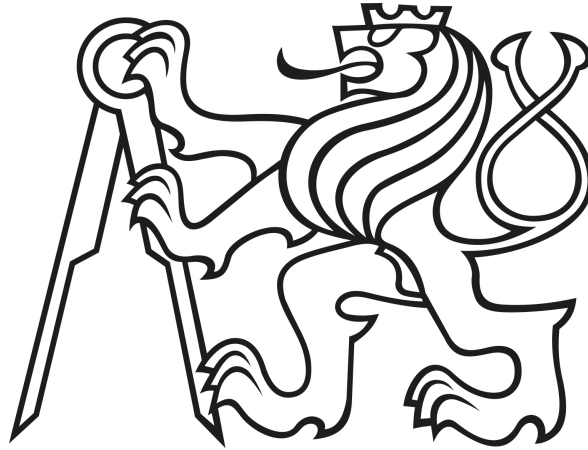


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Konstrukce hybridního stroje - stroj pro možnost laserového
navařování a frézování

2016

Bc. Jan Proněk

Zadání

viz.: DP_Pronek_zadani.pdf

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 (autorský zákon).

V Praze dne 20.7.2016

.....
podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Smolíkovi, Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Ivanu Divišovi za formulaci zadání, vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této diplomové práce. Současně děkuji firmě KOVOSVIT MAS, a.s. za poskytnuté podklady, bez kterých by nebylo možné tuto práci na dané téma řešit. Děkuji též panu Ing. Jiřímu Heřmánkovi z firmy Siemens, s.r.o za konzultace k elektro projekci.

Dík patří také celé mé rodině za psychickou a hmotnou podporu během studia.

Anotace

Autor:	Bc. Jan Proněk
Název DP:	Konstrukce hybridního stroje - stroj pro možnost laserového navařování a frézování
Rozsah práce:	85 str., 47 obr., 12 tab.
Školní rok vyhotovení:	2015/2016
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Ivan Diviš
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Výroba součástí laserovým navařováním a frézováním
Klíčová slova:	Hybridní stroj, konstrukce, laserové navařování, frézování
Anotace:	Diplomová práce se zabývá konstrukcí hybridního stroje. Práce obsahuje rešerši současného stavu hybridních strojů a praktickou část zabývající se návrhem a konstrukcí stroje. Součástí práce je výkresová dokumentace vlastní konstrukce.

Annotation

Author:	Bc. Jan Proněk
Title of diploma dissertation:	Construction of hybrid machine - machine for the possibility of laser cladding and milling
Extent:	85 p., 47 fig., 12 tab.,
Academic year:	2015/2016
University:	CTU - Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 - Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Consultant:	Ing. Ivan Diviš
Submitter of the Theme:	CTU - Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Part manufacturing with laser cladding and milling
Key words:	Hybrid machine, construction, laser cladding, milling
Annotation:	The thesis deal with a construction of the hybrid machine. The thesis includes a research of the current state of hybrid machines and a practical part dealing with the design and construction of the machine. The drawings of the construction are enclosed.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle práce	10
3	Technologie Laser Cladding	11
4	Rešerše hybridních strojů	14
4.1	Příklady hybridních strojů	17
4.1.1	DMG MORI Lasertec 65 3D	17
4.1.2	Mazak INTEGREX i-400AM	18
4.1.3	Hermle C40 MPA	19
4.1.4	Hamuel Reichenbacher HSTM 1500	20
4.1.5	WFL - MILLTURN M80	21
4.1.6	Sodick OPM 250L	22
4.1.7	Matsuura Lumex Avance-25	23
4.2	Zhodnocení potenciálu hybridních strojů	25
5	Analýza systémů Laser Cladding	26
5.1	Laserové procesní hlavy pro navařování	26
5.1.1	Precitec	28
5.1.2	Laserline	29
5.1.3	Coherent	30
5.1.4	Fraunhofer IWS	31
5.2	Laserové zdroje	34
5.2.1	Laserline LDM	34
5.2.2	Laserline LDF	35
5.2.3	IPG Photonics YLS	35
5.3	Výběr konkrétních systému pro zabudování do stroje	37
5.4	Systém kontroly navařovacího procesu	38
6	Rozbor variant možného konstrukčního řešení	40
6.1	Stroj určený pro integraci navařovacích systémů	40
6.2	Varianta 1 - umístění navařovacích hlav na stroji	43
6.3	Varianta 2 - umístění navařovacích hlav na stroji	44
6.4	Varianta 3 - umístění navařovacích hlav na stroji	44
6.5	Varianta 4 - umístění navařovacích hlav na stroji	45
6.6	Výběr nejvhodnější varianty pro podrobné zpracování	46

6.7	Technologický postup při práci stroje	47
7	Konstrukční zpracování zvolené varianty	48
7.1	Konstrukce pohybových os navařovacích hlav	48
7.1.1	Specifikace pracovního rozsahu pohybových os	48
7.1.2	Popis konstrukce sestav pohybových os W_1 a W_2	50
7.1.3	Dynamika pohybových os	54
7.1.4	Kontrola tuhosti uložení navařovacích hlav	57
7.1.5	Volba základen pro lineární vedení pohybových os	58
7.1.6	Návrh elektronické části pohonu pohybových os	59
7.1.7	Definice požadavků na konstrukční změny stroje	60
7.2	Řešení krytování prostoru vřeteníku	62
7.3	Konstrukce systému zavírání prostoru vřeteníku	63
7.4	Řešení systému automatické výměny nástrojů	64
7.5	Řešení krytování stroje	67
7.6	Řešení periférií hybridního stroje	68
7.7	Souhrn nákladů na výrobu prototypu	70
7.8	Předpokládaný výkon stroje v hybridním režimu	74
8	Závěr	75
9	Seznamy	76
9.1	Seznam literatury	76
9.2	Seznam obrázků	79
9.3	Seznam tabulek	81
9.4	Seznam použitého softwaru	82
9.5	Seznam příloh	83
9.5.1	Výkresová dokumentace	83
9.5.2	Textové přílohy	85
9.5.3	Elektronické přílohy	85

Přehled použitých veličin a jednotek

a	$[m.s^{-2}]$	Zrychlení
D_U	$[mm]$	Průměr kruhové upínací desky
F	$[N]$	Zatěžující síla
h	$[m.rad^{-1}]$	Stoupání kuličkového šroubu
J_M	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti hřídele motoru
J_{RED}	$[kg.m^2]$	Redukovaný moment setrvačnosti
J_S	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
k_i	$[N/\mu m]$	Tuhost vozíku v normálovém směru
k_h	$[N/\mu m]$	Tuhost na konci hlavy
L	$[mm]$	Vzdálenost polohy dojetí
L_K	$[mm]$	Vzdálenost mezi vozíky
L_V	$[mm]$	Vzdálenost od konce hlavy k horní skupině vozíků
m	$[kg]$	Hmotnost
M_k	$[N.m]$	Krouticí moment
M_{kRED}	$[N.m]$	Redukovaný krouticí moment
n	$[min^{-1}]$	Otáčky servomotoru
P	$[mm]$	Stoupání kuličkového šroubu
t	$[s]$	Čas
X	$[mm]$	Vzdálenost osy navařovací hlavy od osy vřetene
X_C	$[mm]$	Celkový rozsah osy X
X_P	$[mm]$	Požadovaná vzdálenost zvětšení osy X
X_R	$[mm]$	Vzdálenost osy upínací desky od osy vřetene ve směru osy X
Z	$[mm]$	Rozsah osy W
Z_G	$[mm]$	Bezpečnostní přídavek
Z_K	$[mm]$	Vzdálenost mezi kruhovou upínací deskou a nejvyšším bodem kolíbký
Z_V	$[mm]$	Vzdálenost mezi koncovým bodem nástroje a koncovým bodem navařovací hlavy

Přehled použitých indexů

1	Působící na straně lineární osy W_1
2	Působící na straně lineární osy W_2
b	Bez uvažování zatěžující síly
p	Proti směru zatěžující síly
v	Ve směru zatěžující síly

1 Úvod

Tato práce se zabývá konstrukcí hybridního stroje. Koncept hybridních strojů je nový v oblasti výrobních strojů a své uplatnění teprve nachází. Vývoj v této oblasti, je úzce spjat s vývojem dalších odvětví, s kterými úzce souvisí. Předně se jedná o rozvoj v oblasti aditivních technologií výroby, zvláště pak o vývoj v oblasti laserových systémů. O aktuálnosti tématu svědčí fakt nedávného zařazení strojů pro aditivní výrobu, v rámci evropského trhu a pod autoritou evropského sdružení CECIMO, do kategorie výrobních strojů „Machine Tools“ vedle strojů obráběcích a tvářecích. Hlavní motivací vzniku hybridních strojů je spojení aditivních technologií se substraktivními v jednom pracovním prostoru a využití synergie obou těchto procesů.

Tlak na zkracování času potřebného k výrobě nového produktu nebo součásti přispívá k rozvoji hybridních strojů, které jsou v této oblasti velkým příslibem. Aditivní technologie umožňuje variabilitu tvaru při návrhu součásti a zároveň při požadavku na přesnost nebo jakost ploch je tohoto možno dosáhnout obráběním. Spojení aditivní a substraktivní technologie má jako další výhodu zkrácení vedlejších neproduktivních časů. Odpadají činnosti jako přemísťování a upínání obrobku mezi operacemi což navíc vylučuje možnou chybu při nepřesném upnutí. Zároveň se začínají rozvíjet CAM softwary určené právě pro hybridní výrobu. V jednom prostředí bude možné na základě CAD modelu zvolit strategii nanášení materiálu i obrábění s výstupem v ISO kódu pro hybridní stroj, v jehož systému musí samozřejmě být příslušné funkce.

V úvodu této práce je krátce představena technologie laserového navařování kovů nazývaná „Laser Cladding“. Následuje rešeršní část zaměřená na komerční a experimentální hybridní stroje s posouzením jejich potenciálu a možného využití. V další části práce jsou analyzovány laserové systémy pro navařování kovového prášku a drátu vhodné pro zabudování do pracovního prostoru frézovacího stroje MCV 1000 5AX z produkce firmy KOVOSVIT MAS, a.s. Na základě zvolených laserových systémů jsou navrženy varianty konstrukčního řešení integrace těchto systémů do stroje. Zvolená varianta je konstrukčně zpracována na úrovni výrobní výkresové dokumentace. Dále jsou definovány další nutné konstrukční úpravy stroje. V závěru práce je představen souhrn nákladů na výrobu prototypu a je uveden předpokládaný výkon stroje v hybridním režimu práce.

2 Cíle práce

- Hlavním cílem práce je konstrukčně zpracovat návrh přestavby frézovacího stroje MCV 1000 5AX na stroj hybridní, umožňující navařovat kovy pomocí laseru
- Dílčí cíle plynoucí přímo ze zadání DP:
 - Představit technologii Laser Cladding
 - Provést rešerši komerčních a experimentálních hybridních strojů
 - Provést analýzu laserových systémů pro navařování práškem a drátem vhodných pro zabudování do stroje MCV 1000 5AX
 - Vybrat vhodné laserové systémy pro navařování práškem a drátem pro zabudování do stroje v jednom pracovním prostoru
 - Provést rozbor variant konstrukčního řešení integrace systémů laser cladding do stroje MCV 1000 5AX
 - Provést analýzu výhod a nevýhod variant konstrukčního řešení integrace a zvolit nejvhodnější uspořádání pro podrobné zpracování
 - Konstrukčně zpracovat zvolenou variantu a popsat nutné konstrukční úpravy, které si integrace dvou laserových systémů vynutí
 - Definovat požadavky na další konstrukční úpravy stroje
 - Koncepčně vyřešit krytování stroje, systém AVN, úpravy nosné struktury, úpravy pohonů, periférií a agregátů
 - Shrnout náklady na výrobu prototypu a popsat předpokládaný výkon stroje

3 Technologie Laser Cladding

Díky rozvoji v oblasti laserových technologií a zlevňování laserových zdrojů se laserové aplikace stále více uplatňují v mnoha oborech lidské činnosti. V průmyslu lze laser využít k mnoha procesům, jako laserové řezání, kalení, gravírování a v neposlední řadě k laserovému navařování neboli laser claddingu. Technologie laser cladding spadá do kategorie 3D tisku kovu. Obecně je touto technologií přídavný materiál ve formě prášku, drátu nebo pasty taven laserovým paprskem spolu s podkladovým materiálem za vzniku pevné metalurgické vazby.

Laser cladding se vyznačuje několika pozitivními vlastnostmi [1] (str. 35-37). Jedná se zřejmě o nejlepší techniku pro vytváření funkčních povlaků na povrchu součástí. Vysoká materiálová flexibilita a možnost kombinace materiálů je další nespornou výhodou. Navařený materiál se vyznačuje jemnou mikrostrukturou díky rychlému chladnutí návaru, což je spojeno i s nízkou deformací podkladového materiálu a nízkým roztečením návaru.

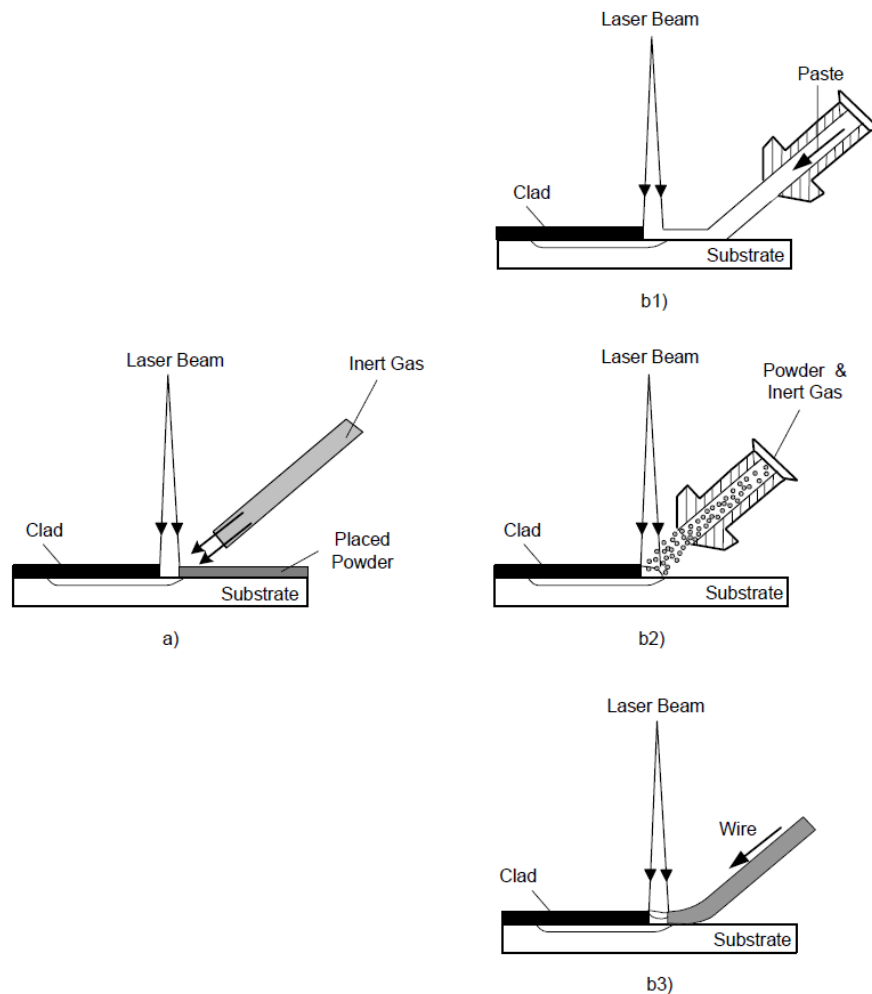
V zásadě lze podle [1] (str. 57-62) laser cladding rozdělit na čtyři základní metody dle charakteru a způsobu dopravení přídavného materiálu do pracovního prostoru:

- a) Pre-placed powder cladding
- b) Powder injection cladding
- c) Wire feeding cladding
- d) Paste cladding

Metoda pre-placed powder cladding jinak známá jako „Direct Metal Laser Sintering“ (DMLS) nebo „Selective Laser Sintering of Metals“ (SLSM), spočívá v nanášení tenké vrstvy prášku na podkladový materiál, který je posléze spékán (sintrován) laserovým paprskem v požadovaných místech, jak je zobrazeno na obrázku (1-a). K nanášení vrstvy prášku je nutné speciální zařízení, přičemž tloušťka nanášené vrstvy je často 50 μm . Nespečený prášek pak slouží jako podpůrný materiál umožňující vytvářet struktury s větším sklonem stěn. Po dokončení navařování je nespečený prášek odstraněn. Tato metoda je díky své povaze někdy označována jako dvou-kroková. Opakují se kroky nanášení prášku a sintrování, dokud není vytvořena požadovaná struktura.

V současné době nejvíce využívanou metodou laserového navařování je powder injection cladding, také často označovanou jako „Direct Metal Deposition“ (DMD) nebo „Direct

Energy Deposition“ (DED). V této metodě zobrazené na obrázku (1-b2) je přídavný materiál ve formě prášku vháněn do místa zaostření laserového paprsku (spotu) inertním plynem, kde je taven. V důsledku relativního pohybu procesní hlavy a podkladu vzniká návarová housenka s požadovanými rozměry. Existuje široká škála materiálů určených pro laserové navařování práškem, jedná se o různé druhy ocelí včetně nástrojové a nerezové, bronzové a mosazné slitiny, inconel, slitiny hliníku, atd.



obr. 1: Metody laser claddingu [1]

Alternativním řešením k metodě powder injection cladding je wire feeding cladding zobrazena na obrázku (1-b3), jenž využívá za přídavný materiál navařovací drát. V porovnání s metodou powder injection cladding se jedná o levnější řešení z hlediska ceny přídavného materiálu. Za přídavný materiál lze použít běžné dráty určené pro svařování, ať už plné nebo trubičkové. Výhodou je také maximální využití přídavného materiálu, ve srovnání s metodou powder injection cladding, u které vždy dochází k materiálovým ztrátám. Autoři odborných publikací se neshodují, která z těchto metod dosahuje kvalitnějších návarů [1] (str. 60-61), [2] (str. 72-76), ale shodují se na tom, že metoda využívající

k navařování drátu je citlivější na výkyvy procesních parametrů. Problémem této metody může být také nekontinuální proudění nataveného kovu na konci drátu do místa návaru, tomu je možné předejít vhodnou volbou procesních parametrů.

Nejméně rozšířeným druhem je paste laser cladding, jak ukazuje obrázek (1-b1), přídavný materiál je přiváděn ve formě pasty. Tato pasta je tvořena směsí kovového prášku a vhodného pojiva, které se musí při navařování odpařit. Pro optimální kvalitu návaru je nutné dodržet konstantní přiváděné množství pasty, což se ukázalo jako problematické [1] (str. 62). Další nepříznivé vlastnosti jako větší porezita návaru a citlivost na stabilitu procesních parametrů nepřispívají k většímu rozvoji této metody.

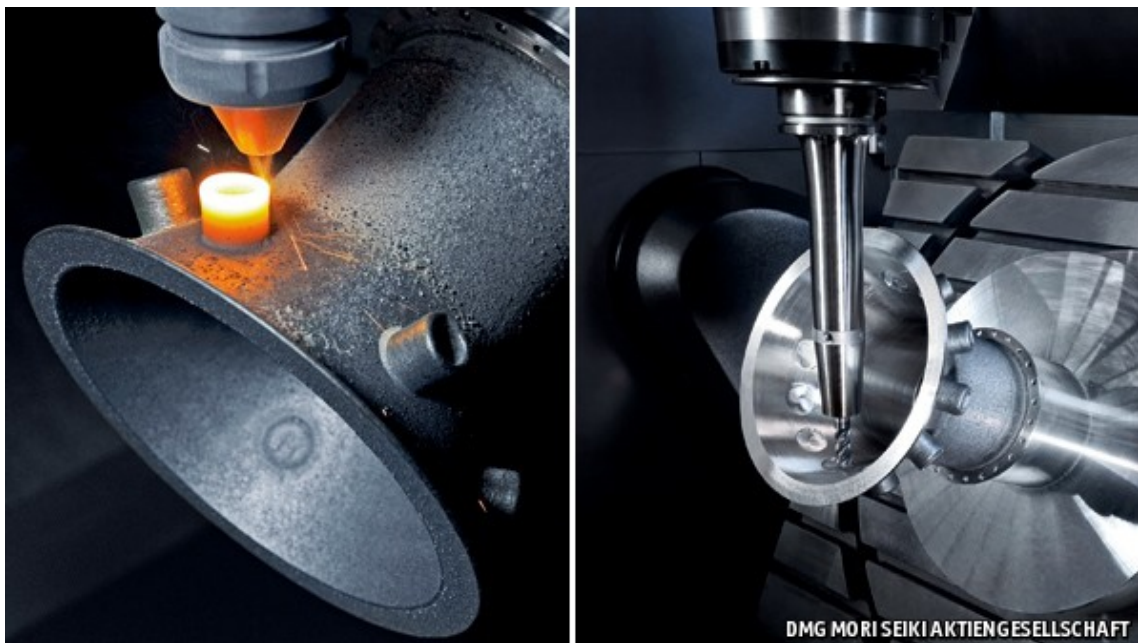
Laser cladding nalézá uplatnění v různých aplikacích průmyslu [1] (str. 40-50), [3] (str. 3-5). Používá se k opravě a repasování součástí, kde se na opotřebovaná místa navaří nový materiál a následně obrobí. Typicky se jedná o lopatky turbín letadlových motorů a turbín v energetice. Dále lze vytvářet funkční návary na strojních součástech pro zlepšení vlastností povrchu jako je tvrdost, pevnost, odolnost proti korozi nebo odolnost proti opotřebení. Při tvorbě vícevrstvé struktury je možné vytvářet funkčně odstupňované struktury střídáním materiálu ve vrstvách nebo vytvářet takzvané „smart structures“, kdy je do navařované struktury zavařen funkční prvek, příkladně se jedná o různé senzory nebo magnety. Velké uplatnění nalézá metoda pre-placed powder cladding v oblasti tvorby licích forem, kde není problém vytvářet složitý systém chladících kanálů, jinak těžko zhotovitelných. Významnou oblastí je samozřejmě rapid-prototyping a 3D tisk. Díky povaze technologie laser cladding je výroba tvarově složitých součástí mnohem rychlejší než konvenčními metodami jako odlévání nebo kování. Součást požadovaného tvaru je vyrobena bezprostředně přímo z CAD modelu a odpadá tak čas nutný například na výrobu formy. Z tohoto důvodu je laserové navařování využíváno při vývoji a výrobě součástí v kusové a malosériové výrobě.

Přes své možnosti a výhody je zde i několik nevýhod, které zpomalují rozšíření této technologie v širším měřítku. V první řadě se jedná o investičně náročnou technologii. U dnešních laserových zdrojů, ať už diodových, vláknových nebo pevnolátkových je účinnost stále ne příliš vysoká. K dalším problémům patří vysoká citlivost procesu na změny provozních parametrů, což v důsledku výrazně ovlivňuje kvalitu návaru. Jistě se jedná o relativně novou technologii, jejíž potenciál není ještě zdaleka prozkoumán a nabízí velké možnosti do budoucna.

