají. Zejména je pak jeho úloha důležitá na konci difuzního procesu, kdy dojde k otevření aparatury a výjezdu vsázky z topných kazet. Tehdy je nutno výpary z aparatur výrazně odsávat, aby nezamořovali čisté prostředí, do kterého se vsázka z topných kazet vysouvá. Scavenger je tedy jakýmsi oddělovacím článkem částí systému difuzní pece, která se nachází v šedých či servisních prostorech od Load stationu, který je umístěn v čistých prostorech. Na (obr. 8) vpravo, je patrná stěna, za kterou se nachází čisté prostory. Scavengery jsou vyráběny z nerezové oceli třídy 316L. Plyny jsou z jednotlivých pozic odváděny nerezovým potrubím, které je svedeno do společného vyústění, které je následně napojeno na centrální podnikový odtah nebezpečných plynů. Jednotlivé potrubí jsou ještě před vyústěním opatřeny buď automaticky, nebo manuálně říditelnými klapkami, kterými se reguluje množství odsávaných plynů. Jednotlivá potrubí jsou opatřeny otvory pro odečítání tlaku, na digitální tlakoměrech, patrné na stěně na (obr. 8) vpravo, které napomáhají při naladění pozice klapek odtahu. Odůvodnění toho, proč má pec DA62 Scavenger i na straně vzdálenější od čistých prostor, najdeme v technologii výroby, která je použita na této peci a je dále popsána v kapitole 3.3. Předem lze ale říci, že je to z bezpečnostních důvodů. Kdy by došlo k porušení připojení procesních plynů, tak je nutno uniklé plyny rychle a pohodlně odsát, jelikož jsou velmi toxické.

Spodní část pecí bývá podobně jako u Gas cabinetů osazena potřebnou elektronikou, stykači, pojistkami, bezpečnostními tlačítky, ale nachází se zde i hlavní přívod elektrického napájení celého systému difuzní pece a mohutné transformátory pro napájení topných kazet. Každá pozice zde pak má ovládací panel pro zapnutí/vypnutí pozice difuzní pece, optickou kontrolu zapnutí/vypnutí pozice, optickou kontrolu spínání SRR (Solid State Relay) pro napájení topných kazet, akustické a optické

informace o poruše zařízení, informace o teplotě topné kazety a jednotlivých topných zón (přední, střední, zadní).



obr. 8 Model Gas cabinetu + pece DA62 (vlevo) a reálná fotka servisního prostoru a systému DA62 (vpravo)

1.1.3. Zasouvací stanice (Load station)

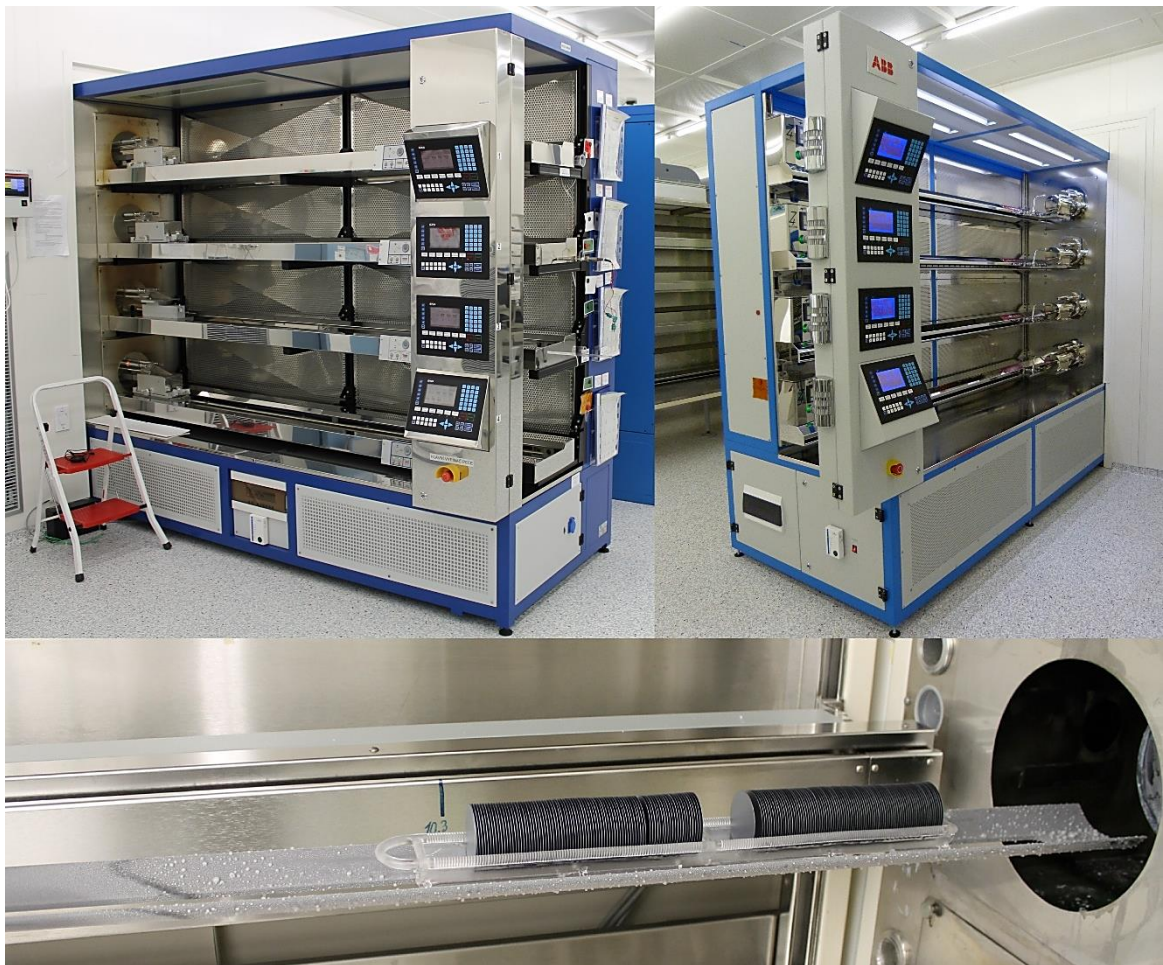
Poslední částí systému difuzní pece, která se nachází za stěnou servisního prostoru v čistých prostorech, je Load station. Stavební koncepce je shodná s předešlými tudíž se opět jedná o svařenou konstrukci s povrchovou ochranou. První hlavní úlohou této části je zasouvání výrobní vsázky křemíkových destiček bez kontaktu s aparaturou do topných kazet. To zajišťují především samotné Loadery či zakladače různých koncepcí. V základu jde o systém zajišťující horizontální posuv, který je buď řešen vetknutým, viz (obr. 9) vpravo, nebo kolejnicovým, viz (obr. 9) vlevo, pojezdovým systémem, poháněným stejnosměrným elektromotorem s planetovou převodovkou a enkodérem pro sledování polohy, kde je pohyb přenášen pomocí vyztuženého plastového řetězu, nebo pryžovým ozubeným řemenem. Samotný proces zasouvání je pak řízen řídicím systémem.

Křemíkové destičky naskládané do nosníku vyrobeného z křemenného skla, nebo z křemíku, jsou připevněny na speciální křemíkové pádlo, viz. (obr. 9) dole, které je na upevněno do polohovatelné hlavy zakladače. Hlava zakladače je pak opatřena dvěma kruhovými deskami, které fungují jako dvířka. První kruhová deska, vyrobená z křemenného mléčného skla a opatřena pružinovým dorazem, uzavírá křemíkovou či skleněnou aparaturu. Za ní druhá kruhová plechová deska pak uzavírá prostor Scavengeru.

Druhou hlavní úlohou stanice, je zajištění laminárního proudění v pracovní oblasti Load stationu, tedy v oblasti, kde dochází k zasouvání a vysouvání výrobní vsázky. V tomto prostoru také dochází k samotné manipulaci s křemíkovými deskami. Vzduch je nasáván ve spodní oblasti do prostoru Load stationu pomocí průmyslových ventilátorů určených pro čisté prostory, skrze jednostupňový nebo dvoustupňový filtrační člen. Nejčastěji je zde využíváno tzv. filtračních roun zhotovených z polyesterových vláken dle DIN EN 799 ve filtrační třídě G3 až G4. Vzduch je následně dopraven

pomocí proudové cesty do zadního prostoru Load stationu, kde je tlačén skrze poslední filtrační stupeň. Ten tvoří kazetové HEPA (High Efficient Particular Air) filtry ve třídě H13 až H14. Odsud pak vychází filtrovaný kompaktní jednosměrný proud vzduchu, který malou rychlostí proudí vodorovně ze zadní stěny kolmo na zakladače a srhává tak sebou zbytkové částice obsažené v čistém prostoru a lokálně se tak dosahuje vyšší třídy čistoty. Proudnice vzduchu by měly být rovnoběžné a neměly by se křížit. Výstupní rychlost proudu z HEPA filtrů by se tedy měla pohybovat okolo $0,45 \div 0,5 \text{ m/s}$. [8]

Ve spodní části, jak již bylo nastíněno, se kromě ventilátorů nachází rovněž regulátor otáček ventilátorů, různé svorkovnice a pojistková skříň. Na boku je pak Load station opatřen panelem osazeným průmyslovými terminály, které slouží pro lokální obsluhu a nastavení parametrů difuzní pece.



obr. 9 Load station SVCS s kolejovým zakladačem (vlevo), Load station ABB s vetknutým zakladačem Sandvik-MRL (vpravo) a detail křemíkového pádla s výrobní vsázkou

2. Výkonové polovodičové součástky v ABB s.r.o. Polovodiče Novodvorská

Společnost ABB celosvětově tvoří čtyři velké divize, které se nadále skládají z jednotlivých podnikových jednotek. Ty se následně zaměřují na určité odvětví a kategorie podle druhu výrobku. Jednotlivými divizemi jsou Elektrotechnické výrobky, Robotika a pohony, Průmyslová automatizace a nakonec Energetika. Právě v poslední zmíněné divizi je zařazeno odvětví Polovodiče, jež se vyznačuje širokým sortimentem výkonových polovodičových součástek, které využívají tradiční i nejmodernější technologie výroby. Součástky plní s vysokou spolehlivostí požadavky trakčních a průmyslových aplikací, ale i soustav pro přenos energie. Portfolio produktů vyráběných v závodě ABB Praha a v závodě ve Švýcarském Lenzburgu se sestává z vypínacích tyristorů GTO a IGCT, modulů s integrovanými bipolárními tranzistory IGBT, tyristorů a diod v oblasti výkonů od 150 A do 12 kA a od 200 V do 8,5 kV. Zaměříme-li se pouze na produkci součástek z pražského závodu ABB Polovodiče, tak zjistíme, že v současné době přibližně 80 % celkové výrobní kapacity tohoto závodu tvoří svářecí, rychlé a standardní diody. Zbytek produkce pak tvoří tyristory GTO, rychlé tyristory, fázově řízené tyristory PCT a zpětně propustné tyristory RCT. Pro pořádek jsou ve stručnosti níže uvedeny principy jednotlivých výše uvedených součástek. [9]

2.1 Diody

Jako první principiálně nejjednodušší diskretní součástka je uvedena dioda. Je to součástka se dvěma elektrodami, které v závislosti na její konstrukci pro jednu polaritu přiloženého napětí vedou elektrický proud a pro opačnou polaritu brání v průtoku elektrického proudu. Abychom dosáhli tohoto ventilového účinku, je třeba využít energetickou bariéru, která v pevných látkách vzniká na styku dvou oblastí, jejichž vlastnosti jsou odlišné. Tuto energetickou bariéru lze pak přiložením napětí vhodné polarity snížit, nebo naopak opačnou polaritou bariéru zvýšit. Hojně využívanou bariérou je v současnosti P-N přechod, dále pak přechod kov-polovodič. Vedle hlavního ventilového účinku, jež se využívá k usměrňování elektrického proudu, mají tyto přechody ještě další vlastnosti, které se využívají pro nejrůznější elektronické funkce

V současnosti se vyrábí řada typů výkonových polovodičových diod. Výše uvedené svářecí, rychlé a standardní diody jsou jedněmi z nich. Ventilový účinek je využíván ve všech typech a liší se od sebe zejména ve vnitřní konstrukci a technologii výroby, které plynou z požadavků jednotlivých aplikací kombinací výstupních elektrických parametrů.

[10] [11]

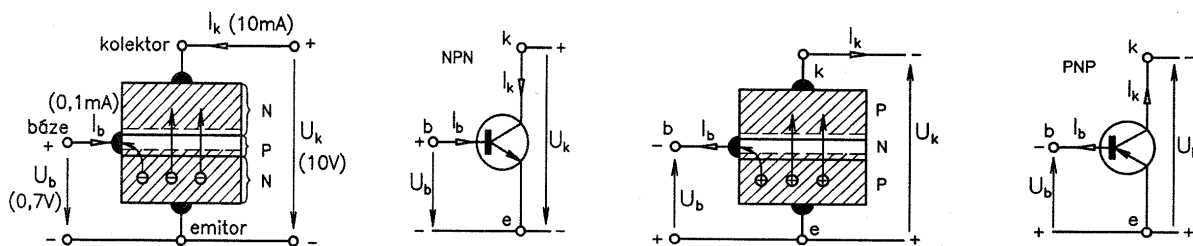


obr. 10 Skupina rychlých diod (vlevo), standardních diod (uprostřed) a svářecích diod ABB (vpravo) [12]

2.2 Tranzistory

Druhou diskrétní elektronickou součástí, která je svou konstrukcí složitější, než dioda je tranzistor. Má tři elektrody a v závislosti na konstrukci, resp. zapojení je schopen zesilovat buď napětí, nebo proud, nebo obojí současně. Tranzistor bývá často díky své zesilovací schopnosti označován za tzv. aktivní součástku, na rozdíl od diody, která je považována za pasivní, neboť zesilovací schopnost nemá. Tranzistor objevili v roce 1947 pánové Bardeen, Brattain a Shockley, kteří mu dali také název vyplývající ze slovního spojení TRANSfer reSISTOR jenž vzniklo z faktu, že odpor mezi dvěma svorkami se měnil v závislosti na velikosti proudu v řídicím obvodu do třetí svorky. V současnosti existuje několik druhů tranzistorů, které se dle konstrukce dělí na bipolární, unipolární a kombinované mezi které je zařazen např. IGBT. Bipolární tranzistory se od unipolárních v základu liší v tom, že ke své činnosti potřebují jak elektrony, tak i díry. Unipolárním tranzistorům stačí k zajištění základního principu činnosti nosiče pouze jedné polaritě a tedy elektrony, resp. díry pro kanál typu N, resp. P.

Bipolární tranzistor neboli BJT (Bipolar Junction Transistor) tvoří třívrstvá struktura PNP nebo NPN. Na (obr. 11) je zobrazena struktura a schematická značka bipolárních tranzistorů PNP a NPN v zapojení se společným emitorem, což je nejužívanější zapojení. Princip zesílení u takto zapojeného tranzistoru spočívá v tom, že malým napětím, resp. malým proudem do báze tranzistoru ovládáme větší proud v obvodu kolektoru, kde je i vyšší napětí.

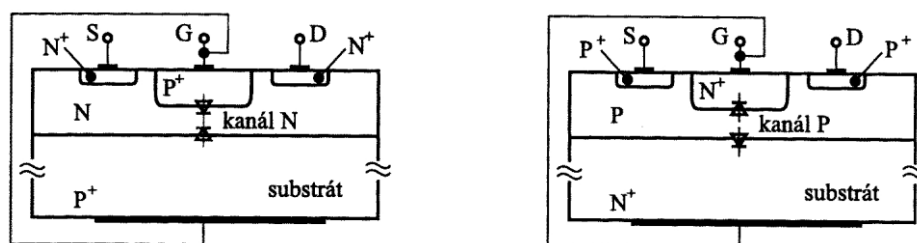


obr. 11 Struktura a schematická značka bipolárního tranzistoru NPN v zapojení se společným emitorem (vlevo) a PNP (vpravo) [13]

Unipolární tranzistor neboli polem řízený tranzistor, FET (Field Effect Transistor) se stejně jako tranzistor bipolární užívá k zesilování, nicméně výkonové tranzistory pro vysoké proudy a vysoké napětí se používají převážně jako spínače a v menší míře jako zesilovače. Přednostmi jsou pak zejména velmi vysoký vstupní odpor, malý řídicí příkon a velký rozsah kolektorových proudů (D). Základními typy unipolárních tranzistorů jsou pak JFET (Junction Field-Effect Transistor) a MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET). Princip řízení je pak takový, že elektroda Source (S) je „zdrojem“ volných nosičů z vnějšího obvodu do kanálu, kde jsou nosiče po průchodu kanálem „odsátý“ zpět do vnějšího obvodu elektrodou Drain (D). Kanál je pak oblast jednoho typu vodivosti, kterou se pohybují elektrony (kanál N) resp. díry (kanál P) mezi S a D. Proud nosičů kanálem lze pak řídit pomocí elektrody zvané Gate (G). Přiložením napětí mezi G a S se závěrně polarizují protilehlé P-N přechody G-S, jež reprezentují diody na (obr. 12) a díky tomu vznikne elektrické pole, které působí kolmo k povrchu destičky polovodiče. Tímto způsobem lze pak elektrickým polem mezi G a S ovládat hodnotu proudu v kanálu mezi S a D (Field Effect) a dosáhnout tranzistorového jevu.

Princip MOSFETu je stejný. Liší se od JFETu pouze v tom, že je vodivost kanálu mezi elektrodami S a D ovládána elektrickým polem, které vytváří struktura kov(M)-oxid(O)-polovodič(S). Oxid pak nejčastěji tvoří oxid křemičitý, jelikož je ho na povrchu křemíku relativně snadno možno připravit. Průřez tranzistoru JFET je pak uveden na (obr. 12)

IGBT (Insulated Gate Bipolar Tranzistor) je struktura, která se na vstupu chová jako unipolární tranzistor a na výstupu jako bipolární tranzistor. Slučují se zde výhody napěťového řízení a menšího saturačního napětí při možnosti provozu v napěťových třídách od 600 V do 4,5 kV nicméně vyvinuta byla již i třída 6 kV. Mezní hodnoty proudů se pohybují od desítek A do jednotek kA. Zde se pak několik čipů IGBT spojuje paralelně spolu s nulovými diodami ve speciálních pouzdrech v tzv. modulech. Předností IGBT jsou poměrně dobré dynamické vlastnosti a možnost jejich ovlivnění již při výrobě.



obr. 12 Průřez tranzistorů JFET s kanálem N a P [10]

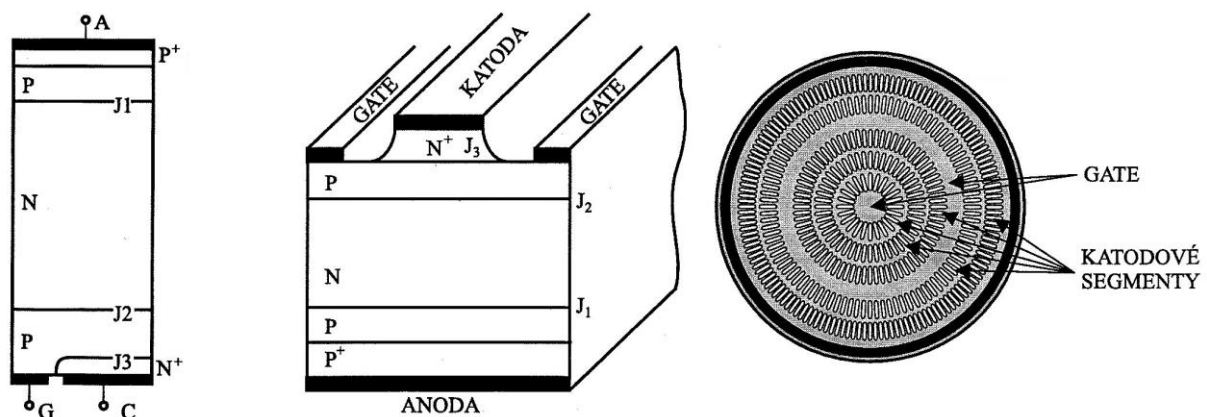
[10] [13]

2.3 Tyristory

Poslední zmíněnou diskrétní součástkou jsou tyristory. Zde se jedná o bipolární spínací součástku vykazující bistabilní regenerativní spínací charakteristiky. Tím je řečeno, že přepnutí do sepnutého stavu lze provést proudovým impulsem do řídicí elektrody a součástka zůstává sepnutá i po skončení impulzu. V tomto se tedy zásadně odlišuje tyristor od tranzistoru, u kterého je pro udržení sepnutého stavu nutno trvale udržovat proud do báze. Tyristor má tedy schopnost ovládat velké výkony relativně jednoduchým řídicím obvodem s malým příkonem, a protože se jedná o bipolární součástky přednostní je právě velká výkonová zatížitelnost. Tyristor má tři elektrody. Anodu (A), katodu (C) a řídicí elektrodu (G) a strukturálně se jedná o čtyřvrstvou součástku P-N-P-N, která je tvořena třemi P-N přechody J1, J2 a J3. Je-li k anodě připojen kladný pól oproti katodě, brání průchodu vrstva J2 a tyristor je ve vypnutém blokovacím stavu. Vrstva J2 se tedy označuje jako blokovací přechod. Při obráceném zapojení brání průchodu zase vrstva J1 a J3 a tyristor je tedy ve vypnutém závěrném stavu. Tyristor přejde z blokovacího do sepnutého stavu tehdy, je-li přivedeno na elektrodu (G) kladné napětí oproti katodě. To vyvolá kritický řídicí proud a dojde k lavinovitému sepnutí tyristoru. Tyristor pak setrvává v sepnutém stavu do té doby, než se proud na anodě nezmenší pod hodnotu vypínacího proudu. Úkolem základní struktury zpětně závěrného tyristoru, zobrazeného na (obr. 13), je při spínání a v sepnutém stavu to, že z anodového emitoru tvořeného silně dotovanou vrstvou P⁺ a méně dotovanou vrstvou P a z katodového emitoru tvořeného silně dotovanou vrstvou N⁺ dojde k injekci nosičů do dlouhé báze N a výrazně kratší báze P. Nízko dotovaná báze N má pak za úkol dosáhnout potřebné hodnoty průrazného napětí, aby nedocházelo k nežádoucímu sepnutí. Tyristor tedy můžeme chápat jako výkonovou diodu, kde je báze P navíc opatřena kontaktem (G) a je zde tudíž přechod J2, který zde umožňuje zásadní změnu chování, resp. výše zmíněnou bistabilitu.

Vypínací tyristor GTO (Gate Turn-Off) se od klasického tyristoru liší v možnosti odstranění náboje v okolí blokovacího přechodu (J2) sepnutého tyristoru pomocí záporného proudu, což lze provést přiložením napětí na přechod J3 tak, aby byl polarizován závěrně. Jinými slovy, k vypnutí sepnutého tyristoru dojde přivedením záporného napětí na řídicí elektrodu. Dojde tak k omezení injekce elektronů z oblasti emitoru N⁺ přiléhající ke kontaktu řídicí elektrody a zároveň jsou odsávány díry z oblasti krátké báze P a při dostatečně velkém záporném řídicím signálu dojde k zamezení injekce elektronů z katodového emitoru N⁺. Maximální záporný řídicí proud je limitován maximálním dosažitelným

napětím, resp. průrazným napětím přechodu J3, což u GTO bývá 20 V až 25 V. K odstranění náboje v okolí blokovacího přechodu J2 se tedy používá napětí 15 V, nicméně toto napětí dokáže odsát náboj jen z určité malé hloubky, a proto musí být katoda tvořena úzkým páskem optimální šířky $200 \div 400 \mu\text{m}$ a dlouhým 3 mm. Aby byl tyristor GTO schopný spínat velké proudy v jednotkách kA, je nutno katodové segmenty spojovat paralelně. Celá součástka je pak dle (obr. 13) tvořena několika stovkami paralelně spojených katodových segmentů, které jsou spojovány přítlačnou elektrodou ve tvaru mezikruží. Řídící elektroda je tvořena pokovením mezi segmenty a je cca $10 \mu\text{m}$ níže než katodové pásy. Vyvedena je pak středem tyristoru. Takto řešený tyristor je pak schopen vypínat proudy v řádu jednotek kA při napájecím napětí v řádu jednotek kV s vypínací dobou přibližně $100 \mu\text{s}$.



obr. 13 Struktura tyristoru (vlevo), individuální katodový segment GTO tyristoru v řezu (uprostřed) a pohled shora na destičku GTO tyristoru (vlevo) [10]

IGCT (Integrated Gate Commutated thyristor) je stejně jako klasický tyristor čtyřvrstvá polovodičová součástka, se stejným řazením vrstev a ve své podstatě můžeme říci, že se jedná o extrémně rychle spínaný GTO tyristor. Vychází ze zlepšené klasické struktury GTO a integrované zpětné diody. Skládá se z tyristorové struktury GCT a řídicího obvodu, který je integrován co nejtěsněji k silové části z důvodů potlačení parazitních vlastních indukčností zdroje řídicích a vypínacích impulsů. Doba zapnutí IGCT se pohybuje okolo $1 \div 15 \mu\text{s}$, vypínací doba pak v rozmezí $1 \div 3 \mu\text{s}$.