4 Rešerše hybridních strojů

Od počátků strojírenské výroby bylo snahou provést co nejvíce operací na jedno upnutí obrobku, v ideálním případě vyrobit celou součást. To s sebou přinášelo celou řadu výhod a dodnes přináší. Ve většině případů to však ovšem nebylo možné z prostého důvodu technologických omezení strojů ve strojírenské výrobě. Tyto snahy vedly k vývoji strojů, jež v sobě integrují technologické operace, které dříve striktně náležely jednotlivým strojům pro danou operaci. [4]

Dnes jsou již běžné multifunkční obráběcí centra kombinující soustružnické, frézovací, vrtací a brousící operace. Objevují se i stroje slučující technologie běžného třískového obrábění s nekonvenčními metodami obrábění. Příkladem takových strojů jsou brusky nástrojů slučující klasické broušení s elektroerozivním obráběním (QXD 250 firmy Vollmer, S31/S41 firmy Studer). Dalším příkladem je soustruh s možností tepelné úpravy povrchu obráběných dílců díky integrované laserové jednotce (RNC 400 LaserTurn firmy Monforts). Samostatnou kapitolou jsou hybridní stroje, které spojují aditivní procesy výroby s procesy substraktivními. Za substraktivní technologii je ve většině případů považován proces třískového obrábění. [5]



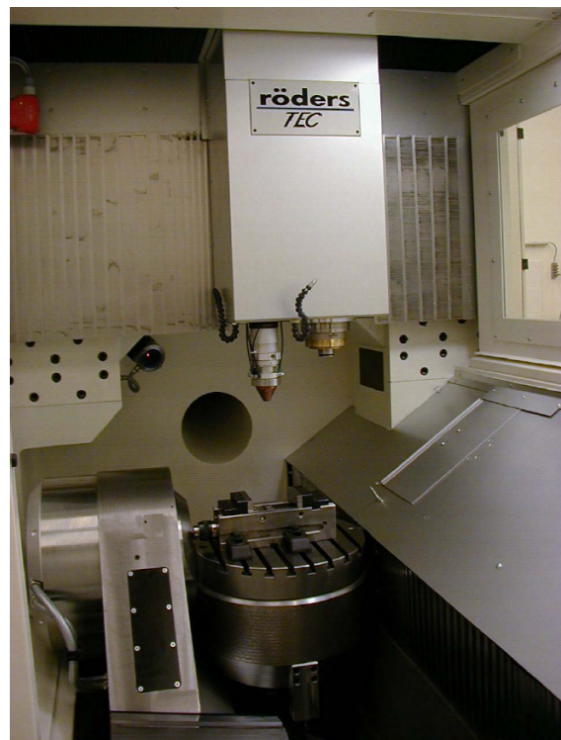
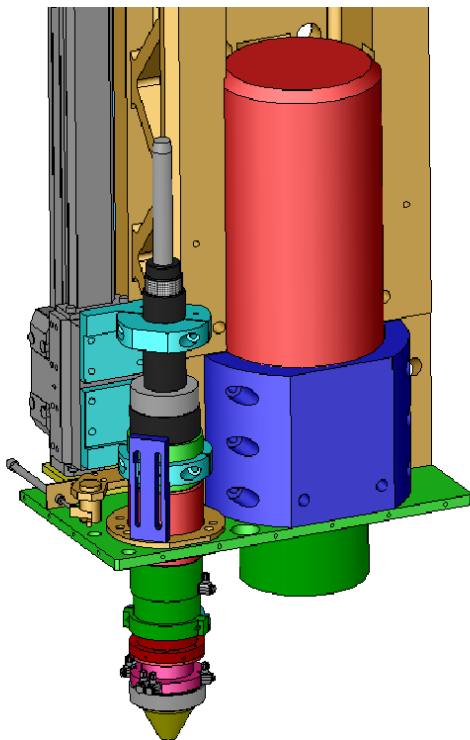
obr. 2: Výroba dílce na hybridním stroji Lasertec 65 3D DMG MORI [6]

Koncept hybridních strojů využívá výhod obou procesů, geometrická variabilita na straně aditivního procesu, přesnost a jakost povrchu na straně obráběcího procesu. Za aditivní metodu se v oblasti hybridních strojů považuje zpravidla laserové navařování. Aditivní

metodou je vytvořen dílec, a poté dojde k obrobení jeho funkčních ploch. Tím, že je vše provedeno na jednom stroji, odpadá nutnost přemísťování obrobku z jednoho stroje na druhý. Zkracuje se výrobní čas a odpadá nepřesnost, která by vznikla při opětovném upínání obrobku. Možnost přidávání a ubírání materiálu v krocích, umožňuje vytváření struktur, jinak těžko vyrobitelných. [7]

Jeden z prvních pokusů vytvořit hybridní stroj pochází od firmy Röders prezentovaný v odborném článku v roce 2004 [8]. Do pracovního prostoru 5osé frézky Röders RFM 600 DS byla integrována technologie powder injection cladding, tedy do kategorie b) dle rozdělení v kapitole 3. Jako zdroj byl použit Nd:YAG pevnolátkový laser. V článku jsou uvedeny dva možné způsoby integrace laserové optiky do pracovního prostoru stroje:

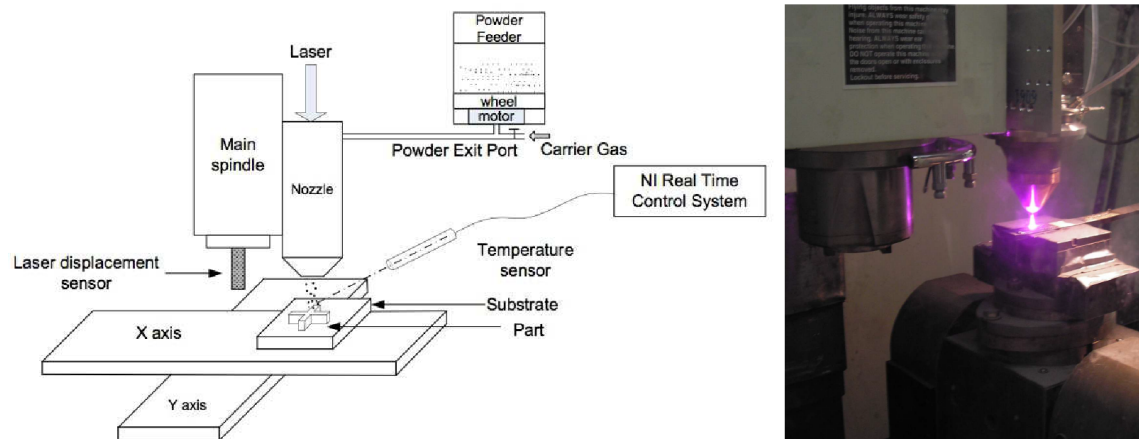
1. Laserovou optiku s tryskou je možné upnout do vřetene jako běžný nástroj. Zachová se tak pracovní rozsah ve vodorovné rovině XY i při procesu navařování, ale ve svislém směru osy Z dojde k značnému omezení rozsahu. Navíc toto řešení si vyžaduje dodatečné místo pro odkládání navařovací hlavy, jelikož ji nelze uložit do zásobníku nástrojů.
2. Laserová optika s tryskou je přichycena na boku vřetene. Zde dojde k redukcí pracovního rozsahu při navařování v rovině XY, ve směru osy Z však nenastane žádné omezení.



obr. 3: Navařovací hlava a hybridní stroj - Röders [8]

Röders se rozhodlo realizovat druhou zmíněnou variantu. Navařovací hlavu připevnili na pneumatický pohon umístěný laterálně k vřetení stroje. Toto řešení je zobrazeno na obrázku (3). Navařovací hlava je buď ve vysunutém, nebo zasunutém stavu, kdy je chráněna od frézovacího procesu. Řízení pohybu navařovací hlavy pak probíhá stejně jako při obráběcím procesu.

Za zmínění stojí systém hybridní výroby vzniklý v laboratořích Missouri University of Science and Technology koncem 90-tých let [9] (str. 227-230). Základem je 5osé vertikální frézovací centrum Fadal 3016L s aditivním procesem zastoupeným systémem laserové práškové depozice dopované diodovým laserem Nuvonyxo výkonu 1 kW. Schéma tohoto hybridního systému je zobrazeno na obrázku (4) vlevo. Zde je navařovací hlava pevně připevněna k vřetení bez možnosti jakéhokoliv pohybu. Takováto konfigurace je jednoduchá konstrukčně ale nevýhoda se jeví v možnosti kolize tvořeného dílce buď s nástrojem upnutým ve vřetení nebo s navařovací hlavou. Z důvodu ochrany zařízení je systém opatřen senzorem zabraňujícím kolizi navařovací hlavy s upínací deskou.



obr. 4: Pracovní prostor hybridního stroje - Missouri University of Science and Technology [10] (vpravo), a jeho schéma [9] (vlevo)

Motivací tvorby tohoto hybridního stroje byla snaha o zavedení výrobní infrastruktury pro rapid-prototyping k vědeckým a vzdělávacím účelům univerzity. Navařované materiály jsou prášky nástrojové oceli a titanu vháněné do navařovací hlavy komerčním systémem dopravy prášku určeným pro nástřik plasmou. Kontrola procesu je poměrně propracovaná, vedle teplotního senzoru je použit i senzor výchylky laseru, který snímá vzdálenost navařovací hlavy od návaru a ta je udržována na konstantní hodnotě. S použitím transformační matice je řízen pohyb navařovací hlavy standardními G a M funkcemi ISO kódu. Hybridní stroj při procesu nanášení materiálu je vyobrazen na obrázku (4) vpravo.

4.1 Příklady hybridních strojů

Na trhu lze dnes nalézt několik komerčně nabízených hybridních strojů. Výrobci jsou zpravidla velké firmy s dobrým jménem v oblasti výroby obráběcích strojů. Jedná se například o firmy DMG MORI, Mazak či Matsuura. V současnosti lze hybridní stroje rozdělit do dvou skupin:

- a) Stroj s třískovým obráběním (frézování, soustružení) + laserové navařování technologií powder injection cladding
- b) Stroj s třískovým obráběním (frézování) + aditivní technologie pre-placed powder injection

Dále budou uvedeni zástupci obou skupin. Uváděné stroje se liší především svými technologickými možnostmi. Každý z nich je vhodnější na výrobu určitého typu součásti. Rozdíly jsou samozřejmě i v dalších parametrech jako ve velikosti pracovního prostoru, výkonnosti, atp. U každého stroje je uvedeno maximum dostupných informací. Úvodem je třeba konstatovat, že se jedná téměř výhradně o prototypy nebo novinky na trhu bez dostupné zpětné vazby od reálných uživatelů těchto strojů.

4.1.1 DMG MORI Lasertec 65 3D

Hybridní stroj koncernu DMG MORI integruje aditivní technologii na 5osou frézku DMU 65. Aditivní technologie je zastoupena laserovou hlavou pro navařování práškem (powder injection cladding), s kterou je tvorba návarů podle DMG 10krát rychlejší než s použitím technologie pre-placed powder injection. Svou konfigurací stroj spadá do kategorie b) podle rozdělení v kapitole 4.1. Laserová hlava je osazena standardní upínacím rozhraním HSK, je tedy v případě potřeby upnuta do vřetene podobně jako nástroje. Výhodou tohoto řešení je možnost změny laserové hlavy podle potřeby změny parametrů návaru, nikoliv však automaticky v rámci jedné operace navařování. Stroj disponuje pracovním prostorem pro obrobky $\varnothing 600$ mm a 400 mm výšky, s maximální hmotností 600 kg. Ergonomický design stroje umožňuje přístupnost k pracovnímu prostoru předními dveřmi o šířce 1 430 mm. Jako pozitivum uvádí výrobce nízký zástavbový prostor 12 m². Jedním návarem lze navařovat struktury s tloušťkou 0,1 ÷ 5 mm, v závislosti na laseru a geometrii trysky, kterou je do spotu přiváděn prášek. Vytvářené kontury nepotřebují podpůrný materiál, např. přírubové a kuželové dílce.



obr. 5: Lasertec 65 3D DMG MORI [11]

Možnostmi výroby na stroji je tvorba nových dílů (tělesa turbín, trysky, prvky chladičích systémů s vnitřní strukturou), opravou stávajících dílů (turbíny proudových motorů, kola Peltonových turbín, oprava vstřikovacích forem) a kovovým povlakováním (ložisková tělesa, hřídele). V popisu stroje jsou uvedeny ozkoušené a testované materiály pro navařování, například nerezová ocel, inconel 625/718, materiál na bázi wolframu a uhlíku, slitiny bronzu a mosazi, nástrojové oceli. Při navařování je deklarováno 99,8% vyplnění materiálem, tzn. minimální porozita vzniklé struktury. Mechanické vlastnosti navařeného materiálu jsou téměř shodné s obecnými hodnotami mechanických vlastností daného materiálu. Se strojem je dodáván jednotný softwarový balíček určený pro hybridní výrobu obsahující CAD a CAM moduly, postprocesor pro generování NC kódu a program 3D simulací pro kontrolu před kolizemi. Software je nadstavbou známé platformy NX Siemens, samostatně se však neprodává. [11]

4.1.2 Mazak INTEGREX i-400AM

S konceptem hybridního stroje přišla i Japonská firma Mazak. Na své 5osé multifunkční obráběcí centrum implementovala modul laserové práškové depozice, odpovídající metodě powder injection cladding, rozšiřující tak schopnosti základního stroje. Stroj disponuje

navářovací hlavou pro vysoký výkon a hlavou pro vysokou přesnost návaru (high-speed and fine heads). V nabídce je i hlava pro laserové popisování. Hlavy jsou uloženy v zásobníku nástrojů a upínány přes nástrojové rozhraní podobně jako na stroji Lasertec 65 3D, s možností automatické změny navařovací hlavy během výrobního procesu. Zdrojem je zde vláknový laser. Při navařování je možné kombinovat různé kovy, což umožňuje opravu opotřebovaných nebo poškozených dílů, jako jsou lopatky letadlových turbín. Mazak vyzdvihuje obráběcí schopnosti svého stroje, INTEGREX i-400 nese označení Multi-Tasking díky dvěma vřetenům pro soustružnické a frézovací operace. Stroj může být doplněn protivřetenem nebo NC řízeným koníkem. [12]



obr. 6: Mazak INTEGREX i-400 [12]

4.1.3 Hermle C40 MPA

Své portfolio rozšířila o hybridní stroj firma Hermle integrací modulu aditivní technologie MPA (Metal Powder Application) na svou 5osou frézku Hermle C40. Vyvinutá technologie je univerzálním nástrojem pro generativní tvorbu velkoobjemových komponent s širokým polem aplikací. Hlavní využití výrobce vidí v oblasti nastříkávání a tvorbě forem k lití. Hybridní technologií vyráběné komponenty dosahují velikosti 500 mm v průměru. Technologie MPA stojí na principu rozprašování kovového prášku na podklad vrstvu po vrstvě. Dosahuje se toho zrychlením částic na vysokou rychlost nosným plynem pomocí Lavalovi trysky. Částice se po dopadu na podklad plasticky deformují, dochází k místním tlakům převyšujícím 10 GPa a teplotám převyšujícím 1 000 °C. V důsledku tohoto procesu se vytváří vazba mezi podkladem a částicemi kovu. Tato technologie se také nazývá „Cold Spraying“. Rychlost tvorby struktury přesahující 200 cm³ za hodinu tryskou o průměru několik milimetrů, předurčuje použití technologie MPA na tvorbu struktur s poměrně

velkým objemem a velkými plochami. Tento hybridní stroj je díky unikátní generativní technologii výjimečný a nespadá ani do žádné z kategorií uvedených v kapitole 4.1.

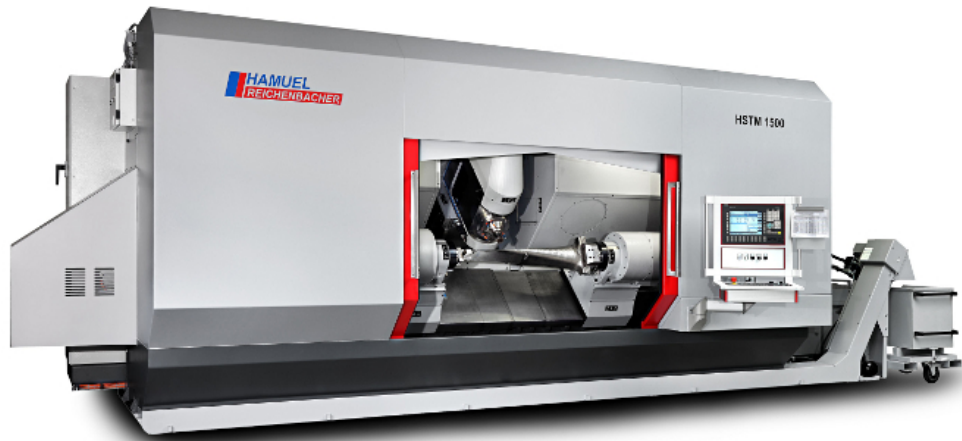
Materiály běžně použitelné pro technologii MPA jsou různé druhy oceli včetně nerezové, měď, bronz, titan a hliník. V jedné struktuře je možno použít rozdílných materiálů, střídání nanášených materiálů a mezikrového obrábění umožňuje vyrábět masivní struktury tvořené dvěma a více materiály. Se speciálním podpurným materiálem je možné tvořit dutiny, kanály a struktury s podříznutým obrysem. Tento podpurný materiál je vodou rozpustný a na konci procesu tvorby součásti se oplachem odstraní. Možné následné tepelné zpracování optimalizuje mikrostrukturu materiálu a zlepšuje výsledné mechanické vlastnosti. Hermle vyvinulo speciální CAD/CAM software pro použití MPA technologie s názvem MPA studio. Slouží k tvorbě programů zahrnující aditivní metodu spolu s obráběním v jednom procesu. [13]



obr. 7: Hermle C40 MPA [14]

4.1.4 Hamuel Reichenbacher HSTM 1500

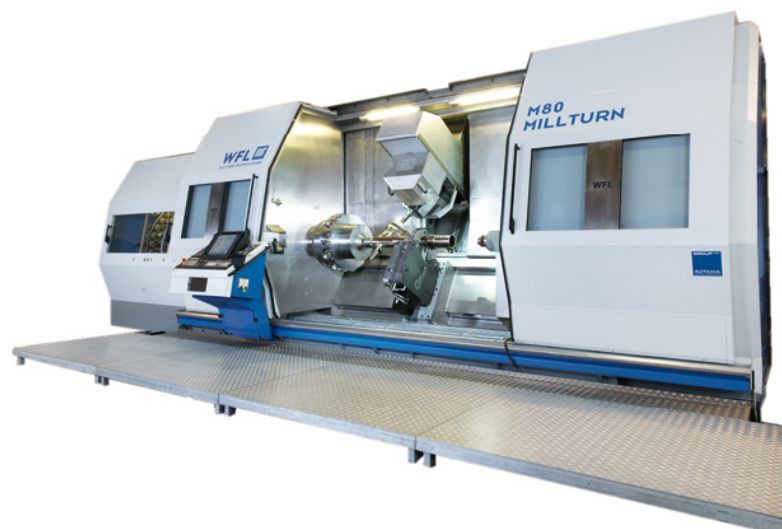
HSTM 1500 je hybridní stroj německé společnosti Hamuel Reichenbacher. Stroj má poměrně velký pracovní prostor především ve směru osy hlavního soustružnického vřetene. Díky dvěma protilehlým vřetenům je stroj ideální na opravu velkých turbínových lopatek, které se upínají mezi oběma vřeteny. Navařovací prášková hlava se připojuje přes HSK kužel do frézovacího vřetene, stejně jako frézovací nástroje, brusné nástroje a měřicí sondy. Takto vybavený stroj má velké možnosti ve zhotovování tvarově složitých ploch s velkou přesností. [15]



obr. 8: Hamuel Reichenbacher HSTM 1500 [15]

4.1.5 WFL - MILLTURN M80

Na výstavě Emo 2015 byl předveden hybridní stroj firmy WFL Millturn M80. V základním provedení se jedná o 5osé multifunkční obráběcí centrum doplněné modulem laserového navařování. Laserová hlava a zdroj od firmy Laserline umožňuje tvořit návar tloušťky až 6 mm. Laserovou navařovací hlavu je možné vyměnit během procesu tvorby dílce za hlavu určenou k povrchovému kalení. Jelikož točný průměr stroje je 1 000 mm, nepředpokládá se tvorba celého dílce pouze technologií laserového navařování. Spíše se bude uplatňovat postup navařování menších a složitějších prvků na základní dílec, což se jeví jako výhodnější, než opracovávání plného materiálu. [16]



obr. 9: WFL - MILLTURN M80 [16]

4.1.6 Sodick OPM 250L

Japonská firma Sodick nabízí hybridní stroj OPM 250L, ačkoliv je prezentován jako pokročilá 3D tiskárna na výrobu kovových dílců. Tento hybridní stroj spadá do kategorie b) podle rozdělení v úvodu kapitoly 4.1. Hlavní oblast využití stroje společnost vidí především ve výrobě forem pro lití plastů. Spojením aditivní technologie laserového sintrování předvrstveného prášku a vysokorychlostního obrábění frézováním je stroj schopen vyrábět velmi komplexní tvary, zvláště pak trojrozměrné potrubní systémy nebo hluboce žebrované dílce. Proces výroby probíhá následovně. Povlakovací lišta nanese na podklad rovnoměrnou vrstvu prášku o tloušťce 0,05 mm (recoating process), poté laserová hlava sintruje prášek na požadovaných místech, kde se taví a následně tuhne v požadovaných tvarech. Sodick tedy využívá metodu pre-placed powder cladding pro navařování prášku. Takto je vždy vysintrováno 10 vrstev, přírůstek tedy činí 0,5 mm, následuje proces obrobení vzniklé struktury, to se opakuje stále ve stejném taktu, dokud není proces výroby dokončen. Pohyb pracovního stolu ve svislém směru je realizován postupným klesáním stolu vždy o danou hodnotu, nanášení prášku tedy probíhá vždy ve stejné rovině. Energii sintrovací hlavě dodává Ytterbium vláknový zdroj laseru o výkonu 500 W a vlnové délce 1 070 nm. Prostředí při procesu navařování chrání přiváděný inertní plyn (dusík) do pracovního prostoru.



obr. 10: Sodick OPM 250L [17]

Při návrhu forem s integrovaným chladicím potrubím je využíváno CAE softwarů, pro optimální vstříknutí taveniny a co nejrychlejší možné ztuhnutí. Celý proces tuhnutí je kontrolován teplotními čidly integrovanými ve formě. S použitím uvedených technologií lze dosáhnout zkrácení vstřikovací cyklu až o 30% a také velikost smrštění je zhruba poloviční oproti běžným formám. Již zmiňované softwarové jednotky pro CAM a CAE

doplněné o CAD modul vyvinuté ve spolupráci s OPM laboratory jsou dodávány se strojem jako jednotný softwarový balíček. Postprocesorem vytvořený NC kód je zpracováván NC jednotkou „LN2RP“ vyvinutou speciálně pro stroj OPM 250L. [17]

4.1.7 Matsuura Lumex Avance-25

Další Japonskou společností, která má ve své nabídce hybridní stroj je firma Matsuura. Svým provedením a technologickými vlastnostmi je stroj obdobou již zmíněného OPM 250L firmy Sodick. Prášek je spékán laserem v připraveném loži a to stejným způsobem, tedy po vrstvách 0,05 mm a obráběný tvar po deseti vytvořených vrstvách. Výrobní možnosti jsou také téměř shodné, se zaměřením na výrobu forem s vnitřním chladicím systémem. Tento fakt staví stroj Lumex Avance-25 do role přímého konkurenta stroje společnosti Sodick. [18]



obr. 11: Matsuura Lumex Avance-25 [19]

tab. 1: Parametry hybridních strojů [20]

Stroj	DMG MORI Lasertec 65 3D	Mazak INTEGREX i-400AM	Hermle C40 MPA	Hamel Reichenbacher HSTM 1500	WFL MILLTURN M80	Sodick OPM 250L	Matsura Lumex Avance-25
Parametr							
Aditivní proces	¹ PIC	PIC	Cold spraying	PIC	PIC	² PPC	PPC
Substruktivní proces	5osé CNC obrábění	5osé CNC obrábění	5osé CNC obrábění	5osé CNC obrábění	5osé CNC obrábění	3osé CNC obrábění	3osé CNC obrábění
Uložení nav. hlavy	Do vřetene	Do vřetene	Samostatná pozice	Do vřetene	-	Samostatná pozice	Samostatná pozice
Fréz. vřet. ot. [min^{-1}]	18 000	20 000	-	16 000	8 000	45 000	45 000
Výkon laseru [W]	2 500	-	-	-	-	500	400
Velik. výř. AM [mm]	$\varnothing 600 \times 400$	-	-	-	-	250 x 250 x 250	260 x 260 x 100
Rychlost AM [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$]	1	-	1,5	-	-	-	-
Materiály	Ocel, inconel, bronz, mosaz	-	Ocel, měď, bronz, titan, hliník	-	-	Ocel	Ocel, titan, nikl
CAD, CAM, CAI	Siemens NX	-	MPA studio	Delcam power INSPECT, SHAPE, MILL	-	MARKS-MILL, OPM GenLaser, Optimizer, Verify	-
Přídavné funkce	-	Laserové gravírování, Jemná a hrubá tryska	Multi-metal deposition	Laserové grav., 3D scan, Kontrola, Leštění	Laserové kalení, Las. svařování	-	Vision-based monitoring

¹Powder Injection Cladding

²Pre-placed Powder Cladding

4.2 Zhodnocení potenciálu hybridních strojů

U uvedených hybridních strojů lze najít některé společné znaky. Ve všech případech uplatnění technologie powder injection cladding je aditivní technologie integrována do již existujícího obráběcího stroje. A v případě uplatnění technologie pre-placed powder injection pak stroje vychází společně z vertikálních frézovacích strojů a čistých DMLS tiskáren. Často jsou laserové navařovací hlavy upínány přes nástrojová rozhraní. Snahou je možnost změny šířky návaru ať už změnou celé navařovací hlavy nebo překonfigurováním trysky. Některé hybridní stroje jsou kromě aditivní laserové technologie vybaveny i jinou laserovou technologií, například k laserovému kalení nebo gravírování. Množství konstrukčních kovových materiálů zvládnutých pro zpracování pomocí hybridních strojů je zatím relativně malé a zahrnuje především nerezové a nástrojové oceli a dále titan a niklové slitiny. Jak se bude rozšiřovat paleta zpracovatelných materiálů, poroste potenciál v uplatnění strojů. Většina výrobců hybridních strojů zároveň dodává potřebný software určený pro hybridní výrobu. Základní parametry uvedených komerčních hybridních strojů jsou uvedeny v tabulce (1).

Některé pozitivní vlastnosti hybridních strojů již byli zmíněny, přesto se stále zkoumají nové možnosti jejich uplatnění. Větší rozšíření hybridních strojů je spojeno s jejich přímým využitím v průmyslu. Trh s hybridními stroji je zatím velmi úzký, ale začíná se postupně rozšiřovat. Pro tradiční výrobce obráběcích strojů se rozšíření portfolia o hybridní stroje stává konkurenční výhodou. V posledních letech s nabídkou hybridních strojů přišla na trh řada zavedených výrobců obráběcích strojů a další směry vývoje těchto strojů budou určeny především zájmem zákazníků.

5 Analýza systémů Laser Cladding

V kapitole 3 byly uvedeny čtyři základní metody navařování technologií laser cladding. Pro účely této práce budou dále uváděny laserové systémy odpovídající metodám b) a c), tedy powder injection cladding a wire feeding cladding. Metoda a) pre-placed powder cladding nebude uvažována jako vhodná pro zabudování do stroje MCV 1000 5AX, jelikož její aplikace by vyžadovala integrování systému nanášení prášku do stroje, což je na 5osém frézovacím stroji prakticky neřešitelné. Problémem je osa A stroje, při její rotaci se mění směr gravitačního zrychlení vůči kruhové upínací desce a nelze zajistit udržení nanesené vrstvy prášku v obecné poloze.