[10] [13] [14]

Zpětně propustný tyristor RCT (Reverse Conducting Thyristor) je asymetrický tyristor s integrovanou antiparalelní diodou integrovanou v jednom systému křemíkové desky. Nemá závěrné vlastnosti a uplatňují se zejména v tyristorových spínačích a střídačích. Umístění diody a tyristoru do jednoho pouzdra umožňuje zmenšení celkového objemu a hmotnosti zařízení ve všech typech obvodů, kde se používá antiparalelní kombinace tyristoru s diodou.

[15]

Fázově řízený tyristor PCT (Phase Controlled Thyristor) jsou typicky používány jako ventily pro fázové řízení proudu u převodu střídavého proudu na stejnosměrný a naopak. Pracují při nízkých frekvencích zejména pak při síťové frekvenci. V propustném stavu vykazují velmi malé ztráty, což je činí atraktivními pro efektivní řízení velmi vysokých proudů a energií.

[16]

3. P-N přechod a základy technologie výkonové polovodičové součástky

Před povídáním o samotné technologii výroby výkonových polovodičových součástek zde uvedu, jaké rozmanité funkce může polovodičový přechod PN plnit a popíši samotný fyzikální model přechodu PN.

Jak již bylo zmíněno, přechod dokáže usměrňovat elektrický proud, ale také tvořit potenciálovou bariéru, vstříkovat minoritní nosiče, uplatňovat kapacitní vlastnosti, hromadit prostorový náboj, vytvářet různé nelineární voltampérové charakteristiky, a dokonce může reagovat na funkci sousedních, nebo blízkých PN přechodů. Dále také, jak Einstein zjistil, může měnit světelnou energii na elektrickou, reagovat na různé druhy záření a při průchodu proudem emitovat světelné záření. Nespornou výhodou je fakt, že je PN přechod možno různými technologiemi poměrně snadno připravit přímo uvnitř krystalu. Tím dokážeme eliminovat styk polovodič-kov a zcela se tak vyhnout nepříznivým rušivým jevům, které jsou důsledkem povrchové stavby dvou materiálů.

Věnujme se nyní fyzikálnímu modelu přechodu. Máme jediný polovodičový monokrystal, kde je levá část dopovaná akceptorovými příměsí N_A a pravá část dopovaná donorovými příměsí N_D . Akceptory se nazývají proto, neboť přijímají elektrony a levá část tedy představuje polovodič typu P. Donory se pak analogicky nazývají proto, že odevzdávají elektrony a pravá část tak představuje polovodič typu N. Mezi dvěma částmi krystalu pak vznikne hranice, v níž se nachází místo, kde je $N_A = N_D$. Toto místo nazýváme metalurgickým přechodem. Budeme-li předpokládat, že má polovodič pokojovou teplotu, jsou všechny příměsí ionizovány. Koncentrace elektronů je tedy přibližně rovna koncentraci donorových atomů a koncentrace děr je přibližně rovna koncentraci akceptorových atomů. Nicméně určitý malý rozdíl těchto koncentrací zde je a plyne z existence minoritních nosičů, kterých je však při pokojové teplotě nepatrný zlomek v porovnání s majoritními. Tyto poměry platí v obou částech krystalu, avšak s výjimkou výše zmíněné hranice, tedy v oblasti přechodu PN.

Podíváme-li se tedy na oblast přechodu PN, jež je zobrazena na (obr. 14), vidíme, že zde zprava přechází velká koncentrace majoritních elektronů n_n na malou koncentraci minoritních elektronů n_{p0} a zleva zase velká koncentrace majoritní děr p_p na malou koncentraci minoritních děr p_{n0} . V oblasti přechodu PN tedy dochází k velkému spádu koncentrace, k velkému gradientu koncentrace elektronů i děr. Tento gradient tedy vede k difúzi děr do oblasti N a elektronů do oblasti P. Díry difundované do oblasti N, po sobě zanechají nepohyblivé ionizované akceptory, jejichž záporný náboj není kompenzovaný a naproti tomu elektrony difundované do oblasti P po sobě zanechaly nepohyblivé kladně ionizované donory, jejichž náboj také není kompenzovaný. Výsledkem je vznik nábojové dvojvrstvy (oblast přechodu PN) s vysokou intenzitou elektrického pole E ve směru poklesu elektrického potenciálu φ_{dif} , tedy od kladného k zápornému náboji ionizovaných příměsí dle (obr. 14). V okolí metalurgického přechodu tak vzniká oblast prostorového náboje (OPN), která se chová jako nábojový dipól. Současně se zde však projevuje další jev, jenž je důsledkem elektrického pole E . Současně s probíhající difúzí, elektrické pole o intenzitě E odsává minoritní nosiče náboje z oblasti N a P, a tudíž nastává drift elektronů z P do N a děr z N do P ve směru toku elektrického pole E , tedy ve směru právě opačném ke směru difúze. Takto vzniklý vnitřní potenciálový rozdíl mezi dvěma částmi krystalu se projevuje posunutím obou pásových schémat o energii $e \cdot U_{dif}$ a vzniká mezi nimi energetická bariéra.

Bez přiloženého vnějšího napětí, udržuje energetická bariéra rovnováhu mezi oběma zmíněnými jevy, tedy mezi vlivem difúze a vlivem elektrického pole. Proudové hustoty způsobené difúzí a elektrickým polem si musí být rovny. Velikost energetické bariéry je pak $|e \cdot \varphi_{dif}| = e \cdot U_{dif}$, kde U_{dif} je difúzní napětí a je tím větší, čím větší je difúze majoritních nosičů, resp. čím je větší dotace donorů a akceptorů a čím větší je teplota. Na základě Maxwell-Boltzmannovy statistiky lze pro U_{dif} za zjednodušujících předpokladů odvodit výraz

$$U_{dif} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right) = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_n}{n_{p0}}\right) = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{p_p}{p_{n0}}\right) \quad (3.1)$$

kde dva poslední výrazy vpravo vyplývají z toho, že všechny příměsi jsou ionizovány, a tudíž můžeme psát že $n_n = N_D$ a $p_p = N_A$, takže $n_{p0} = n_i^2/p_p = n_i^2/N_A$ nebo $p_{n0} = n_i^2/n_n = n_i^2/N_D$. Ze vztahu (3.1) je pak patrné, že difúzní napětí je dáno poměrem koncentrací majoritních a minoritních nosičů náboje n_n/n_{p0} , resp. p_p/p_{n0} na odpovídající hranici OPN. Každý nárůst tohoto poměru koncentrace, N_D nebo N_A o řád znamená nárůst difúzního napětí o 60 mV. Elektrony celého polovodiče se nachází v tepelné rovnováze s mřížkou, což je důsledkem toho, že není přiloženo napětí a neteče tudíž proud. Tato termodynamická rovnováha je vyjádřena tím, že Fermiho hladina W_F leží v obou částech krystalu v téže úrovni.

Pokud přivedeme vnější napětí U_{vn} polarizované tak, že kladný pól je na části krystalu s vodivostí P a záporný pól na N, pásový diagram se změní. Vnější napětí U_{vn} působí proti difúznímu napětí U_{dif} což má za následek snížení vnitřní potenciálové bariéry v přechod PN z původní $e \cdot U_{dif}$ na $e \cdot (U_{dif} - U_{vn})$. Na (obr. 14) je vidět, že nyní jsou Fermiho hladiny obou částí polovodiče proti sobě posunuty o energii, která odpovídá vnějšímu přiloženému napětí U_{vn} . Výše popsaná rovnováha mezi difúzním působením a působením elektrického pole uvnitř přechodu je narušena a převažuje vliv difúze. Díky difúznímu toku děr z části krystalu P do N prochází proud s proudovou hustotou J_p a vlivem difúzního toku elektronů z části krystalu N do P prochází proud s proudovou hustotou J_n . Jejich součet pak vyjadřuje proudovou hustotu tekoucí přechodem PN, jenž je dána vztahem (3.2) a představuje tak proud vyvolaný vnějším přiloženým napětím U_{vn} . Vychází se zde z úvahy, že hustota elektrického proudu elektronů \vec{J}_n , je složena ze dvou složek. První složka je daná unášivým pohybem elektronů vlivem elektrického pole o intenzitě \vec{E} za působení pohyblivosti μ_n . Druhá je pak dána difúzním tokem elektronů vlivem gradientu koncentrace elektronů ∇n . D_n zde reprezentuje koeficient difúze elektronů. Obdobně platí pro proudovou hustotu děr \vec{J}_p .

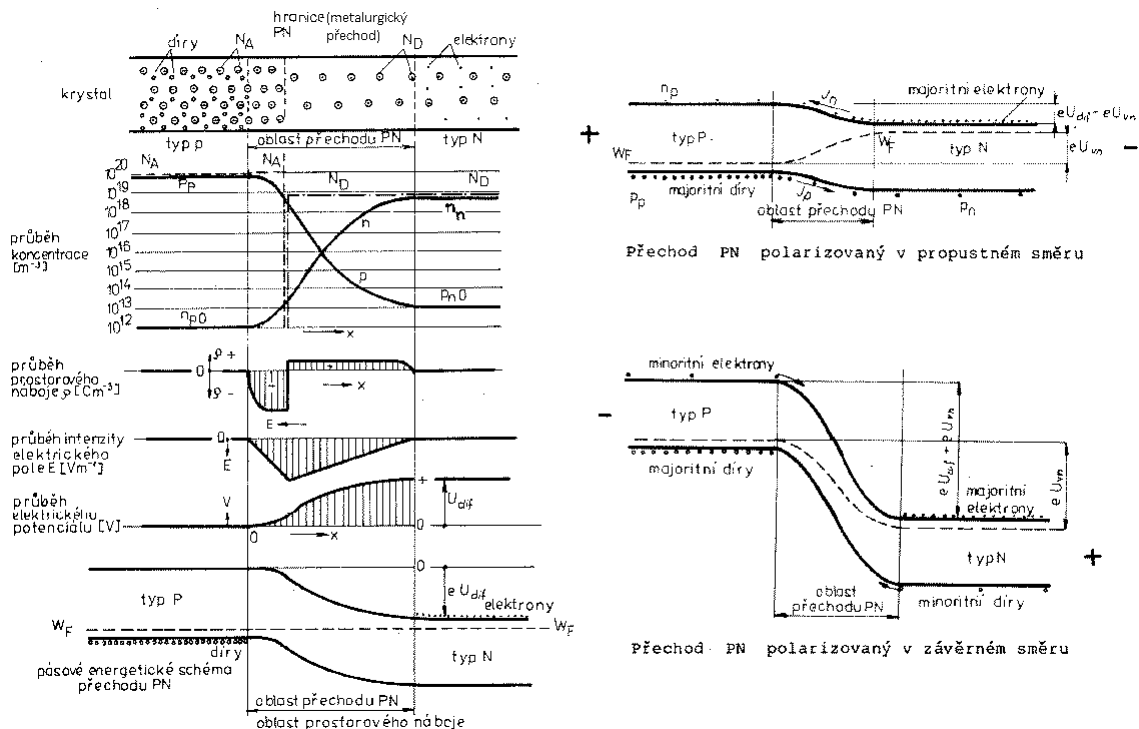
$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = en\mu_n\vec{E} + eD_n\nabla n + en\mu_p\vec{E} - eD_p\nabla p \quad (3.2)$$

Takto polarizovaný přechod je při přiložení napětí U_{vn} propustný pro elektrický proud. Dále je třeba říci, že se v části typu P vstříknuté elektrony přechodem PN z oblasti N stávají minoritními elektrony a obdobně se tak do části typu N skrze PN přechod injektují minoritní díry. Koncentrace vstříknutých minoritních nosičů těsně za PN přechodem jsou však několikanásobně větší, než rovnovážné koncentrace minoritních nosičů n_{p0} a p_{n0} . Současně se však zpravidla uvažuje podmínka slabého vstříku, což znamená, že koncentrace vstříknutých minoritních nosičů je stále o mnoho menší než koncentrace majoritních nosičů v příslušné části krystalu. (Zde je třeba si uvědomit pro lepší pochopení věci, že jakmile majoritní nosič projde přechodem PN, stává se podle přijatého názvosloví nosičem minoritním.) Vstříknuté nosiče na určité vzdálenosti za PN přechodem tzv. zrekombinují s majoritními nosiči, které přitékají v opačném směru. Průměrná vzdálenost, do níž vstříknuté nosiče

prodifundují než zrekombinují, se nazývá difúzní délka L_p nebo L_n . Koncentrace vstříknutých nosičů n_p a p_n tedy ubývá od kraje přechodu PN a za několik difúzních délek se koncentrace v krajních částech krystalu přiblíží koncentraci minoritních nosičů n_{p0} a p_{n0} . Vstřík minoritních nosičů přechodem PN do báze polovodičové součástky, což je vrstva krystalu, za níž následuje další přechod PN, je rozhodující pro funkci tranzistorů, tyristorů a dalších součástek. Majoritní nosiče, jsou zase rozhodující pro průchod proudu oběma krajními částmi krystalu, kde je jejich koncentrace o mnoho řádů vyšší než rovnovážná koncentrace minoritních nosičů, a jsou tak schopny vlivem nepatrného elektrického pole vytvořit potřebné proudové hustoty.

Budeme-li řešit obrácený případ, kdy přivedeme vnější napětí U_{vn} polarizované tak, že kladný pól je na části krystalu s vodivostí N a záporný pól na P, pásový diagram se nám opět změní. Vnější napětí U_{vn} působí souhlasně s difúzním napětím, což má za následek zvýšení potenciálové bariéry z $e \cdot U_{dif}$ na $e \cdot (U_{dif} + U_{vn})$, rozšíření oblasti prostorového náboje a že elektrické pole v oblasti PN přechodu značně převažuje, nad působením difúze. Majoritní nosiče tedy neprojdou PN přechodem, čímž tedy nedochází ani k vstříku minoritních nosičů. Jediná možnost průchodu zde nastává pro minoritní díry p_{n0} ve valenčním pásu polovodiče N a pro minoritní elektrony n_{p0} ve valenčním pásu polovodiče P, jelikož pro ně to znamená sestoupit z vyšší energetické hladiny na nižší. Jakmile se tyto minoritní díry nebo elektrony dostanou na okraj přechodu, jsou vtaženy silným elektrickým polem a převedeny na druhou stranu. Vzhledem k tomu, že jsou rovnovážné koncentrace minoritních nosičů o mnoho řádů menší než koncentrace majoritních nosičů, PN přechod propouští pouze nepatrný „klidový“ závěrný proud a při pokojové teplotě můžeme konstatovat, že přechodem prakticky nic neteče. Poměry na takto polarizovaném PN přechodu se mohou změnit, jestliže do krajní části polovodičového krystalu nějakým způsobem vstříkne nadbytečné minoritní nosiče. Ty pak difundují k okraji PN přechodu, jsou do něj vtaženy a závěrný proud se tak může o několik řádů zvětšit. Tohoto jevu se využívá u tranzistorů, tyristorů a dalších součástek.

[10] [11]



obr. 14 Přechod PN a jeho pásově schéma (vlevo), PN přechod v závěrném a propustném směru (vpravo) [11]

3.1 Základy výroby monokrystalického křemíku

Polovodič je prvek IV. skupiny a pro výrobu polovodičových součástek se z této IV. skupiny na výrobu substrátu (desky), kde se vytváří struktura součástky, používá křemík Si. Užívá se ho zejména proto, že je ho v zemské kůře dostatek a že jsme substrát schopni vytvořit tak, aby vykazoval vysokou čistotu a bezchybnou strukturu atomové mřížky. Desky se vyrábí z polotovaru, který představuje monokrystal křemíku. Pro jeho výrobu je nutný polykrystalický křemík a legující prvky (nejčastěji As, Sb, P, B) jenž určují, jestli výsledný substrát bude P-typový, tedy dopovaný trojmocnými prvky III.A podskupiny periodické soustavy, které se nazývají akceptory nebo N-typový, tedy dopovaný pětímocnými prvky V.A, které nazýváme donory. K samotné tavbě pak dochází v grafitové topné zóně v inertní argonové atmosféře (při tlaku 15 – 50 mbar).

Polykrystalický křemík se získává z přírodního křemene neboli oxidu křemičitého (SiO_2), který zredukujeme uhlíkem (používá se uhlí, koks, dřevo, dřevěné uhlí) v obloukové peci při teplotě okolo 2000 °C. Produktem chemické reakce



je hutní křemík v čistotě 97 – 99%. Ten se dá zpracovávat nejen v elektrotechnickém průmyslu, ale používá se i v metalurgii a v chemickém průmyslu např. při výrobě gumy a různých maziv. Dalším krokem je čištění hutního křemíku přes kapalnou formu trichlorsilanu na kterou je převeden podle reakce



Trichlorsilan (SiHCl_3) byl při bodu varu 32 °C přečištěn na čistotu 99,999 % a následuje depozice polykrystalického křemíku na zárodečné jádro, které je vyhříváno na teplotu okolo 1100 °C podle reakce



kde jsou vyrobené tyče rozčleněny na menší kusy (v lineárním rozměru typicky 1 – 15 cm). Čistota těchto polykrystalických kousků křemíku je až 12N (na jeden atom nečistoty připadá 10^{12} atomů Si). Cena polykrystalického křemíku se dnes pohybuje okolo 40 amerických dolarů za kg.

K monokrystalické struktuře křemíku můžeme dojít dvěma způsoby. Existuje tzv. kelímková metoda, do které spadá tažení monokrystalu metodou Czochralského, která je nejčastěji využívanou metodou a Bridgemanova metoda, která spočívá ve vytahování grafitové „lodičky“ z odporové pece. Druhé jsou tzv. bez kelímkové metody u kterých se používá zonální tavby (float zone). Pojdme se zaměřit na nejčastěji užívanou metodu jenž je metoda Czochralského. Tažení monokrystalu je podmíněno monokrystalickým zárodkem, jehož krystalografická orientace je důležitá, neboť rostoucí krystal orientaci kopíruje. Přesnost orientace zárodku se pohybuje v jednotkách úhlových minut. Zařízení je rozděleno na dvě komory. V dolní komoře je uložena grafitová topná zóna a kelímek z křemenného skla, ve kterém dochází k vlastní tavbě polykrystalu s dopantem a růstu krystalu. Materiál kelímku je vybrán tak, aby co nejméně reagoval s taveninou. Horní komora potom slouží jako prostor pro vyrostlý krystal a taky skrze klapku vakuově odděluje spodní prostor. Aktivním prvkem topné zóny je grafitové topné těleso meandrovitého útvaru s odporem v desítkách $m\Omega$, které se průchodem proudu dokáže zahřát až na teplotu okolo 2000 °C. Rozhodujícími parametry pro růst krystalu potom jsou

teplota taveniny, rychlost tažení zárodka, parametry procesního plynu, ale také vzájemná rychlost otáčení zárodka vůči kelímku, neboť k tomuto pohybu při procesu tažení také dochází.

Nakonec se hodí pohovořit o dvou příměsích, které se v monokrystalu vyskytují a mají nežádoucí vliv na jakost. Jedná se o kyslík, uhlík a jiné kovy. Kyslík se do taveniny dostává rozpouštěním ze stěny kelímku z křemenného skla. Atomy kyslíku jsou zabudovány do intersticiálních poloh křemíku a mají zásadní vliv na objemovou getraci neboli záchyt nežádoucích atomů kovů v okolí precipitátů „sraženin“ kyslíku v krystalu. Precipitáty pak způsobují pnutí krystalové mřížky. Uhlík se do taveniny dostává z grafitových topných těles. Významně ovlivňuje precipitaci kyslíku a tím i objemovou getraci kovů. Kovy pak také hrají významnou roli při kontaminaci křemíku, a to zejména proto, že jejich přítomnost snižuje dobu života minoritních nosičů elektrického náboje a tím zhoršují výsledné parametry součástky. Doba života je jakousi analogií k difúzní délce. Jedná se o dobu, po kterou přechází minoritní nosič vrstvou za PN přechodem než zrekombinuje.

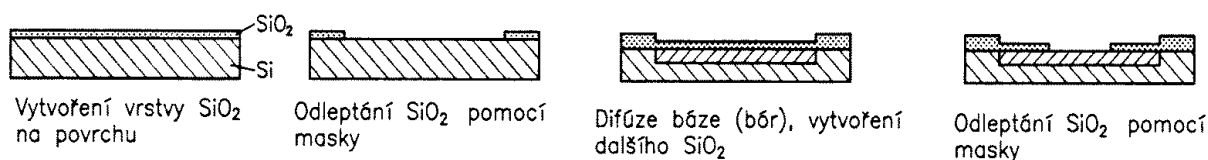
Po vyhodnocení vytaženého krystalu následuje řezání desek pomocí pily s vnitřním přerезem, nebo speciálním drátem. Pak lapování neboli oboustranné broušení za pomoci lapovací pasty a nakonec chemicko-mechanické leštění.

[17] [18]

3.2 Základy technologického oxidačního procesu

Oxidací se rozumí vytváření, nanášení (depozice) vrstvy oxidu křemičitého (SiO_2) na křemíkovém substrátu, který jsme získali předchozím postupem popsáním v (3.1). Důvodů proč vytvářet oxidační vrstvu na substrátu může být hned několik.

Oxidační vrstva v první řadě slouží jako jakási maska, skrze kterou se nemohou (nebo jen velmi obtížně mohou) do substrátu dostávat dopanty, tedy donorové a akceptorové příměsi. Na (obr. 15) je vyobrazen chronologicky zleva fotolitografický postup vytvoření masky, jenž zabraňuje difúzi bóru do Si substrátu tam, kde je to nežádoucí.



obr. 15 Fotolitografický postup vytvoření masky z SiO_2 [13]

Dále oxid může sloužit jako povrchová pasivace, jenž může např. chránit některou plochu destičky, která je dopovaná, před rozptylem dopantu do prostoru, pokud následují nějaké další tepelné procesy, kde by tento jev rozptylu mohl nastat.

V kapitole (2.3) kde se povídalo o tyristorech je řídicí (gate) elektroda vytvořena právě vrstvou oxidu, což je další možné využití oxidačního procesu.

Potom snad ještě stojí za zmínku, že tuto vrstvu lze využít jako elektrickou izolaci při několikastupňových metalizačních úrovních.

Kromě toho, že se na čerstvě připravených substrátech tvoří spontánně při pokojové teplotě vrstva SiO_2 zhruba o tloušťce menší než 2 nm , která je ale parazitní a nechtěná, existuje několik metod, jak oxid na povrchu substrátu připravit. Patří mezi ně termická oxidace, PECVD (Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition) depozice, LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) depozice

a elektrochemická anodizace. Nejdůležitější z nich je pro polovodičový průmysl oxidace termická, neboť touto metodou jsme schopni připravit nejdokonalejší vrstvy SiO₂. Rozlišujeme dva druhy termické oxidace. Suchá, která se provádí plynným kyslíkem, jenž popisuje chemická reakce (3.6) a vlhká (3.7), která se provádí vodní párou a obecně probíhá několikanásobně rychleji než suchá.



[13] [18] [19]

3.3 Základy technologického difuzního procesu

K realizaci samotné polovodičové struktury, která pak dle její funkce dává název samotné součástce, jenž struktura reprezentuje, je difúze. Její hnací silou je gradient chemického potenciálu, jenž zavádí regulované množství vybraných příměsí do určené oblasti křemíkového substrátu. Nejčastěji je gradient chemického potenciálu vyvolán gradientem koncentrace. V takovém případě se difúze označuje jako difúze volná, neboť probíhá směrem k vyrovnání koncentračního gradientu. Kromě koncentračního gradientu může difúzi hnát gradient elektrického potenciálu, teplotní gradient, gradient mechanického napětí či gradient magnetického pole. V takovýchto případech se jedná o difúzi vynucenou, neboť vzniká působením vnějších sil a nemusí vést k vyrovnání koncentračního gradientu [20]. Vraťme se ale k volné difúzi, která je předmětem zájmu. Částice se pohybují většinou z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. Za standardních podmínek k difúzi v pevných látkách ve větší míře dochází jen velmi obtížně, a proto je nutné částice vynutit k pohybu např. pomocí vysokých teplot.

K teoretickému základnímu popisu difúze se pak používá druhý Fickův zákon, který má podobu [21]

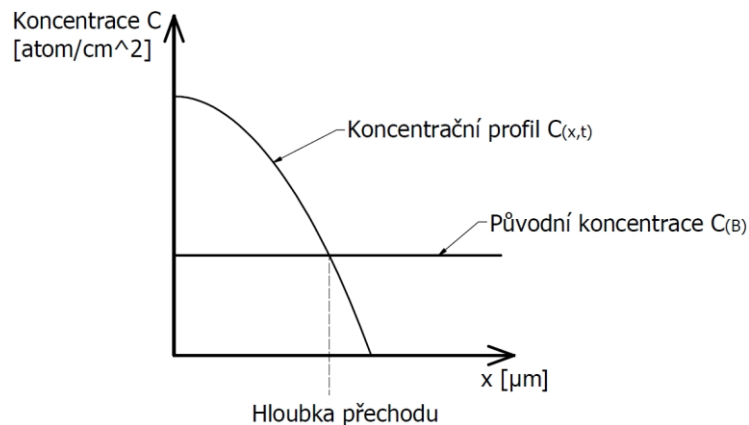
$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{(x,t)}}{\partial x^2} \quad (3.8)$$

Kde $C_{(x,t)}$ je koncentrace v daném čase t a místě x , D je difúzní koeficient, který je závislý na teplotě a je dán [21]

$$D = D_0 e^{\frac{-E_A}{kT}} \quad (3.9)$$

kde D_0 je frekvenční faktor, jenž je dán strukturou a povahou látky a nezávisí na teplotě. E_A je aktivační energie a také nezávisí na teplotě, je dána energií nutnou pro přeskok atomů. T je absolutní teplota a k je Boltzmannova konstanta. Tento vztah je známý pod označením Arrheinův [19]. K lepšímu pochopení základního popisu difúze může posloužit (obr. 16) na kterém je zobrazen koncentrační profil $C_{(x,t)}$, resp. závislost koncentrace příměsí na hloubce prodifundování do křemíku za čas t spolu s původní koncentrací dopantů v objemu křemíkového substrátu před samotnou difúzí $C_{(B)}$. Místo, kde se koncentrace nadifundovaného dopantu rovná původní koncentrací v objemu se nazývá hloubka přechodu, resp. hranice PN přechodu neboli metalurgický přechod (viz. kapitola 3).

[18]

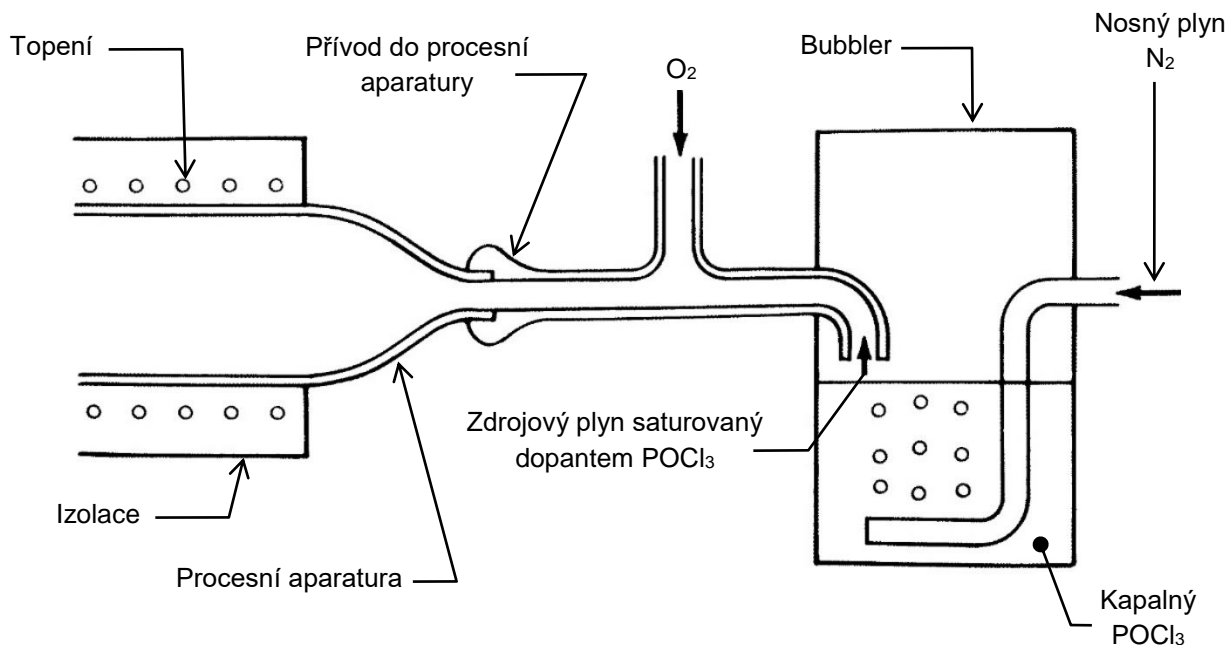


obr. 16 K vysvětlení základnímu popisu difúze [22]

Podle stavu, v jakém se dopant na křemíkové destičce nachází, můžeme difúzi rozdělit na část předdifúzní (predeposition) a rozdifúndování (drive-in) [23].

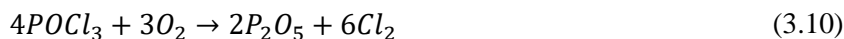
Dopant může mít buď plynnou, kapalnou, nebo pevnou formu a proces může probíhat v různých typech výrobních zařízeních. Tato práce se zabývá konstrukcí zasouvací stanice k difúzní peci DA62, jenž je typově zařazena jako horizontální třípozicová nevakuová dávková vysokoteplotní pec a dopant či difúzant zde má formu kapalného zdroje POCl_3 . Princip difúze je tedy dále popisován na difúzi fosforu z plynného zdroje příměsí, neboť jak je dále popsáno, do procesní aparatury se POCl_3 dostává prostřednictvím nosného plynu, na který je navázán. Na (obr. 17) je schematicky vyobrazeno jakým způsobem se kapalným difúzantem dostává do procesní aparatury.

[23]



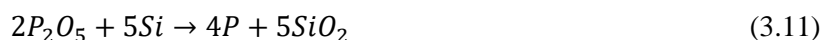
obr. 17 Schéma dopravy dopantu POCl_3 do procesní aparatury [23]

Při procesu předdifúze se v procesní aparatuře sytí atmosféra zdrojovým plynem, oxichloridem fosforečným (POCl_3). Ten je do aparatury přiváděn díky nosnému plynu, jímž je dusík (N_2), který z gas panelu putuje do tzv. bubbleru, kde dochází k probublávání dusíku a kapalného difúzantu. Takto vzniklý zdrojový plyn, saturovaný dopantem POCl_3 , putuje do procesní aparatury, kde reaguje s kyslíkem, který je rovněž z gas panelu dopravován do aparatury. Výsledkem chemické reakce

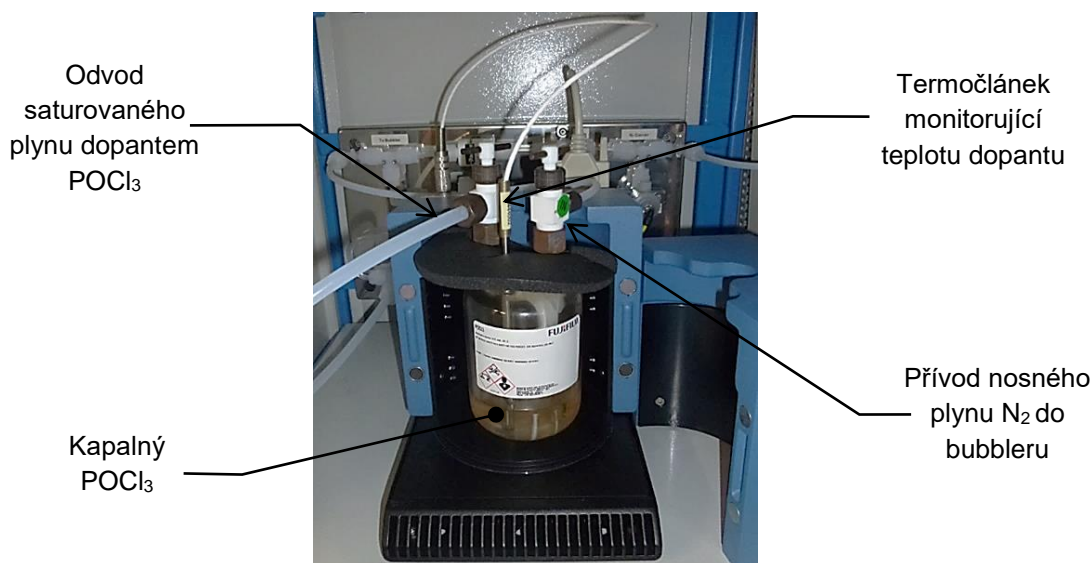


je oxid fosforečný a chlor. V důsledku této reakce pak dochází k nanášení dopovaného oxidu na křemíkové desky. V praxi dosí často přechází difúzi krátká oxidace, tak že na povrchu křemíkových desek ve vysokoteplotním reaktoru vznikne první oxid křemičitý SiO_2 a následně vzniká oxid fosforečný podle výše uvedené rovnice. Vznikne tedy jakási kombinace těchto dvou oxidů. Taková soustava se nazývá PSG (Phosphorous Silicon Glass). Toto sklo tedy slouží jako zdroj příměsí na křemíkové desce. Samotný chlor potom reaguje s přítomným vodíkem (vodní vlhkost v atmosféře) za vzniku kyseliny chlorovodíkové. Vzniklé skupenství je ale vítané, neboť čistí procesní aparaturu a má určitý getrační efekt pro křemíkové desky [19]. V kapitole 1.1.2 se odkazují na tuto kapitolu, neboť zde má být vysvětlen důvod přítomnosti dvou Scavengerů na peci DA62. Je to právě kyselina chlorovodíková, jejíž případný únik při nehodě je nepřijatelný. Tímto končí proces předdifúze a může nastat rozdifundování vzniklého oxidu.

Po nanesení PSG se atomární fosfor, jenž je v PSG vázaný, začíná za pomoci teploty dostávat hlouběji do křemíkového substrátu. Tento proces lze popsat následující chemickou reakcí.



Takovýmto způsobem vzniká v substrátu nasycená N^+ vrstva, jenž slouží ve výkonových polovodičových součástkách zejména jako emitor. Důležitým parametrem při vytváření N^+ vrstev je čas a teplota předdifúze. Nelze však zanedbat ani čas a teplotu samotného rozdifundování. Nicméně ukazuje se, že je zde i řada jiných důležitějších parametrů, jako např. závěrečný krok chlazení, jenž je podstatný pro getrační efekt [19]. Nakonec kapitoly zde jen pro zajímavost uvádím obrázek (obr. 18) skutečného bubbleru z Gas cabinetu DA62 s kapalným difuzantem v 1,5 l nádobě.



obr. 18 Bubbler s kapalným difuzantem (dopantem) POCl_3

4. Metodika řešení a provozování čistých prostorů v elektrotechnickém průmyslu

Uvědomíme-li si, jak velké nároky jsou kladeny na čistotu suroviny, z nichž jsou polovodičové součástky vyráběny a že nelze ani zanedbávat přesnost nastavení parametrů jenž by zásadně ovlivnili kvalitu a funkčnost vyráběných součástek, není potom k údivu, že i nároky na samotný prostor, kde dochází k manipulaci s křemíkovými systémy během technologických mezikroků, jsou vysoké. Při návrhu čistých prostorů je třeba postupovat dle určitých metodik, které stanoví základní přístupy k řešení problematiky čistých prostorů v elektrotechnickém průmyslu. Řešení pak musí vyhovovat určitým normám a standardům, které blíže specifikují nároky na velikost a počet částic, které mohou být přítomny v prostoru dané třídy čistoty.

Detailní řešení problematiky provozování a stanovování třídy čistoty, je nad rámec této práce, a proto je zde uvedeno jen pár definic termínů, které se v práci vyskytují a tabulka mezní velikosti a koncentrace částic dle standardu FED-STD-209E podle kterého se označují třídy čistoty místností v podniku ABB s.r.o. Polovodiče Novodvorská. Jelikož je předmětem práce návrh Load stationu tak je uvedeno i krátké povídání o druhu proudění vzduchu, které se na tomto zařízení uplatňuje a problematika vícestupňové filtrace, jenž se Load stationu také týká.

4.1 Částice

Jest objekt v pevném nebo kapalném skupenství nebo kombinace obojího o rozměrech obecně v rozmezí 0,001 až 1000 μm . [24]

4.2 Čistá zóna

Je definovaný prostor, ve kterém je koncentrace částic ve vzduchu řízena tak, aby byly dosaženy požadavky na danou třídu čistoty. [24]

4.3 Čistý prostor

Se definuje jako prostor, ve kterém je koncentrace částic ve vzduchu řízena a který obsahuje jednu nebo více čistých zón. [24]

4.4 Třída čistoty

Jedná se o úroveň čistoty vzduchu určené maximálním přípustným počtem částic v kubickém metru vzduchu (popř. v kubické stopě), které jsou pro jednotlivé třídy čistoty uvedeny v tabulce (tab. 1) a které byly stanoveny statistickými metodami. Označení třídy v jednotkách soustavy SI je dáno dekadickým logaritmem maximálního přípustného počtu částic o velikosti 0,5 μm a větších v kubickém metru vzduchu. Označení třídy v palcových jednotkách, obvykle používaných v USA, je dáno maximálním přípustným počtem částic 0,5 μm a větších v kubické stopě. [24]

4.5 Velikost částice

To je maximální lineární rozměr průmětu částice v rovině pozorování tak, jak je viditelný v mikroskopu, nebo ekvivalentní průměr částice detekovaný automatickými zařízeními. Ekvivalentní průměr je průměr referenční koule známých vlastností, která dává stejný signál v detektoru částic jako částice, která je měřena.

4.6 Třídy čistoty čistých prostorů dle FS 209 E

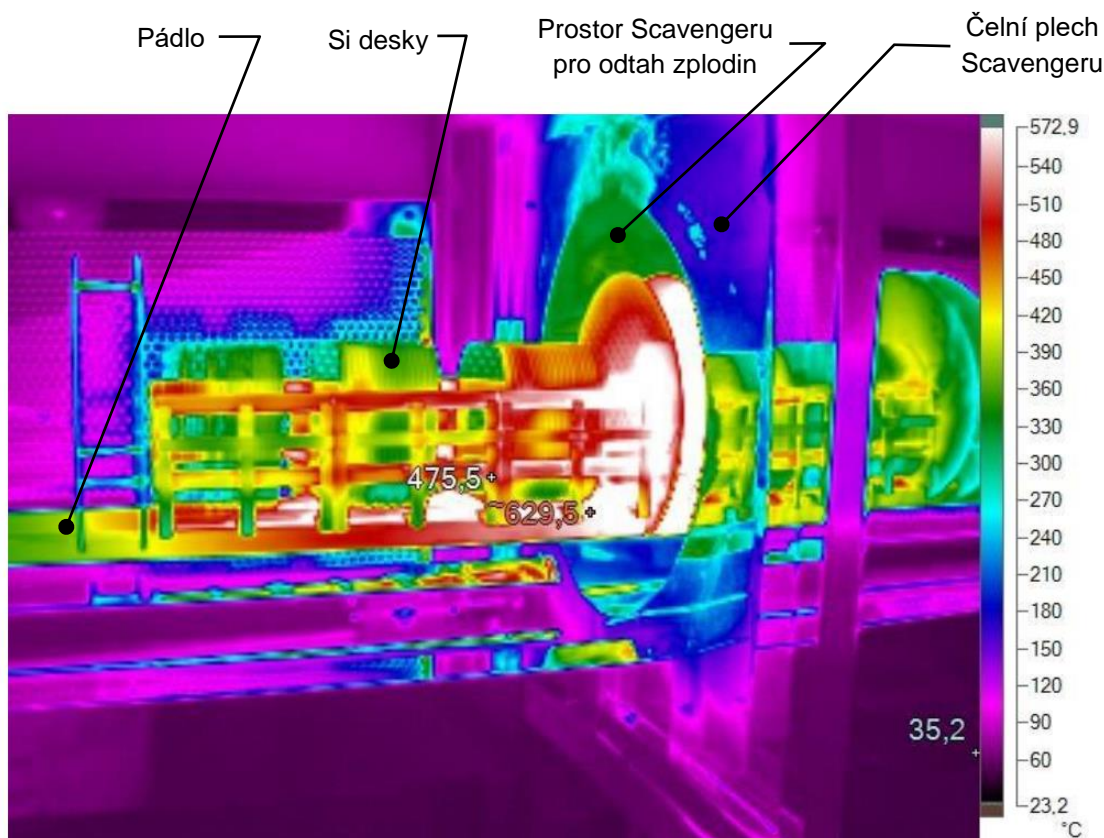
V tabulce (tab. 1) jsou uvedené meze pro každou třídu čistoty. Meze určují dané koncentrace (počet částic v jednotce objemu) částic ve vzduchu s rozměry stejnými nebo většími než rozměr částic, které jsou uvedeny v tabulce. Nicméně meze tříd uvedené v (tab. 1) jsou definovány pouze pro účely klasifikace třídy čistoty a nemusejí přímo reprezentovat rozdělení částic za dané situace.

Třída čistoty		Meze velikosti částice pro danou třídu čistoty									
		0,1 μm		0,2 μm		0,3 μm		0,5 μm		5 μm	
Jednotky SI	Palcové	Objemové jednotky		Objemové jednotky		Objemové jednotky		Objemové jednotky		Objemové jednotky	
		(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)
M1		350	9,91	75,7	2,14	30,9	0,875	10	0,283		
M1.5	1	1 240	35	265	7,5	106	3	35,3	1		
M2		3 500	99,1	757	21,4	309	8,75	100	2,83		
M2.5	10	12 400	350	2 650	75	1 060	30	353	10		
M3		35 000	991	7 570	214	3 090	87,5	1 000	28,3		
M3.5	100			26 500	750	10 600	300	3 530	100		
M4				75 700	2 140	30 900	875	10 000	283		
M4.5	1 000							35 300	1 000	247	7
M5								100 000	2 830	618	17,5
M5.5	10 000							353 000	10 000	2 470	70
M6								1 000 000	28 300	6 180	175
M6.5	100 000							3 530 000	100 000	24 700	700
M7								10 000 000	283 000	61 800	1 750

tab. 1 Třídy čistoty dle FS 209 E [24]

4.7 Proudění a třída čistoty vzduchu v pracovní oblast Load stationu

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.1.3, pracovní oblastí se rozumí zóna, kde se koná zasouvání, vysouvání křemíkových desek a následná manipulace s nimi. Teplota, při níž dochází k zajištění, resp. vyjždění se pohybuje okolo 700 °C a má svoje opodstatnění. Při této teplotě dochází k jakémusi „samočisticímu“ ději uvnitř procesní aparatury, jinými slovy, dochází k vydifundování nečistot (organické nečistoty, kovy) z vnitřní plochy procesní aparatury. Plynné nečistoty jsou odsávány Scavengerem (popsaným v kapitole 1.1.2) zejména při vysouvání a zasouvání, kdy je prostor aparatury otevřen. Po zajištění pádla i s deskami následuje proces vyhřívání aparatury na teplotu difúze jenž trvá 90 *min* rychlostí 5 °C/*min*. Teplota difúze pak pro POCl₃ ve skleněné aparatuře z křemenného skla činí 1150 °C a následuje výdrž 60 až 120 *min* na teplotě, při níž probíhají procesy popsané v kapitole 3.3. Po procesu difúze následuje pokles teploty opět na 700 °C rychlostí cca 1,7 °C/*min*. Křemíkové desky pak při vysouvání postupně na pádla chladnou z teploty 700 °C až na teplotu okolí (tedy cca 20 °C), kdy je možné desky z nosníku sundat. Jak je popsáno v [19] tak desky poté, co opustí prostor Scavengeru a vjíždí do manipulačního prostoru (pracovní oblast), rychle ochladnou na teplotu 400 °C (viz. obr. 19) a postupně jsou pak v manipulačním prostoru po úplném vyjetí pádla ještě cca 30 *min* ochlazovány na teplotu vhodnou k manipulaci. Vzhledem ke stále vysoké teplotě, kterou desky v manipulační oblasti Load stationu mají, je třeba udržovat v pracovní oblast zvýšenou třídu čistoty a dle výše přijaté nomenklatury, vytvořit v pracovní oblasti Load stationu čistou zónu. Dopadne-li totiž částice na takto horký povrch desky, „přípeče“ se na ní, což potom v závislosti na velikosti a charakteru částice může způsobovat jisté menší, nebo významné zhoršení elektrický parametrů dané vyráběné součástky. Zejména pak může docházet ke vzniku různých parazitních proudů a podstatně pak mohou nečistoty ovlivňovat dobu života nosičů náboje, což je významný faktor ovlivňující kvalitu součástky.



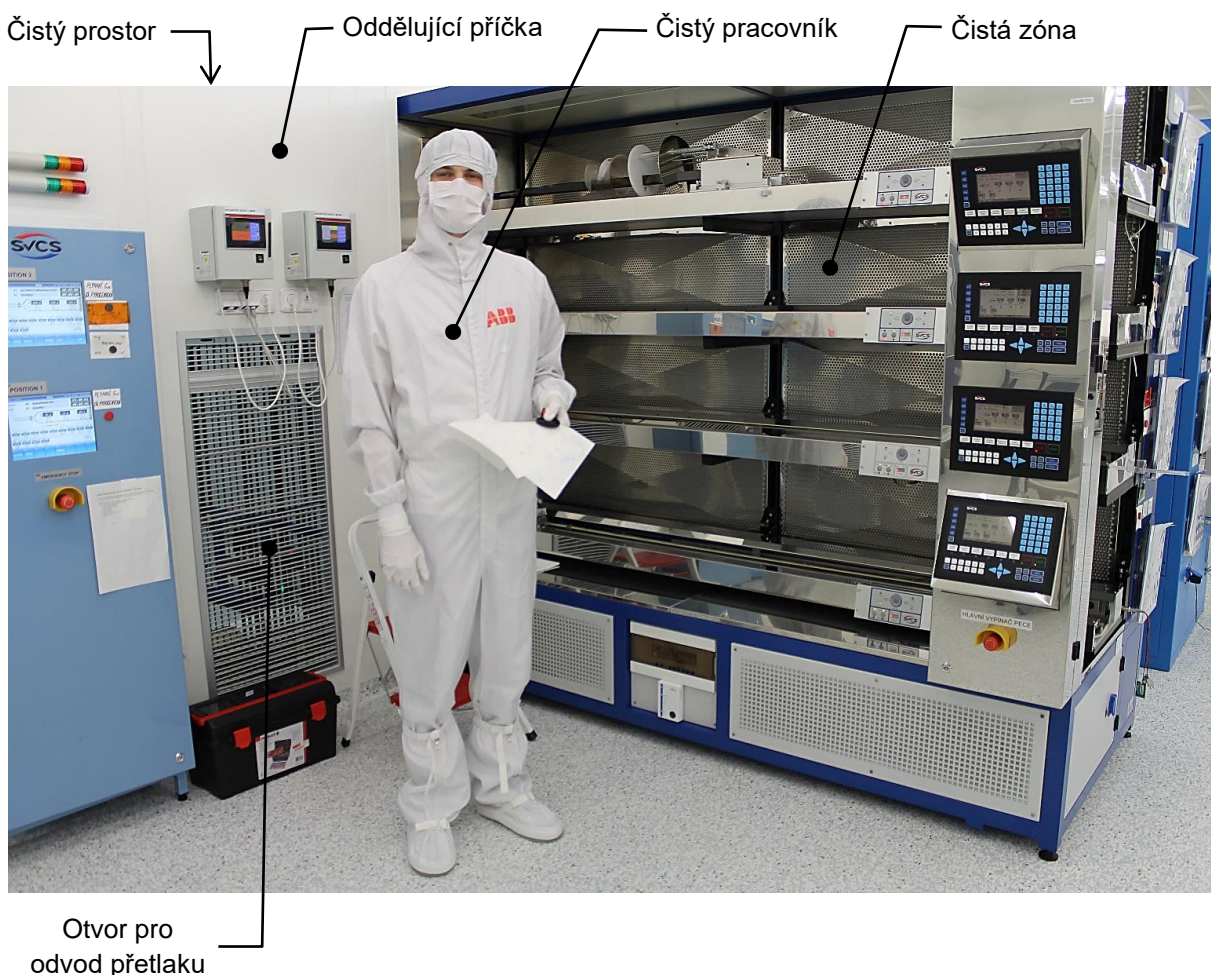
obr. 19 Vysouvání Si desek z Difúzní pece [19]

V čistém prostoru podniku ABB Polovodiče je třída čistoty 1 000. Dle zasetých zvyklostí v podniku ABB Polovodiče je standardem označovat třídu čistoty místnosti dle palcového značení. Tohoto formátu označování se drží i tato práce. Požadavkem na třídu čistoty v čisté zóně pracovní oblasti Load stationu je 1 až 10. Podle metodiky by tedy proudění vzduchu v pracovní oblasti mělo mít níže uvedené vlastnosti.