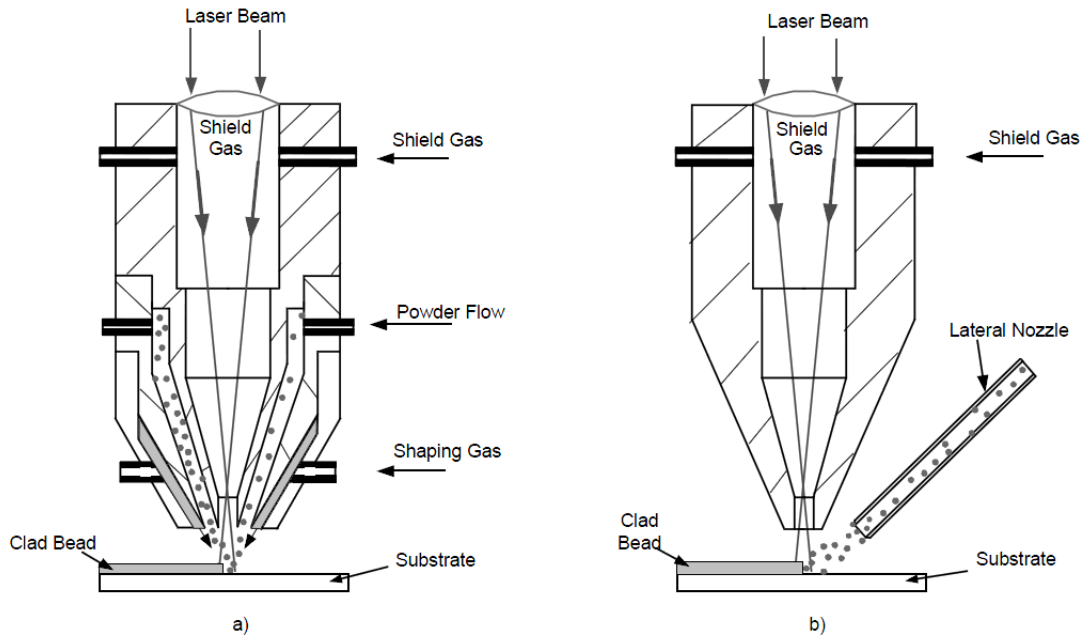
Systémy laserového navařování lze rozdělit na dvě hlavní části. První částí je procesní navařovací hlava obsahující potřebné optické prvky pro usměrnění a zaostření laserového paprsku a prvky pro přívod přídavného materiálu popřípadě další jako chladicí kanály, přívod inertního plynu, monitorování procesu, atp. Druhou částí je laserový zdroj, který generuje laserový paprsek požadovaného výkonu a kvality. V následujících kapitolách budou uvedeny konkrétní komerčně dostupné navařovací hlavy a laserové zdroje.

5.1 Laserové procesní hlavy pro navařování

Laserové procesní hlavy pro navařování technologií laser cladding se člení podle druhu trysky na dva typy [1] (str. 106).

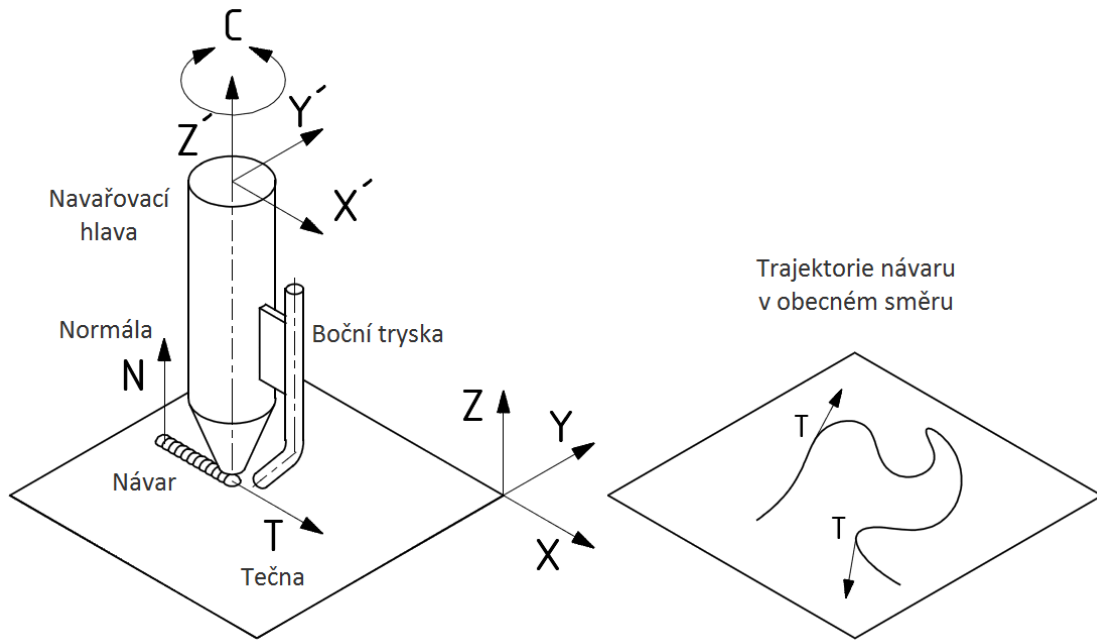
- a) S koaxiální přívodem materiálu do spotu
- b) S bočním přívodem materiálu do spotu

Oba typy navařovacích hlav jsou zobrazeny na obrázku (12). Typ s koaxiální tryskou (obr. 12-a) zaručuje absolutní směrovou nezávislost navařování. U druhého typu (obr. 12-b) je tato směrová nezávislost omezena.



obr. 12: Typy laserových procesních hlav [1]

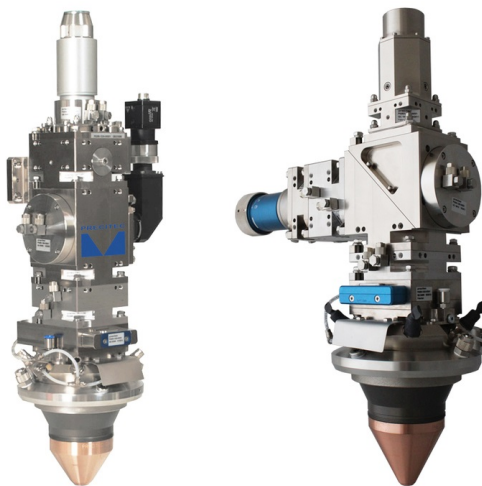
Případ navařování hlavou s boční tryskou ukazuje obrázek (13). Rovinu navařování představuje rovina XY . Vzhledem k poloze navařování a aktuální trajektorii návaru lze zavést normálu a tečnu charakterizující okamžitý směr navařování. Normála představuje směrnici kolmého průmětu osy navařovací hlavy do roviny navařování. Tečna je směrovým vektorem pohybující se navařovací hlavy v místě návaru. V případě navařování hlavou s bočním přívodem prášku je nezbytné, aby směr trysky přivádějící přídavný materiál byl v každém okamžiku navařování souhlasný s tečnou. Při zavedení souřadného systému navařovací hlavy a předpokladu polohy boční trysky v kladném směru osy X' hlavy, musí být souřadný systém navařovací hlavy vždy orientován tak, aby směr tečny a osy X' byl totožný. Toho lze dosáhnout natáčením řízené osy C navařovací hlavy. Rozsah natáčení boční trysky je však omezen z důvodu přívodu přídavného materiálu do trysky. Nelze tak nepřetržitě vytvářet návary s trajektoriemi vyžadující natočení hlavy mimo její rozsah. Z tohoto důvodu budou vybírány pouze hlavy s koaxiálním přívodem přídavného materiálu, u kterých je natočení kolem jejich podélné osy indiferentní vůči směru natočení tečny trajektorie, která je vodící křivkou návaru.



obr. 13: Navařovací hlava s boční tryskou

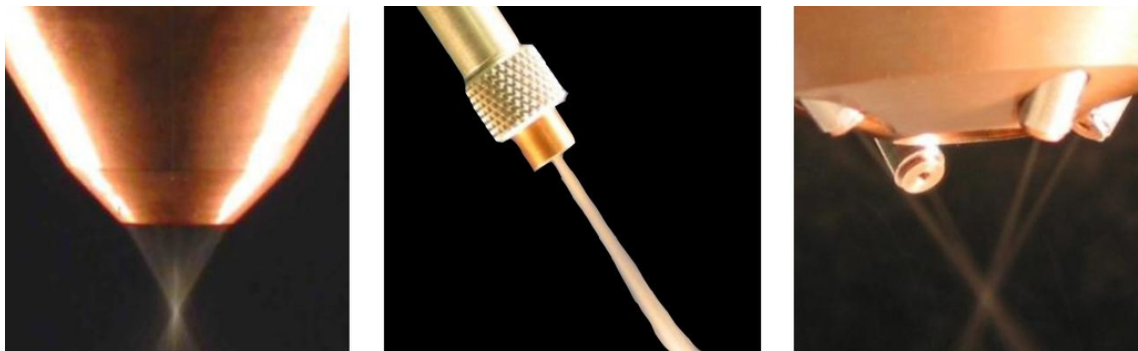
5.1.1 Precitec

Společnost Precitec je výrobcem komponent pro aplikace využívající laserové technologie. Nabízené procesní hlavy se vyznačují modulární stavbou, procesní hlavu lze tak nakonfigurovat přesně pro zamýšlené použití. Procesní hlavy jsou určeny pouze pro navařování práškem. Příklady možných konfigurací procesních hlav je zobrazen na obrázku (14). Jak lze vidět, je možné nakonfigurovat přívod laserového vlákna koaxiálně nebo pod úhlem 90°. Tato konkrétní procesní hlava nese označení YC 52, svými parametry uvedenými v tabulce (2) je vhodná pro navrhovanou aplikaci. [21]



obr. 14: Příklady konfigurace procesní hlavy YC52 - Precitec [21]

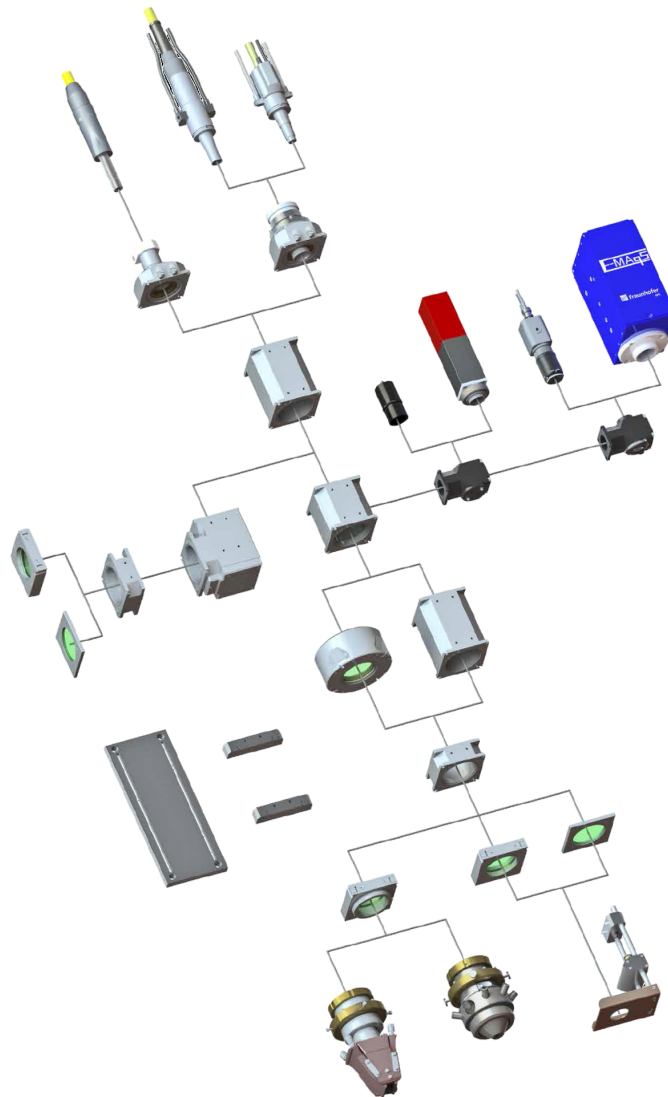
Důležitým aspektem je volba typu trysky pro přívod prášku. V nabídce lze volit ze tří základních typů, trysky jsou zobrazeny na obrázku (15). Každý z těchto typů je vhodný pro specifické použití. První typ na obrázku (15) vlevo, se nazývá koaxiální prstencová tryska. Výhodou je homogenní zaostření prášku v místě spotu v poměrně malém průměru, poměr využití prášku je také vyšší. Prášek lze smíchat s ochrannými plyny. Druhý typ, samostatná tryska na obrázku (15) uprostřed, je příkladem trysky s bočním přívodem materiálu. Jednou z výhod použití boční trysky je znatelně větší účinnost využití prášku, tedy větší poměr mezi navařeným práškem k prášku ztrátovému. Další výhodou je lepší možnost ochrany pracovního prostoru ochranným plynem. Poslední typ na obrázku (15) vpravo je koaxiální čtyřcestná tryska vhodná pro 3D aplikace a pro vysoké výkony laseru. Tato tryska má horší přístupnost. [21]



obr. 15: Typy trysek pro přívod prášku - Precitec [21]

5.1.2 Laserline

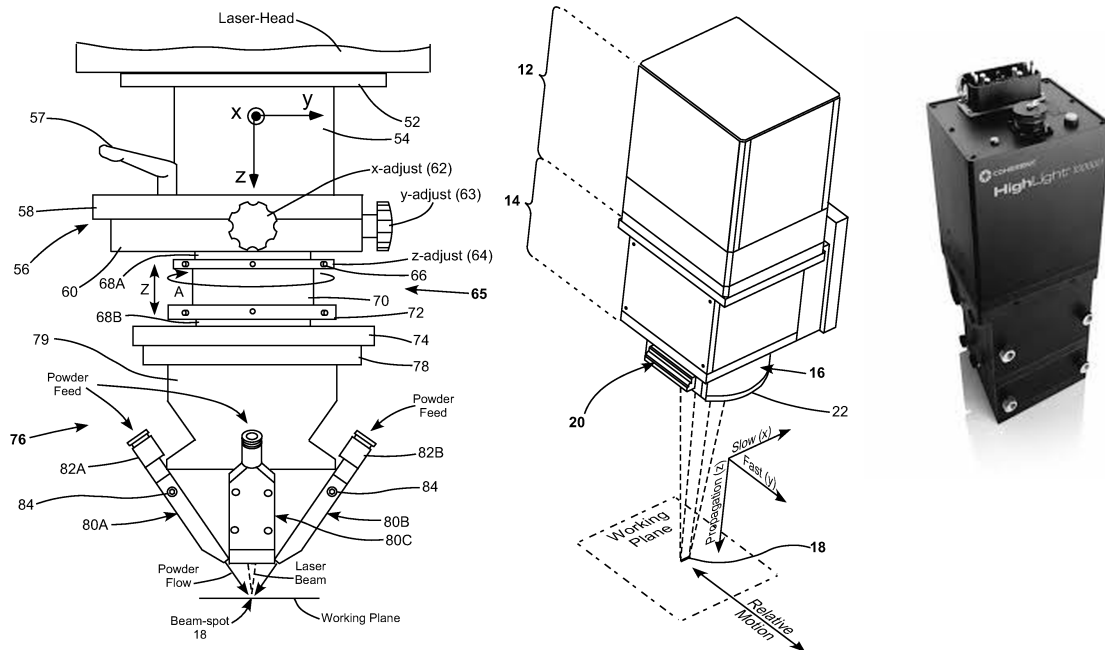
Společnost Laserline, podobně jako Precitec má zavedený modulární systém tvorby procesních hlav pro laserové technologie. Schéma modulární tvorby je zobrazeno na obrázku (16). Devízou je možnost kontroly procesu přes vložený pyrometr, CCD kameru nebo kameru snímající teplotní oblast návaru. V průběhu navařování lze snímat informace o teplotě a na základě toho přizpůsobit výkon přiváděného laserového paprsku, což vede ke stabilnějšímu průběhu návaru. Stejně jako Precitec nabízí i společnost Laserline různé typy trysek pro přívod prášku. Kromě toho je možné místo trysky pro prášek zvolit modul pro přívod drátu z boku. Hlavy pro laserové navařování spadají do série OTS, v tabulce (2) jsou uvedena technická data procesních hlav OTS-3 a OTS-5. [22]



obr. 16: Modulární design procesních hlav OTS - Laserline [22]

5.1.3 Coherent

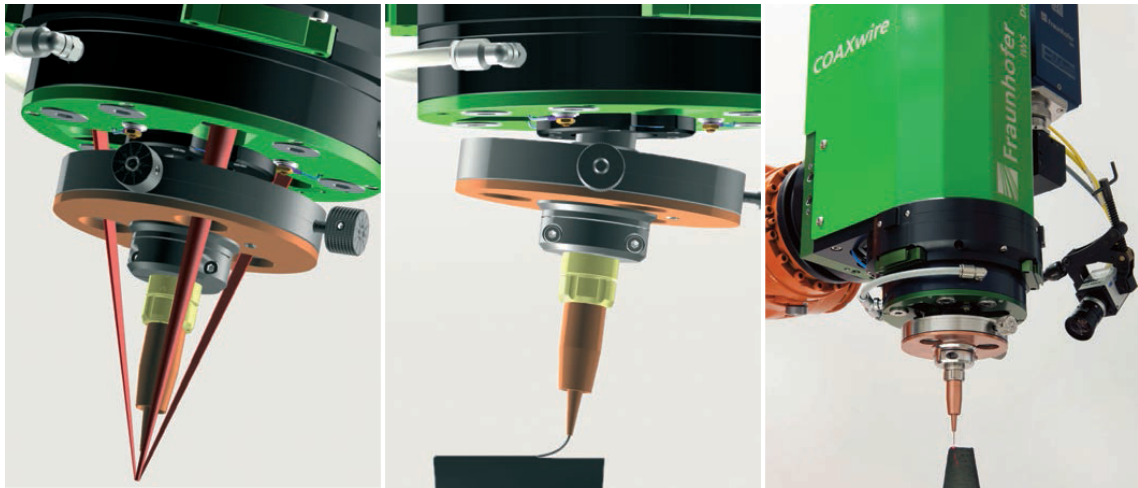
Společnost Coherent zabývající se laserovými technologiemi prezentuje laserové procesní hlavy HighLight D-Series určené pro výkony laseru 4, 8 a 10 kW. Hlavy jsou určeny jak pro laserové kalení, tak pro aditivní technologie, tedy navařování a svařování. Hlava je tvořena boxem obsahující optické prvky a tryskou. Lze volit z velkého množství trysek jak pro technologii laser cladding, tak pro další laserové technologie. Výhodou procesních hlav Coherent je jejich robustní provedení, zaručující dostatečnou tuhost a pevnost. Toto je vyváženo poněkud větší hmotností, která činí přibližně 23 kg a je značně větší než hmotnosti hlav jiných výrobců. Porovnání hmotností je možné v tabulce (2). [23]



obr. 17: Obrázek boxu s optikou [23] (vpravo) se schématem [24] (uprostřed) a schéma jedné z možných trysek pro technologii navařování kovu metodou powder injection cladding [24] (vlevo)

5.1.4 Fraunhofer IWS

Jedinou komerčně nabízenou navařovací hlavou s koaxiálním přívodem drátu jako přídavného materiálu představuje výzkumný institut Fraunhofer IWS s označením COAXwire. Pro navařování lze použít všechny kovové komerčně vyráběné dráty pro svařování a pájení průměru $0,4 \div 1,6$ mm. Deklarováno je stoprocentní využití materiálu. Rychlost tvorby struktury je v rozsahu $100 \div 250$ cm³/hod v závislosti na materiálu drátu a geometrii tvořené součásti. Maximální přípustný výkon zdroje jsou 4 kW laserového výkonu, i když proběhly úspěšné testování navařování s výkonem 6 kW. Přiváděný laserový paprsek je speciálním optickým elementem rozdělen na tři samostatné paprsky po 120° okolo osy přívodu drátu, posléze jsou všechny tři paprsky zaostřeny do fokusačního bodu, kde dochází k tavení drátu a částečně i podkladového materiálu, princip funkce je zřetelný z obrázku (18). [25]



obr. 18: Procesní hlava pro navařování drátem COAXwire - Fraunhofer IWS [25]

tab. 2: Parametry procesních hlav pro laserové navarování

Parametr	Navarovací hlava	Precitec YC52	Laserline OTS-3	Laserline OTS-5	Coherent HighLight D-Series 4000	Fraunhofer IWS COAXwire
Druh laseru		Pevnolátkové s vysokou kvalitou paprsku	Diodový	Diodový	-	Diskový, diodový, vláknový
Druh navarování		¹ PIC	PIC	PIC	PIC	² WFC
Max. výkon [W]		6 000	6 000	20 000	4 000	4 000
Max. šířka návaru [mm]		až 6 (dle výkonu a rozostření las. paprsku)	-	-	1 ÷ 12 paprsku	-
Vlnová délka [nm]		-	900 - 1 100	900 - 1 100	975±10	-
Numerická apertura [-]		0,2	0,1 ÷ 0,2	0,1 ÷ 0,2	-	max. 0,1
Ohnisková fok. vzdálenost [mm]		100 ÷ 250	40 ÷ 500	80 ÷ 600	275	-
Konektor optického vlákna		-	LLK-B, LLK-D/Auto	LLK-B, LLK-D/Auto	-	LLK-B, LLK-B, QBH
Rozměry hlavy (V x Š x H)[mm]		-	500 x 56 x 56	500 x 74 x 74	558 x 190 x 201	500 x 160 x 210
Hmotnost [kg]		5,5	2,7	4,7	23	13
Operační teplota [°C]		-	max. 50	max. 50	5 ÷ 45	-
Operační vlhkost [%]		-	Bez kondenzace	Bez kondenzace	10 ÷ 80	-
Další vlastnosti		Různé druhy trysek pro navarování, přívod laserové paprsku pod úhlem 90°, ochrana optiky proti prachu, navarování v horizontálním směru	Různé druhy trysek pro navarování, výměnná kazeta s ochranným sklem	Různé druhy trysek pro navarování, výměnná kazeta s ochranným sklem	-	Ochrana optiky při nárazu, výměnná kazeta s ochranným sklem

¹Powder Injection Cladding

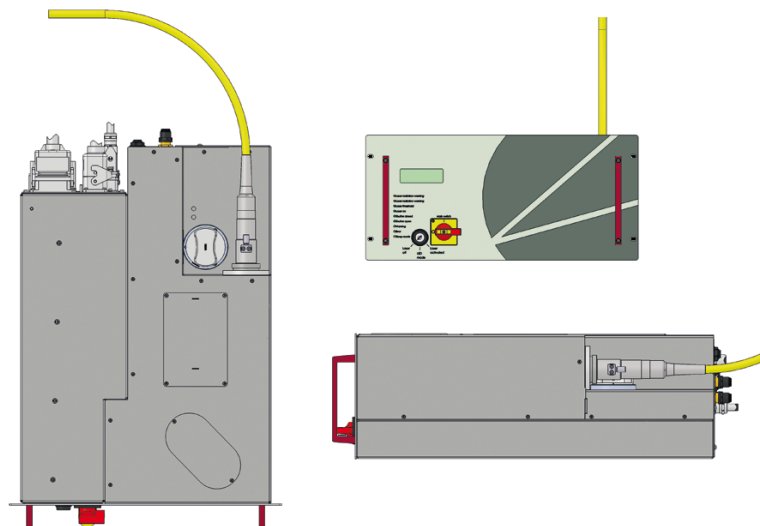
²Wire Feeding Cladding

5.2 Laserové zdroje

Pro laserovou aplikaci laser cladding jsou vhodné laserové zdroje na principu diodovém, vláknovém nebo pevno-látkovém. Při volbě laserového zdroje je nezbytné, aby splňoval požadované parametry pro danou aplikaci. Dále je nezbytné, aby byl zdroj kompatibilní s navrženou procesní hlavou. O kompatibilitě rozhoduje především druh laseru, nebo také zda je podporován konektor optického vlákna procesní hlavou. Kromě typu laseru je zdroj definován dodávaným výkonem paprsku, vlnovou délkou paprsku, charakter laserového paprsku, to znamená, zda je kontinuální nebo pulzuje, případně dalšími parametry. Dále uvedené laserové zdroje jsou svými parametry vhodné k použití pro laserové navařování.

5.2.1 Laserline LDM

Společnost Laserline se kromě procesních hlav zabývá laserovými zdroji na diodové bázi. V nabídce společnosti se svými parametry jeví jako vhodné laserové zdroje z řady LDM s maximálním výstupním výkonem 4 kW. Kvalita paprsku je srovnatelná s pevnolátkovými lasery Nd:YAG. Zaručená je kompatibilita s procesními hlavami Laserline. Bezpečný provoz by měl zajišťovat propracovaný systém kontroly procesu. Konkrétní technická specifikace je uvedena v tabulce (3). Řada LDM je charakteristická kompaktním designem v racku neboli v regálovém provedení zaručující minimální zástavbu. [26]



obr. 19: Diodový laserový zdroj LDM - Laserline [26]

5.2.2 Laserline LDF

Řada LDF laserových zdrojů Laserline pracuje na principu diodového laseru. S maximálním výkonem až 20 kW jsou tyto zdroje vhodné pro svařování, pájení, kalení a samozřejmě pro laserové navařování. Modulární design umožňuje konfiguraci zákazníkem, co se týče výkonu nebo počtu výstupů. Zdroje dokážou pracovat i v náročném prostředí se zvýšenou prašností a vlhkostí. S minimální potřebnou údržbou jsou schopné fungovat i ve vícesměnném provozu. [27]



obr. 20: Laserový zdroj Laserline řady LDF [27]

5.2.3 IPG Photonics YLS

Koncern IPG se specializuje mimo jiné na výrobu průmyslových laserových zdrojů pro různé aplikace. Zastoupení firmy IPG nalezne i v České republice. Zdroje řady YLS (Ytterbium Lasers Systems) na principu vláknového laseru jsou určeny pro velké množství laserových aplikací včetně laserového navařování. Tato řada nabízí zdroje o laserovém výkonu až 50 kW. Laserový paprsek lze generovat jako kontinuální (CW) nebo pulzovaný s maximální frekvencí až 5 kHz. Řada YLS nabízí až 6 možný výstupů vlákna z jednoho zdroje, to znamená až 6 možný napájených zařízení. [28]



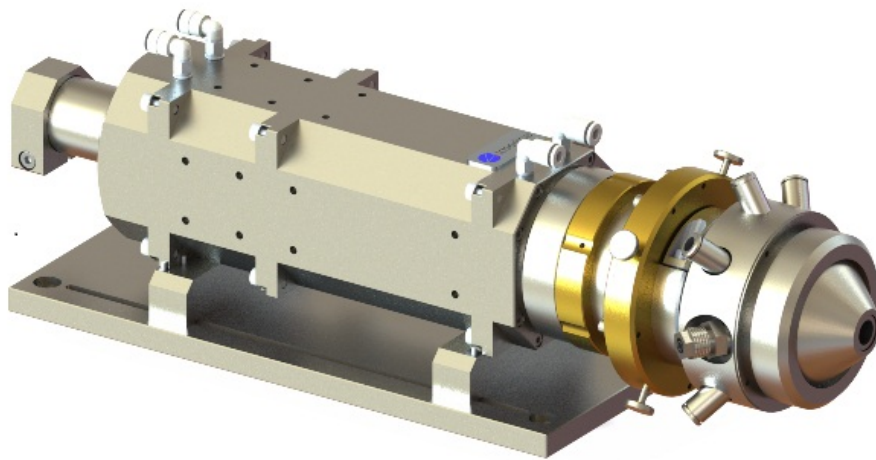
obr. 21: Laserový zdroj IPG Photonics řady YLS [29]

tab. 3: Parametry laserových zdrojů

Zdroj	Laserline LDM-4000	Laserline LDF-4000	IPG Photonics YLS-4000
Parametr			
Druh laseru	Diodový	Diodový	Vláknový
Max. výstupní výkon [W]	4 000	4 000	4 000
Kvalita paprsku [mm.mrad]	100	100	-
Konektor opt. vlákna	LLK-B, LLK-D/auto	LLK-B, LLK-D/auto	-
Průměr opt. vlákna [μm]	400, 1000	min. 1000	50, 100, 200
Stabilita výkonu [%]	max. ±2	max. ±2	-
Rozsah vlnových délek [nm]	900 ÷ 1 070	900 ÷ 1 070	1 070 ±10
Hmotnost [kg]	50	650	-
Rozměry (V x Š x H)[mm]	220 x 483 x 636	1 595 x 680 x 1 015	-
Napájecí napětí	380 ÷ 420 VAC	380 ÷ 420 VAC	-
Příkon [W]	9 500	10 300	13 300
Výkon chlazení [W]	5 500	6 300	9 300
Pracovní teplota [°C]	10 ÷ 45	10 ÷ 45	-
Pracovní vlhkost [%]	max. 75	max. 75	-
Stupeň krytí	IP 54	IP 54	-
Podporovaná rozhraní	Profibus DP, Ethernet, RS 232	Profinet, Profibus, DeviceNet, EtherNet/IP	DeviceNet, Profibus, EtherNet

5.3 Výběr konkrétních systému pro zabudování do stroje

Z výše uvedených navařovacích procesních hlav připadá v úvahu jako jediná pro navařování z drátu procesní hlava Fraunhofer COAXwire, jelikož další procesní hlavy pro laserové navařování drátem s požadovanými vlastnostmi nejsou v současné době k dispozici. Procesní hlava pro navařování práškem byla vybírána s ohledem na kompatibilitu s laserovým zdrojem. Byly porovnány možné kombinace laserových zdrojů a procesních hlav. Pro navařování práškem byla vybrána procesní hlava Laserline v konfiguraci OTS-5, zobrazená na obrázku (22). Jako laserový zdroj byl zvolen Laserline LDF 4000-100 VG64, který se zabudovaným modulem pro přepínání paprsků mezi dvěma výstupy je schopen napájet jak hlavu pro navařování práškem tak i drátem. V souvislosti s řízením procesu byly obě navařovací hlavy nakonfigurovány s termokamerou E-MAqS pro plošné snímání teploty v místě návaru. Tato kamera, vyvinutá výzkumným institutem Fraunhofer IWS, je stranově připojena k navařovací hlavě, a přes polopropustné zrcátko snímá koaxiálně teplotu v místě návaru a velikost tavné lázně. Jedná se o prvek kontroly parametrů navařovacího procesu s možností zpětnovazebního řízení vstupních parametrů laseru. O řízení navařovacího procesu je podrobněji pojednáno v následující kapitole.

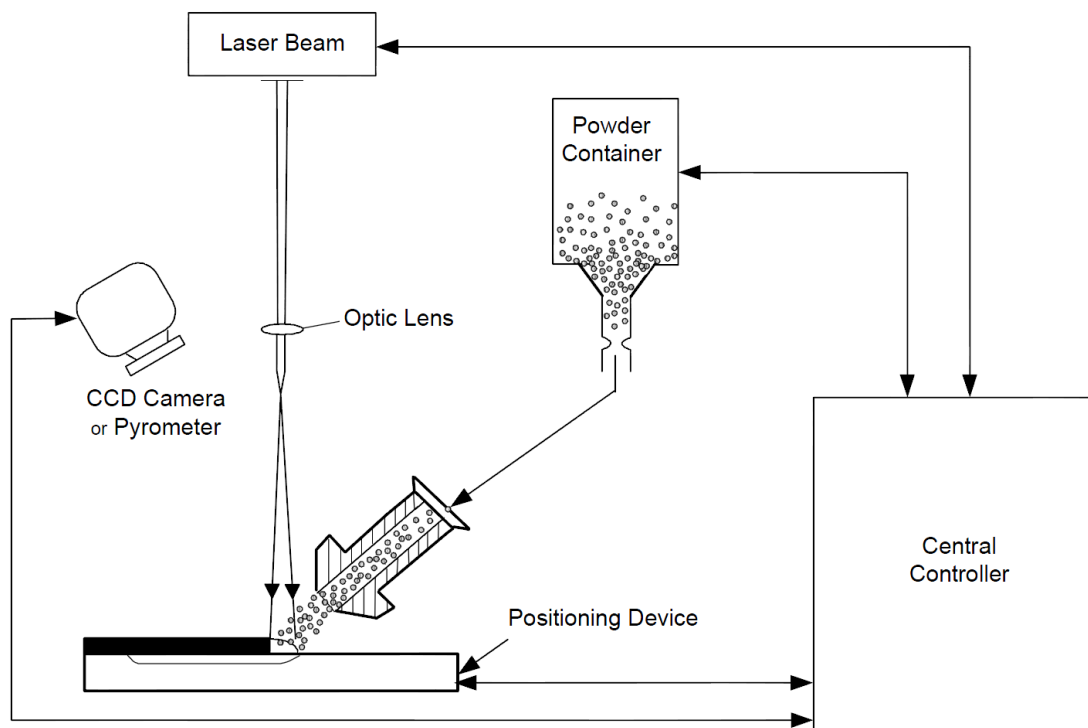


obr. 22: Navařovací hlava Laserline OTS-5 [22]

Za zmínění stojí jistá spojitost mezi společnostmi Laserline a Fraunhofer IWS. Obě tyto německé společnosti zabývající se laserovými technologiemi ve svých katalozích nabízejí některé shodné produkty. Jedná se například o již zmíněnou termokameru E-MAqS, kterou je možné připojit k procesním hlavám obou firem. Nebo také o směšovací trysku s označením COAX 8, která je právě součástí zvolené konfigurace procesní optiky pro navařování práškem OTS-5.

5.4 Systém kontroly navařovacího procesu

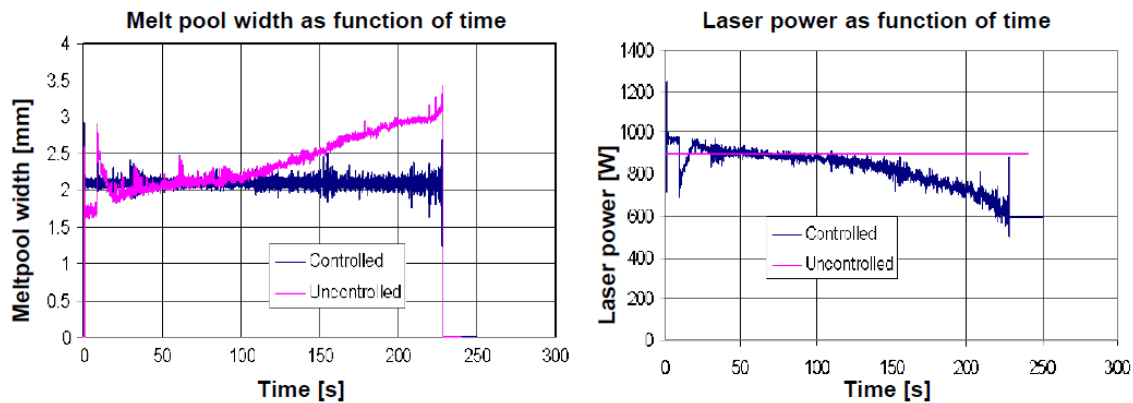
Parametry figurující v navařovacím procesu lze rozdělit na říditelné a měřitelné [1] (str. 179). Přičemž měřitelné parametry jsou ovlivňovány parametry říditelnými, jejichž hodnoty lze přímo nastavit. Mezi říditelné parametry patří především výkon laseru, rychlost přívodu prášku nebo drátu a rychlost posuvu hlavy vůči podkladu při navařování. Měřitelnými parametry jsou rozměry návaru, teplota návaru a jakost povrchu. Obecně lze dobře sledovat měřitelné parametry, zvláště teplotu v místě návaru a rozměry návaru. Pro sledování teploty v místě návaru se používají pyrometry nebo termokamery. Sledovat geometrii návaru lze pomocí CCD kamery.



obr. 23: Příklad zpětnovazebního řízení navařovacího procesu [1]

Pro vytváření kvalitních návarů technologií laser cladding je nezbytné zpětnovazební řízení procesu. Příklad systému se sledováním měřitelných parametrů je zobrazen na obrázku (23). V aplikaci laser cladding se ukázala jako nejvhodnější strategie řízení procesu sledování teploty v místě návaru, která se regulací laserového výkonu udržuje na konstantní hodnotě [30] (str. 51). Z tohoto důvodu byly zvolené procesní hlavy pro navařování práškem a drátem nakonfigurovány s termokamerou E-MAqS pro sledování teplotní mapy v místě návaru. Kamera je dodávána se softwarovým balíčkem LompocPro, zajišťující zpětnovazební řízení procesu o frekvenci taktu 200 Hz. Přínos zpětné vazby v řízení

procesu navařování demonstruje obrázek (24). Z grafu je zřejmé, že udržováním konstantní teploty návaru regulací laserového výkonu udržuje stejnou šířku návaru v průběhu doby navařování. V porovnání s procesem bez zpětné vazby je rozdíl ve fluktuaci šířky návaru markantní.



obr. 24: Parametry navařování se zpětnou vazbou od kamery E-MAqS [31]

6 Rozbor variant možného konstrukčního řešení

Jako první krok před samotnou konstrukcí bylo třeba zvážit, jakým způsobem budou laserové systémy na stroji uloženy. Z tohoto důvodu byly provedeny možné konstrukční varianty uložení laserových navařovacích hlav na stroji, s možností navařování v pracovním prostoru. Z dále uvedených variant byla nejvhodnější vybrána ke konstrukčnímu zpracování.

6.1 Stroj určený pro integraci navařovacích systémů

Pro integraci laserových systémů byl určen stroj MCV 1000 5AX, zobrazený na obrázku (25). Stroj patří do řady vertikálních frézovacích center tuzemského výrobce obráběcích strojů KOVOSVIT MAS, a.s. Nosná struktura stroje je v uspořádání tvaru „C“. Lineární osy jsou realizovány valivými vedeními a pohony s kuličkovými šrouby. Těžiště využití je v přesném a rychlém obrábění v pěti osách tvarově složitých kontur, vrtání, vyvrtávání, vystružování, řezání závitů, atd. Systém automatické výměny nástrojů umožňuje práci v automatickém cyklu. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce (4). Řídicími systémy pro řadu MCV jsou standardně HEIDENHAIN iTNC530 HSCI a SIEMENS SINUMERIK 840D sl. [32]



obr. 25: Vertikální frézovací centrum MCV 1000 5AX [32]

tab. 4: Technická data MCV 1000 SPRINT 5AX [32]

Pracovní rozsah (x/y/z)	880/590/520	mm
Maximální otáčky frézovacího vřetene	18 000	ot.min ⁻¹
Maximální krouticí moment vřetene	86/120	N.m
Maximální výkon vřetene	25/35	kW
Kuželová dutina vřetene	HSK 63A	-
Rozsah osy C	360	°
Rozsah osy A	±110	°
Rozměry stroje (d/š/v)	4 600/3 600/3 000	mm
Přesnost nastavení polohy	0,01	mm
Upínání nástrojů	HSK-A63	-
Kapacita zásobníku nástrojů	30	-

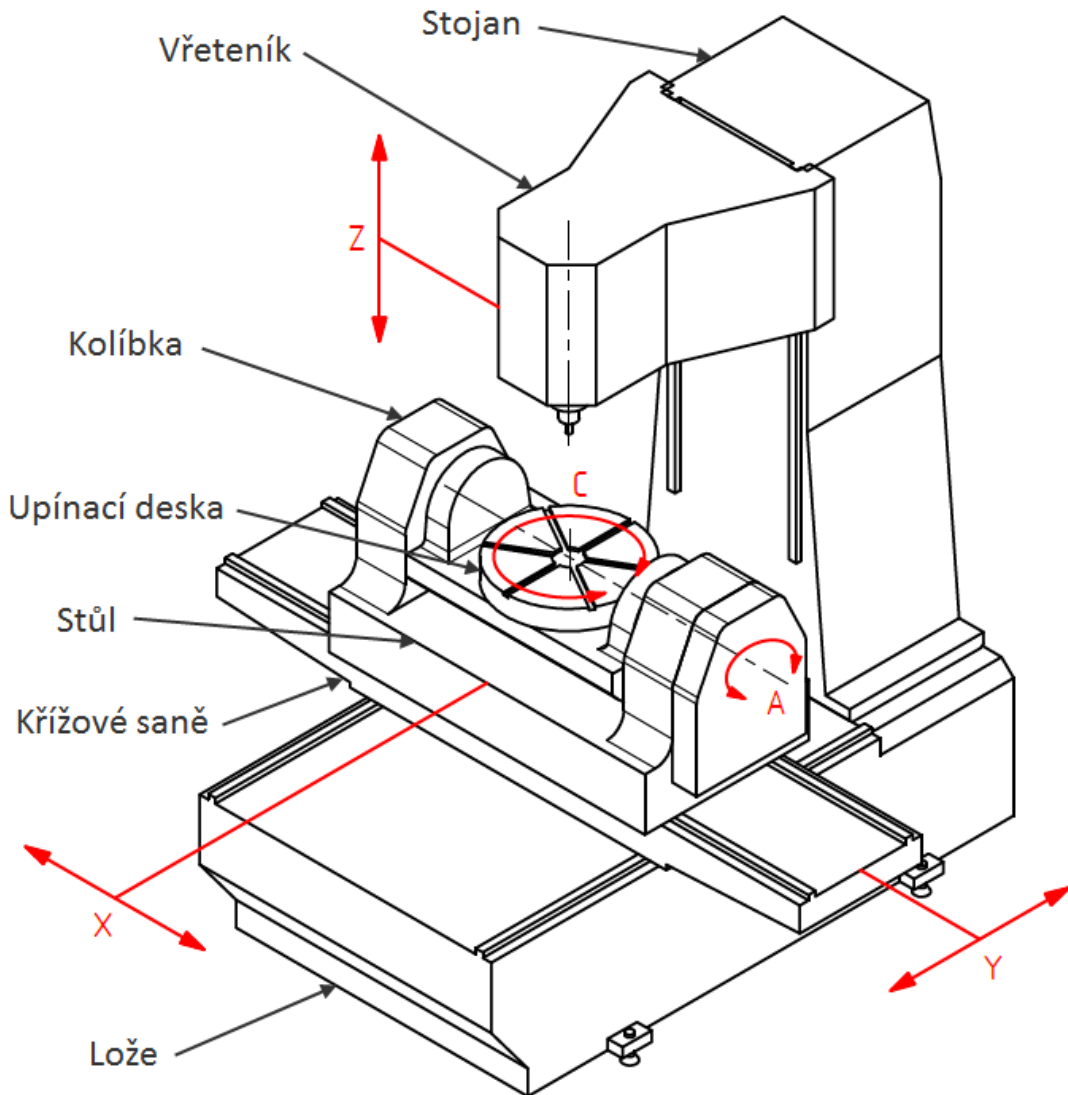
Rozložení pohybových os na stroji je 1/4, tj. jedna osa na straně nástroje a čtyři osy na straně obrobku. Přičemž tři osy jsou lineární (X, Y, Z) a dvě rotační (A, C). Rozložení os na stroji MCV 1000 5AX je zobrazeno na obrázku (26).

V úvahu připadají dvě možnosti jak integrovat procesní hlavy pro laserové navařování na stroj. Buď lze využít nástrojového rozhraní pro upínání navařovacích hlav přímo do vřetene stroje nebo připevnit navařovací hlavy na některé z volných ploch na boku vřeteníku. Realizace varianty upínání navařovacích hlav do vřetene stroje by bylo konstrukčně složité. Bylo by nutné vyřešit ukládání hlav, kde by byly uloženy a připraveny k upnutí do vřetene, což by v omezeném pracovním prostoru stroje šlo obtížně realizovat. Vybrané navařovací hlavy navíc nejsou nakonfigurovány s rozhraním k upínání do vřetene stroje. Dále by nevyhnutelně došlo ke zmenšení pracovního rozsahu při navařování ve směru osy Z.

Jako téměř jediné vhodné místo pro umístění navařovacích hlav se jeví vřeteník stroje. Umístění navařovacích hlav na vřeteníku stroje znamená provést podobné konstrukční řešení jaké uskutečnila firma Rödgers, viz. kapitola 4. V tomto případě bude třeba řešit umístění dvou hlav místo jedné. Navařovací hlavy budou muset nutně mít možnost vysouvání a zasouvání ve směru rovnoběžném s osou frézovacího vřetene. Při aditivním procesu navařování bude vysunuta vždy jedna z hlav a při obrábění navařené struktury budou muset být hlavy zasunuty nad úroveň frézovacího nástroje kvůli zabránění jejich možné kolize s částmi stroje nebo s tvořeným dílcem.

Navařovací hlavy budou v definované vazbě vzhledem k vřeteníku stroje respektive k jeho vřetenu. Při uvažování možnosti pohybu navařovacích hlav pouze ve svislém směru,

bude jejich vzdálenost od osy vřetene ve směru osy X a Y neměnná. Poloha navařovacích hlav ve směru osy Z vůči vřetenu se bude měnit v závislosti na vysunutí respektive zasunutí hlav ale bude muset být známá z důvodu korektního řízení jejich pohybu. Pohyb navařovacích hlav při navařování bude řešen standardně interpolačními funkcemi. Přičemž je třeba použít funkci posunutí souřadného systému nástroje. Nutné bude nějakým způsobem systémově vyřešit proměnné hodnoty vzdáleností navařovacích hlav vůči vřetenu stroje ve směru osy Z.



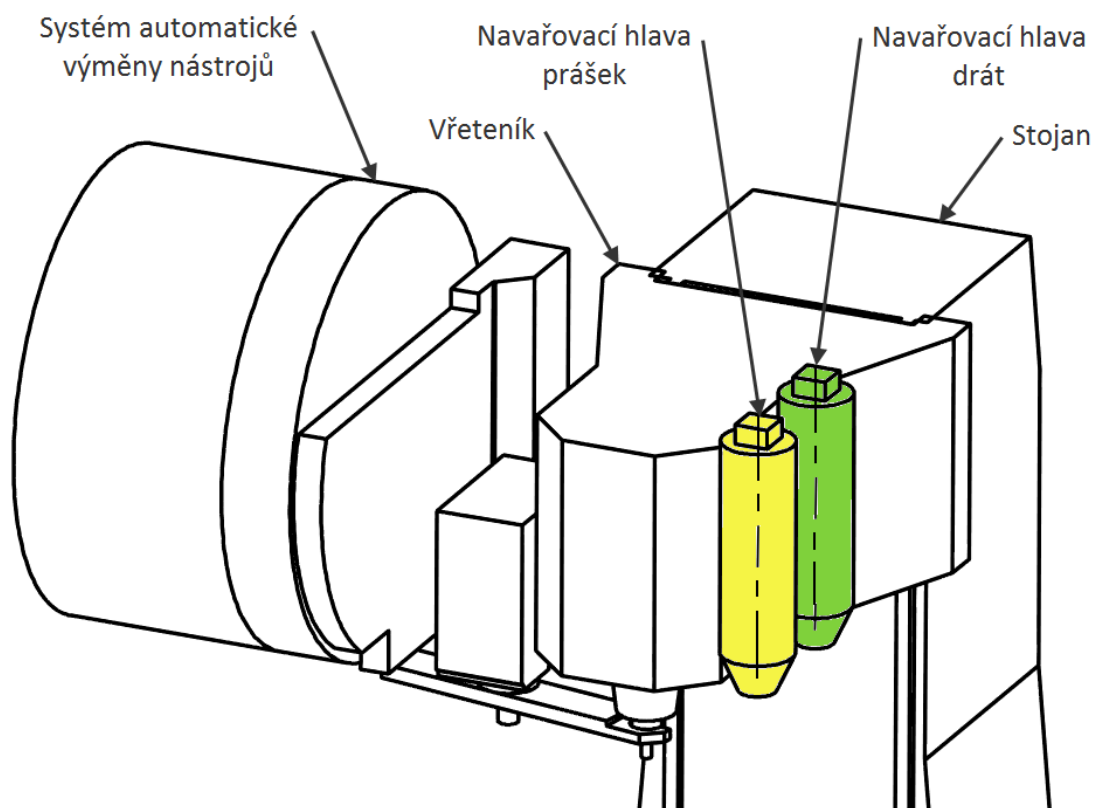
obr. 26: Rozložení pohybových os na stroji MCV 1000 5AX

Při volbě varianty umístění hlav na vřeteníku stroje je nutné brát v potaz řadu faktorů. Integrace hlav si nutně vynutí konstrukční úpravy stroje, takové, aby byly zachovány původní technologické možnosti stroje a zároveň přidaná aditivní technologie plnila svojí funkci. Požadavkem je, aby bylo možné navařovat v celém pracovním rozsahu stroje, tedy

v prostoru nad kruhovou upínací deskou. Zachování tohoto pracovního rozsahu si pravděpodobně vynutí úpravu rozsahu osy X respektive Y. V tuto chvíli se dá předpokládat, že dojde k úpravám krytování prostoru vřeteníku a následným úpravám kapotáže celého stroje. V následujících kapitolách budou představeny jednotlivé varianty umístění navařovacích hlav na vřetení stroje, které by bylo možné konstrukčně realizovat.

6.2 Varianta 1 - umístění navařovacích hlav na stroji

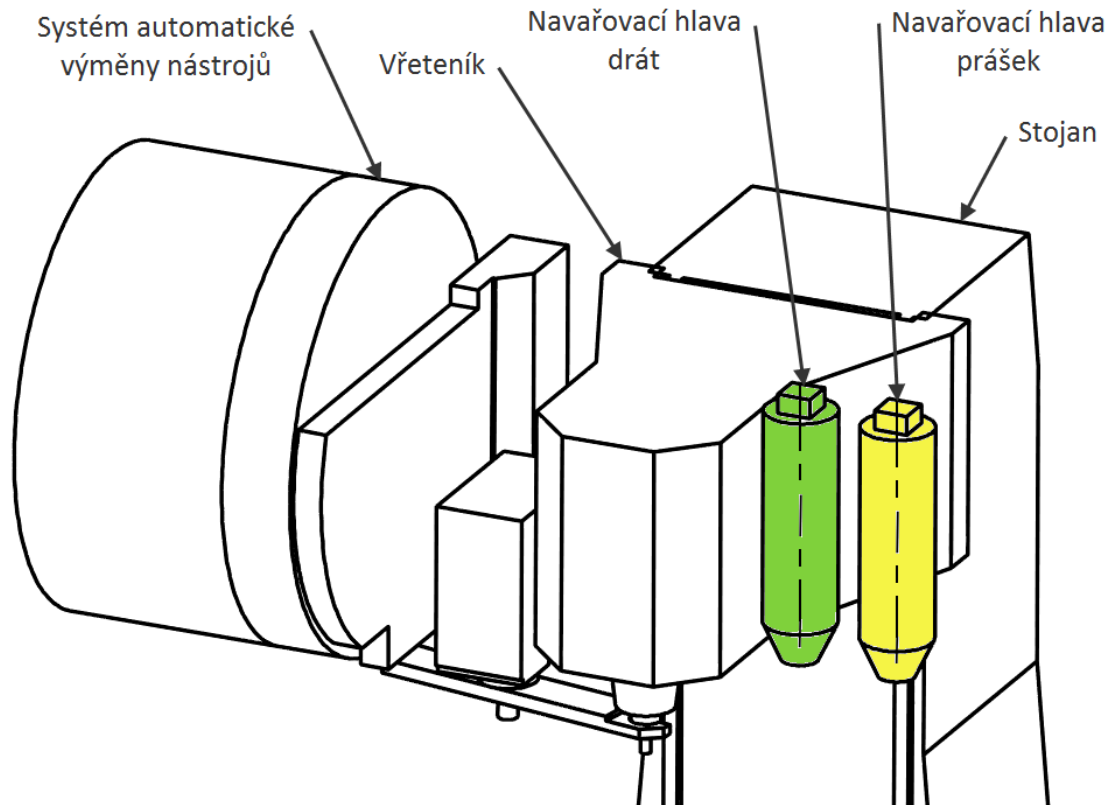
V první variantě uložení hlav je využit bok vřeteníku odlehlý od systému automatické výměny nástrojů. Hlavy jsou zde uloženy vedle sebe jak ukazuje obrázek (27). Toto řešení působí na první pohled poměrně kompaktně. Rozjezd osy X se zkrátí pouze v jednom směru. Kromě toho je nutné posoudit i omezení rozjezdu v ose Y. Možným problémem může být nedostatečný prostor pro uložení obou hlav.