Pro třídu čistoty 1, 10, 100 je nutné jednosměrné (laminární) proudění vzduchu. Vzduch vstupuje do čisté zóny stropem nebo stěnou a vystupuje podlahou nebo protilehlou stěnou, případně velkoplošnými odsávacími otvory. Rozhodujícím činitelem je rychlost proudění vzduchu $v = 0,45 \div 0,5 \text{ m/s}$. Při nižších rychlostech se toto proudění jakýmkoliv zásahem, tedy i pracovní činností vychyluje nebo i rozbíjí. Tím se potlačuje základní princip systému čisté zóny s jednosměrným prouděním, resp. rychlého odvodu všech částic z čistého manipulačního místa. [24]

Určitým faktorem, jenž ovlivňuje čistotu pracoviště je samotná obsluha. Sám pracovník je totiž zdrojem částic, např. částičky kůže, vlasů, bakterií, virů apod. Emise částic je pak úměrná fyzické aktivitě pracovníka. Emisi částic pracovníkem je pak možno snížit vhodnou volbou oděvu. Přitom je nutno brát na zřetel všechny části oděvu a obuvi a neopomenout přitom samotné praní, sušení a distribuci oděvu k pracovníkovi. Nezanedbatelným faktorem je pak stupeň zakrytí nechráněných částí lidského těla. Člověk v pracovním plášti, civilních kalhotách, botách a čepicích, kde uvažovaný materiál textilií je 20 % bavlna a 80 % umělá vlákna, produkuje o 90 % vyšší počet částic než člověk v kombinéze s kapucí a maskou, ze 100% umělého vlákna, brýlemi, vysokými antistatickými návleky na přezůvkách a s latexovými rukavicemi, opatřenými absorpční vložkou. [24] Pro lepší představu o podmínkách na pracovišti je na (obr. 20) vyobrazen pracovník v čistém prostoru a v oděvu, jenž vyhovuje výše zmíněným požadavkům na čistotu. Dále je na (obr. 20), pro lepší pochopení, naznačena oblast čisté zóny a čistého prostoru a čisté zóny, zde na Load stationu s kolejovými zakladači firmy SVCS. Na obrázku je také

vidět otvor, kterým dochází k odvodu přetlaku z čistých prostor, neboť základním předpokladem k udržení vyšší třídy čistoty v místnosti, která je obklopena místnostmi s nižší třídou čistoty je existence přetlaku v čistém prostoru. Za zajímavou zmínku pak stojí to, že pracovník na (obr. 20) drží neprášivý, voskovaný papír, na který si dělal poznámky propiskou, neboť v čistých prostorách je zakázáno používání obyčejných papírů, tužek a gum. Pro přímou organizaci a řízení provoz je zde totiž žádané využívat v maximální míře automatizované systémy řízení.



obr. 20 Čisté prostory

4.8 Filtrace vzduchu

Jak je známo, tak filtrace se odstraňují nežádoucí částice z distribuovaného vzduchu. Pro čisté prostory se volí pak více stupňová filtrace. Budeme-li se bavit o čisté zóně v pracovní oblasti, pak je dále nutno obstarat samotný Load station systémem filtrace vzduchu jenž bude filtrovat vzduch z čistého prostoru do prostoru čisté zóny.

Filtrační vložky jsou rozděleny podle stupně odlučivosti do tříd. Skladba jednotlivých filtračních stupňů pak vyplývá z požadované třídy čistoty, koncentrace, druhu a charakteru nežádoucích částí a z vyhodnocení celkové hospodárnosti. Bere se v úvahu, že zanášení filtrů způsobuje vyšší tlakové ztráty, které se musí překonávat za cenu vyšší spotřeby elektrické energie. Vyměňují-li se filtry dříve než při dosažení maximální tlakové ztráty, mohou být náklady na elektrickou energii nižší. Zvýší se tím však náklady na obnovu filtračních vložek. U filtračních vložek třetího stupně filtrace se doporučuje až trojnásobný nárůst tlakové ztráty oproti čistému stavu. Z ekonomického rozboru navrženého způsobu

filtrace vzduchu a dostupnosti vhodných prvků se stanoví maximální tlaková ztráta na filtračních vložkách a způsob regulace výtlačného ventilátoru pro zachování konstantního průtoku vzduchu přes filtrační vložky při jejich postupném zanášení. [24]

Touto kapitolou končí teoretická část práce, která blíže osvětluje praktické řešení problematiky věci, jež je předmětem zadání této práce, popisuje PN přechod a technologii výroby výkonových polovodičových součástek, seznamuje s portfoliem firmy ABB Polovodiče a přibližuje metodiku řešení a provozování čistých prostor v elektrotechnickém průmyslu. Praktické řešení zandání je dále popisováno na následujících stranách v praktické části práce.

PRAKTICKÁ ČÁST

5. Zakladač (Loader) a Load station k difuzní peci

Jak již bylo nastíněno v úvodní kapitole, tak v současné době systém DA62 disponuje pouze poloautomatickým zasouvacím systémem, jenž jakýmsi způsobem dostačuje pro potřeby výroby, nicméně kvůli zmíněným nedokonalostem je v podniku tendence jej modernizovat. Na (obr. 21) je vyobrazen aktuální stav „Load stationu“ DA62. Již na přelomu roku 2016/2017 byla podnikem předschválena investice na výrobu vlastního zakladače, neboť v současné době sice na trhu zakladače různých firem k dispozici jsou, ale svou koncepcí, možnostmi nastavení a zejména i pořizovací cenou nevyhovují úplně vždy specifikacím podniku pro danou aplikaci. Mnohdy jsou také samotné zakladače obtížně k dostání, neboť většina firem, které se zabývají výrobou zařízení pro zpracování křemíkových desek dodává již kompletní systémy a podniky nejsou vždy ochotné dodávat pouze určité části výrobních celků. V kapitole 1.1 je zmínka o systému difuzní pece ABB2. Celý systém ABB2 byl vytvořen týmem lidí z interního vývojového oddělení podniku ABB Polovodiče, je plně funkční a vykazuje velmi dobré výsledky měření elektrických parametrů na vyráběných kusech. Díky tomuto úspěšnému projektu pomalu odpadá závislost podniku na externích dodavateli techniky, která je potřeba na zpracování polovodičových desek, neboť podnik sám disponuje cenným know-how, jak techniku vyrábět a provozovat. Zejména díky této tendenci, pak vznikl projekt na vlastní zakladač (Loader).



obr. 21 Provizorní Load station pece DA62

5.1 Reverse engineering a aplikace požadovaných specifikací podniku

Úkolem bylo inspirovat se zakladačem, jenž výrobce MRL Industries (Sandvik) označuje jako Cantilever Loading System, neboť svou koncepcí vyhovuje zadaným požadavkům podniku pro pec DA62, jak je dále popsáno. Zakladače MRL s vetknutě řešenou koncepcí lineárního pohybu jsou vyobrazen na (obr. 22) vlevo ve stavu, kdy jsou již připevněny k Load stationu. V tomto případě se jedná o podnikem vytvořený Load station k peci ABB2, o které se již bylo zmíněno v předchozích řádcích. Spolu se zakladači MRL, jsou vpravo vyobrazeny zakladače, kde je užito kolejového konceptu lineárního pohybu na jiném Load stationu externího výrobce. Dole je pak detail samotné hlavy zakladače MRL, do které se upevňuje „pádlo“, na kterém jsou dopravovány křemíkové destičky do prostoru procesní aparatury.



obr. 22 Zakladače MRL (vlevo), kolejové zakladače (vpravo) a detail hlavy zakladače MRL

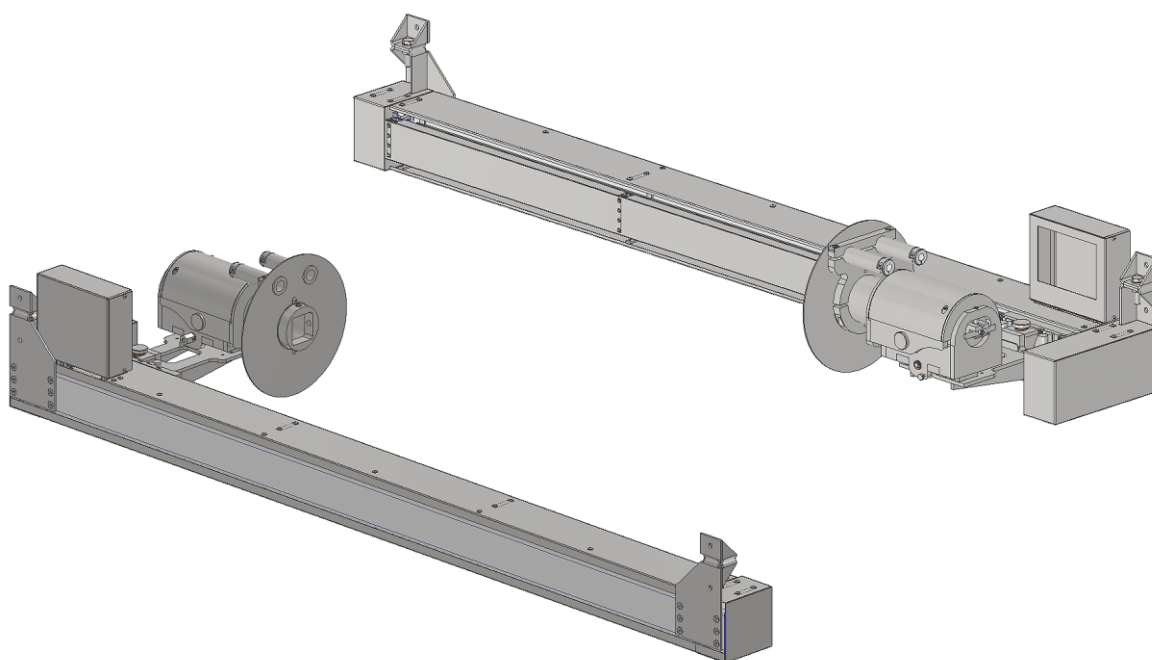
5.1.2 Koncepce řešení lineárního pohybu

Ze zkušenosti podniku se jeví pravé řešení (obr. 22) jako méně výhodné a to proto, že kolejové řešení více zasahuje do pracovního prostoru Load stationu a díky tomu je obtížnější přístup k odnímatelným krycím plechům Scavengeru, které je čas od času nutno odmontovat, např. při údržbových pracích. Obecně výhodnějším řešením je levá koncepce (obr. 22), kde je lineární vedení připevněno na rám zakladače a do pracovního prostoru tak zasahuje pouze vetknutá základní deska, na které je připevněna hlava zakladače.

Dalším faktorem je skutečnost, že kolejové řešení je více náchylné na korozi. Jak víme, tak při difuzi POCl_3 vzniká kyselina chlorovodíková, jejíž velká část je sice odsávána Scavengerem, ale někdy se část par může dostávat až do čistých prostor do přední oblasti Load stationu. Páry tak někdy u kolejového řešení mohou kondenzovat do lože kolejového zakladače, kde postupem času mohou způsobovat problémy spojené s korozí. Postupem času bylo také vyzorováno, že při procesu vyjíždění pádla z procesní aparatury může docházet k drobnému skápnutí kyselých kondenzátů, které se utváří na pádle v důsledku rozdílné teploty v pracovním prostoru Load stationu a samotného křemíkového pádla, jenž je po difúzním procesu velmi horké. Kyselé kapky opět mohou na loži kolejového zakladače, kam zkápnou, neboť se pod pádlem kolejového zakladače lože nachází, vytvářet korozi. Často koroze v případě kolejového zakladače zaleze až do lineárního vedení, kde pak způsobuje korozi v ložiskách systému vedení, což je opět nežádoucí.

Nespornou výhodou kolejového zakladače je jeho tuhost oproti vetknutému zakladači. Díky kolejovému loži nedochází k tak velkým průhybům, jako u vetknuté koncepce. Tato výhoda je ale diskutabilní, neboť samotný průhyb křemíkového pádla je daleko významnější, než průhyb rámu zakladače a tudíž je limitujícím faktorem v maximální možné hmotnosti vsázky především křemíkové pádlo, sekundárně pak koncepce zakladače.

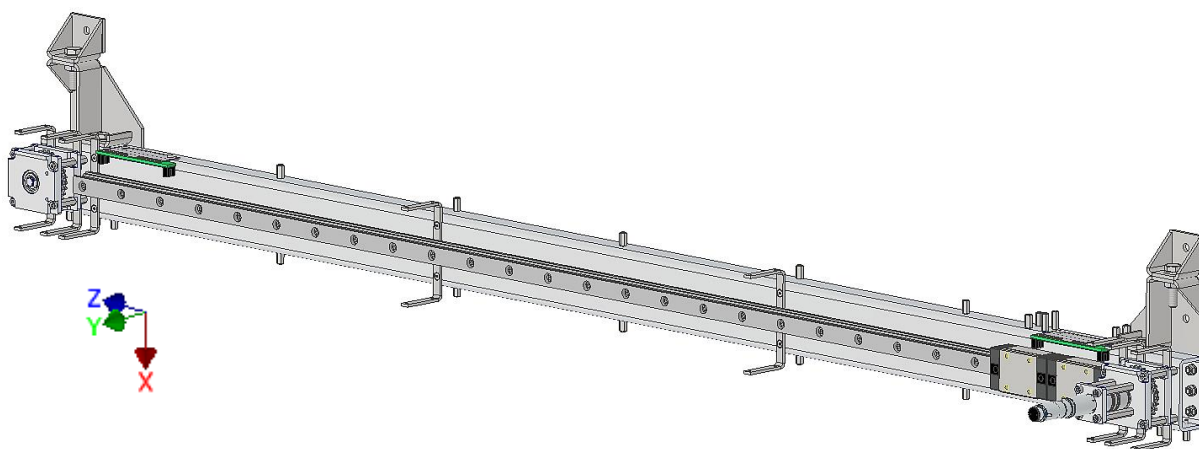
Z výše uvedeného tedy vyplynulo jasné řešení při volbě konceptu vlastního zakladače. Je jím zakladač s vetknutou základní deskou. Výsledný model zakladače je na (obr. 23). Podrobnější popis technického řešení dílčích celků je uvedeno v následujících kapitolách.



obr. 23 Koncepce řešení Loaderu ABB

5.1.2 Rám zakladače a volba lineárního vedení

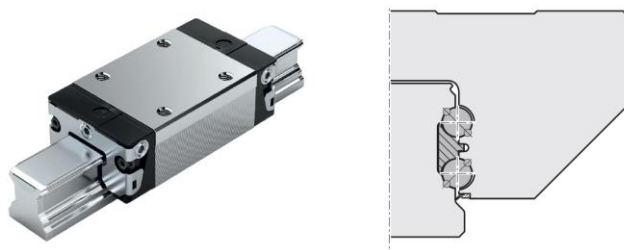
Pro rám zakladače ABB byl zvolen hliníkový dutý profil obdélníkového průřezu 80x40x4 délky 1760 mm. Materiál rámu je hliník EN AW-6082 T6 v uměle vystárnutém stavu, jenž je vhodný pro tuto aplikaci, neboť materiál kombinuje velmi dobrý poměr pevnosti a hmotnosti s výbornou odolností vůči korozi, která je zde žádaná. Kromě připevnění lineárního vedení na přední straně rámu, slouží rám i k upevnění krycích plechů, které zde drží prostřednictvím sériově vyráběných distančních sloupků různých rozměrů a prostřednictvím úhelníků. Dále jsou k rámu připevněny ložiskové domky, ve kterých je uložena hnací a hnaná hřídel a také pohon s převodovkou a spojku. Dále se zde nacházejí dvě elektrické světelné závory, které slouží jako signál do řídicí jednotky o tom, že se hlava zakladače nachází již v jedné ze dvou koncových pozic zakladače a vydává tak pokyn do řídicí jednotky ke snížení rychlosti posuvu. Zadní strana rámu pak slouží k připevnění upevňovacích konzol, které drží Loader na rámu Load stationu. Sestava rámu zakladače je vyobrazena na (obr. 24) a výkresová dokumentace k této sestavě je pak k nahlédnutí v příloze práce pod číslem výkresu 3603-01-400.



obr. 24 Rám Loaderu ABB

Jako prostředek pro zprostředkování lineárního pohybu Loaderu je zde užito dvou kamenů a vodící lišty od firmy Bosch Rexroth. (obr. 25) Jedná se systém lineárního vedení se čtyřmi řadami kuliček, kde každá řada má pouze dvoubodový dotyk. Vedení se vyznačuje velkou tuhostí, přesností a precizním chodem se samomazací schopností. Výrobce uvádí, že koeficient tření μ mezi kameny a vodící lištou se pohybuje mezi 0,002 až 0,003. Těla kamenů a vodící lišta jsou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli DIN EN 10088. V průmyslu jsou tyto systémy využívány pro systémy dopravníků, nebo při konstrukci obráběcích center jako vodící prvky supportů.

Konkrétně jsou použity kameny BSHP Ball Runner Block SNS s číslem produktu R1622 214 20 (velikost 20). Velikost vodící lišty se odvíjí od velikosti použitých kamenů. Čela kamenů jsou opatřeny otvory se závitem M5 pro připevnění základní desky. Detailní technické data jsou uvedena v datasheetu v příloze.



obr. 25 Bosh RexrothBall Runner Block SNS [25]

5.1.3 Pohonná jednotka zakladače a řízení

Na pohonnou jednotku ze strany zadavatele nebyly požadovány žádné speciální nároky. Jedinými dvěma požadavky bylo, aby doba zasouvání a vysouvání netrvalo kratší dobu než 40 min a aby nominální napětí motoru bylo stejnosměrné 24V. Doba zasouvání je dána zejména tím, aby křemíkové desky netrpěly tepelným šokem a doba 40 min je ze zkušenosti podniku optimální. Požadavek na nominální napětí motorové jednotky vyplynul z týmu lidí, jenž má na starost elektrické zapojení a řízení zakladače. K řízení motoru je plánováno používat jednotku Maxon EPOS4 24/1.5 Position Controller, se kterou má tým již dobré zkušenosti a která svými parametry vyhovuje k řízení stejnosměrných motorů výše zmíněného napětí. Při navrhování jednotky jsem postupoval podle následujících úvah.

Nejprve je nutno stanovit sílu, která působí na kameny lineárního vedení. Ta je dána hmotností teoreticky maximální možné vsázky, jenž může být naložena na křemíkové pádlo, hmotností samotného pádla a nosníku, ve kterém jsou desky naskládány a hmotností samotné hlavy zakladače se základní deskou.

Pec DA62 je konstruována na křemíkové desky o maximálním průměru $d_{Si} = 3'' = 76,2 \text{ mm}$. Vezmeme-li největší možný křemíkový nosník pro 104 desek o průměru d_{Si} a tloušťce desky $t_{Si} = 1 \text{ mm}$. Vychází nám pro hustotu křemíku $\rho_{Si} = 2,33 \text{ g/cm}^3$ maximální možná hmotnost křemíkové vsázky $m_{\max Si} \cong 11 \text{ kg}$.

Hmotnost křemíkového pádla a křemíkového nosníku dle výstupu z programu Autodesk Inventor, kde byly 3D díly vymodelovány a byla jim přiřazena hustota ρ_{Si} pak činí $m_{P+N} \cong 7 \text{ kg}$.

Stejným způsobem pak byla zjištěna hmotnost hlavy zakladače $m_{Hlava} \cong 13 \text{ kg}$ a hmotnost základny $m_{Základna} \cong 7 \text{ kg}$. Dle zavedené orientace na (obr. 24) je síla působící na kameny lineárního vedení ve směru osy x dána

$$F_{x\ ABB} = g \cdot (m_{\max Si} + m_{P+N} + m_{Hlava} + m_{Základna}) \quad (5.1)$$

kde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ a tedy $F_{x\ ABB} \cong 370 \text{ N}$

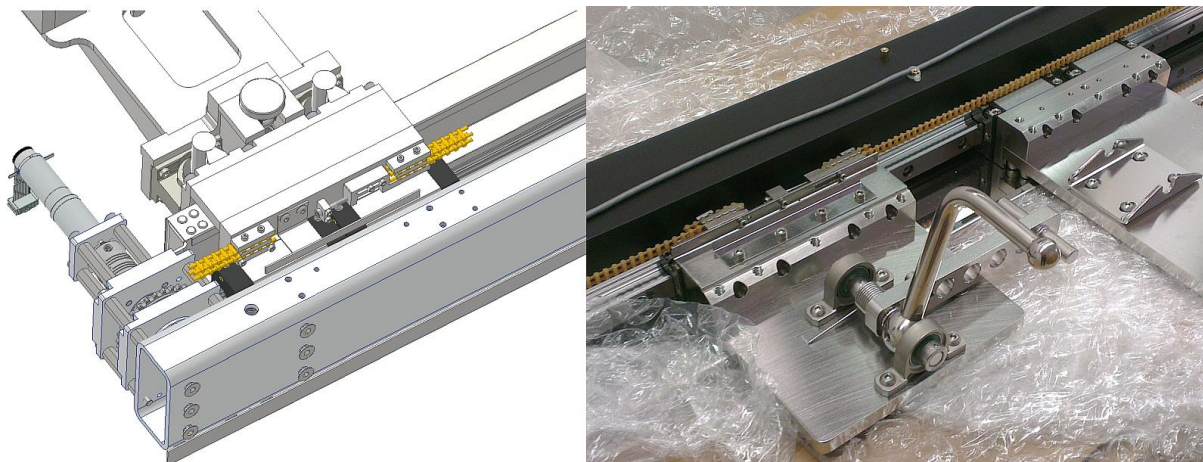
Dále jsem ověřil součinitel tření kamenů lineárního vedení. Na zakladači MRL, které bylo předmětem reverse engineeringu jsou použity kameny stejného typu jako byly zvoleny na zakladač ABB. Součinitel tření kamenů jsem stanovil následujícím způsobem.