obr. 27: Varianta 1 - umístění navařovacích hlav na stroji

6.3 Varianta 2 - umístění navařovacích hlav na stroji

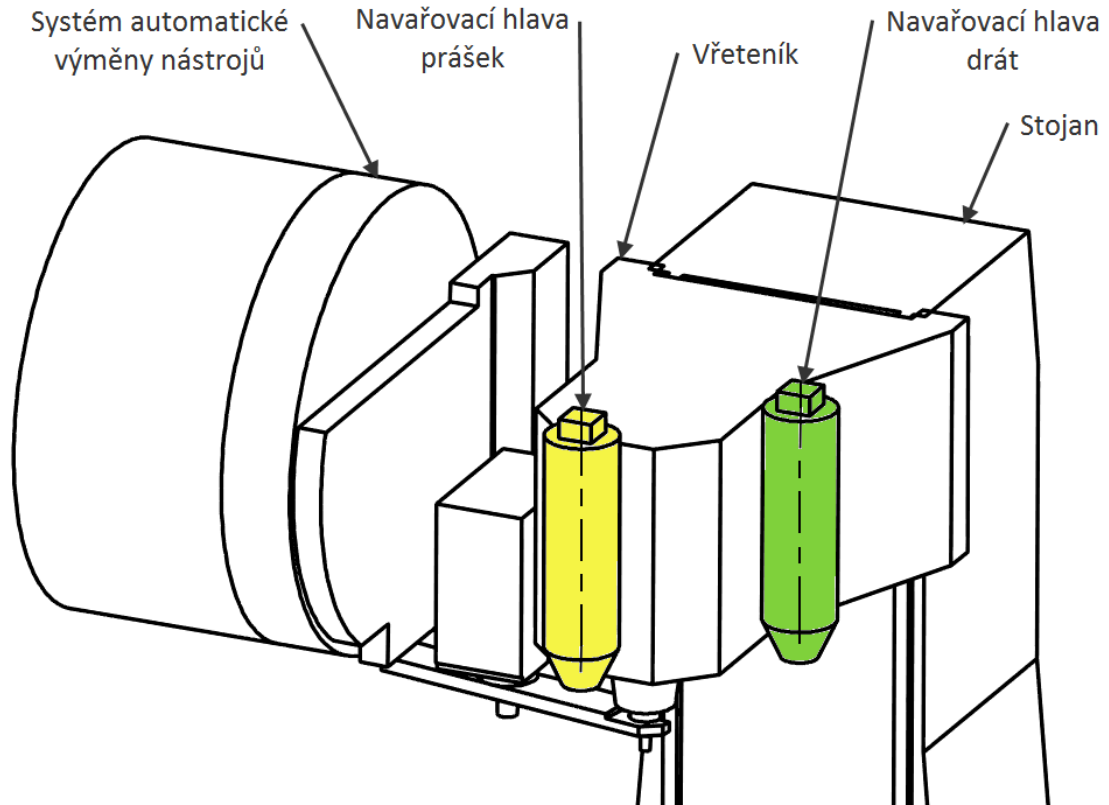
V této variantě jsou hlavy umístěny na volném boku vřeteníku paralelně ve směru pohybové osy X stroje (28). Jelikož takto umístěné hlavy mají osy v jedné rovině s osou vřetene, nedojde ke zkrácení rozjezdu ve směru osy Y. Toto je vyváženo výraznějším zkrácením rozjezdu osy X v jednom směru. Varianta takto uložených hlav by způsobila značně nesymetrickou úpravu pohybové osy.



obr. 28: Varianta 2 - umístění navařovacích hlav na stroji

6.4 Varianta 3 - umístění navařovacích hlav na stroji

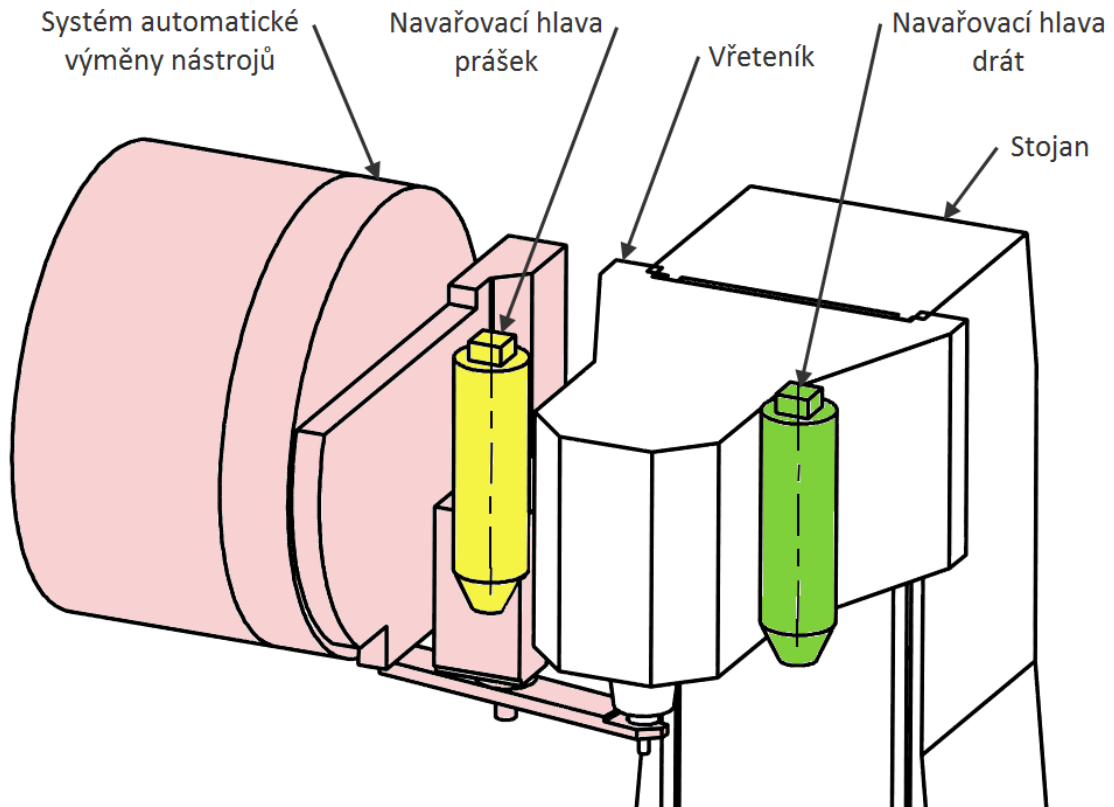
V třetí variantě je jedna z hlav umístěna na boku vřeteníku a druhá na jeho čele (29). Z hlediska využití prostoru je toto řešení poměrně vhodné. Realizace výsuvné funkce hlav bude jednodušší než u první varianty. Přístup k oběma hlavám je dobrý a koreluje s ergonomií krytování stroje. Nevýhodou je možné zkrácení rozjezdu v obou vodorovných osách stroje, zde je osa Y výrazně omezena v porovnání s první variantou.



obr. 29: Varianta 3 - umístění navařovacích hlav na stroji

6.5 Varianta 4 - umístění navařovacích hlav na stroji

V poslední variantě jsou hlavy uloženy každá na jednom z boků vřeteníku (30). Stejně jako u předchozí varianty nedojde k omezení v rozjezdu osy Y stroje. Díky symetrickému umístění se dá předpokládat i symetrické zkrácení rozjezdu osy X. Problémem této varianty je nutnost přepracování systému automatické výměny nástrojů. Jelikož prostor, kde byl umístěn pohon výměnného ramene, je nyní obsazen jednou z hlav. Jako první možností jak tento problém vyřešit je posunutí celého systému AVN směrem od vřeteníku a adekvátního prodloužení výměnného ramene.



obr. 30: Varianta 4 - umístění navařovacích hlav na stroji

6.6 Výběr nejvhodnější varianty pro podrobné zpracování

Z důvodu kvalitativního posouzení vhodnosti daných variant konstrukčního uložení navařovacích hlav na vřetení stroje bylo provedeno jejich kritériální zhodnocení. Byla posouzena výsledná nesymetrie daných variant vůči pracovnímu prostoru stroje, rozsah přestavby nosné struktury stroje, který by provedení dané varianty vyžadovalo a velikost výsledného pracovního prostoru při navařování. Ohodnocení variant dle daných kritérií zobrazuje tabulka (5).

tab. 5: Kritériální zhodnocení variant uložení navařovacích hlav na vřetení stroje

Kritéria \ Varianta	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Nesymetrie výsledného prac. prostoru	+	---	-	++
Rozsah přestavby stávající nosné struktury stroje	-	+	--	-
Velikost výsl. prac. prostoru	++	-	+	++

+++ nejlépe splňuje dané kritérium

--- nejhůře splňuje dané kritérium

Z posouzení variant možného konstrukčního řešení uložení navařovacích hlav na vřetení stroje nejlépe vychází varianta č. 4, tedy uložení obou hlav na bocích vřeteníku. Tato varianta je dále zpracována včetně potřebných konstrukčních úprav.

6.7 Technologický postup při práci stroje

Před samotným návrhem uložení navařovacích hlav na stroji je třeba určit, jak bude probíhat proces výroby na budoucím hybridním stroji. V úvahu připadají dvě varianty technologického postupu zahrnující frézovací a navařovací operace. V prvním případě dojde nejdříve k navaření celé struktury a následnému obrábění aditivně vytvořeného celku. Druhou možností je střídání navařovacího procesu s obráběcím. Postup pak probíhá tak, že se navaří jedna nebo více vrstev a následně se obrobí vrchní část vytvořeného návaru, na takto obrobenou vrstvu se navaří další, která se opět obrobí a tak dále. Každá z těchto metod má své výhody. První případ bude jednoznačně produktivnější z hlediska rychlosti tvorby dílce, není třeba po každé navařené vrstvě měnit navařovací hlavu za obráběcí nástroj. Naproti tomu, druhá varianta zaručí tvorbu vrstev na rovnějším povrchu, což může ovlivnit jakost vzniklé struktury. Nicméně k finálnímu obrobení funkční ploch dojde vždy u obou zmíněných variant.

V případě práce stroje podle druhé zmíněné varianty, je nutné aby byl ve vřetení upnut frézovací nástroj a bylo možné rychle měnit aditivní proces za proces obrábění a opačně. Při změně procesu z aditivního na obráběcí musí dojít alespoň k částečnému zasunutí navařovací hlavy. Uvážíme-li situaci, při které bude obráběn návar v úrovni pod rovinou tvořenou horními plochami boků kolíčky, je nezbytné, aby byly navařovací hlavy v tento okamžik právě nad touto rovinou. Podmínka bezpečné vzdálenosti od boků kolíčky platí obdobně i pro frézovací nástroj při procesu navařování. Tato podmínka definuje požadavek na schopnost vysunutí navařovacích hlav vůči vřetenu stroje respektive vůči nástroji upnutému v něm na takovou hodnotu, která zaručí bezkolizní výrobní proces.

7 Konstrukční zpracování zvolené varianty

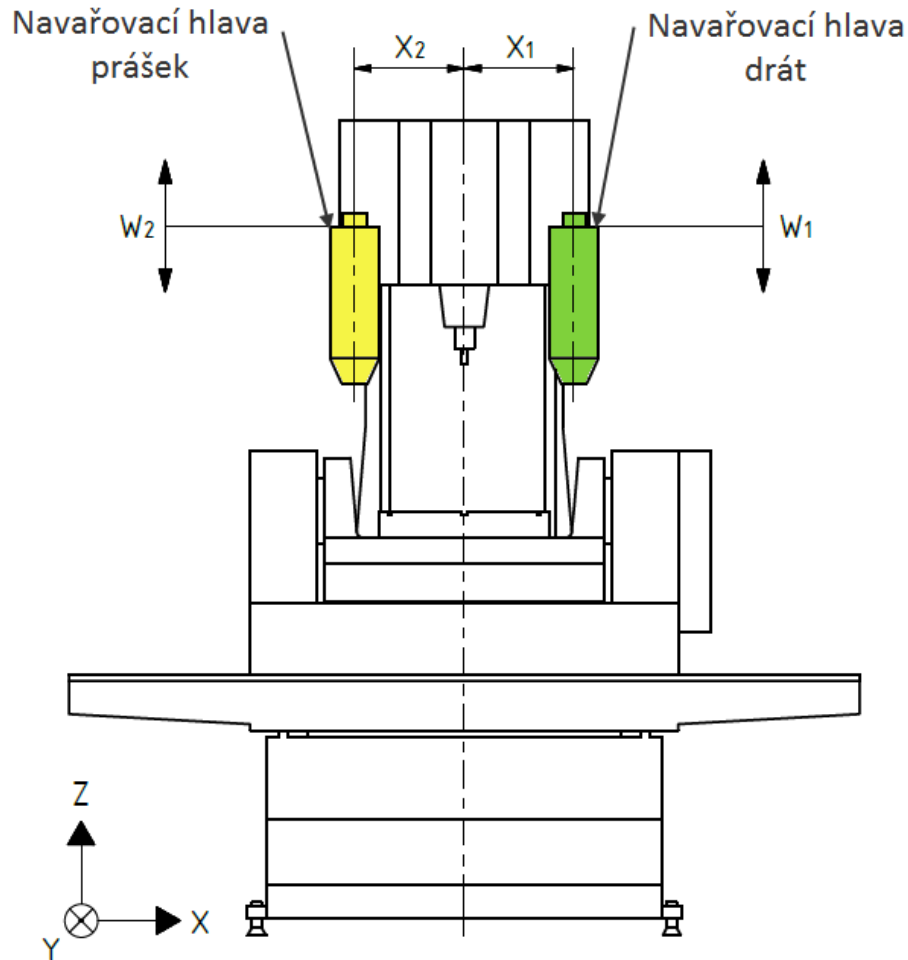
V první fázi konstrukčního zpracování integrace systémů laserového navařování do stroje MCV 1000 5AX byly zkonstruovány řízené lineární osy nesoucí navařovací hlavy. Dále byly provedeny některé kontrolní výpočty vztahující se ke konstrukci pohybových os. Následně jsou definovány a představeny některé vynucené konstrukční úpravy stroje nutné pro realizaci hybridního stroje.

7.1 Konstrukce pohybových os navařovacích hlav

Jak již bylo zmíněno, v dalším zpracování je provedeno konstrukční řešení uložení navařovacích hlav podle varianty označené jako č. 4. V první fázi byl navržen způsob uložení konstrukčních celků nesoucí navařovací hlavy na vřeteník stroje. V souvislosti s požadavkem na polohování navařovacích hlav bylo třeba určit minimální pracovní rozsah os nesoucí hlavy, potřebný pro navařování. K tomu bylo nutné zvolit nejvhodnější způsob vysouvání hlav, včetně pohonu s možností polohování hlav na dané hodnoty vysunutí. Konstruování nových sestav probíhalo přímo v modelu stroje MCV 1000 5AX. Snadno se tak ověřovaly možné kolize zkonstruovaných sestav se stávající částmi stroje. Snáze se také kontrolovaly připojovací rozměry vzniklých sestav.

7.1.1 Specifikace pracovního rozsahu pohybových os

Návrhové schéma uložení navařovacích hlav je vyobrazeno na obrázku (31). Z obrázku je patrné, že se budou sledovat hodnoty vzdálení os navařovacích hlav od osy vřetene označené jako X_1 a X_2 . Tyto vzdálenosti budou mít přímou vazbu na změnu pracovního rozsahu navařování, konkrétně na změnu rozsahu v ose X. Jelikož pohyb navařovacích hlav bude řízen, bude možno polohovat ve vertikálním směru. Tyto vzniklé pohybové osy rovnoběžné s osou Z stroje lze označit jako W_1 respektive W_2 .

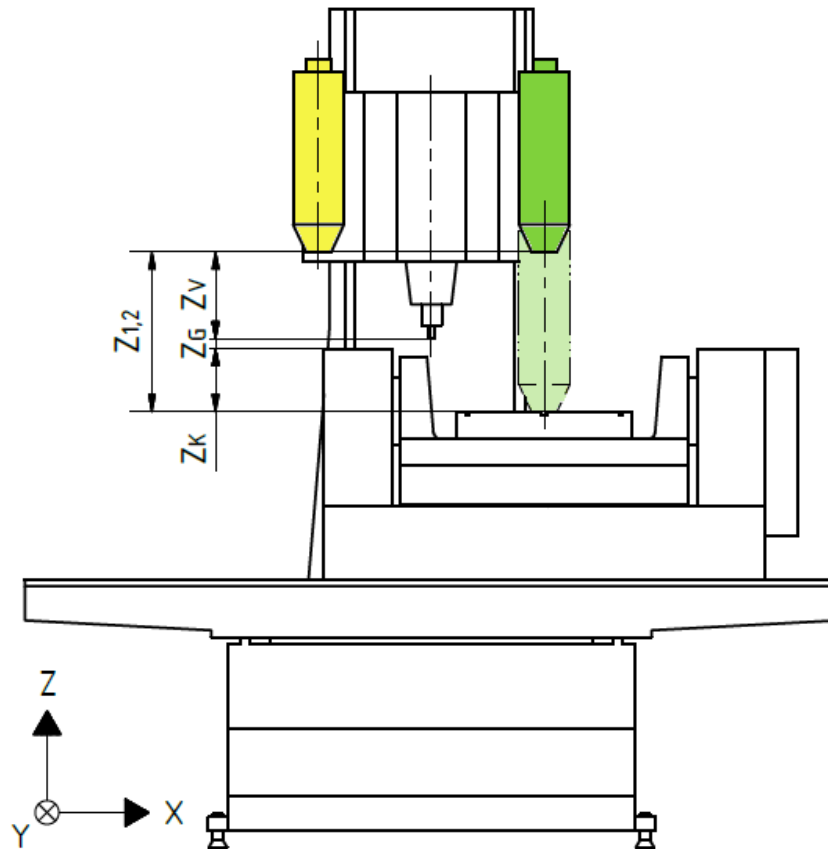


obr. 31: Pracovní schéma uložení navařovacích hlav s vyznačenými osami W_1 a W_2

Nyní je nasnadě vypočítání potřebného rozsahu pohybových os W_1 a W_2 . Uvažuje se výrobní cyklus, kdy bude možné navařovat v rovině horní části kruhové upínací desky s upnutým nástrojem ve vřetenu. Přitom nesmí dojít ke kolizi mezi upnutým nástrojem a boky kolíčky. Schéma výpočtu s označenými délkovými parametry je zobrazeno na obrázku (32). Vztah pro výpočet minimálního potřebného rozsahu os lze napsat takto:

$$Z_{1,2} = Z_V + Z_K + Z_G = 255 + 185 + 30 = 470\text{mm} \quad (7.1)$$

Kde Z_V je vzdálenost mezi koncovým bodem nástroje a koncovým bodem navařovací hlavy, při jejím maximálním vysunutí. Jako reprezentativní nástroj je uvažována stopková fréza délky 100 mm upnuta přes rozhraní kužele HSK-A63 do vřetene stroje. Tato délka nástroje bude tedy maximální možnou pro bezpečné provozování stroje s přidanou hybridní funkcí. Rozměr Z_K je vzdálenost mezi horní částí kruhové upínací desky a nejvyšším bodem boku kolíčky a Z_G je bezpečností přídavek.



obr. 32: Schéma pro výpočet potřebného rozsahu os W_1 a W_2

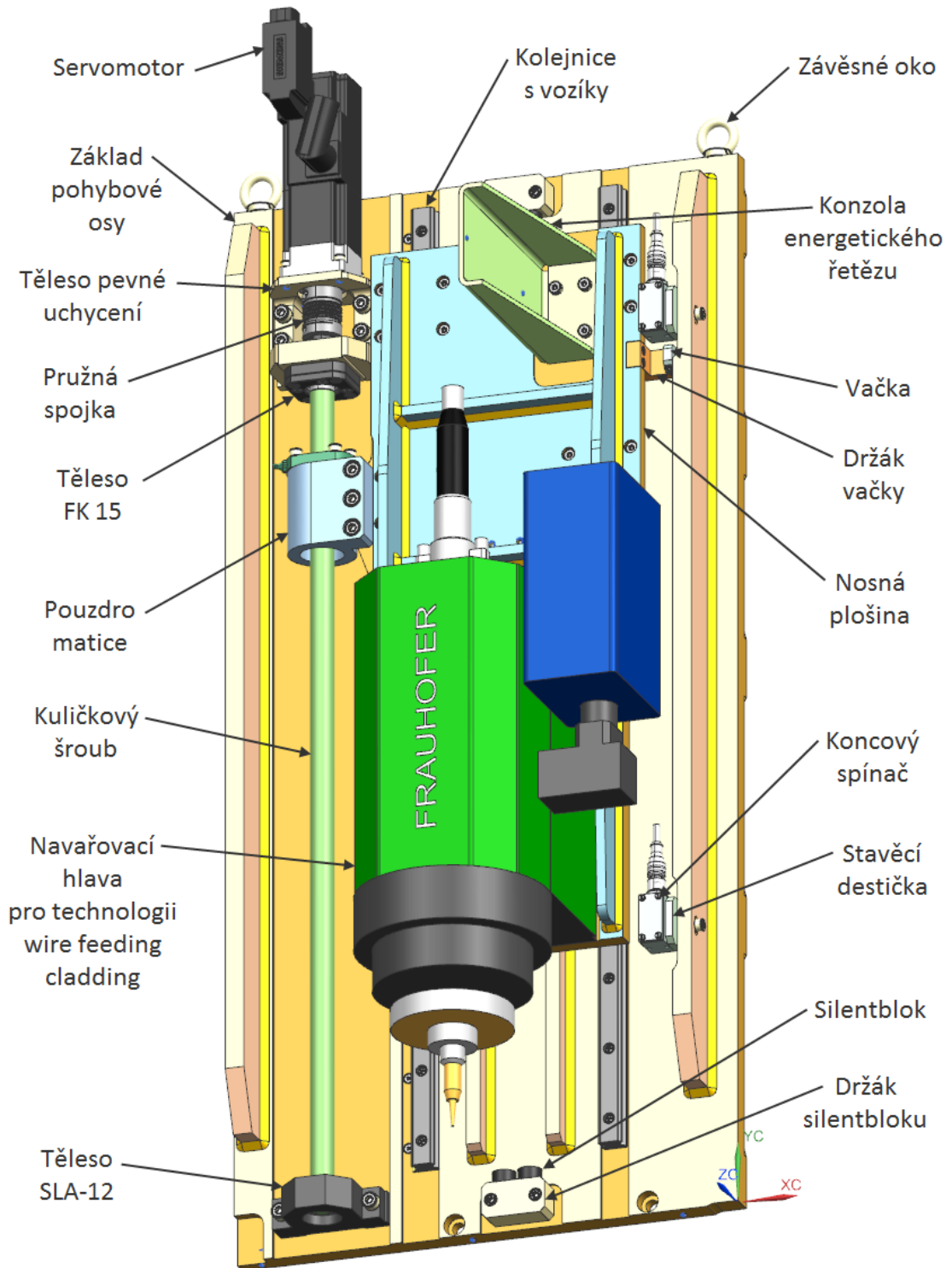
Zjištěná hodnota potřebného rozsahu os nosující navařovací hlavy je tedy 470 mm. K připevnění sestav pohybových os budou využity obrobené boční plochy vřeteníku. Předpokládá se geometrická přesnost těchto ploch, která zajistí přiměřenou rovnoběžnost navařovacích hlav s vřetenem po montáži sestav na stroji.

7.1.2 Popis konstrukce sestav pohybových os W_1 a W_2

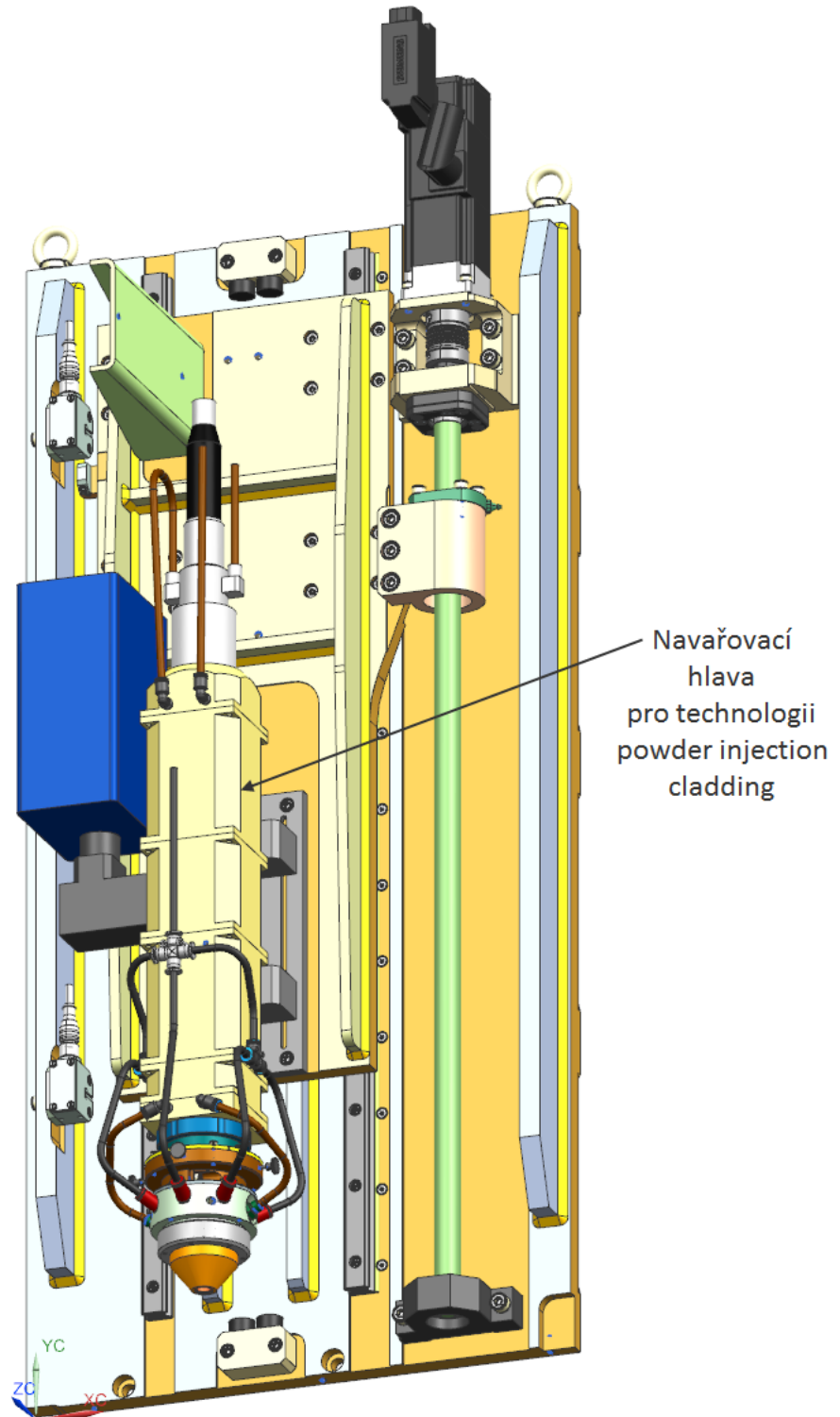
Navržené připevnění sestavy pohybové osy W_1 na vřeteník stroje je čtyřmi šrouby M10 s vnitřním šestihranem přes základ pohybové osy. Sestava pohybové osy W_1 s popisem součástí je zobrazena na obrázku (33). Navařovací hlava je připevněna na nosnou plošinu (saně), jež je propojena se základem pohybové osy lineárním vedením. Pohon osy představuje servomotor od firmy Siemens přímo propojen pružnou hřídelovou spojkou s kuličkovým šroubem. Kuličkový šroub je v horní části pevně uchycen radiálně-axiálním ložiskem v ložiskovém tělese FK 15. Toto těleso je uloženo v tělese pevného uchycení, které je pevně spojené se základem pohybové osy. Těleso pevného uchycení zároveň zaru-

čuje souosé spojení servomotoru s kuličkovým šroubem. Volný konec kuličkového šroubu je uložen přes radiální ložisko v tělese SLA-12 pevně připevněném k základu pohybové osy. Silový tok z matice kuličkového šroubu je přenášen pouzdrem matice na nosnou plošinu. Pozice kuličkového šroubu vůči nosné plošině je umístěna záměrně mimo prostor mezi kolejnicemi lineárního vedení. Důvodem je snaha o minimalizaci odsazení osy navařovací hlavy od osy vřeteně. Tato snaha v pozdější fázi sníží nároky na konstrukční úpravy stroje. K součásti sestavy patří mechanické koncové spínače polohy připevněné přes ustavovací destičky k základnímu dílci. Tyto spínače jsou bezpečnostním prvkem a při sepnutí dávají signál řídicí jednotce osy k řízenému brzdění servomotoru v případě přejetí programovaného pracovního rozsahu osy. V souvislosti s koncovými spínači plní spínací funkci vačka spojená držákem vačky s nosnou plošinou. Dalšími bezpečnostními prvky jsou koncové dorazy se silentbloky zabraňující vyjetí vozíků lineárního vedení z kolejnic, v případě selhání veškerých elektronických bezpečnostních prvků. K takové situaci by nemělo nikdy dojít, ale podobné dorazy jsou u pohybových os standardem.

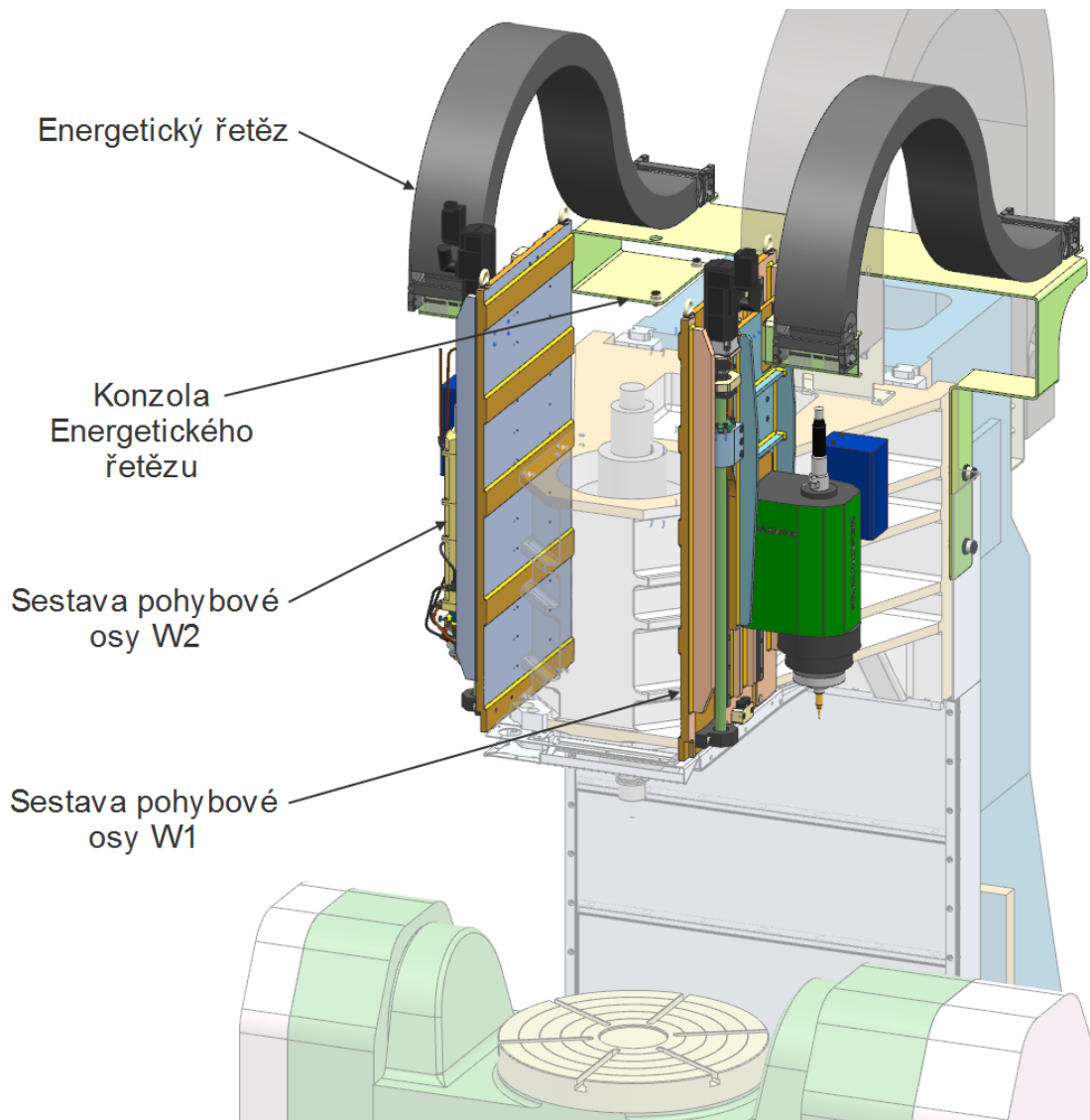
Sestavný výkres osy W_1 je součástí přílohy výkresové dokumentace (č. v. ASM_000001281_00_PDF_1). Sestavný výkres pohybové osy W_2 pro hlavu s možností navařování práškem je taktéž součástí přílohy výkresové dokumentace (č. v. ASM_000001277_00_PDF_1), vzhledem k tomu, že pohybové osy jsou konstrukčně téměř zrcadlově stejné, nemá smysl zde detailně popisovat i pohybovou osu W_2 , vyobrazenou na obrázku (34). Uložení pohybových os na vřeteníku stroje zobrazuje obrázek (35). Celková sestava stroje s realizovanou přestavbou na hybridní stroj je uvedena v sestavném výkresu (č. v. ASM_000001284_00_PDF_1).



obr. 33: Sestava pohybové osy W_1



obr. 34: Sestava pohybové osy W_2



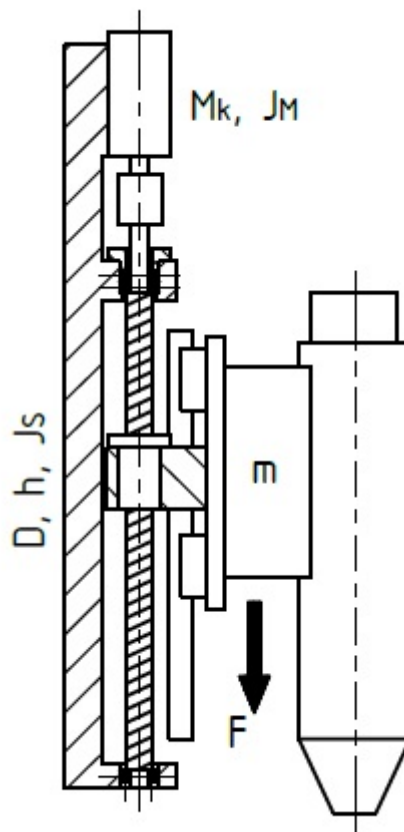
obr. 35: Uložení sestav pohybových os na vřeteníku stroje
(původní převzatá část sestavy stroje je zašedlá)

7.1.3 Dynamika pohybových os

Důležitou vlastností pohybových os nesoucí navařovací hlavy, je dynamika těchto os. Akcelerační a decelerační schopnost s maximální dosažitelnou rychlostí přímo ovlivňuje čas, za který osa s hlavou dojde na danou pozici. V tomto případě je osa v konfiguraci s kuličkovým šroubem hnaným servomotorem. Parametry ovlivňující dynamiku osy jsou hmotnost pohybující se části, stoupání kuličkového šroubu a výkonové parametry pohonu. Výpočet maximálních dosažitelných zrychlení osy vychází z [33] (str. 102-103).

Na obrázku (36) je znázorněno schéma výpočtového modelu. Síla F působí svisle ve směru tíhového zrychlení a jedná se ve skutečnosti o tíhovou sílu danou hmotností po-

hybujících se částí, která působí konstantně přes matici na kuličkový šroub, potažmo na servomotor. Je zřejmé, že maximální dosažitelné zrychlení bude ve směru pohybu proti působící síle menší než ve směru působící síly. Pohon musí, kromě setrvačných sil, překonávat ještě tíhovou sílu F . Naproti tomu ve směru působící síly tato síla přispívá k zrychlení v tomto směru. Určující hodnotou zrychlení bude případ proti směru působící síly F , neboť nás zajímá menší z těchto dvou hodnot. Vlastní výpočet zrychlení proti směru působící síly F je dán vztahem (7.3). Působící síly a hmoty jsou redukovány na hřídel motoru. Kde M_k je jmenovitý krouticí moment servomotoru, h je stoupání šroubu v základních jednotkách $[\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}]$ a J_M a J_S jsou momenty setrvačnosti rotoru servomotoru respektive kuličkového šroubu. Po dosazení konkrétních hodnot, vychází zrychlení $a_p = 2,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Toto zrychlení je adekvátní vůči zrychlení os samotného stroje MCV 1000 5AX, které má hodnotu pro všechny osy stejnou a to $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



obr. 36: Schéma pohybové osy pro výpočet zrychlení

$$h = \frac{P}{2000 \cdot \pi} = \frac{5}{2000 \cdot \pi} = 0,000796 \text{ m}\cdot\text{rad}^{-1} \quad (7.2)$$

$$a_p = \frac{M_{kRED}.h}{J_{RED}} = \frac{(M_k - F.h).h}{J_M + J_S + m.h^2} = \frac{(0,6 - 294,3 \cdot 0,0008) \cdot 0,0008}{0,000028 + 0,000085 + 30 \cdot 0,0008^2} = 2,21 m \cdot s^{-2} \quad (7.3)$$

$$v_{MAX} = \frac{n.h.2.\pi}{60} = \frac{6000 \cdot 0,0008 \cdot 2.\pi}{60} = 0,5 m \cdot s^{-1} \quad (7.4)$$

$$t_p = \frac{L}{v_{MAX}} + \frac{v_{MAX}}{a_p} = \frac{0,47}{0,5} + \frac{0,5}{2,21} = 1,17 s \quad (7.5)$$

Porovnání zrychlení ve směru a proti směru zatěžující síly stejně jako bez uvažování zatěžující síly jsou uvedeny v tabuce 6, stejně jako vstupní parametry výpočtu. Zrychlení ve směru působící síly by mohlo až být příliš velké, omezení zrychlení lze ošetřit v řídicí jednotce omezením krouticího momentu pro tento směr pohybu respektive omezením proudu.

tab. 6: Parametry výpočtu dynamických veličin pohybové osy W_1

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Vstupní parametry			
Jmenovitý krouticí moment motoru	M_k	0,6	N.m
Jmenovité otáčky motoru	n	6 000	min ⁻¹
Moment setrvačnosti motoru	J_M	0,000 028	kg.m ²
Moment setrvačnosti šroubu	J_S	0,000 085	kg.m ²
Hmotnost pohybujících se částí	m	30	kg
Stoupání šroubu	h	0,000 8	m.rad ⁻¹
Vzdálenost dojetí na polohu	L	470	mm
Maximální dosažitelná zrychlení			
Zrychlení bez uvažování působící síly	a_b	3,62	m.s ⁻²
Zrychlení proti směru působící síly	a_v	2,21	m.s ⁻²
Zrychlení ve směru působící	a_p	5,03	m.s ⁻²
Doba dojetí na požadovanou polohu			
Čas dojetí na polohu bez uvažování půs. síly	t_b	1,08	s
Čas dojetí na polohu proti směru půs. síly	t_v	1,17	s
Čas dojetí na polohu ve směru půs. síly	t_p	1,04	s

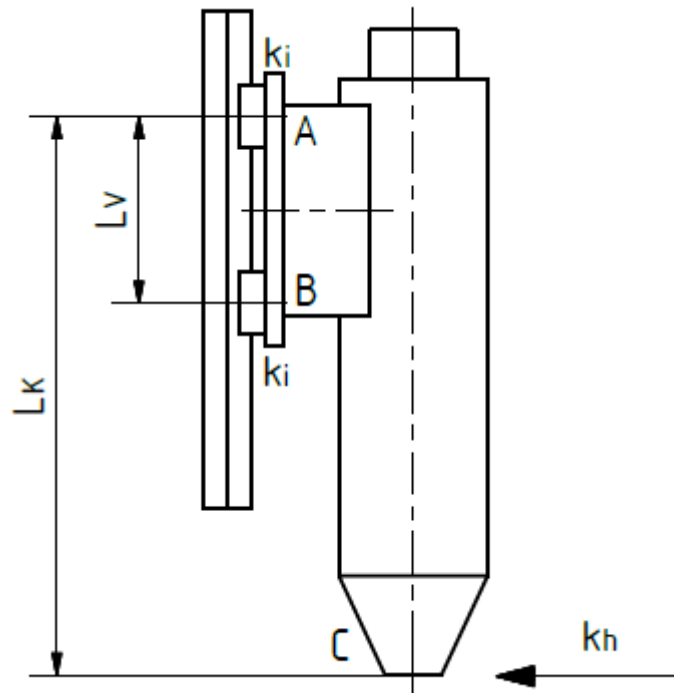
Ze známých hodnot maximálního zrychlení pro dané směry a z hodnoty maximální rychlosti při jmenovitých otáčkách v_{MAX} vypočtené ze vztahu (7.4), kde n jsou jmenovité otáčky servomotoru, je jednoduché dopočítat čas potřebný k dojetí na danou vzdálenost polohy L . čas potřebný pro najetí na polohu t_p odpovídající maximálnímu zdvihu osy, tedy 470 mm, je vypočten ve vztahu (7.5). Tento čas uvažuje zrychlení proti směru působící síly

a_p . Výpočet vychází z předpokladu lichoběžníkového průběhu rychlosti, tedy osa akceleruje na hodnotu maximální rychlosti, poté jede patřičný úsek konstantní maximální rychlostí a ke konci deceleruje. Potřebný čas na dojetí na polohu s výše zmíněnými parametry je 1,17 s. Pro představu, vzdálenosti 47 mm se zrychlením a_p osa dosáhne za 0,29 s. Při menších hodnotách vzdálenosti polohy je poměr vzdálenosti k potřebnému času horší, neboť osa nedokáže zrychlit na maximální rychlost a průběh rychlosti je tak trojúhelníkový. Časy potřebné na dojezd pro tři režimy působení zatěžující síly jsou opět uvedeny v tabulce 6.

7.1.4 Kontrola tuhosti uložení navařovacích hlav

Realizace požadovaného zdvihu 470 mm, si vynutila konstrukci s poněkud vyloženým koncem navařovacích hlav vůči skupině valivých hnízd lineárního vedení. Za provozu by mohly přenášené vibrace ze stroje způsobovat nežádoucí kmitání právě na konci navařovacích hlav. Z tohoto důvodu byla zkontrolována alespoň hodnota statické tuhosti na konci navařovacích hlav k_h , která dává základní předpoklad pro hodnoty dynamické tuhosti. Ve výpočtu je uvažována pouze tuhost použitých vozíků lineárního vedení v normálovém směru k_i , která má hodnotu udávanou výrobcem 250 N/ μ m. Tuhost dílce, na kterém je hlava uložena, je zanedbána z důvodu nepoměrně větší tuhosti vůči vozíkům lineárního vedení. Výpočet výrazněji ovlivní zanedbání tuhosti navařovací hlavy, ta je bohužel neznámá. Samotný výpočet vychází ze zjednodušeného modelu zobrazeného na obrázku (37). Jak je patrné ze vztahu (7.6), tuhost na konci hlavy k_h ovlivňují geometrické parametry konstrukce, konkrétně rozvor vozíků L_V a vzdálenost od konce hlavy k bodu horní skupině vozíků L_K . Vztah je odvozen z výpočtu silových reakcí v bodech A a B po zatížení jednotkovou silou v místě hledané tuhosti k_h a následném vypočtení deformací v těchto bodech. Přes podobnost trojúhelníků je pak spočtena deformace v bodě C a odvozen vztah pro výpočet tuhosti k_h . Vypočtená hodnota tuhosti na konci navařovací hlavy činí 16,2 N/ μ m. Tato hodnota je sice menší v porovnání s hodnotami statických tuhostí u velkých a středních obráběcích strojů v místě nástroje (obvykle 50 ÷ 150 N/ μ), ale můžeme odhadnout, že hodnota dává dobrý předpoklad i pro přiměřenou dynamickou tuhost (poddajnost).

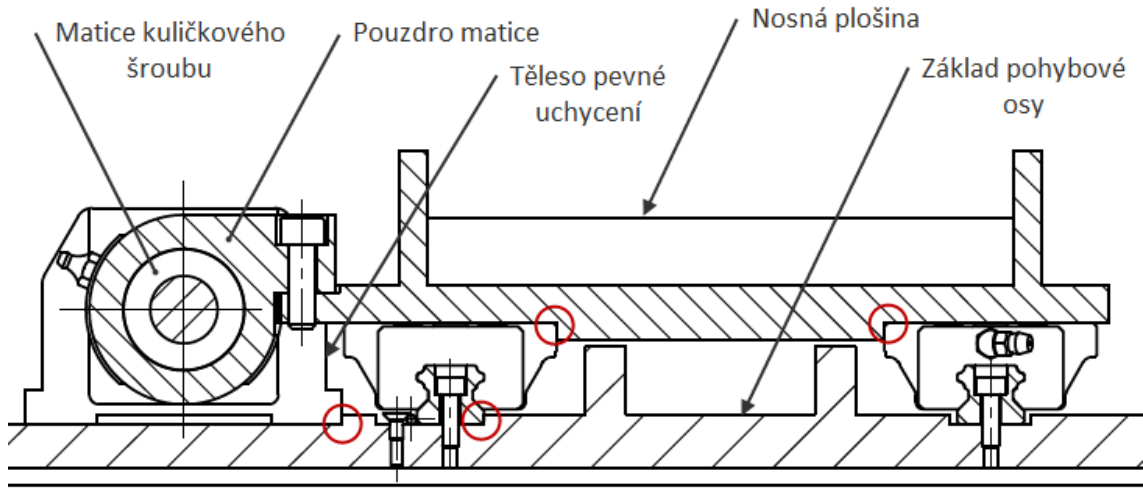
$$k_h = \frac{2 \cdot k_i}{2 \cdot \frac{L_K^2}{L_V^2} - \frac{L_K}{L_V}} = \frac{2 \cdot 250}{2 \cdot \frac{670^2}{160^2} - \frac{670}{160}} = 16,2 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (7.6)$$



obr. 37: Schéma uložení navařovací hlavy pro výpočet tuhosti k_h

7.1.5 Volba základen pro lineární vedení pohybových os

Posuvný pohyb v sestavách pohybových os W_1 a W_2 je realizován lineárními vedeními v kuličkovém provedení. V konstrukcích s lineárními vedeními jako je tato, se připevňují čtyři skupiny, dvě kolejnice a dvě dvojice vozíků. Standardně je poloha tří těchto skupin pevně definována a čtvrtá je volná, uzavírá tak rozměrový obvod a kompenzuje výrobní nepřesnosti. Jak je vidět na obrázku (38), poloha vozíků je pevně definována montáží na nosnou plošinu s doražením k vnitřním tolerovaným plochám. Levá kolejnice je dotlačována k tolerované ploše základu pohybové osy a určuje tak směr pohybu. Pravá kolejnice zůstává volná a při montáži se připevňuje jako poslední právě kvůli kompenzacím výrobních nepřesností. Tímto je vymezen lineární pohyb nosné plošiny vůči základu pohybové osy. Spojení nosné plošiny s maticí kuličkového šroubu zajišťuje pouzdro matice. Uložení matice kuličkového šroubu v pouzdru matice je záměrně navrženo s vůlí. Připevnění pouzdra matice k nosné plošině a připevnění matice kuličkového šroubu k pouzdru bude provedeno až po ustavení a připevnění obou těles, ve kterých se uložen kuličkový šroub. Doražení těles k tolerované ploše na základu pohybové osy zaručí požadovanou rovnoběžnost kuličkového šroubu se skupinou lineárních vedení.



obr. 38: Rozměrový obvod lineárních vedení pohybové osy (červené kroužky označují místa kontaktu se základnami)

7.1.6 Návrh elektronické části pohonu pohybových os

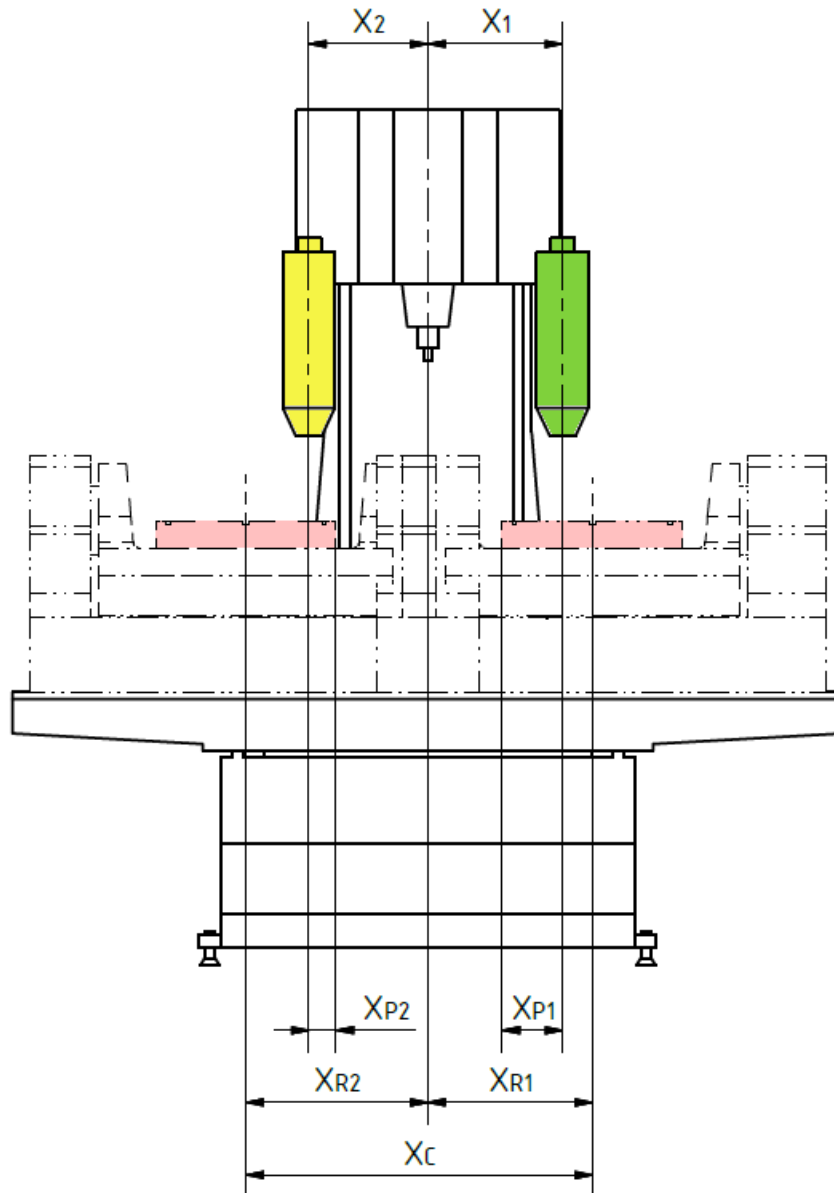
V souvislosti s navrhnutými pohybovými osami byla řešena řídicí část pohonu. Z požadavku na samostatné pohybové osy, které bude možné napojit na řídicí systém stroje nebo obecně na jakýkoliv nadřazený řídicí systém, vyplynula nutnost vybavit tyto osy řídicí jednotkou. Systém pohonů os byl navrhnout v systému Sinamics S120 společnosti Siemens určený právě pro podobné aplikace. S využitím programu SIZER byly navrženy potřebné komponenty pro realizaci požadované funkce. Další podrobnosti návrhu byly konzultovány se zástupcem firmy Siemens. Výkres elektro-projektu pohonů os je součástí přílohy výkresové dokumentace (č.v. ESM_001). Nadřazený řídicí systém bude vysílat pouze požadavek polohy pro pohybové osy do řídicí jednotky a ta požadavek zrealizuje. Řídicí jednotka určuje požadavek proudu na měniči motoru a zajišťuje polohovou i rychlostní zpětnou vazbu. Řídicí jednotka musí dále zajistit základní výstupy (popisy stavu) pro nadřazené PLC stroje. Zejména musí informovat o připravenosti a havárii. Encodery jsou absolutní s 15-bitovým rozlišením na otáčku a 12-bitovou pamětí otáček. Informace o aktuální poloze je zachována v registru encoderu i po odpojení servomotoru od elektřiny. V řídicí jednotce jsou zavedeny další potřebné funkce. Řídicí jednotka bude zajišťovat havarijní brzdění protiproudem.