Vzhledem k tomu, že jsou zakladače MRL namontovány na Load stationu difuzní pece ABB2, použil jsem siloměr na zjištění síly nutné k rozpořívání zakladače. U testovaného typu zakladače MRL, je totiž možno hlavu se základní deskou odpojit od náhonu motoru a pak je možné se základní deskou a hlavou zakladače volně pohybovat po lineárním vedení. Váha základní desky a hlavy zakladače MRL činí $m_{H+Z\ (MRL)} \cong 30 \text{ kg}$. Siloměr jsem připevnil k desce zakladače a táhnul dle zadané orientace na (obr. 24) ve směru osy z. Při rozjezdu siloměr indikoval sílu $F_{t\ MRL} < 1 \text{ N}$ z čehož dle vztahu pro výpočet třecí síly

$$F_{t\ MRL} = \mu_{MRL} \cdot F_{x\ MRL} = \mu_{MRL} \cdot (g \cdot m_{H+Z\ (MRL)}) \quad (5.2)$$

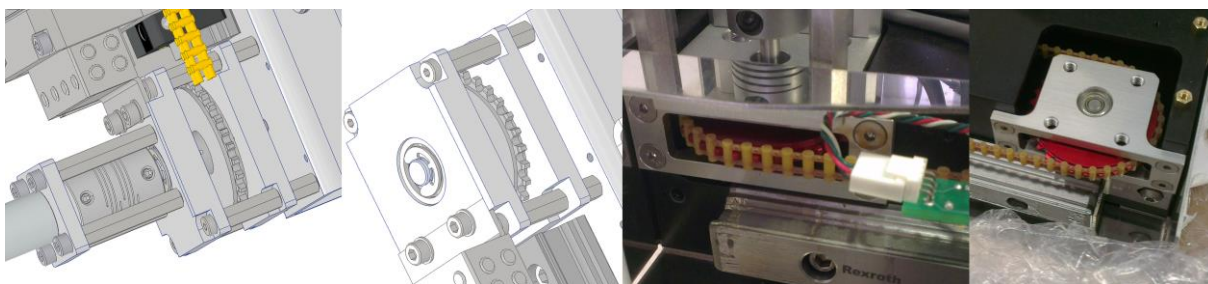
vyplývá, že třecí součinitel tření $\mu_{MRL} \cong 0,003$ což je ve shodě s hodnotami, které udává výrobce, jak je uvedeno v (kap. 5.1.2). Lze prohlásit, že $\mu_{MRL} = \mu_{ABB}$.

Náhon od motoru na lineární vedení je zprostředkován skrze „kabelový“ řetěz (Berg 25CCF-30.0M), kde válečky s vnějším obalem tvoří polyuretan a jádro řetězu pak nerezová ocel, a hliníková ozubená kolečka (Berg 25CP168A-30). Datasheety k nahlédnutí v příloze práce. Porovnání technického řešení připojení náhonu k vedení na zakladači ABB viz. (obr. 26) vlevo a řešení MRL vpravo.



obr. 26 Porovnání technického řešení náhonu ABB (vlevo) a MRL (vpravo)

Uložení ozubených koleček v ložiskových „domcích“ na (obr. 27) k porovnání opět vlevo řešení ABB a vpravo MRL.



obr. 27 Uložení ozubených koleček ABB (vlevo) a MRL (vpravo)

Přezásobíme-li sílu $F_{x\text{ABB}}$ ještě faktorem $k = 2,7$ dostáváme $F_{x\text{ABB}\cdot k} = 1000\text{ N}$ z čehož jsme schopni při znalosti součinitele tření μ_{ABB} vypočítat sílu $F_{t\text{ABB}}$, kterou motor musí být schopen utáhnout, a tedy můžeme psát

$$F_{t\text{ABB}} = F_{x\text{ABB}\cdot k} \cdot \mu_{\text{ABB}} \quad (5.3)$$

z čehož vychází $F_{t\text{ABB}} = 3\text{ N}$. Ozubené kolečko (Berg 25CP168A-30) má průměr roztečné kružnice $d_{OK\text{ABB}} = 60,64\text{ mm}$ z čehož vypočítáme potřebný krouticí moment motoru $Mk_{\text{Mot. ABB}}$ dle

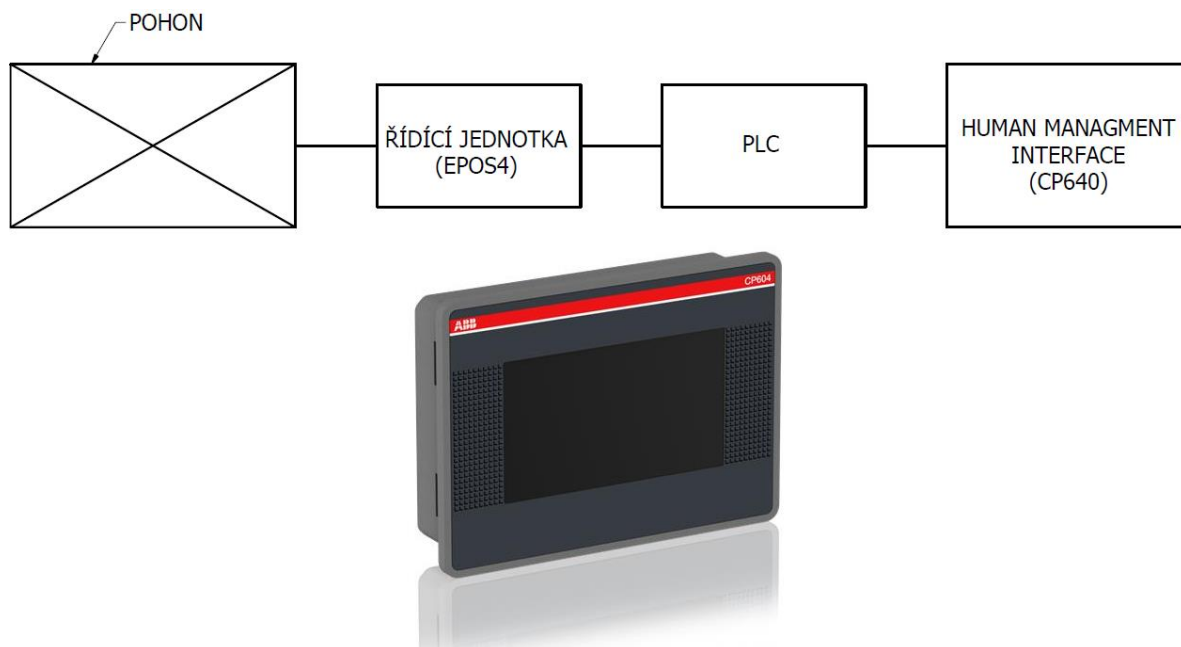
$$Mk_{\text{Mot. ABB}} = F_{t\text{ABB}} \cdot d_{OK\text{ABB}} \quad (5.4)$$

a tak minimální potřebný krouticí moment, který musí být schopen motor vyvodit, je $Mk_{\text{Mot. ABB}} \doteq 0,2\text{ Nm}$.

Samotný motor s převodovkou jsem pak vybíral z nabídky společnosti Maxon, jenž je švýcarským výrobcem precizních motorů široké nabídky. Dle výše zadaných nároků jako nejvhodnější

vyplývala varianta s čtyřstupňovou planetovou převodovkou GPX 22 HP Ø22 jenž je schopná kontinuálně vyvozovat točivý moment $3,7 Nm$ jenž více než 18x převyšuje nároky na minimální potřebná kroutící moment. Převodovka redukuje do pomalu v poměru 439:1. K této převodovce byl na stránkách výrobce Maxon výrobcem přiřazeno několik vhodných motorů, z nichž byl vybrán motor z řady DCX s označením DCX 19 S Ø 19 mm. Jedná se o DC motor s ocelovými kartáči a komutátorem, kde je užito patentované samonosné vinutí Maxon trubkového tvaru. Motor vyhovuje požadovanému nominálního napětí a proudu pro zadanou řídicí jednotku Maxon. Datasheety pohonu k nahlédnutí v příloze práce.

Jak již bylo nastíněno, řízení k parametrů motoru slouží zařízení Maxon EPOS4 24/1.5 Position Controller. Na základě signálu z Encoderu ENX 19 EASY, který je součástí soustavy motoru, je jednotka schopná řídit rychlost motoru, moment na hřídeli, nebo polohu dle nároků uživatele. Jednotka vyžaduje nadřazené řízení z PLC, které je ovládáno systémem CP604, které je přímo součástí Loaderu a jenž slouží operátorovi pro pohodlné nastavené parametru PLC. Na (obr. 28) je pro lepší představu vyobrazeno schéma řízení Loaderu spolu se systémem CP604.



obr. 28 Systém CP604 [26] a schéma řízení Loaderu ABB

5.1.4 Hlava a základní deska zakladače

Hlava zakladače MRL spolu se základní deskou, ke které je hlava připevněna je vyobrazena na (obr. 22). Hlava zakladače MRL je pak složena ze dvou hlavních částí, které jsou vyobrazena na (obr. 29). Spodní část vlevo a horní část vpravo. Ty to dvě části spolu tvoří celek vyobrazený na (obr. 22).

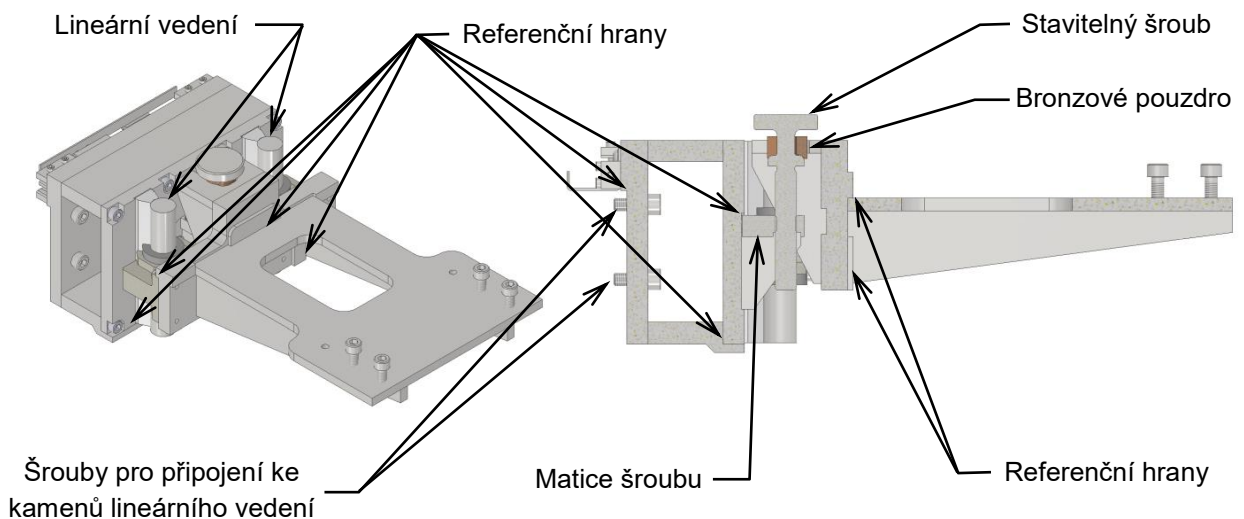
Základní deska nemá kromě toho, že na ní spočívá hlava zakladače a že je jakýmsi mostem mezi kameny vedení jenž umožňují lineární pohyb hlavy žádnou jinou významnou funkci.

Samotná hlava, kromě fixování pádla, díky své konstrukci umožňuje různé jemné korekce výsledného umístění pádla a plechového dorazu (jenž doléhá na přední plech Scavengeru) v prostoru, která je nutná po základním „hrubém“ připevnění pádla k rámu Load stationu. Díky spodní části je možno (dle orientace souřadného systému z obr. 24, který je, pro tento případ, posunut do osy roviny symetrie hlavy zakladače) konat jemnou rotaci hlavy kolem osy x a konat posuvný pohyb hlavy ve směru osy y. Horní část pak umožňuje „klopení“ pádla kolem osy y a „klonění“ pádla kolem osy z.



obr. 29 Spodní (vlevo) a horní (vpravo) část zakladače MRL

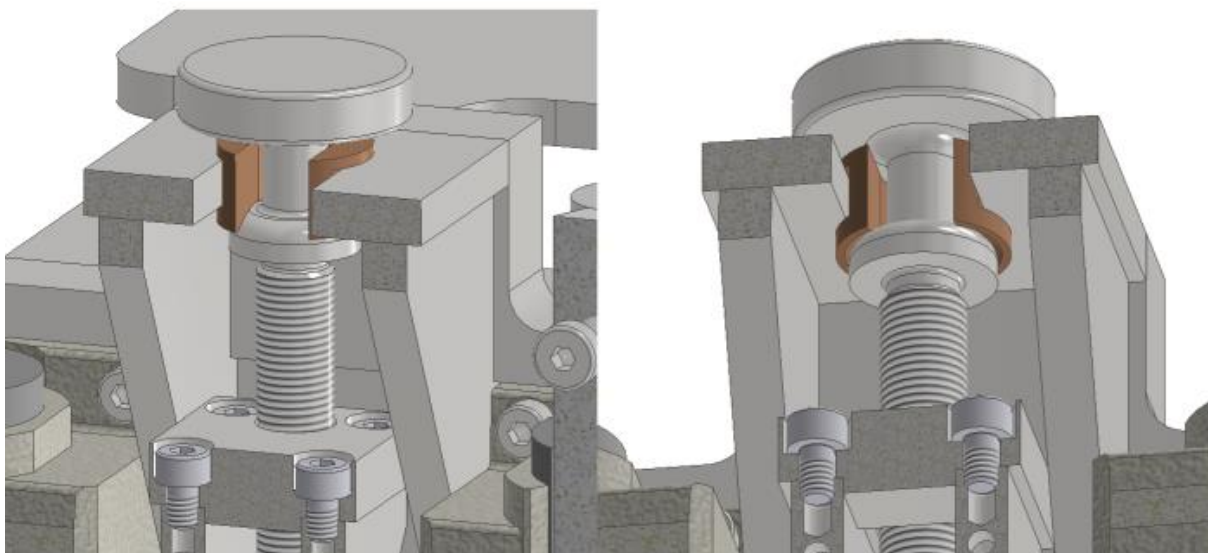
Požadavky na možnosti stavitelnosti hlavy u zakladače ABB byly kromě výše zmíněných rozšířeny o další jednu možnost stavení. Jedná se o možnost výškové stavitelnosti hlavy. Ta byla vyřešena prostřednictvím ručně stavitelného šroubu a systémem lineárního vedení, které výškově stává základní desku zakladače ABB. Konstrukce je vyobrazena na (obr. 30). Důvodem navýšení počtu stupňů volnosti Loaderu ABB byla ta skutečnost, že se v budoucnu počítá i s menším počtem vsázek vývojových křemíkových destiček o průměru 4" a bude tedy nutno výškovou pozici pádla jednoduše, pohodlně a rychle upravovat tak, aby vsázka destiček zaujímal v procesní aparatuře optimální pozici, tedy přibližně v jejím středu.



obr. 30 Konstrukce základní desky zakladače

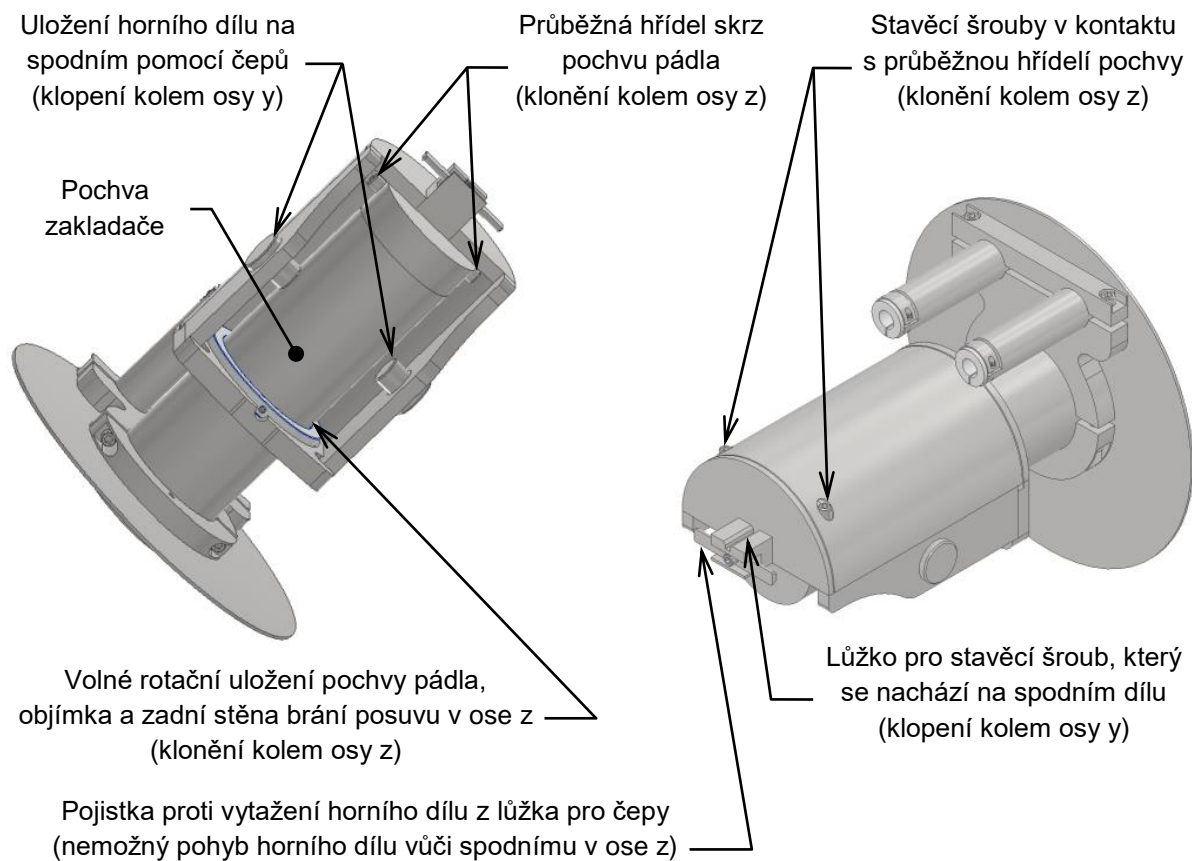
Stavění výšky základní desky je tedy umožněno prostřednictvím stavitelného šroubu, který otáčením v matici šroubu koná pohyb ve směru osy x. Pohyb je šroubem přenášen přes bronzové pouzdro s kulovou dosedací plochou, na kterém sedí kulová plocha šroubu (obr. 31). Bronzové pouzdro je volně vloženo do drážky na základní desce. Materiál pouzdra (cínový bronz, ČSN 42 3137) byl volen

s ohledem na jeho dobré kluzné vlastnosti a kulová plocha má zamezit vzniku dodatečného ohybu šroubu. Šroub s maticí je vyroben z nerezové oceli. Zde je jen nutno říci, že matice a šroub nesmějí být ze stejného druhu nerezové oceli, neboť ze zkušenosti je nám známo, že při stejném druhu nerezové oceli dochází k zadírání. Proto je nutno např. materiál matice volit A2 (AISI 304, ČSN 17 240) a šroubu A4 (AISI 316, ČSN 17 348). Poloha základní desky je ustavena dvěma vodícími lištami s pouzdry (lineární veden). Vodící pouzdra a lišty byly vybrány opět z firmy Bosch Rexroth. Konkrétně se jedná o pouzdra R1067 620 40 (pro průměr hřídele vodící lišty $d_{shaft} = 20\text{ mm}$) jejichž datasheety jsou opět k dispozici v příloze práce.

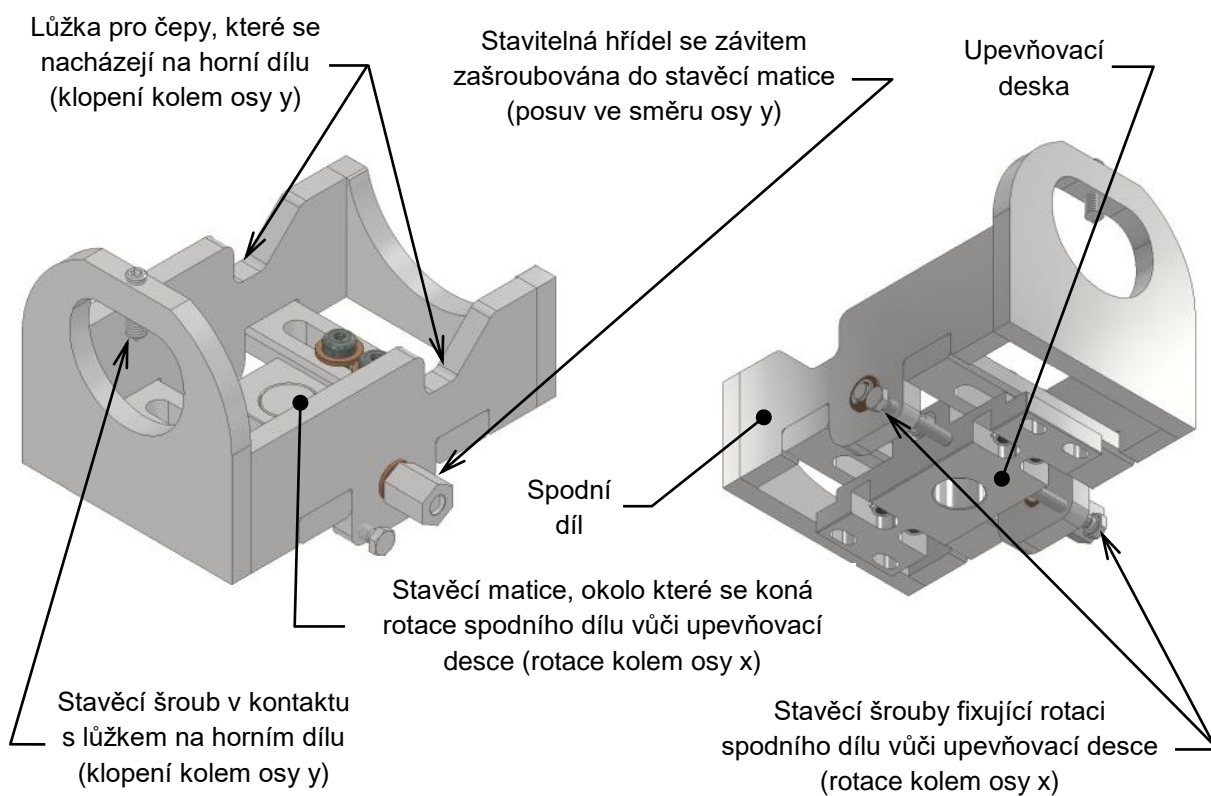


obr. 31 Detail řešení uložení stavěcího šroubu

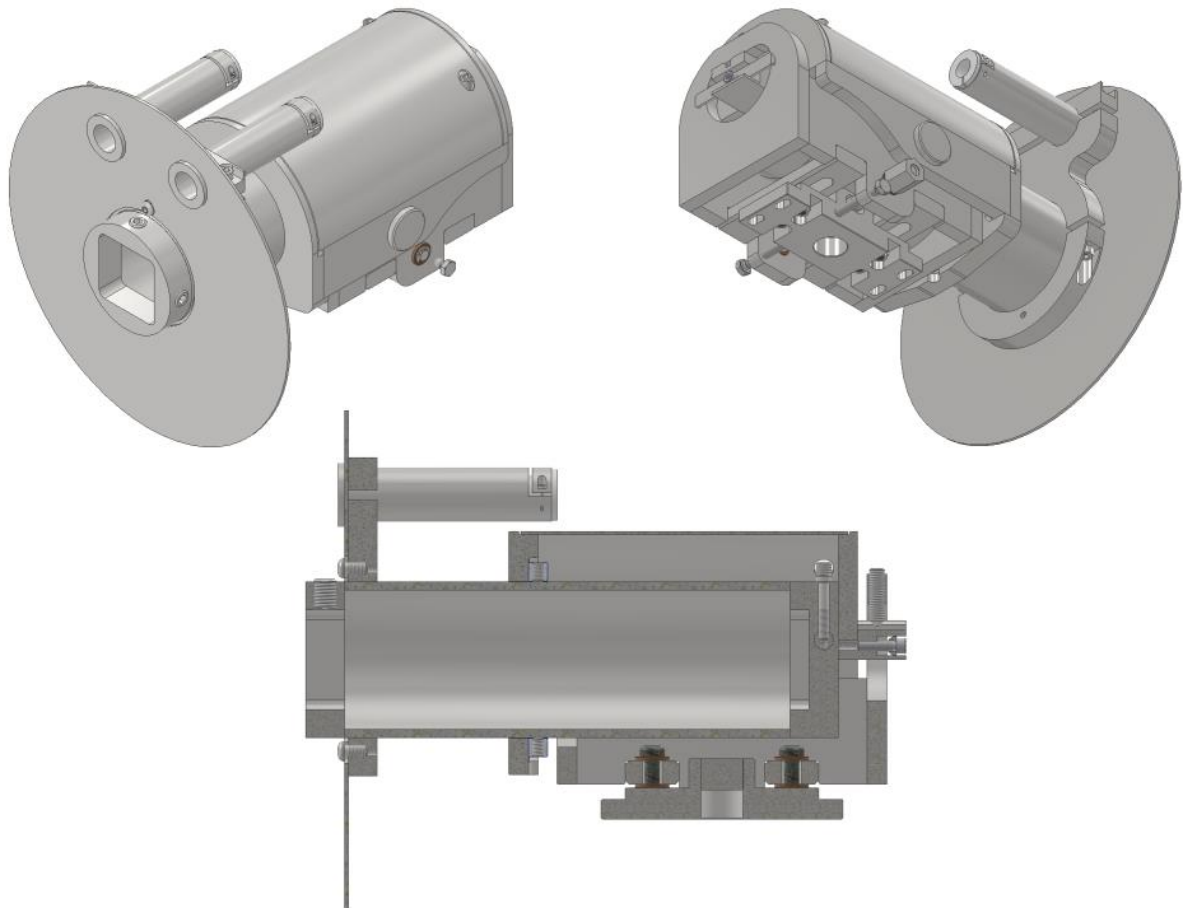
Materiál na výrobu hlavy a základní desky byl volen s ohledem na nutnou odolnost vůči korozi. Zvolena byla nerezová ocel AISI 316L (ČSN 17 349), se kterou má vývojové oddělení zkušenost, jelikož byla hojně využívána při tvorbě systému difúzní pece ABB2. Z 316L jsou ostatně vyráběny všechny ostatní díly, včetně krycích plechů, avšak kromě ložiskových domků a rámu zakladače (viz. příložená výkresová dokumentace). Při návrhu samotného designu jsem se snažil o co největší redukci hmotnosti ovšem při zachování funkčnosti a tuhosti systému. Jak je možno vidět na (obr. 29) tak jednotlivé díly hlavy zakladače MRL jsou soustruženy z jednoho kusu hliníku, což mi přišlo jako nepřijatelný technologický postup na výroby hlavy zakladače ABB, a to zejména pro cenovou náročnost výrobní technologie a materiálu. Díly MRL jsou tvarově velmi složité, jejich výroba vyžaduje užití složitých obráběcích center, jejichž provoz a obsluha je velmi drahá. O nevhodném využití výchozího materiálu není třeba hovořit. Díly pro sestavu hlavy a základní desky zakladače jsou vyráběny výhradně jen z nerezových desek, popřípadě z nerezového plechu a spojovány jsou buď svařováním nebo šrouby. Aby se díly vůči sobě při svařování lépe ustavovali, jsou na jednotlivých dílech sestav frézovány referenční hrany, k nimž se díly dorážejí viz. (obr. 30 a příložená výkresová dokumentace). Díky tomuto postupu se podařilo zredukovat hmotnost hlavy a základní desky zakladače ABB na pouhých 20 kg , což je o třetinu nižší hmotnost než hmotnost hlavy a základní desky zakladače MRL, která činí 30 kg , při zachování tuhosti a funkčnosti Loaderu ABB. Výsledný design hlavy je vyobrazen na (obr. 32, obr. 33 a obr. 34). Jsou zde popsány díly činné při korekci pozice pádla v prostoru, a tudíž je zde patrné i technické řešení korekčního pohybu. Hlava je připevněna k hlavní desce šrouby prostřednictvím „upevňovací desky“ (obr. 33). Upevňovací deska je přišroubována s vůlí osazenými šrouby ke spodnímu dílu. Díky osazeným šroubům je možná rotace a posuv spodního dílu vůči upevňovací desce.



obr. 32 Horní část hlavy zakladače ABB



obr. 33 Spodní část hlavy zakladače ABB



obr. 34 Sestava hlavy zakladače ABB (nahore) s řezem hlavy ABB v rovině symetrie (dole)

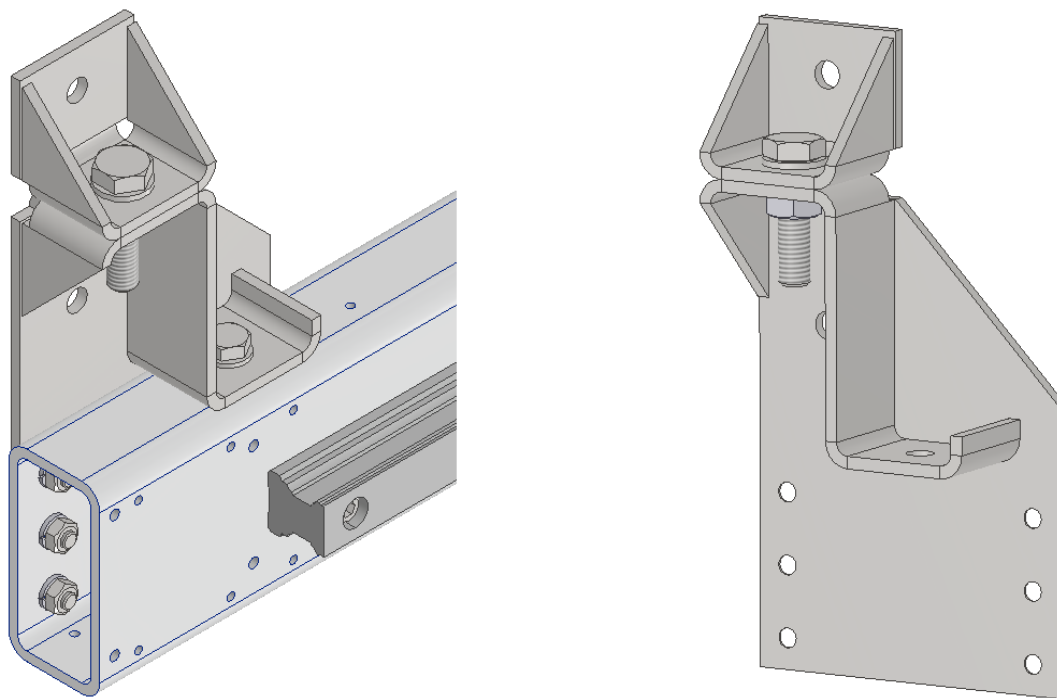
5.1.5 Montážní konzole

Nakonec konstrukčních prací bylo ještě nutno se zamyslet nad konzolí, která drží sestavu Loaderu na rámu Load stationu. U zakladače MRL je montážní konzole řešena prostým silnostěnným plechem lichoběžníkového tvaru viz. (obr. 35). Při montáži Loaderu MRL na pec ABB2 se však vyskytl případ, kdy došlo k drobnému ohnutí montážní konzole. Vzhledem k absenci možnosti dodatečně výškově nastavit hlavu zakladače MRL vůči procesní aparatuře je nutné velmi precizně nastavit výšku již při upevňování na rám, což je vzhledem k celkové hmotnosti zakladače dosti obtížné. Je nutné si uvědomit, že montáž probíhá v čistých prostorech, kde je nepřípustné pomáhat si při ustavování zakladače na rám „špinavými“ zvedáky apod. Ustavování na rám tedy probíhá jen za pomoci dvou či více lidských sil, čímž se zvyšuje riziko drobného či většího poškození zařízení. Dále je také nutností, aby byl zakladač vodorovně ustaven vůči podélné ose procesní aparatury (dle obr. 24 osa z), čímž je montáž Loaderu MRL ještě více ztížena.



obr. 35 Montážní konzole MRL

Při konstrukci konzole jsem se v první řadě snažil zvýšit její ohybovou tuhost a také řešení navrhnout tak, aby usnadňovalo montáž Loaderu na Load station. Výsledek je zobrazeno na (obr. 36).

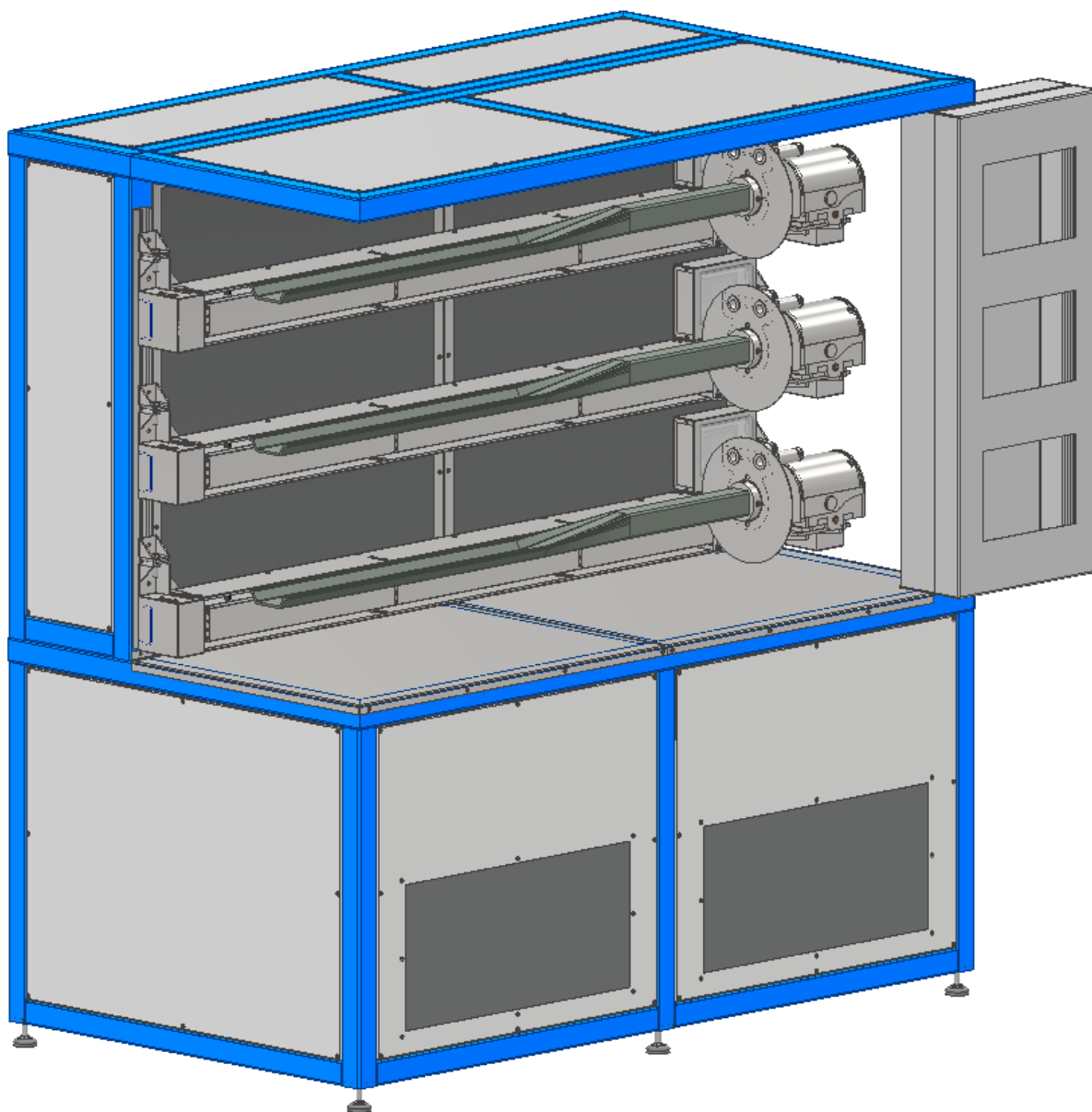


obr. 36 Design montážní konzole Loaderu ABB

Jedná se o ohýbanou svařovanou sestavu dvou dílů z oceli 316L. Tloušťka plechu činí 4 mm. Ohybová tuhost konzole je zvýšena díky vystupujícímu prvku tvaru „S“ a možnost prvotního výškového naladění je umožněna taženým šroubem průměru M10, kde je matice šroubu připevněna ke spodnímu dílu konzole. Podobný typ řešení výškového stavění topných kazet je užito na peci ABB2 a bezproblémově funguje. Konzole je k rámu zakladače připevněna sedmi šrouby. Konzole jsou pak k Load stationu montovány na stojnu tvaru U speciálními šrouby s obdélníkovou podložkou, které jsou dodávány ke stojně. Montáž probíhá skrze dva volné otvory, které jsou na (obr. 36) vlevo. Nakonec stojí za zmínku fakt, že díky tvaru konzole, jenž je k rámu připevněna nejen na zadní stěně, ale i na horní stěně, dochází k lepšímu redistribuování smykových toků, které vznikají v rámu zakladače v důsledku kroucení od lineárního vedení, do stojen Load stationu.

5.1.6 Load station

Při konstrukci samotného Load stationu jsem vycházel zejména ze zkušeností z konstruování Load stationu k difuzní peci ABB2. Jak již bylo psáno v kapitole 1.1.3 jedná se o svařovanou konstrukci zejména z dutých profilů čtvercového průřezu o rozměrech 50x50x2. Celý svařenec Load stationu je tvořen třemi menšími celky. Je tomu tak zejména kvůli jednodušší přepravě. Celek tedy tvoří spodní svařenec, horní svařenec, svařenec stropní části. K load stationu pak patří ještě plechová skříň, kde jsou umístěny průmyslové terminály, které slouží pro lokální obsluhu a nastavení parametrů difuzní pece. Ve spodním svařenci jsou umístěny dva ventilátory, regulátory ventilátorů, řídicí jednotky zakladačů a různé další elektronické díly. Jsou tam ale také části proudové cesty, které z ventilátorů ústí do horního svařence. V horním svařenci jsou umístěny filtry posledního filtračního stupně a tato část tedy generuje jednosměrné (laminární) proudění vzduchu. Svařenec stropní části pak slouží k uložení světel a je k němu připevněna i plechová skříň průmyslových terminálů. Opět pro ilustraci je na (obr. 37) zobrazen model Load stationu k difuzní peci DA62, osazený Loadery ABB i s křemíkovými pádly.



obr. 37 Load station k difúzní peci DA62

5.2 Ověření pevnosti a tuhosti klíčových částí Loaderu

Samotný Load station pevnostní kontrole podroben nebyl. Jeho konstrukce totiž vychází zejména z konceptu Load stationu k peci ABB2, kde po realizaci nebyly pozorovány žádné problémy s vibracemi a ani nebyly zaznamenány žádné výrazné průhyby či koncentrátoři napětí. Pevnostní kontrole je podroben pouze zakladač.

Zakladač byl pevnostně zanalyzovaný pomocí metody konečných prvků (MKP) v prostředí Simens NX 11, kde byl vytvořen zjednodušený model. Po výpočtu jsem následně zkoumal, zda na konstrukci nevznikají významné deformace, které nebyly brány v úvahu.

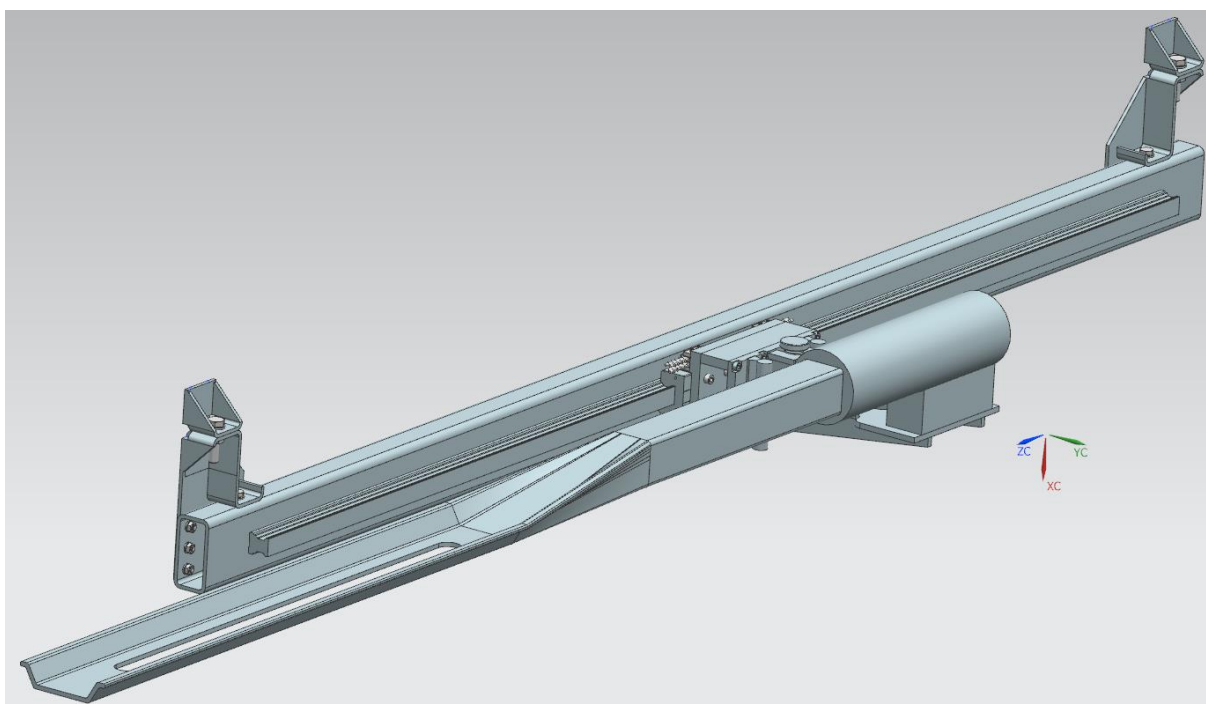
U dílů jejichž vzájemné vazby byly pro výpočet výrazně zjednodušeny, nebo je jejich realizace příliš složitá na výpočet v MKP, byla pevnost a tuhost ověřena analytickými výpočty.

5.2.1 Komplexní pevnostní a tuhostí analýza modelu Loaderu pomocí MKP

Jak již bylo předesláno, MKP model byl vytvořen v programu Simens NX 11. Jako řešič byla zvolena nadstavba NX Nastran a typ řešení pak SOL 101 Linear Statics-Global Constraints

Export modelu byl realizován z výchozího programu Autodesk Inventor, kde proběhla tvorba modelu a výkresové dokumentace. Následně byl model s koncovkou .CATProduct importován do programu NX.

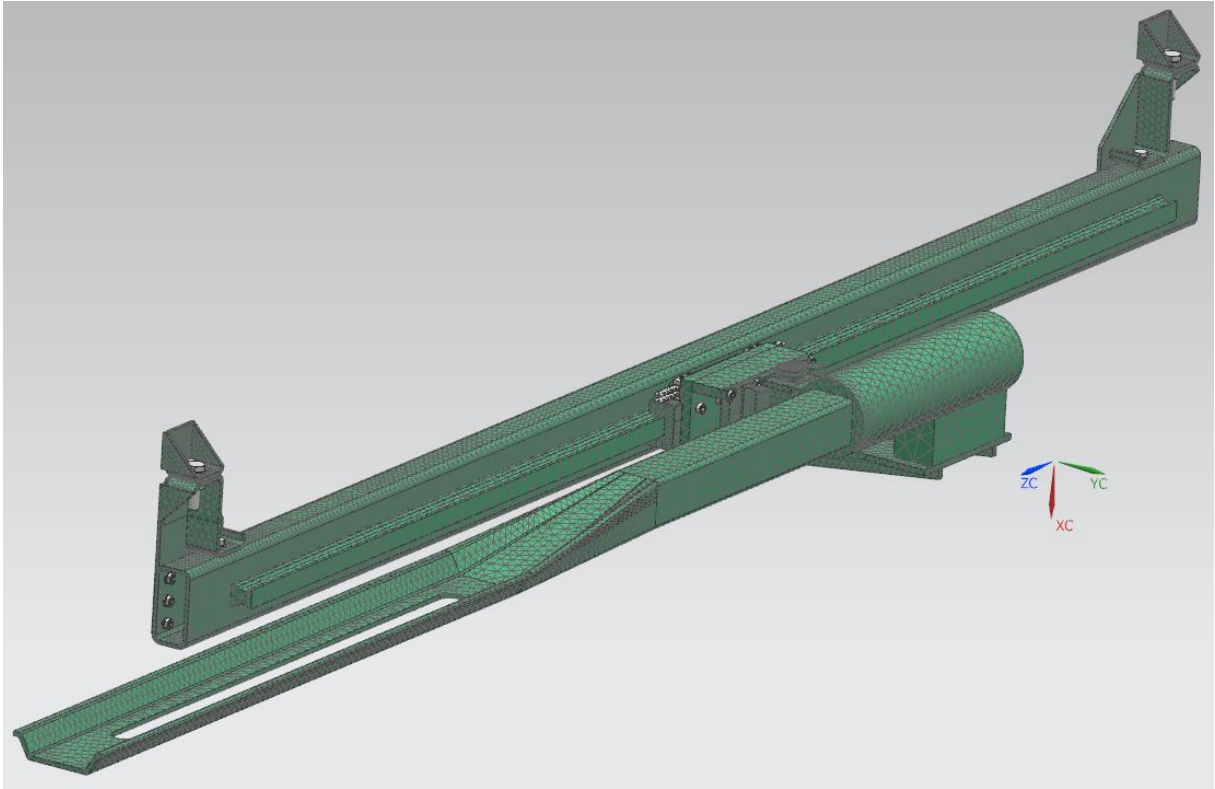
Model bylo nutno před samotnou tvorbou sítě zjednodušit. Zejména bylo nutno odstranit díry v dílech, které by celý proces síťování zbytečně zatěžovali. Idealizovaná sestava k nahlédnutí na (obr.38). Došlo také k výraznému zjednodušení hlavy zakladače, neboť mi při pevnostní analýze šlo zejména o deformace rámu a základní desky. Proto tedy hlava byla nahrazena jednoduchým dílem válcového tvaru, do kterého bylo zasazeno pádlo.



obr. 38 Idealizovaná sestava

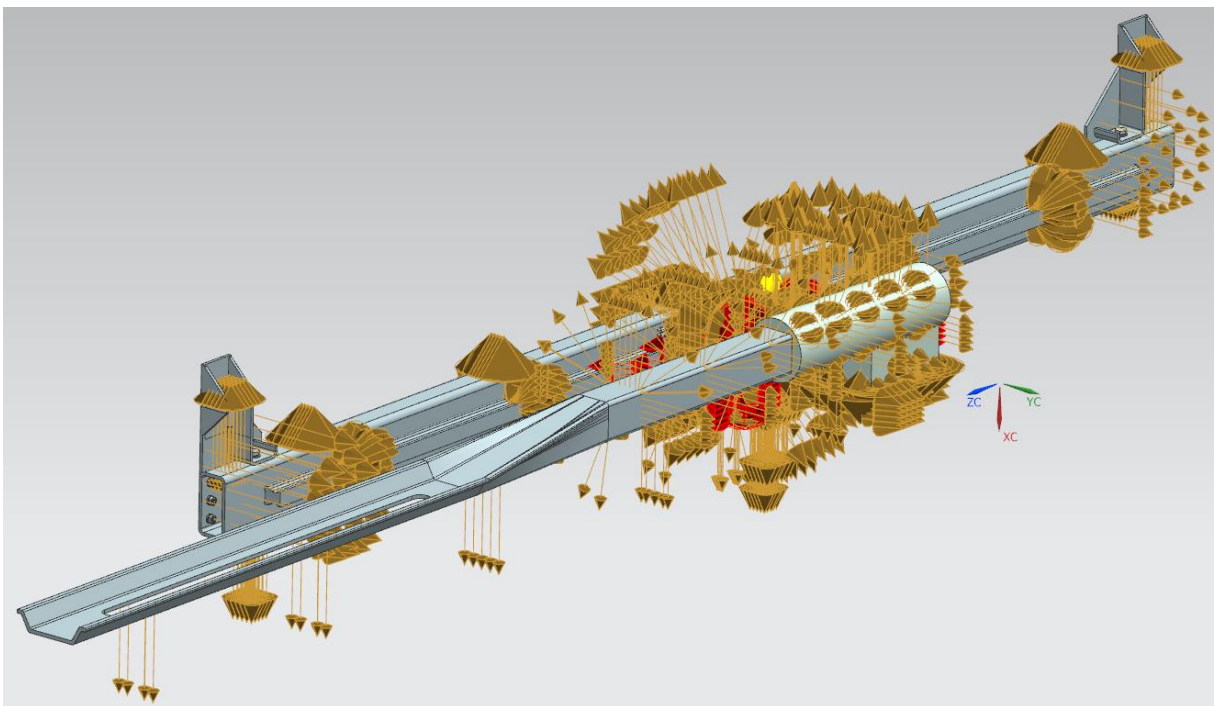
Pro tvorbu sítě byl užito příkazu „3D Tetrahedral“ a zvoleny buňky CTERA(10) s automatickou velikostí buněk pro jednotlivé díly. Model s vytvořenou sítí na (obr. 39). Následně byly jednotlivým dílům přiřazeny materiálové vlastnosti. Pro zjednodušený model hlavy jsem volil materiál s velkým modulem pružnosti a s malou Poissonovou konstantou, neboť jsem chtěl simulovat stav absolutně tuhého tělesa. Hustota materiálu byla volena tak, aby idealizovaný model hlavy váhově odpovídal normálnímu modelu.