7.1.7 Definice požadavků na konstrukční změny stroje

Vzhledem k tomu, že jsou již zkonstruované sestavy pohybových os W_1 a W_2 , a jsou známé jejich rozměry, lze určit hodnoty vzdáleností os navařovacích hlav od osy vřetene X_1 a X_2 , zmiňované v kapitole 7.1.1, číselně vzdálenost X_1 činí 389 mm a X_2 344 mm. Hodnoty vyšly rozdílné z důvodu rozdílných rozměrových parametrů obou navařovacích hlav. Tyto hodnoty jsou důležité pro určení požadavku na úpravu rozsahu pohybové osy X stroje. Pro možnost navařování oběma hlavami v celém pracovním rozsahu, tedy v prostoru nad kruhovou upínací deskou o průměru 520 mm, je nutný minimální rozsah osy X , který toto umožní. Situaci znázorňuje obrázek (39), kde je zobrazen stůl v obou krajních polohách při současném možném rozsahu osy X_C , který činí 1 000 mm. Rozměry X_{R1} a X_{R2} znamenají vzdálenost osy kruhové upínací desky v obou krajních polohách od osy vřetene v rovině XZ stroje. Vzhledem k nesymetrickému umístění kruhové upínací desky na stole, nejsou tyto vzdálenosti stejné, a sice X_{R1} činí 475 mm a X_{R2} 525 mm. K pokrytí celého pracovního prostoru oběma navařovacími hlavami je nutné zvětšit rozsah pohybové osy X v obou směrech o hodnoty X_{P1} respektive X_{P2} pro dané směry, viz. obrázek (39). Výpočet těchto hodnot udávají vztahy (7.7) a (7.8). Kde D_U je Průměr kruhové upínací desky.

$$X_{P1} = X_1 + \frac{D_U}{2} - X_{R1} = 389 + \frac{520}{2} - 475 = 174mm \quad (7.7)$$

$$X_{P2} = X_2 + \frac{D_U}{2} - X_{R2} = 344 + \frac{520}{2} - 525 = 79mm \quad (7.8)$$



obr. 39: Schéma pracovního rozsahu navařování

Tyto vypočtené hodnoty tedy definují požadavek na úpravu pracovního rozsahu osy X. Toho by mělo být dosaženo úpravou křížových saní, jakožto části nosné struktury stroje, včetně souvisejících komponent. Ostatní části nosné struktury stroje nevyžadují další úpravy. Úpravu křížových saní by bylo vhodné realizovat symetricky, tak, aby se výsledný rozsah zvětšil v obou směrech o 175 mm.

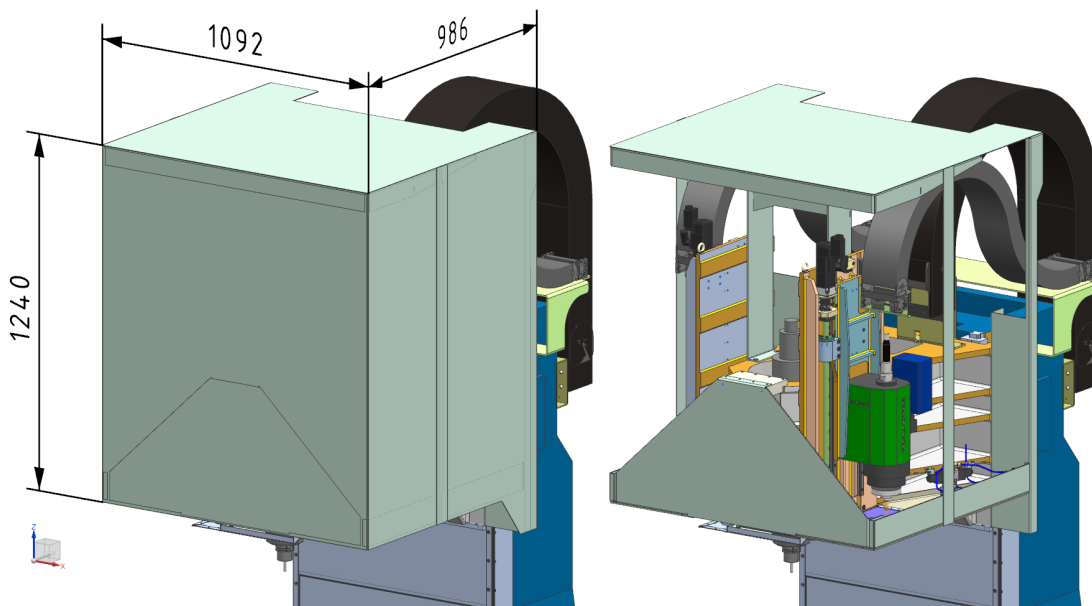
Další úpravy se budou týkat krytování prostoru vřeteníku. Vzhledem k uložení sestav pohybových os přímo na bocích vřeteníku je nutné aby krytování zakrylo celý prostor, zvětšený o pohybové osy.

Vzhledem k zvolené variantě uložení navařovacích hlav na stroji a velikosti zakrytovaného prostoru vřeteníku nebude možné použít stávající systém AVN v bubnovém provedení. Pro práci stroje v automatickém cyklu je však systém AVN nezbytný, proto je nutné nahradit současný systém AVN takovým, který bude moci být použit při současných podmínkách.

Poslední nutnou úpravu představuje rozměrová úprava kapotáže stroje. Úprava se týká rozšíření ve směru osy X, z důvodu rozměrové úpravy křížových saní a kvůli přizpůsobení novému systému AVN. Také je nutné přizpůsobit krycí plechy horní části kapotáže novému krytování prostoru vřeteníku a systému AVN.

7.2 Řešení krytování prostoru vřeteníku

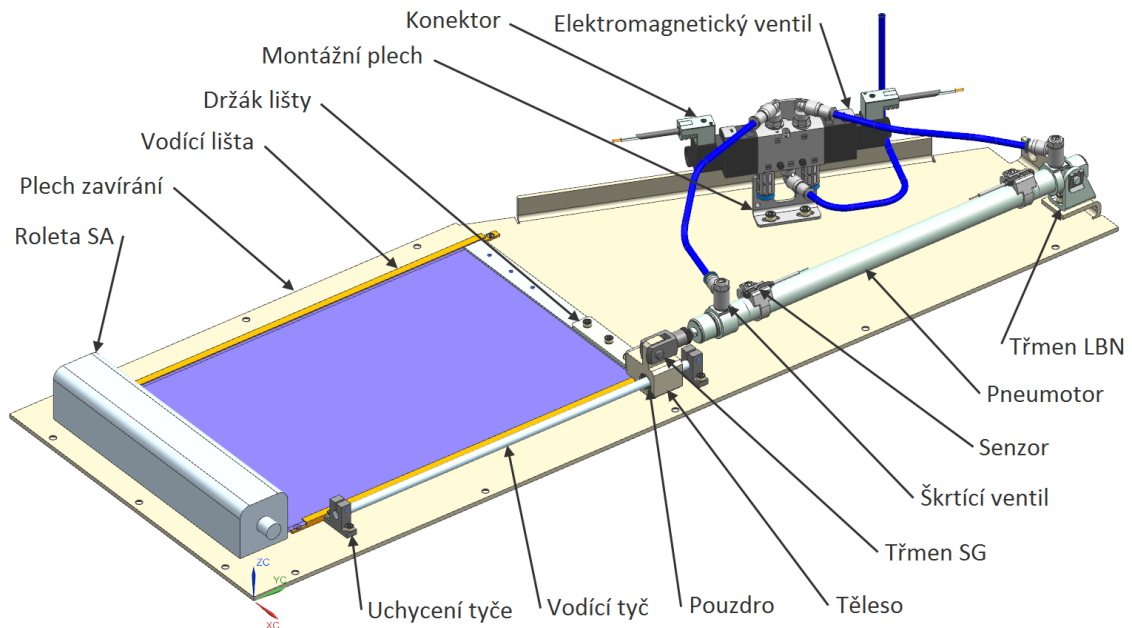
Současné provedení krytování prostoru vřeteníku vychází z původního provedení, kostra i krycí plechy jsou navrhnuty z plechů tloušťky 4 a 5 mm. Připojení krytování k vřeteníku je totožné s původní variantou. Současná podoba s vnějším tvarem kvádru je rozměrově navržena, aby tvořila obálku zvětšeného prostoru vřeteníku o přidané sestavy pohybových os. Přední a boční kryty jsou demontovatelné z důvodu umožnění případného náhledu a přístupu do prostoru vřeteníku k pohybovým osám a dalším částem. Rozměry nového provedení krytování jsou zakótovány v obrázku (40), číselně 1 092 x 1 240 x 986 mm (Š x V x H).



obr. 40: Krytování prostoru vřeteníku

7.3 Konstrukce systému zavírání prostoru vřeteníku

Z důvodu ochrany navařovacích hlav a komponent pohybových, os byly zkonstruovány sestavy automatického zavírání prostoru vřeteníku. Na obrázku (41) je zobrazena sestava zavírání prostoru vřeteníku umístěna na straně vřeteníku pod pohybovou osou W_1 . Na druhé straně vřeteníku je téměř zrcadlově shodná sestava.



obr. 41: Systém zavírání prostoru vřeteníku

K otevření průchodu zakrytého roletou, dojde pouze v okamžiku před vysunutím dané navařovací hlavy a po jejím zasunutí se roleta opět zasune. Základ tvoří plech zavírání uzpůsobený k připevnění do spodní části krytování prostoru vřeteníku. Na tento plech je připevněna roleta SA, zakrývající průchod v plechu zavírání. Materiál rolety Preotex030 odolný teplotám do 600 °C, je svými vlastnostmi vhodný pro použití v daném prostředí. Roleta je uložena na hřídeli v ochranném boxu a předepnuta torzní pružinou. Rovnoměrné vedení rolety ve vodících lištách je zajištěno jejím připojením na vodící tyč s pouzdem uloženým v tělese. Na tomto tělese je zároveň uchycen třmen SG spojený s volným koncem pneumotoru. Stav otevření a zavření rolety závisí na poloze pneumotoru řízeného elektromagnetickým ventilem. Řídící signály k elektromagnetům ventilu je možné vysílat přímo z řídicího systému stroje, nebo z řídicí jednotky pohybových os, v závislosti na zapojení. Signály o dané poloze pístu pneumotoru, respektive o stavu rolety snímají polovodičové senzory připevněné na vnějším válci pneumotoru. Senzory je nutné při montáži ustavit tak, aby spínaly právě v koncových polohách zdvihu pneumotoru. Sepnutí daného senzoru bude nutnou podmínkou zadanou do PLC umožňující vysunutí navařovací hlavy. Při

montáži bude také nastavena přiměřená rychlost pohybu pístnice pneumotoru seřízením škrtících ventilů. Přívod tlakového vzduchu 6 Bar na vstup ventilu je hadičkou s vnějším průměrem 6 mm .

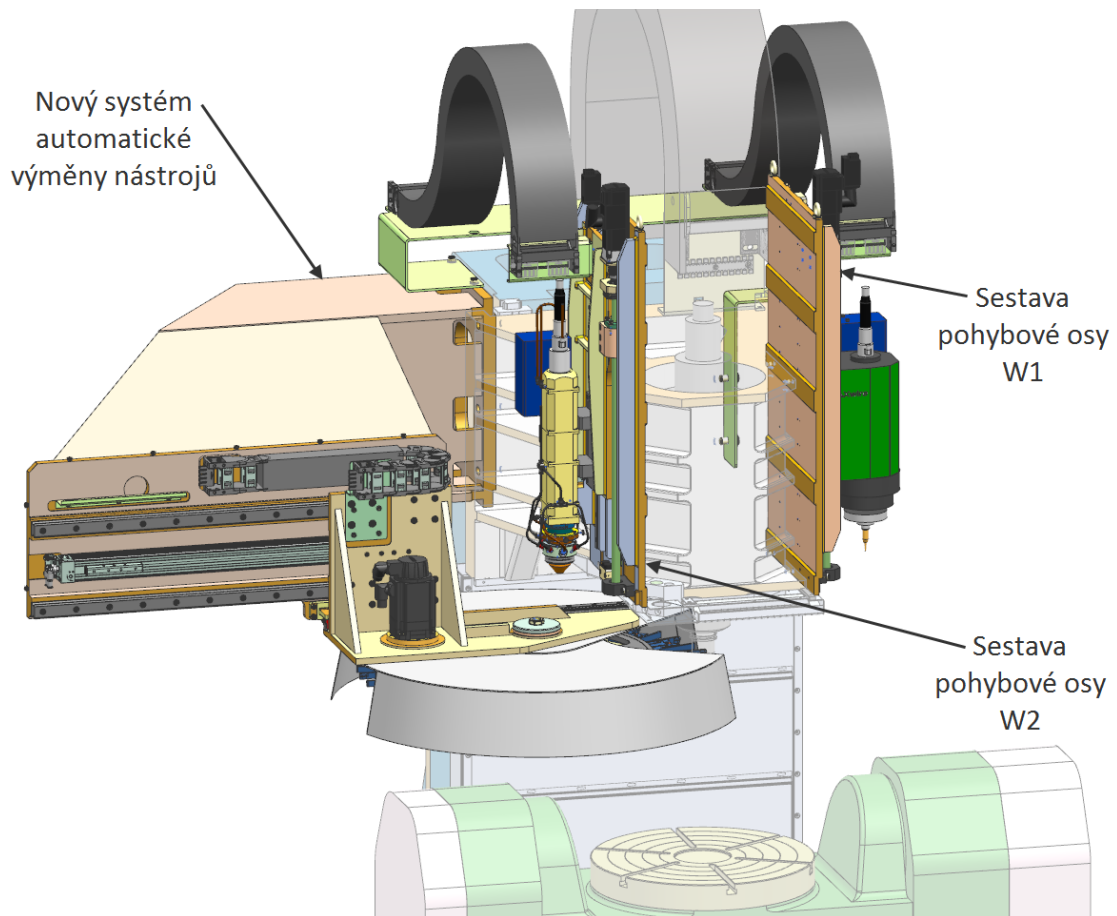
Sestavné výkresy sestav systémů zavírání pro obě pohybové osy jsou součástí přílohy výkresové dokumentace.

Pro pohybovou osu W_1 (č. v. ASM_000001278_00_PDF_1).

Pro pohybovou osu W_2 (č. v. ASM_000001279_00_PDF_1).

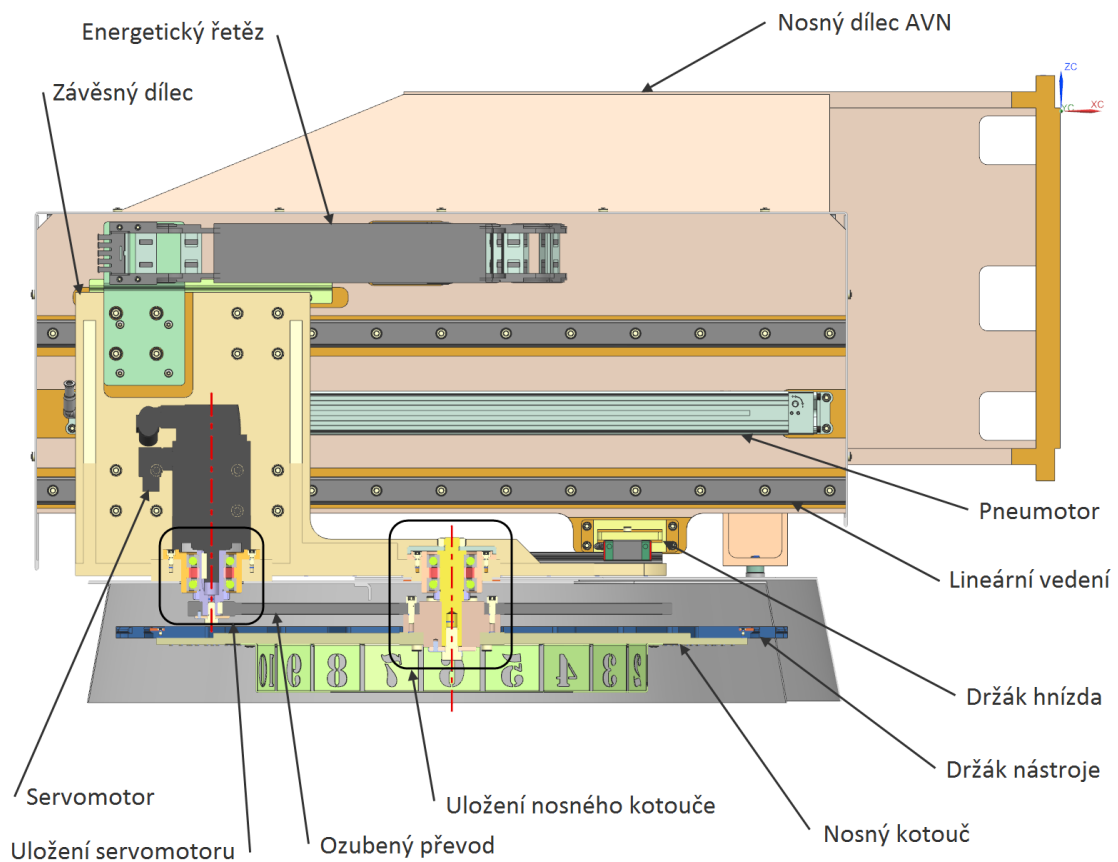
7.4 Řešení systému automatické výměny nástrojů

Kvůli důvodům zmíněným v kapitole 7.1.7 byl navrhnut a zkonstruován nový systém automatické výměny nástrojů. Nový systém AVN v pick-up provedení v pozici výměny nástroje na stroji MCV 1000 5AX je zobrazen na obrázku (42). Důležitým parametrem tohoto systému je velký dosah výsuvné části nutný k najetí osy měněného nástroje pod osu vřetene.



obr. 42: Nový systém AVN v pozici výměny nástroje

System ANV s vyznačenými základními částmi je zobrazen v řezu osy nosného kotouče s nástroji na obrázku (43). Nosný dílec AVN navrhnout jako svařenec z plechů o tloušťce 15 a 20 mm je připevněn ke stroji osmi šrouby se šestihrannou hlavou M16 na stávající připojovací ploše na boku stojanu stroje. Závěsný dílec spojený lineárním vedením s nosným dílcem je připojen k jezdci bezpístnicového pneumotoru. Pneumotor pohybuje s celou skupinou závěsného dílce při výměně nástroje, vždy z jedné koncové polohy do druhé. Jsou zde využity stejné senzory spínající v koncových polohách jako u systémů zavírání prostoru vřeteníku viz. kapitola (7.3). Součást označená na obrázku (43) jako držák hnízda drží vozík lineárního vedení, jehož funkcí je zpevnit poněkud vyloženou skupinu závěsného dílce v zasunuté poloze a zabránit tak možnému rozkmitání této skupiny. Otáčení nosného kotouče s držáky nástrojů činí servomotor přes vložený ozubený převod. Absolutní odměřování servomotoru udržuje stále informaci o poloze, tudíž stačí pouze jednou zreferovat servomotor při montáži a oživení AVN na stroji. Ozubený převod má převodový poměr přesně 10:1, což je výhodné při zadávání strojních konstant AVN do řídicího systému stroje. Ozubené soukolí bylo navrženo a zkontrolováno s pomocí programu MITCalc dle normy ISO 6336. Základní parametry ozubeného soukolí jsou uvedeny v tabulce (7).



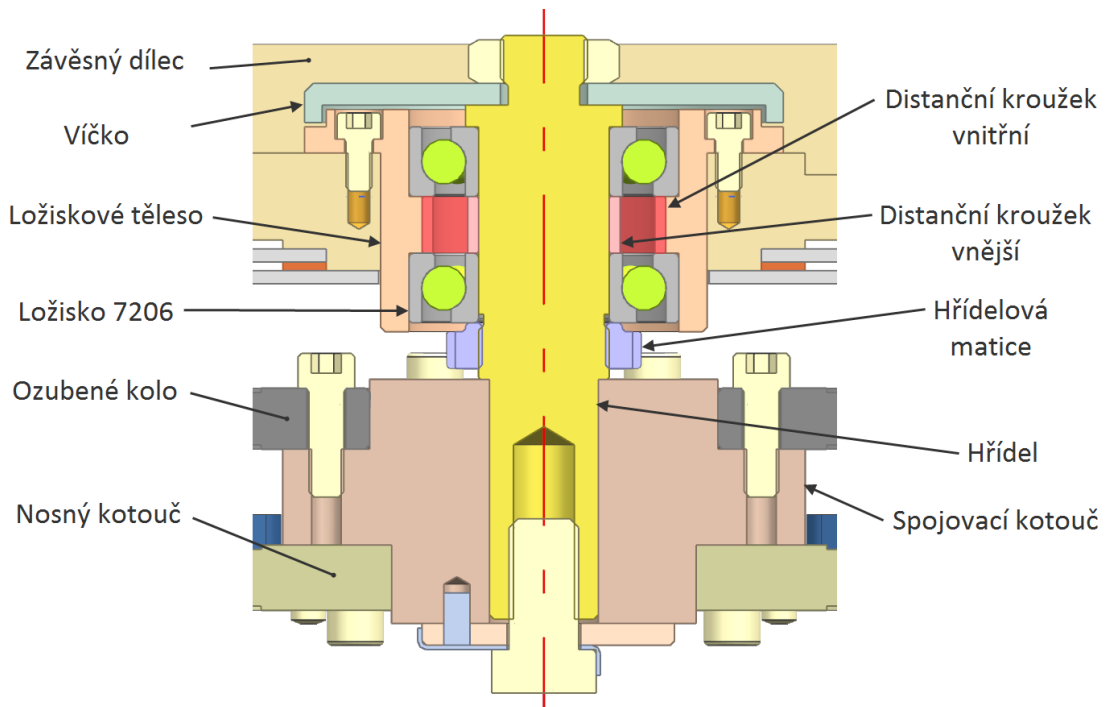
obr. 43: Nový systém AVN v řezu

tab. 7: Základní parametry ozubeného soukolí

Parametr	Označení	Hodnota
Normálový modul [mm]	m_n	3
Počet zubů pastorku	z_1	18
Počet zubů kola	z_2	180
Převodový poměr soukolí	i	10
Osová vzdálenost [mm]	a	297
Úhel záběru [°]	α	20
Úhel sklonu zubů [°]	β	0
Vstupní krouticí moment [N.m]	M_{k1}	2,6
Vstupní otáčky [min^{-1}]	n_1	3 000
Materiál pastorku	mat_p	C45
Materiál kola	mat_k	C45
Mez pevnosti mat. pastorku [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	R_{mp}	640
Mez pevnosti mat. kola [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	R_{mk}	640
Koeficient bezpečnosti na dotyk	S_H	1,2
Koeficient bezpečnosti na ohyb	S_F	1,6
Koef. jednorázového přetížení	K_{AS}	2,0
Provozní životnost soukolí [h]	L_h	20 000

Výrobní výkres pastorku je součástí přílohy výkresové dokumentace (č. v. PRT_000003661_00_PDF_1) a ozubeného kola (č. v. PRT_000003657_00_PDF_1).

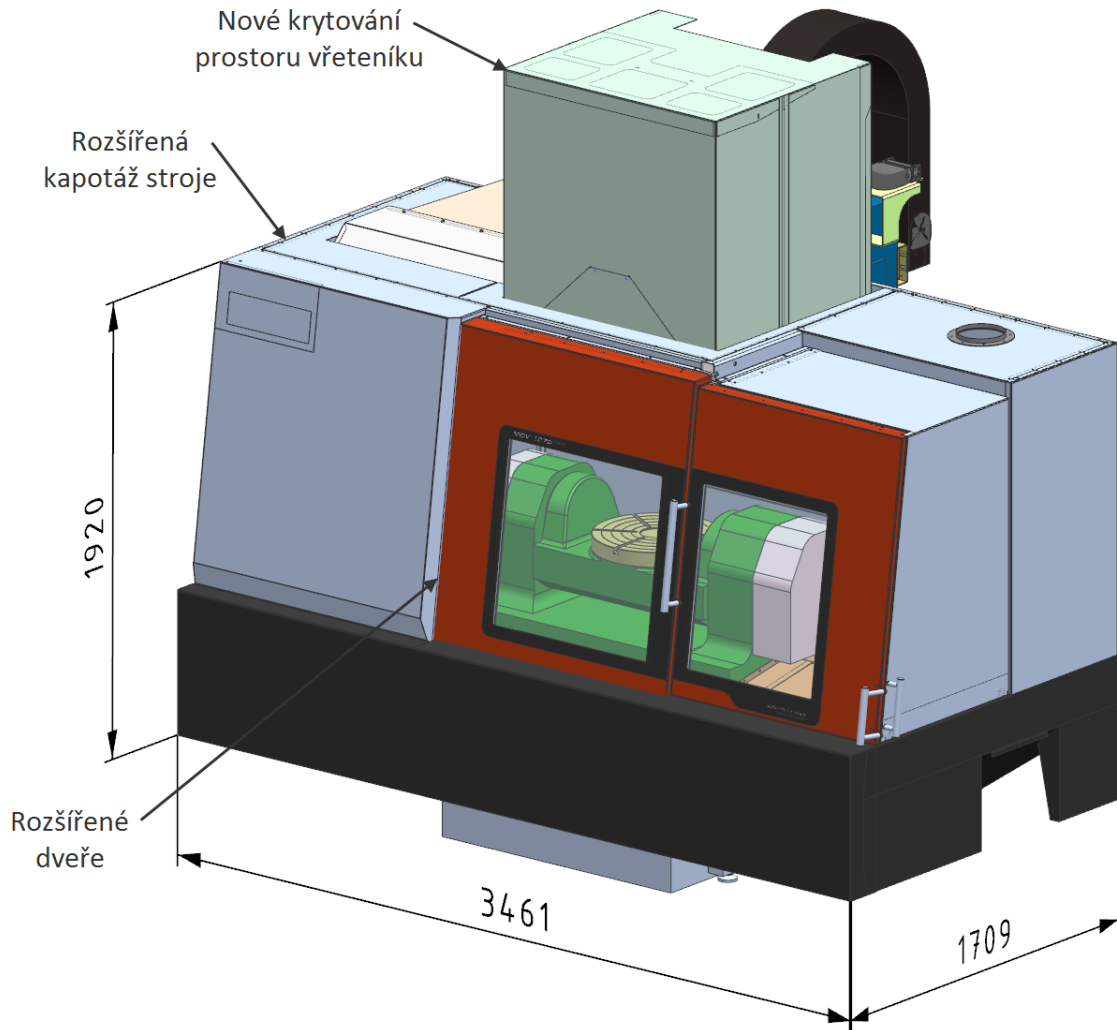
Na obrázku (44) je zobrazen detail uložení nosného kotouče. Hřídel je rotačně uložena v ložiskovém tělese dvojicí kosoúhlých ložisek. Konfigurace ložisek je do „O“, což je únosnější variantou pro přenos klopného momentu, který bude vznikat při působení setrvačných sil na hřídel, než konfigurace do „X“. Z důvodu dosažení a zachování předpětí ložisek jsou použity distanční kroužky. Navržené předpětí je záměrně větší než gravitační síla, která bude působit na hřídel a způsobila by zmenšení nebo až zrušení předpětí ložiskové dvojice. Stálé předpětí je důležité z hlediska tuhosti uložení a životnosti, která u se u nepředepjatých ložisek s kosoúhlým stykem rapidně snižuje. Uložení servomotoru na nosném dílci je obdobné jako uložení nosného kotouče s použitím stejných ložisek a o stejném předpětí.



obr. 44: Detail uložení nosného kotouče

7.5 Řešení krytování stroje

Vzhledem k novým sestavám přidaným na stroji a předpokládané úpravě křížových saní bylo nezbytné přizpůsobit kapotáž stroje stávajícímu stavu. Původní koncept kapotáže je zachován, pouze je provedeno několik úprav. Kapotáž je symetricky rozšířena o 300 mm, tedy o 150 mm na každou stranu, současná šířka činí 3 461 mm. K jiným úpravám, které by ovlivnily vnější rozměry nedošlo. Současná podoba se zakótovanými vnějšími rozměry kapotáže stroje je zobrazena na obrázku (45). Dále byly upraveny krycí plechy horní části kapotáže podle tvaru nového krytování vřeteníku a systému AVN. Poslední úprava se týkala rozšíření dveří, z důvodu zachování přístupu do právního prostoru stroje. Přední prosklené dveře jsou rozšířeny ve vodorovném směru o 150 mm stejně jako plech, do kterého jsou při otevírání zasouvána.