Díly, které jsou navzájem svařeny nebo sešroubovány, byly přes příkaz „Simulation Object Type“ slepeny vazbou Surface-to-Surface gluing. Vazba byla použita i v uložení stavěcího šroubu v matici a na bronzovém lůžku. Lineární vedená na základní desce bylo k vodící hřídeli vázáno vazbou Surface-to-Surface contact. Model s vyvolanými vazbami je vyobrazen na (obr. 40)

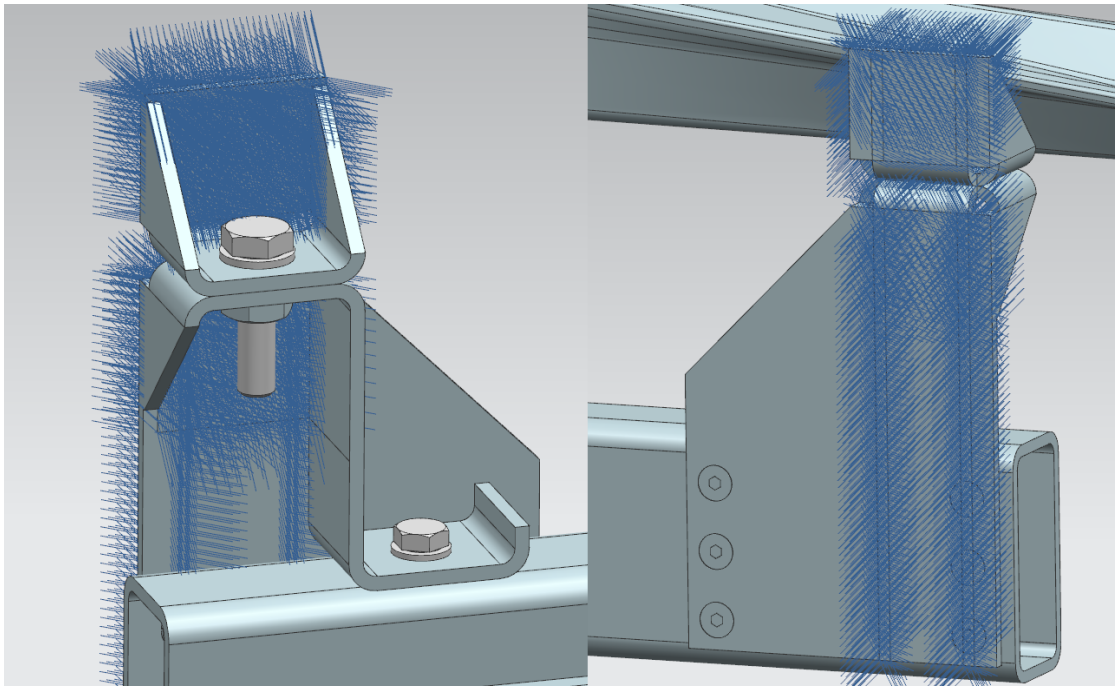


obr. 39 Model s aplikovanou sítí

Okrajové podmínky byly navoleny tak, aby co nejvěrohodněji reprezentovaly skutečnou montáž zakladače na rámu Load stationu. Čelní plochy montážní konzole byly zafixovány příkazem pevné vazby „Fixed constraint“ v oblastech kde dochází k přitlaky hlavy od upevňovacích šroubu a na zadní straně montážní konzole byly vazby omezena na oblast, kde dochází k přitlaku od stojny tvaru „U“. Pro lepší představu jsou vazby pevné vazby „Fixed constraint“ vyobrazeny na (obr. 41)

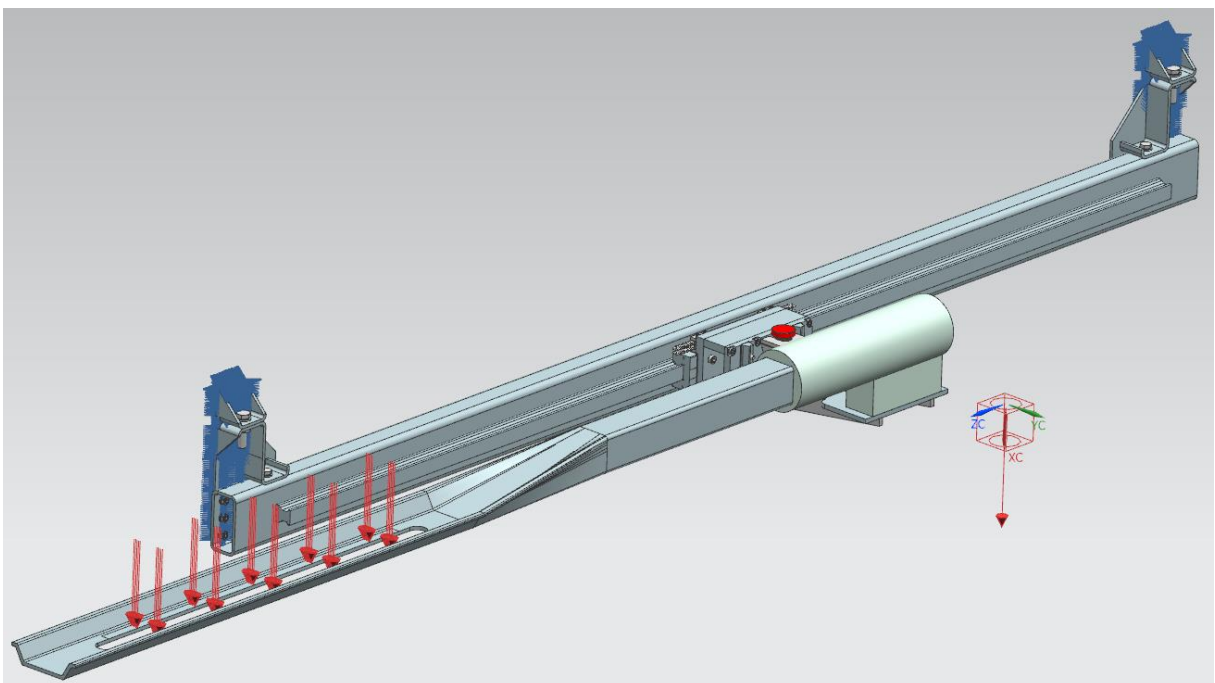


obr. 40 Použité vazby



obr. 41 Pevné vazby

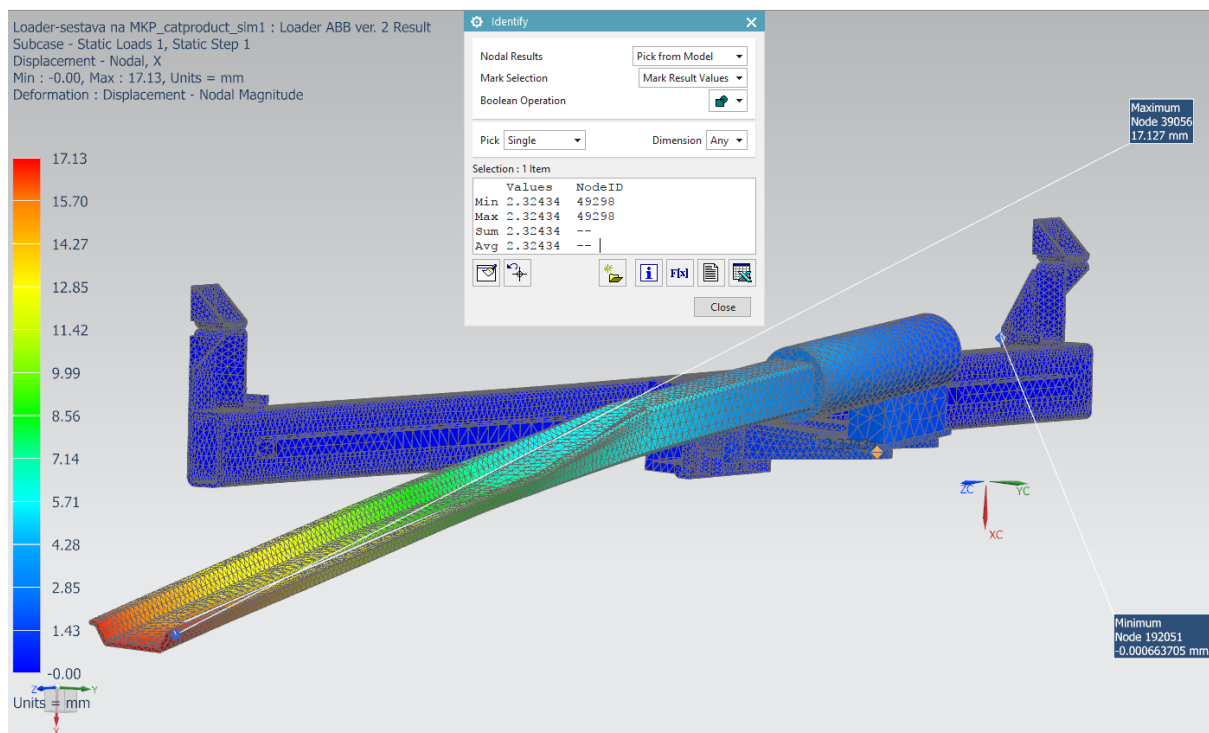
Zatížení je zavedeno na omezené oblasti pádla podle skutečné pozice nosníků křemíkových desek, jak je vyobrazeno na (obr. 42). Síla má velikost 120 N a vychází z maximální možné hmotnosti vsázky. Metoda distribuce síly je zvolena jako „Geometric distribution“, což znamená, že na zvolené oblasti je síla 120 N rozložena jako plošné zatížení. Při výpočtu byla „zapnuta“ gravitace, čímž se dosáhlo věrohodnějších výsledků, neboť se na zatížení podílela i vlastní váha jednotlivých dílů.



obr. 42 Zatížení

Po proběhnutí samotného výpočtu byl zjištěn maximální průhyb ve směru osy x na špičce pádla zakladače, jak ukazuje (obr. 43). S tímto výsledkem se počítalo, a je nutno při nakládání vsázky na pádlo brát ohled na to, že dochází k výraznému průhybu pádla a naladit pomocí stavitelných prvků Loaderu

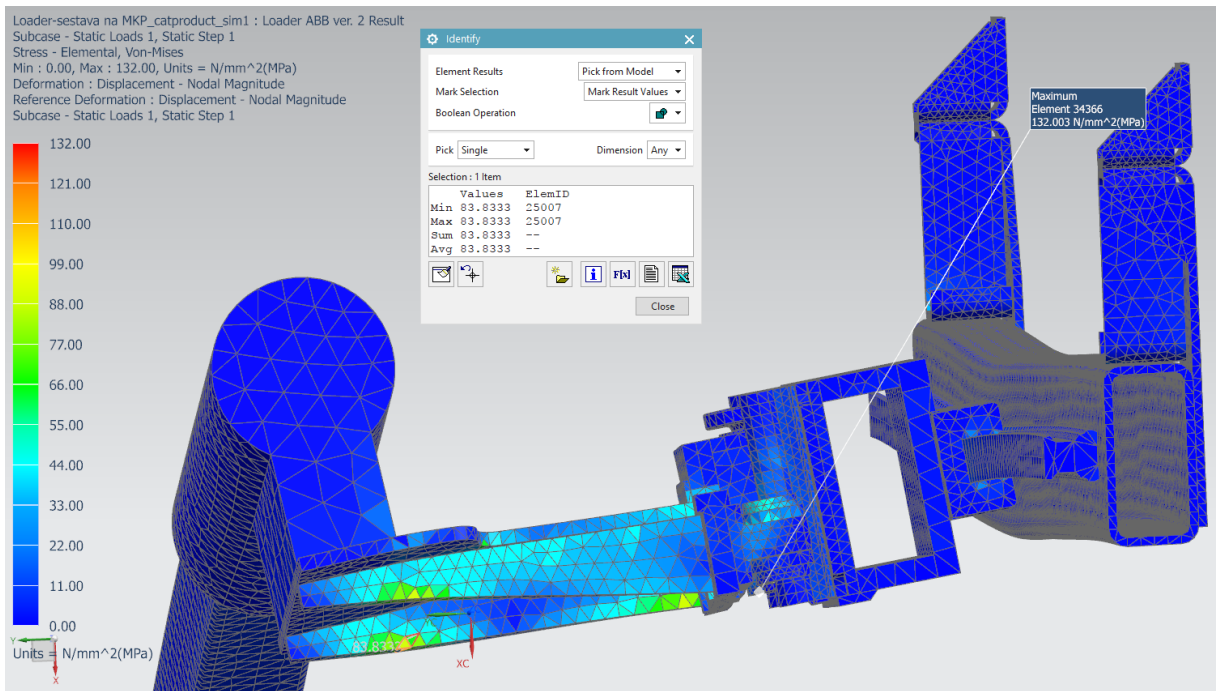
pozici pádla v prostoru vůči procesní aparatuře tak, aby nedošlo při zajíždění k dotyku pádla a procesní aparatury.



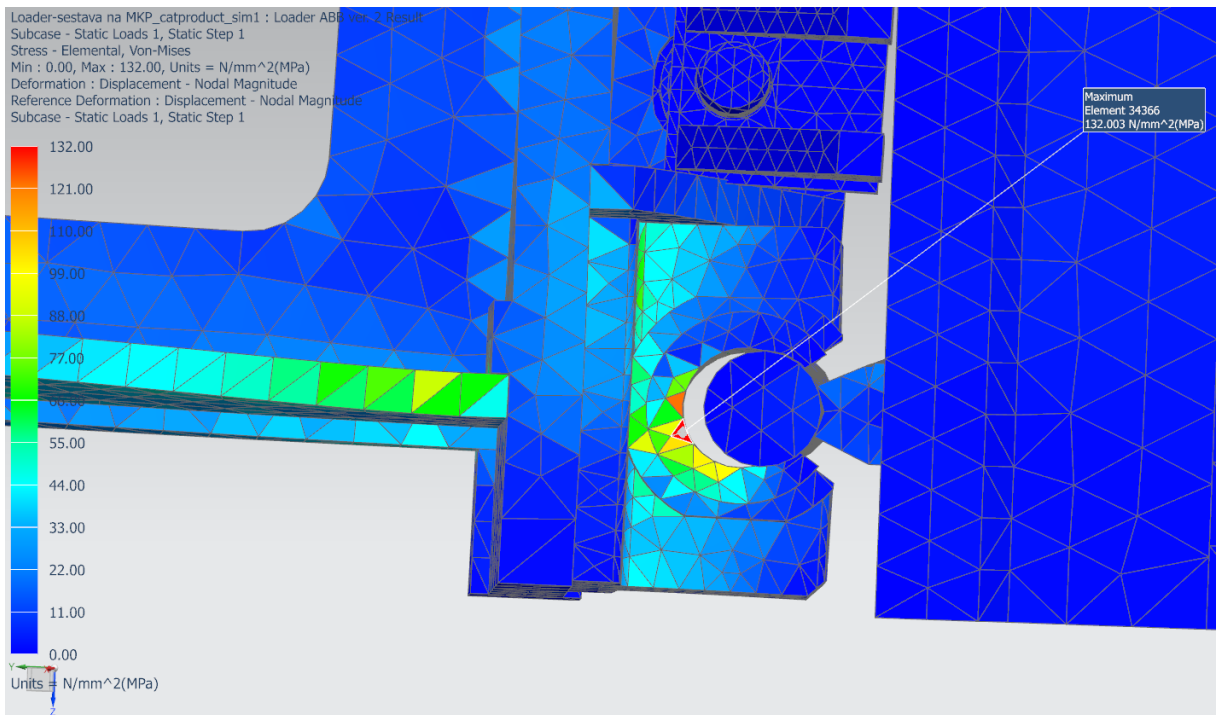
obr. 43 Průhyby v ose x

Na (obr. 43) je zobrazena tabulka, která udává hodnoty průhybu nejkrajnějšího „nodu“ základní desky zakladače $\Delta x_{max_{ZÁKLADNÍ\ DESKA}} = 2,32\text{ mm}$ což je poměrně dobrý výsledek, který reflektuje komplexní tuhost designu samotné konstrukce

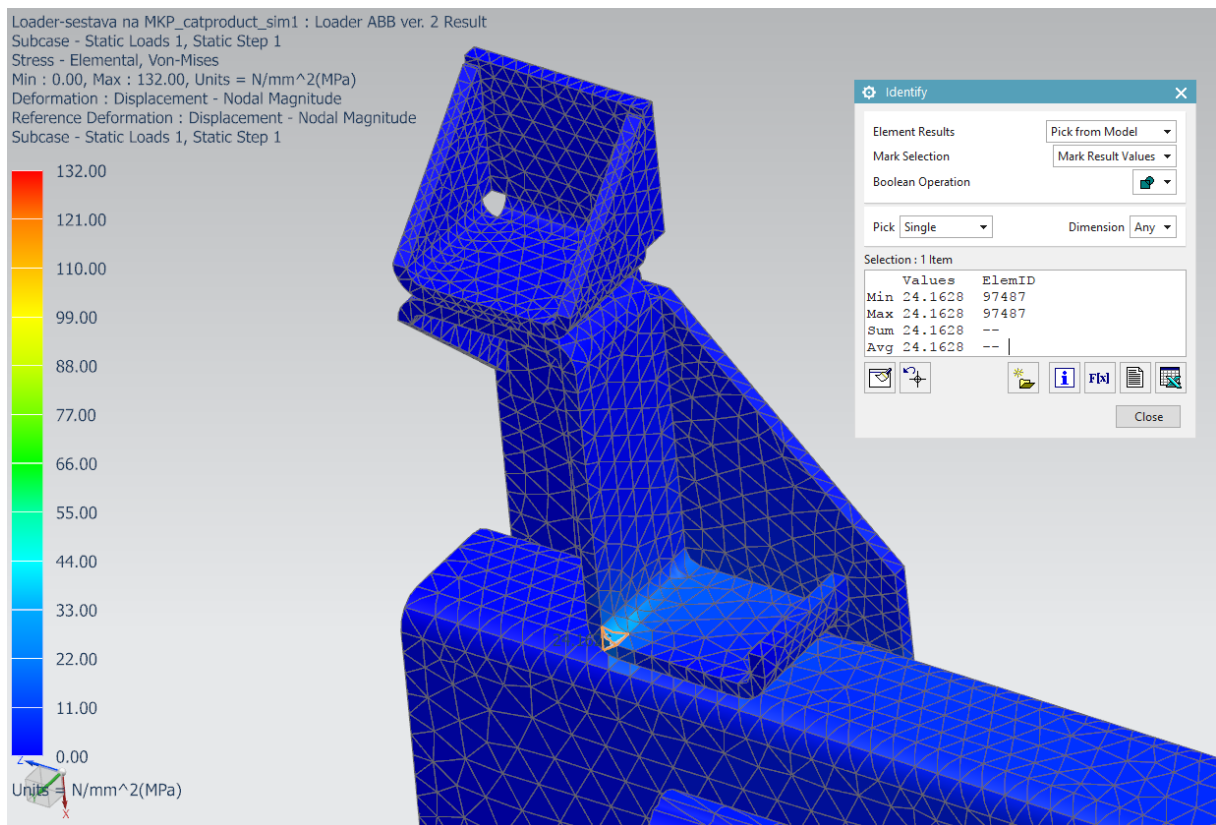
Obrázek (obr. 44) ukazuje, kde vznikají maximální koncentrátoři napětí (měřítko deformace je pro lepší viditelnost deformace nastaveno o 30% větší, než jsou skutečné deformace). Ukazuje se, že nejvíce trpí pouzdro lineárního vedení základní desky. Model indikuje maximální napětí na pouzdře blíže ke Scavengeru 132 Mpa (obr. 45) a tudíž je dále nutno ověřit únosnost pouzdra přesnější výpočtem na základě hodnot maximální únosnosti lineárního vedení z datasheetu výrobce (viz. kap.5.2.2). V tabulce na (obr. 44) je hodnota maximálního napětí žlutě zbarvených buněk na podélných trojúhelníkových nosících základní desky $83,83\text{ Mpa}$. Z materiálových listů pro ocel 316L vyplývá minimální hodnota meze kluzu pro tlusté desky $R_{p0,2} = 195\text{ Mpa}$, z čehož plyne že zvolená koncepce designu Loaderu pevnostně vyhovuje. Na rámu zakladače MKP analýza neindikuje žádné významné koncentrátoři napětí. Ještě stojí za zmínku (obr. 46) kde je ukázáno, jak se zdokonalený design montážní konzole podílí na lepší distribuci napětí z rámu Loaderu do rámu Load stationu. Tabulka na obrázku (obr. 46) ukazuje napětí ve světle modře zbarvené buňce n okraji „S“ prvku zvyšující ohybovou tuhost upevňovací konzole.



obr. 44 Výsledné napětí



obr. 45 Maximální napětí na pouzdře lineárního vedení



obr. 46 Napětí v upevňovací konzoli zakladače

5.2.2 Dodatečné analytické ověření pevnosti vybraných částí Loaderu

Vazba mezi stavěcím šroubem a jeho maticí, viz. (obr. 31), byla v modelu MKP nahrazena sešitím vnější plochy šrouby a vnitřní plochy matice. Vzhledem k tomu že na závitech šroubu stojí poměrně velká váha, jenž představuje základní deska s hlavou a křemíkové pádlo s deskami, je nutností ověřit tlak v závitu šroubu. Síla působící na šroub je dána zjednodušeným předpokladem

$$F_{x \text{ ŠROUB}} = g \cdot (m_{\max Si} + m_{P+N} + m_{Hlava} + m_{Základna}) \cdot k \quad (5.5)$$

kde $k = 2$ a tedy síla v ose šroubu $F_{x \text{ ŠROUB}} = 740 \text{ N}$. Vztah pro výpočet středního tlaku v závitu je

$$p_{\text{závity Šroubu}} = \frac{F_{x \text{ ŠROUB}}}{z \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - D_1^2)} \quad (5.6)$$

Výška matice je 8 mm z čehož pro závit M10 plyne počet činných závitů $z = 8$, průměr $d = 10 \text{ mm}$ a $D_1 = 8,160 \text{ mm}$. Výsledky tlak je $p = 3,52 \text{ Mpa}$. Běžná hodnota p_D pro ocel je dle [27] $7 \div 12 \text{ Mpa}$. Šroub M10 tedy vyhovuje pro toto použití. Hodnota štíhlostní poměru vychází $\lambda = 17,4$ pro případ uložení III. a je menší než 40 tudíž strach ze vzpěru šroubu není na místě. [27]

MKP model ukázal koncentraci napětí na lineárním vedení základní desky s čím bylo počítáno při návrhu. Datasheet pro pouzdra R1067 620 40 udává maximální hodnotu při statické zátěži v hlavním směru (vyobrazený na obr. 47 vpravo) $C = 2570 \text{ N}$. Diagram vlevo udává koeficient, kterým je nutno hodnotu C přezásobit, pokud síla C nepůsobí ve směru 0° . Zjednodušíme-li tedy náš případ dle (obr. 48) kde síla $F_{x \text{ POUZDRO}}$ je dána vztahem

$$F_{x\text{ POUZDRO}} = g \cdot \left(m_{\text{maxSi}} + m_{P+N} + m_{\text{Hlava}} + \left[\frac{m_{\text{Základna}}}{2} \right] \right) \quad (5.7)$$

pak na pouzdro vedení působí silová dvojice dle

$$Mk_{Z\text{ POUZDRO}} = F_{x\text{ POUZDRO}} \cdot 0,190 \quad (5.8)$$

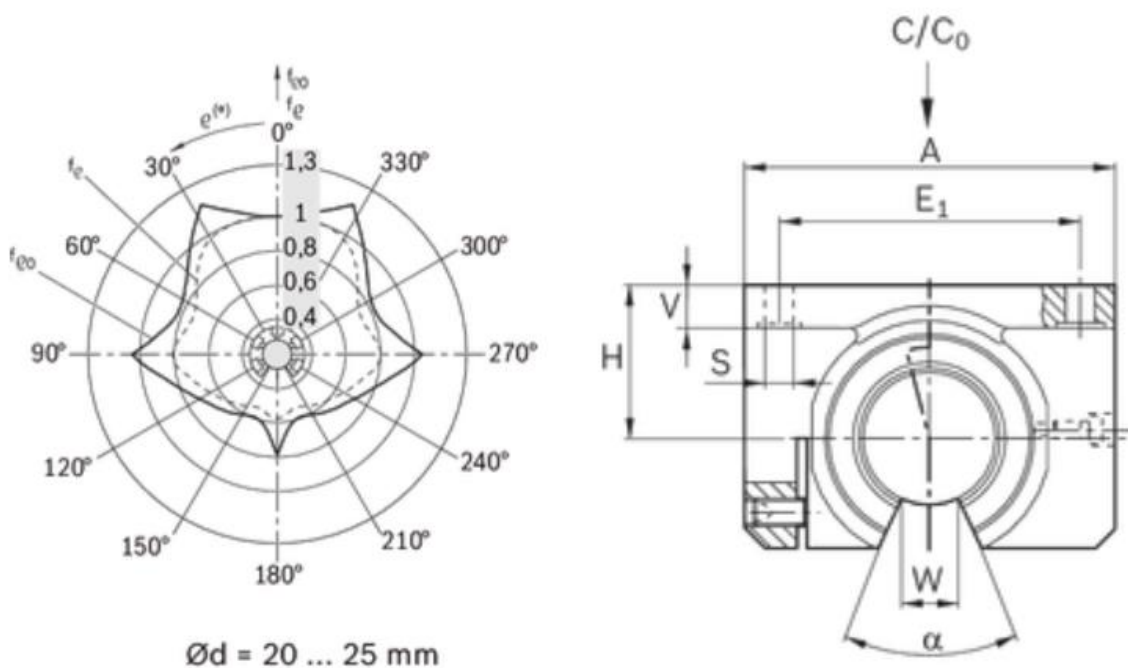
Pro $F_{x\text{ POUZDRO}} \cong 330\text{ N}$ je silová dvojice (moment) $Mk_{Z\text{ POUZDRO}} = 62,5\text{ Nm}$ z čehož můžeme při znalosti výšky pouzdra vypočítat sílu $F_{y\text{ POUZDRO}}$ dle

$$F_{y\text{ POUZDRO}} = \frac{Mk_{Z\text{ POUZDRO}}}{0,035} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.8)$$

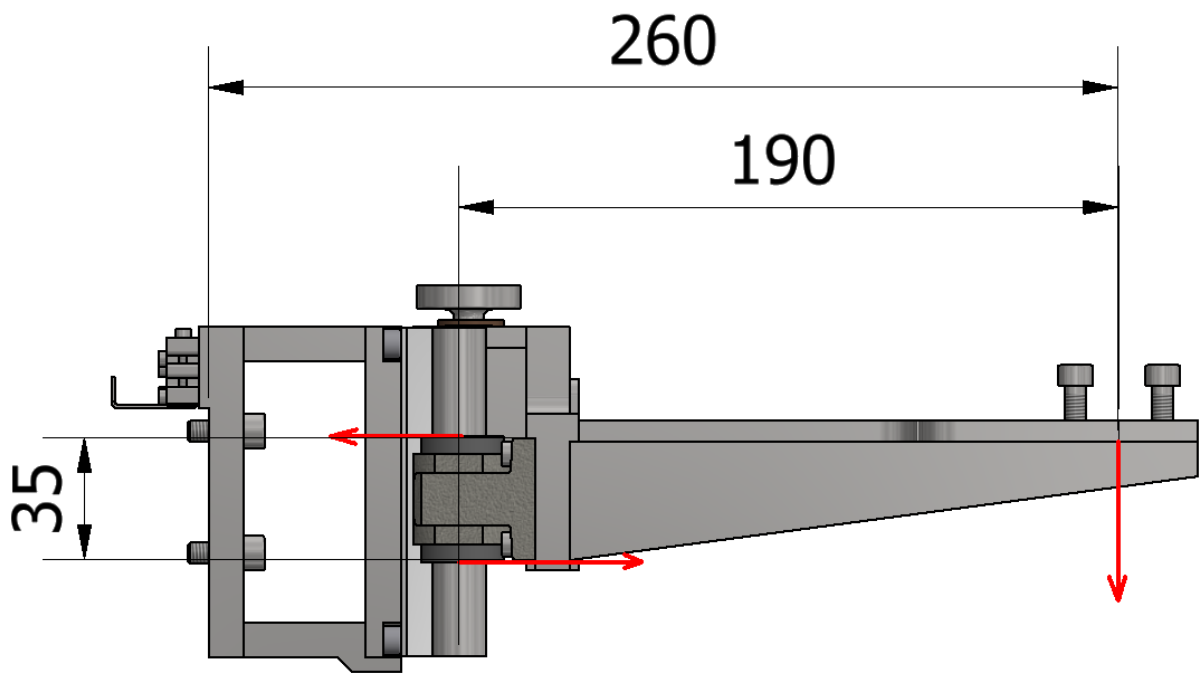
Pak je síla působící v jednom pouzdře $F_{y\text{ POUZDRO}} = 892\text{ N}$. Přezásobíme-li maximální dovolenou sílu C korekčním faktorem dostáváme $C_{0,8} = 2056\text{ N}$ a tedy $C_{0,8} > F_{y\text{ POUZDRO}}$ čímž je splněna podmínka únosnosti pouzdra lineárního vedení.

Při podrobnější analýze v ostatních směrech nebyly zjištěny větší síly ($F_{z\text{ POUZDRO}}$) působící na pouzdro než $F_{y\text{ POUZDRO}}$

Podobnou metodou bylo kontrolováno i lineární vedení R1622 214 20 jenž má několikanásobně větší únosnosti než pouzdro na základní desce. Ve všech směrech vedení vyhovovalo a s velkou rezervou nebyla překročena maximální únosnost kamenů lineárního vedení.



obr. 47 Graf únosnosti pouzdrového lineárního vedení (vlevo) a definice hlavního směru působení síly (vpravo)



obr. 48 Schéma řešení únosnosti pouzdrového lineárního vedení

6. Pracovní oblast Load stationu

Jak již bylo blíže uvedeno v (kap. 4.7) pracovní oblast je zónou s vyšší třídou čistoty, než je čistota samotného čistého prostoru, ve které se zóna nachází. Prostředkem k zajištění čisté zóny je existence jednosměrného proudění, které zajistí ventilátor umístěný ve spodní části load stationu. Ventilátor nasává vzduch z okolního čistého prostoru přes dva filtrační stupně, umístěné před vstupem do ventilátoru a tlačí vzduch přes poslední třetí filtrační stupeň. Vzduch pak vychází ze stěny Loadstationu (dle přijaté orientace ve směru osy y) rychlostí v , která by pro zajištění jednosměrného proudění měla být v rozmezí $0,45 \div 0,5 \text{ m/s}$. Postupem času, dochází k zanášení filtračních stupňů a je tedy třeba v daných údržbových intervalech provádět měření třídy čistoty v čisté zóně Load stationu, aby byla zachována minimálně třída čistoty 10. Pokud není dosaženo požadované třídy čistoty, musí dojít k výměně filtračních stupňů.

6.1 Filtrační prostředky a ventilátor

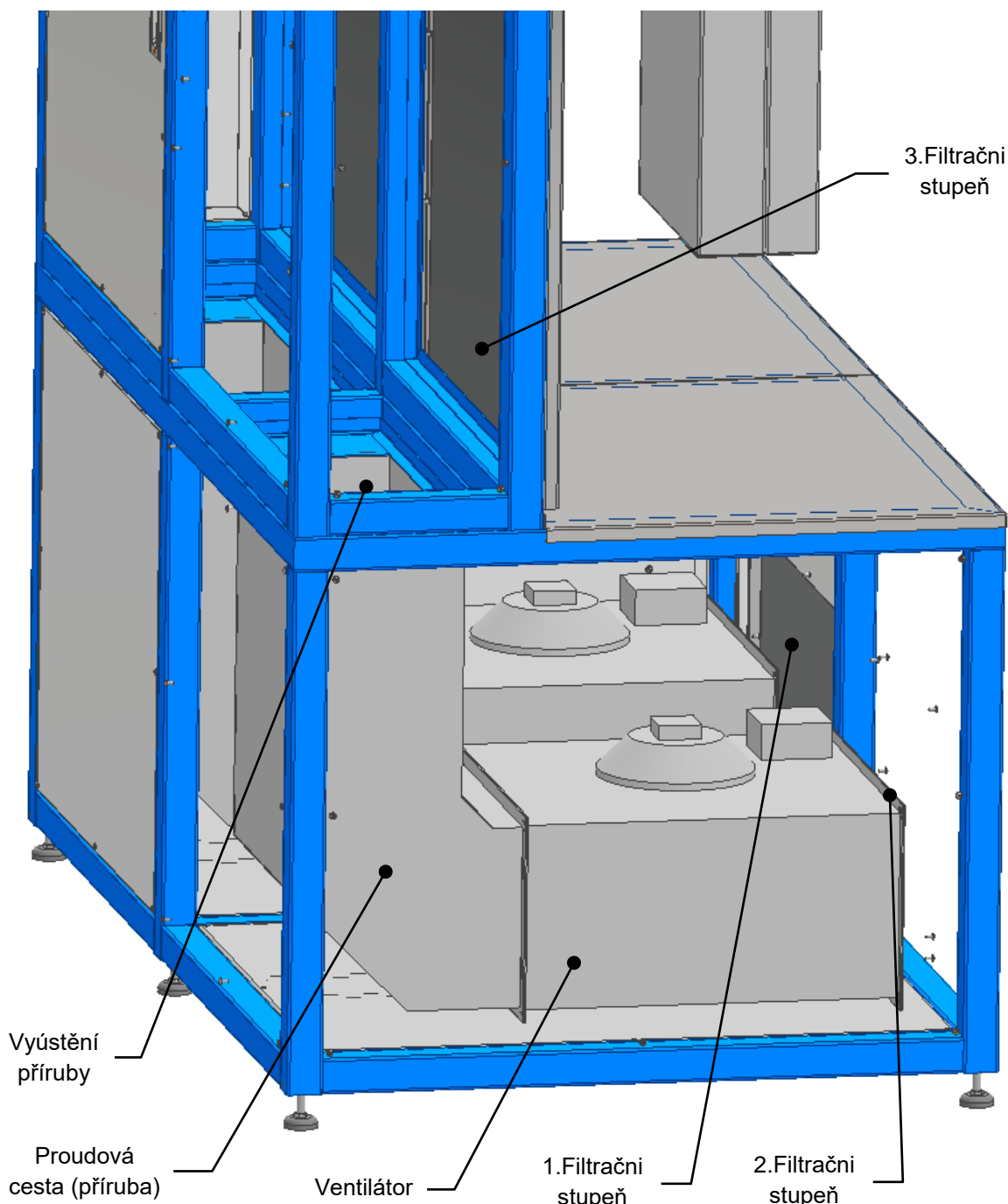
Pro filtraci vzduchu jsou tedy na Load stationu použity tři filtrační stupně. První stupeň filtrace, jenž je umístěn na čelním krycím plechu spodní části Load stationu je filtrační rouno třídy filtrace G3 pod označením Venufa 290. Rouno je složeno z polyesterových vláken s progresivní hloubkovou strukturou. Druhý stupeň, jenž je umístěn přímo na vstupní přírubě ventilátoru tvoří opět filtrační rouno. Zde ale již v třídě filtrace G4 pod označením MyStop 500. Rouno je rovněž složeno z polyesterových vláken, zde jsou ale mnohem více zhuštěna a filtr má speciálně hlazenou stranu čistého vzduchu, která zabraňuje uvolňování vláken. Dle datasheetu (v příloze práce) má filtr G3 odlučivost 87,7 % a G4 94,4 %. Odlučivost je definována dle ČSN 779 jako poměr celkového množství zátěžového prachu zachyceného filtrem k celkovému množství podaného prachu do dosažení konečné tlakové ztráty. Poslední filtrační stupeň tvoří kazetový filtr třídy filtrace H14, dá se také označovat jako HEPA filtr (produktové označení A14FA). Odlučivost tohoto filtru je dle [28] větší než 99,995 %. Filtr je poskládan z filtračního papíru ze skelných submikrovláken a následně je zatmelen do hliníkového rámu s ochrannou mřížkou na straně čistého vzduchu. Filtr je pak díky rámečku pohodlně usazen do vnitřního prostoru rámu horní části svařence Load stationu. Filtry H14 jsou doporučeny k ventilacím, které mají zajistit bezturbulentní laminární proud vzduchu, což je přesně případ, který je žádán. Veškerá dokumentace k filtračním členům viz. příloha práce.

Ventilátor jsem vybíral z nabídky produktů společnosti Remak, jenž je předním českým výrobcem velmi kvalitní vzduchotechniky, která se hojně užívá v chemickém, farmaceutickém, či polovodičovém průmyslu. Konkrétně byl zvolen ventilátor řady RP 50-25/25-4D. Jedná se o třífázový plně regulovatelný radiální ventilátor s čtyřhranným průřezem. Vnější plášť ventilátoru je vyroben z galvanicky pozinkovaného plechu, lopatky oběžného kola jsou dopředu zahnuty a rovněž vyrobeny z pozinkovaného ocelového plechu. S ventilátory Remak má podnik velmi dobré zkušenosti a byly užity i na Loaderu pro difuzní pec ABB2, kde bez problémů fungují a plní svůj účel.

6.2 Technické řešení proudové cesty

Při řešení proudové cesty jsem kladl důraz na jednoduchost při zachování potřebné funkčnosti. Je velmi podobná použitému řešení u Loaderu k peci ABB2, kde za plného provozu nebyly pozorovány žádné nedostatky. Řešení je zobrazeno na (obr. 49). Jedná se o svařovanou plechovou konstrukci z nerezového plechu, kde je změna směru proudnic řešena kolenem se sklonem 45° . Příruba se vkládá do Loaderu skrze zadní otvor v dolní části a je přišroubována na límeček z ocelového lechu, který je přivřen k rámu v prostoru, kde na sobě leží horní a dolní část svařence Load stationu. K přírubě je

následně připevněn ventilátor. Ten stojí na gumových páscích, jenž plní funkci silentbloku a také vymezují výškový rozdíl, tak aby byl ventilátor vůči přírubě dobře usazen. Ventilátor se do dolní části Load stationu vkládá přední otvorem, jenž je zakryt děrovaným plechem, na kterém je umístěn první filtrační stupeň. Jelikož má stěna, ze které vychází jednosměrný proud poměrně velký povrch, doprava vzduchu prostřednictvím jednoho ventilátoru by kladla velké nároky na rozměry a výkon ventilátoru. Z tohoto důvodu je řešení dopravy celkového objemu vzduchu rozděleno na dvě pozice s dvěma menšími ventilátory.



obr. 49 Technické řešení proudové cesty

6.3 Ověření laminárního proudění v pracovní oblasti Load stationu pro vybranou variantu ventilátoru a filtračních prostředků

Nejprve je nutno stanovit potřebný objem vzduchu, který musí procházet přes filtrační stupeň č. 3. Při znalosti rychlosti $v_{OUT} = 0,45 \text{ m/s}$, nutné k jednosměrnému proudění (viz. kap. 4.7) a znalosti plochy filtru $S_3 = 0,6512 \text{ m}^2$ lze stanovit dle jednoduchého vztahu objem vzduchu který protéká filtračním stupněm č. 3

$$V_3 = S_3 \cdot v_{OUT} \quad (6.1)$$

Objem potřebného vzduchu za hodinu je $V_3 = 1055 \text{ m}^3/\text{hod}$. Z datasheetu HEPA filtru H14 lze odvodit, že maximální možný objemový průtok skrze filtr H14 výše uvedeného povrchu S_3 je $V_{H14 \text{ max}} = 1060 \text{ m}^3/\text{hod}$. Tato podmínka je tedy splněna.

Dále při znalosti rovnice kontinuity můžeme stanovit potřebnou rychlost vzduchu na výstupu z ventilátoru tak, abychom dosahovali na stupni č. 3 požadované parametry výstupní rychlosti vzduchu. Platí tedy

$$S_2 \cdot v_{IN} = S_3 \cdot v_{OUT} \quad (6.2)$$

Pro průřez ventilátoru $S_2 = 0,170 \text{ m}^2$ pak rychlost vzduchu $v_{IN} \doteq 6200 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$. V datasheetech filtrů (G3, G4 a H14) jsou graficky znázorněny závislosti množství vzduchu [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$] na tlakové ztrátě [Pa], z čehož můžeme zjistit celkový tlak, který musí být schopen ventilátor „přetlačit“ resp. „usát“. Pro jednotlivé filtrační stupně tedy z grafů plyne $\Delta p_{G3} = 32 \text{ Pa}$, $\Delta p_{G4} = 40 \text{ Pa}$ a $\Delta p_{H14} = 125 \text{ Pa}$ a celková tlak který musí ventilátor dodávat je dán

$$\Delta p_{t \text{ max}} = \Delta p_{G3} + \Delta p_{G4} + \Delta p_{H14} \quad (6.3)$$

a tedy $\Delta p_{t \text{ max}} = 197 \text{ Pa}$. Datasheet ventilátorů firmy Remak obsahuje grafické závislosti celkového tlaku $\Delta p_{t \text{ max}} [\text{Pa}]$ na průtoku vzduchu $V_{max} [\text{m}^3/\text{h}]$, z čehož lze odečíst, že ventilátor RP 50-25/22-4D, v otáčkovém režimu 3c, má průtok vzduchu $V_{max} = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$. Po přepočítání tedy tímto hrubým analytickým výpočtem vychází, že výsledná rychlost vzduchu vycházejícího ze stěny Load stationu je $v_{OUT \text{ skut}} = 0,46 \text{ m/s}$.

Zvolený ventilátor tedy při tomto hrubém ověření splňuje nároky na zprostředkování jednosměrného proudění. Ventilátor je díky regulátoru otáček, který je rovněž v nabídce firmy Remak, schopný pracovat ve více režimech s různými průtoky vzduchu a je tak možné se přizpůsobovat s postupným zanášením filtračních prvků vzrůstajícímu odporu a zachovávat tak v_{OUT} v rozumných mezích tolerance.

7. Závěr

Dle zadání jsem tedy navrhl zasouvací stanici k difúzní peci pro výrobu polovodičových součástek. Vytvořil jsem potřebnou výkresovou dokumentaci pro realizaci zakladače, která je přiložena k diplomové práci. V příloze jsou rovněž přiloženy veškeré dokumentace a datasheety k zařízením a dílům od externích dodavatelů, které byly použity na realizaci projektu

Pevnostní analýza, která proběhla metodou konečných prvků neprokázala žádné výrazné koncentrace napětí a průhyby, které by byly překážkou k realizaci zakladače dle výše uvedeného designu.

Navržený systém filtrace z velké části vycházel ze zkušeností při tvorbě zakladače k peci ABB2, na kterém jsem se v podniku podílel a měl by tedy splňovat nároky na existenci jednosměrného (laminárního) proudění v pracovní oblasti Load stationu. Zjednodušené analytické ověření laminárního proudění potvrzuje výše uvedené tvrzení.

Literatura

- [1] P. a.s., *Přehledový katalog*, Praha, 2008.
- [2] ABB, „Tiskové centrum - Archiv,“ 26 Zář 2012. [Online]. Available: <http://www.abb.cz/cawp/seitp202/01771afed671353cc1257a85004ac5e4.aspx>.
- [3] Bronkhorts, „Products - EL-FLOW® Select - Laboratory style GAS Mass Flow Meters / Mass Flow Controllers,“ [Online]. Available: <https://www.bronkhorst.com/files/downloads/brochures/folder-el-flow.pdf>.
- [4] Mottocorp, „Products - HIGH-FLOW POINT OF USE FILTERS,“ [Online]. Available: https://mottocorp.com/sites/default/files/GSP11215H3_0.pdf.
- [5] I. Tempres Systems, „Gas cabinet Reference Manual,“ 2004.
- [6] Kanthal, „Resistance heating alloys for electric home appliances,“ Sandvik Materials Technology, Sweden, 2012.
- [7] I. Carter Glassblowing, „Horizontal process tube,“ Carter Glassblowing Inc., Texas, 2013.
- [8] I. Tempres System, „Loadstation Reference Manual,“ 2004.
- [9] ABB, „ABB-Produkty-Polovodiče,“ 2017. [Online]. Available: <http://new.abb.com/semiconductors/cs>.
- [10] J. Vobecký a V. Záhlava, *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*, Praha: Grada, 2005.
- [11] C. RNDr. Jaroslav Homola, C. Ing. Lubor Jirásek, I. L. Kalenda, I. J. Klápště, D. č. k. Č. prof. Ing. Milan Kubát, I. M. p. f. M, I. M. Pellant, I. B. Pina a I. J. Plíva, *Silnoproudá mikroelektronika*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989.
- [12] ABB, „ABB-Produkty-Polovodiče-Diody,“ 2017. [Online]. Available: <http://new.abb.com/semiconductors/cs/diodes>.
- [13] D. a. k. prof. Ing. Ivan Uhlíř, *Elektrické obvody a elektronika*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.
- [14] C. Prof. Ing. Vítězslav Benda a C. Doc. Ing. Václav Papež, *Komponenty výkonové elektrotechniky*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006.
- [15] C. Prof. Ing. Jaroslav Boušek, „Vícevrstvé spínací součástky,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/eso/prvky7x.pdf>.

- [16] ABB, „ABB-Produkty-Polovodiče-Tyristory-Fázově řízené tyristory (PCT),“ 2017. [Online]. Available: <http://new.abb.com/semiconductors/cs/thyristors/pct>.
- [17] M. M. Lorenc, M. J. Šik a I. L. V. Ph.D., „Technologie růstu monokrystalů křemíku Czocharlskiho metodou,“ 2017. [Online]. Available: http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf.
- [18] I. O. Frantík, I. P. Wostrý, I. R. Bařinka a P. Lukašik, Vysokoteplotní procesy v polovodičové výrobě, Rožnov pod Radhoštěm: Czech RE Agency, o.p.s, 2011.
- [19] I. O. Frantík, Vysokoteplotní procesy ve výrobě křemíkových fotovoltaických článků, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Doktorská práce, 2014.
- [20] K. Barabaszová, Difuzní charakteristiky a koncentračně gradientní materiály na bázi Ni-Al, Ostrava: VŠB-TU, Disertační práce, 2004.
- [21] H. Mehrer a N. A. Stolwijk, Heroes and Highlights in the History of Diffusion, Münster: Institut für Materialphysik, Universität Münster, 2009.
- [22] S. W. Jones, Diffusion in Silicon, Georgetown: IC Knowledge, 2008.
- [23] P. Gise a R. Blanchard, Modern semiconductor fabrication technology, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [24] E. R. a.s, Metodika řešení a provozování čistých prostorů pro elektrotechnický průmysl, Rožov pod Radhoštěm.
- [25] R. B. Group, „Produktový katalog Ball rail systems,“ Bosch Rexroth AG, Schweinfurt, 2014.
- [26] ABB, „new.abb.com - Detailed information for: CP604,“ 2018. [Online]. Available: <http://new.abb.com/products/1SAP504100R0001/cp604cp600-eco-control-panel-tft-grafic-display-touchscreen-4-3-480x272-pi>.
- [27] C. Doc. Ing. Vladimír Švec, Části a mechanismy strojů - Spoje a části spojovací, Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- [28] Č. E. 1.-1. 1. 5002, Vysoce účinné filtry vzduch (HEPA A ULPA)- Část 1: Klasifikace, ověřování vlastností, označování, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.