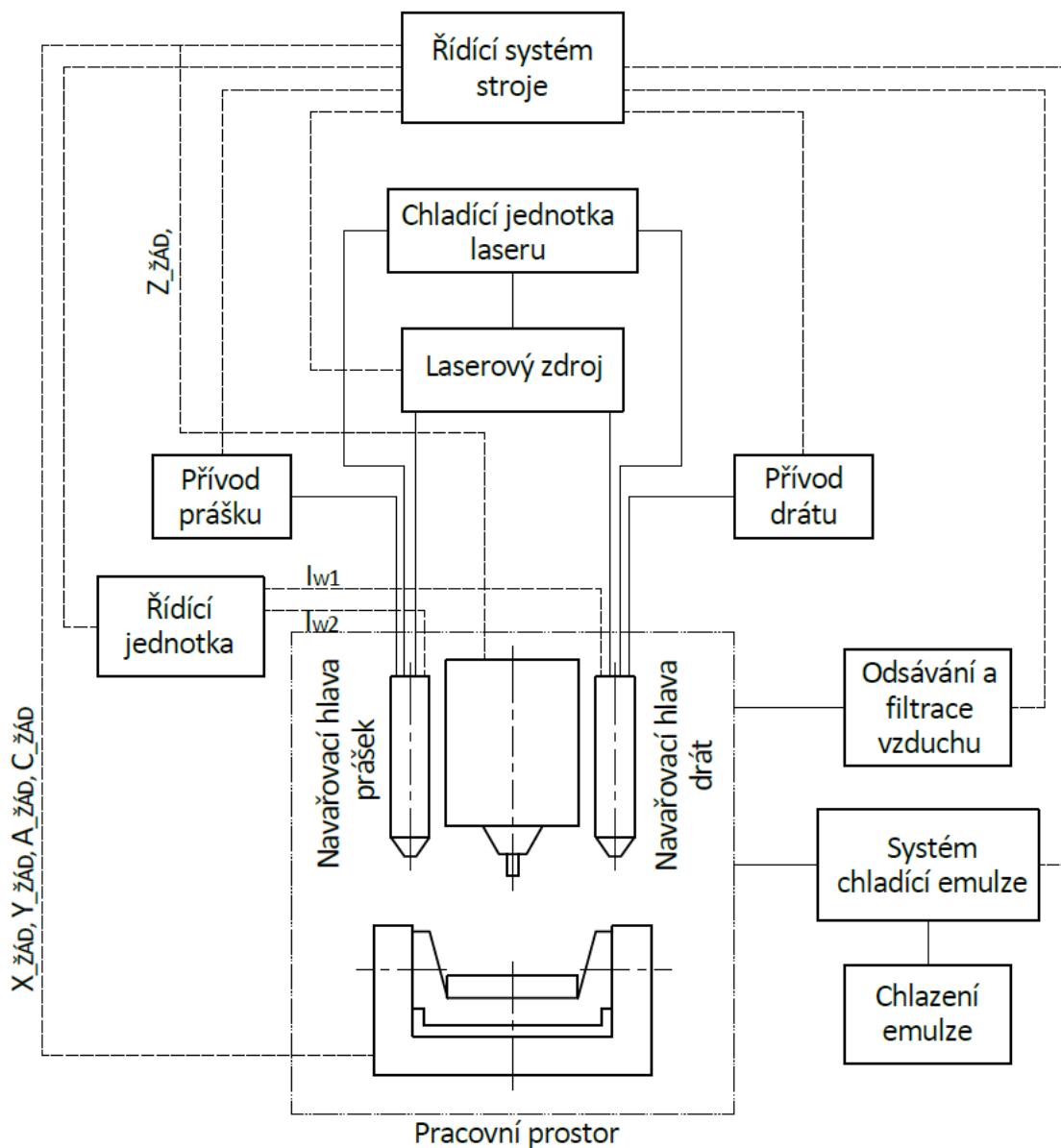
obr. 45: Stroj MCV 1000 5AX s upravenou kapotáží

7.6 Řešení periférií hybridního stroje

Přidání technologie laserového navařování do stávající frézovacího stroje současně vyžaduje přidání souvisejících zařízení potřebných k provozování aditivní laserové technologie. Tato zařízení jsou perifériemi stroje umístěné v jeho blízkosti. Kromě periférií pro laserové navařování kovu práškem a drátem jsou na stroj napojeny další periférie, které již byly součástí stroje. Jedná se o nádrž s chladicí emulzí, chladič emulze, odsávání a filtraci vzduchu pracovního prostoru. Tyto periférie byly převzaty a ponechány bez úpravy.

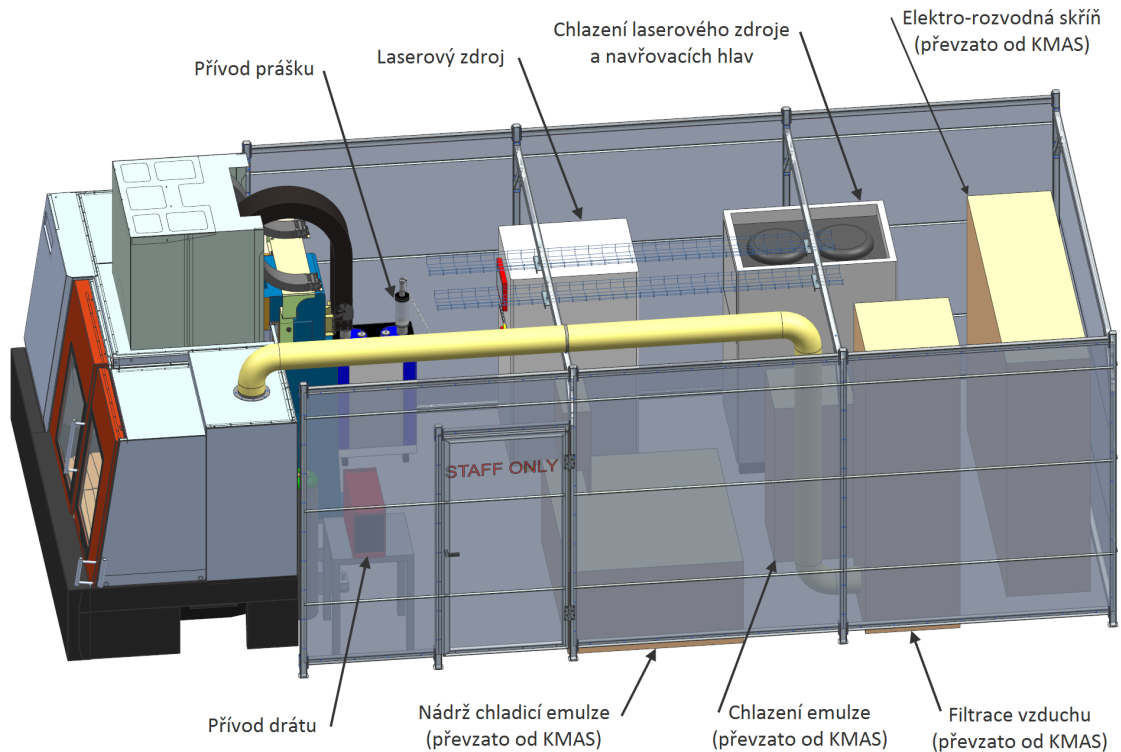
Schéma napojení zmíněných periférií na řídicí systém stroje je zobrazeno na obrázku (46). Periférie systému laserového navařování jsou laserový zdroj, chladicí jednotka, zařízení pro přívod prášku a pro přívod drátu. Ve výčtu by ještě mohly být tlakové bomby s inertním plynem napojené na navařovací hlavy s řízeným průtokem plynu chránícího

navářovací proces. V tomto návrhu architektury řízení jsou periférie napojeny přímo na řídicí systém stroje. Periférie pro proces laserového navářování by mohly být napojeny na samostatný systém, a až ten by byl napojen na řídicí systém stroje. Takovéto zapojení by pak bylo obdobné napojení lineárních os navářovacích hlav W_1 a W_2 na samostatnou řídicí jednotku. Pro ucelenou představu řízení celého procesu hybridní výroby jsou ve schématu zobrazeny také signály k interpolaci pohybových os stroje od řídicího systému a signály k polohování přídatných lineárních os nesoucí navářovací hlavy. Ve schématu nejsou zobrazeny signály kontroly navářovacího procesu od termokamery E-MAqS specifikované v kapitole 5.4.



obr. 46: Schéma periférií hybridního stroje

Veškeré výše zmíněné periférie musí být umístěny v blízkosti navrhovaného hybridního stroje. Celkový zástavbový prostor stroje se s započítáním všech periférií výrazně zvýší. Pro potřeby ohrazení tohoto zástavbového prostoru zahrnujícího veškeré periférie byl navrhnout jednoduchý box tvořený kostrou z JU profilů a stěnami z plechu. Možné uspořádání periférií v navrhnutém boxu je zobrazeno na obrázku (47).



obr. 47: Možné uspořádání periférií hybridního stroje

Navrhnuté periférie pro navařování práškem a drátem nebudou blíže specifikovány. V následující kapitole jsou uvedeny s označením v souvislosti se zhodnocení nákladů za systém laserového navařování.

7.7 Souhrn nákladů na výrobu prototypu

V této kapitole budou shrnuty náklady spojené s úpravou stroje MCV 1000 5AX na stroj hybridní. Souhrn nákladů je omezen na náklady na zkonstruované sestavy. Celkové náklady za sestavy jsou rozděleny do čtyř skupin. První skupinu představují náklady za nakupované položky v sestavách pohybových os W_1 a W_2 vyjma nákladů za navařovací hlavy. Souhrn nákladů za nakupované položky v této skupině uvádí tabulka (8). Tyto sestavy jsou v jedné skupině z důvodu využití stejných nakupovaných položek. Stejně jsou v jedné skupině sestavy systémů zavírání krytování prostoru vřeteníku, s vyčíslením

nákladů uvedených v tabulce (9) . Další skupinu představují náklady na zásobník nástrojů, viz. tabulka (10). Poslední skupinu tvoří náklady za systémy laserového navařování včetně laserových procesních hlav viz. tabulka (11). Celkové náklady za všechny skupiny jsou uvedeny v tabulce (12).

Všechny uváděné ceny jsou v Kč bez DPH. Ceny položek udaných v € byly přepočteny na Kč podle kurzu ke dni 14.7.2016 (1€ = 27,04Kč).

tab. 8: Náklady na sestavy pohybových os W_1 a W_2

Položka - označení	Výrobce	Počet	Cena [Kč/ks]	Cena [Kč]
Servomotor 1FK7022-5AK71-1VB3	SIEMENS	2	28 419,-	56 868,-
Control unit 6SL3040-1MA00-0AA0	SIEMENS	1	15 900,-	15 900,-
Smart line module 6SL3130-6AE15-0AA0	SIEMENS	1	15 629,-	15 629,-
Double motor module 6SL3120-2TE13-0AA4	SIEMENS	1	27 716,-	27 716,-
SITOP power supply 6EP1334-3BA00	SIEMENS	1	4 678,-	4 678,-
Line choke 6SL3000-0CE15-0AA0	SIEMENS	1	3 164,-	3 164,-
Terminal block 8WA1011-0DF21	SIEMENS	1	270,-	270,-
Kolejnice HGR20R820C	HIWIN	4	1 418,-	5 672,-
Hnízdo HGW20CAZ0CSW	HIWIN	8	971,-	7 768,-
Těleso SLA-12	HIWIN	2	2 150,-	4 300,-
Kuličkový šroub DEB2005-R-4EF-0690-O-P7	HIWIN	2	9 661,-	19 322,-
Těleso přírubové FK15	HIWIN	2	2 636,-	5 272,-
Mechanický spínač BNS 819-99-D-10-S 80	Balluff	4	3 836,-	15 344,-
Konektor BKS-S 80-G-PU-10	Balluff	4	1 204,-	4 816,-
Vačka BNN 520-81-S-10	Balluff	2	501,-	1 002,-
Energetický řetěz 3500-125-300	IGUS	2	2 263,-	4 526,-
Hřeben 3050 ZC	IGUS	8	80,-	640,-
Spojka BKL-4,5	R+W	2	1 606,-	3 212,-
Silentblok K0571.02001055	Kipp	8	68,-	544,-
Výroba vlastních dílů a montáž	-	2	70 000,-	140 000,-
Celkové náklady za skupinu				337 613,-

tab. 9: Náklady na sestavy zavírání prostoru vřeteníku

Položka - označení	Výrobce	Počet	Cena [Kč/ks]	Cena [Kč]
Roleta SA_250_400_A08_F1.0_Preotex030	Hestego	2	12 114,-	24 228,-
Vodící tyč W8	T.E.A	2	206,-	412,-
Uchycení tyče FGWA08	T.E.A	4	560,-	2 240,-
Pouzdro LME8UU	T.E.A	2	171,-	342,-
Pneumotor DSNU-20-300-PPV-A	Festo	2	1 042,-	2 084,-
Třmen LBN-20/25	Festo	2	111,-	222,-
Třmen SG-M8	Festo	2	57,-	114,-
Přípojka SMBR-8-20	Festo	4	73,-	292,-
Ventil VUVS-L20-P53C-MH-G18-F7-U3-1C1	Festo	2	1 595,-	3 190,-
Senzor SMT-8M-A-PS-24V-E-7,5-N-OE	Festo	4	506,-	2 024,-
Šroubení GRLA-1/8-QS-6-D	Festo	4	197,-	788,-
Montážní plech VAME-B10-20-A	Festo	2	215,-	430,-
Šroubení QSKL-1/8-6	Festo	6	110,-	660,-
Konektor KMEB-1-24-10-LED	Festo	4	510,-	2 040,-
Výroba vlastních dílů a montáž	-	2	5 000,-	10 000,-
Celkové náklady za skupinu				49 066,-

tab. 10: Náklady na sestavu zásobníku nástrojů

Položka - označení	Výrobce	Počet	Cena [Kč/ks]	Cena [Kč]
Servomotor 1FK7042-2AF71-1RB0	SIEMENS	1	29 960,-	29 960,-
Kolejnice HGR35R1000C	HIWIN	2	2 228,-	4 456,-
Hnízdo HGH35CAZ0CSW	HIWIN	4	1 555,-	6 220,-
Kolejnice EGR25R720C	HIWIN	1	1 346,-	1 346,-
Hnízdo EGH25SAZ0CSW	HIWIN	1	947,-	947,-
Energetický řetěz 2828-05-063-0	IGUS	1	2 125,-	2 125,-
Hřeben 3050 ZC	IGUS	3	80,-	240,-
Pneumotor DGC-K-32-650-PPV-A-GK	Festo	1	8 061,-	8 061,-
Senzor SMT-8M-A-PS-24V-E-7,5-N-OE	Festo	2	506,-	1 012,-
Šroubení QSKL 1/8-8	Festo	2	122,-	244,-
Ložisko 7206-BEGBP	SKF	4	1 026,-	4 104,-
Matice KMFE 6	SKF	2	687,-	1 374,-
Rolna NATR 8	SKF	1	486,-	486,-
Nástrojový držák HSK-A63	TAC Rockford	20	1 570,-	31 400,-
Výroba vlastních dílů a montáž	-	1	300 000,-	300 000,-
Celkové náklady za skupinu				391 975,-

tab. 11: Náklady na položky systémů laserového navařování

Položka - označení	Výrobce	Počet	Cena [Kč/ks]	Cena [Kč]
Navařovací hlava COAXwire	Fraunhofer IWS	1	1 352 000,-	1 352 000,-
Termokamera E-MAqS	Fraunhofer IWS	2	432 640,-	865 280,-
Navařovací hlava OTS-5	Laserline	1	647 608,-	647 608,-
Laserový zdroj LDF 4000-100	Laserline	1	2 785 120,-	2 785 120,-
Chladicí jednotka CCA12 + OC	Laserline	1	359 632,-	359 632,-
Přepínání paprsků	Laserline	1	324 480,-	324 480,-
Software řízení teploty LompocPro	Laserline	1	351 520,-	351 520,-
Optické vlákno 1000 LLK-D 10m	Laserline	2	187 576,-	375 152,-
Vedení drátu VR 7000	Fronius	1	51 810,-	51 810,-
Přívod prášku PF 2/2	GTV	1	689 520,-	689 520,-
Celkové náklady za skupinu				7 802 122,-

tab. 12: Celkové náklady za všechny skupiny

Skupina	Náklady [Kč]
Sestavy pohybových os W_1 a W_2	337 613,-
Sestavy zavírání prostoru vřeteníku	49 066,-
Sestava zásobníku nástrojů	391 975,-
Systémy laserového navařování	7 802 122,-
Celkové náklady za nakupované položky	8 580 776,-

Z tabulky (12) je zřejmé, že na celkových nákladech potřebných k výrobě prototypu stroje se nejvíce projeví náklady za aditivní technologii laserového navařování. Ke kompletním nákladům by patřily ještě náklady za integraci do stroje (elektro, strojní) a celkovou montáž, programování a oživení.

7.8 Předpokládaný výkon stroje v hybridním režimu

Výkonnost zkonstruovaného hybridního stroje je přímo odvislá od parametrů zahrnutých systémů. Navrhnuté technologie laserového navařování kovů ať už práškem nebo drátem jsou dimenzovány na použití maximálního výkonu 4 kW daného výkonem stroje. Se zvolenou hlavou pro laserové navařování práškem Fraunhofer COAXwire lze tvořit struktury rychlostí $100 \div 250 \text{ cm}^3/\text{hod}$ (pro nerez. ocel). Rychlost tvorby návaru bude dosti podobná i u hlavy pro navařování práškem. Při navařování oceli s uvažování rychlosti tvorby návaru $200 \text{ cm}^3/\text{hod}$ dojde k navaření přibližně 1,5 kg materiálu za hodinu. Obdobné výkony tvorby struktury dosahují hybridní stroje Hermle C40 MPA a DMG Lasertec 65 3D. Při uplatnění hybridního režimu, kdy bude prováděno mezioperační obrábění, lze odhadnout snížení výkonu růstu vytvářeného dílce na cca 0,5 kg/hod.

8 Závěr

V úvodu práce byla představena technologie laserového navařování kovů „Laser Cladding“, byly uvedeny její vlastnosti, druhy a možnosti uplatnění. Následovala rešerše hybridních strojů s uvedením příkladů prvních realizací hybridních strojů. Uvedeny byly také příklady komerčně nabízených hybridních strojů se základními parametry. V další části práce proběhla analýza laserových systémů dělící se na procesní hlavy pro laserové navařování kovů práškem a drátem a na laserové zdroje. Na základě analýzy byly vybrány laserové systémy vhodné pro integraci do pracovního prostoru stroje MCV 1000 5AX, to znamená konkrétní laserový zdroj a laserové hlavy pro navařování kovu práškem a drátem. V úvodu praktické části byl proveden rozbor variant možného řešení konstrukční integrace dvou systémů laser cladding do stroje. Z možných variant konstrukční integrace byla vybrána nejvhodnější varianta pro podrobné zpracování. Proběhlo konstrukční zpracování zvolené varianty. Konstrukční zpracování zahrnuje konstrukci přídavných pohybových os W_1 a W_2 připevněných na bocích vřeteníku a nesoucí navařovací hlavy. Byly uvedeny požadavky na další konstrukční úpravy stroje. Konceptně bylo navrženo nové krytování prostoru vřeteníku zakrývající prostor s novými sestavami pohybových os. Na úrovni výrobní výkresové dokumentace byl vyřešen nový systém automatické výměny nástrojů. Dále bylo provedeno koncepční řešení kapotáže stroje upraveného k hybridní výrobě. Byly uvedeny potřebné periférie hybridního stroje. V závěru byl odhadnut předpokládaný výkon stroje v hybridním režimu a byly shrnuty náklady na výrobu prototypu.

Práce prokázala, že je technicky možné provést přestavbu stroje MCV 1000 5AX na hybridní stroj a přitom využít téměř celý pracovní prostor s minimálními nároky na úpravu nosné struktury stroje.

9 Seznamy

9.1 Seznam literatury

- [1] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. *Laser Cladding*. CRC PRESS, 2005.
- [2] BANDYOPADHYAY, Amit a Susmita. BOSE. *Additive manufacturing*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. ISBN 1482223597.
- [3] GEDDA, Hans. *Laser Cladding: An Experimental and Theoretical Investigation*. 2004. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Vedoucí práce John Powell.
- [4] LARSSON, Jan. Aditivní a hybridní výroba 3D tiskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, 2015-11-18 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-a-hybridni-vyroba-3d-tiskem.html>
- [5] BORO VAN, Petr. Hybridní stroje nastupují a zvládají operace dosud neslučitelné. *Technický týdeník* [online]. 2015, 2015-11-18 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/hybridni-stroje-nastupuji-a-zvladaji-operace-dosud-neslucitelne_30421.html
- [6] Babbage Science and technology: *Advanced manufacturing Adding and taking away*[online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.economist.com/blogs/babbage/2013/12/advanced-manufacturing>
- [7] PIELER, Alexander. Vícenásobné možnosti hybridních obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, 2015-11-18 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vicenasobne-moznosti-hybridnich-obrabecich-stroju.html>
- [8] KERSCHBAUMER, Michael a Georg ERNST. *Hybrid Manufacturing Process for Rapid High Performance Tooling Combining High Speed Milling and Laser Cladding* [online]. [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: http://www.joanneum.at/uploads/tx_publicationlibrary/2004_-_Hybrid_manufacturing_process_for_rapid_high_performance.pdf
- [9] Jacquelyn K. S. Nagel and Frank W. Liou (2012). *Hybrid Manufacturing System Design and Development*, Manufacturing System, Dr. Faieza Abdul Aziz (Ed.), ISBN: 978-953-51-0530-5, InTech, Availablefrom:

- <http://www.intechopen.com/books/manufacturing-system/hybrid-manufacturing-system-design-and-development>
- [10] PADATHU, Ajay Panackal, Todd SPARKS a Frank LIOU. *Workpiece Alignment for Hybrid Laser Aided Part Repair* [online]. University of Missouri - Rolla [cit. 2016-07-14]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2005/2005-37-Padathu.pdf>
- [11] *DMG MORI: LASERTEC 65 3D* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d#Intro>
- [12] *Mazak: INTEGREGEX i-400AM* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>
- [13] *HERMLE: MPA - A METAL POWDER APPLICATION TECHNIQUE* [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://www.hermle-generativ-fertigen.de/cms/en/technology/>
- [14] *TCT magazine: Hermle introduces hybrid 5-axis additive manufacturing machine* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/hermle-introduces-hybrid-5-axis-additive-manufacturing-machi/>
- [15] *Hamuel Reichenbacher: HYBRID MANUFACTURING* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.hamuel.de/en/produkte/hstm/hybrid/index.php>
- [16] *WFL: M80* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.wfl.at/Home/Products/Millturns/MillturnsM80M80G?tabid=0>
- [17] *Sodick: Metal 3D Printer-OPM250L* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: http://www.sodick.jp/product/tool/metal_3d_printer/index.html
- [18] *Matsuura: Lumex Avance-25* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.lumex-matsuura.com/english/index.html>
- [19] *TCT magazine: Matsuura LUMEX Avance-25" Laser Sintering Milling Hybrid* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/matsuura-lumex-avance-25-laser-sintering-milling-hybrid/>
- [20] FLYNN, Joseph, Alborz SHOKRANI, Stephen Thomas NEWMAN a Vimal DHOKIA. *Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools-Research and Industrial Developments* [online]. [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284359253_Hybrid_Additive_and_Subtractive_Machine_Tools-Research_and_Industrial_Developments

- [21] *Precitec: Cladding head YC52* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yc52/#tab1>
- [22] *Laserline: Optics* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: http://www.laserline.de/tl_files/Laserline/downloads/broschueren/en/Laserline_optics.pdf
- [23] *Coherent: HighLight D-Series* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: http://www.coherent.com/downloads/COHR_HighLightD-Series_DS_0314revB_7.pdf
- [24] WASHKO, John F., Harrell Keith PARKER a Stephen W. BROOKSHIER. *Powder-delivery apparatus for laser-cladding*. US 20120199564 A1. Dostupné z: <http://google.com/patents/US20120199564>
- [25] *Fraunhofer IWS: COAXwire* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: http://www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/en/documents/publications/product_sheets/600-6_COAXwire_en.pdf
- [26] *Laserline: LDM Compact Diode Lasers* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: http://www.laserline.de/tl_files/Laserline/downloads/broschueren/en/Laserline_LDM_compact_diode_lsaer.pdf
- [27] *Laserline: LDF Series* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://www.laserline.de/diode-laser-material-processing.html>
- [28] *IPG Photonics: YLS, 1-100 kW* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: [http://www.ipgphotonics.com/laser?id=22#\[Overview\]](http://www.ipgphotonics.com/laser?id=22#[Overview])
- [29] *IPG Photonics: Maximus* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://islphotonics.com/en/maximus>
- [30] MARCEL FREDRIK SCHNEIDER. *Laser cladding with powder: effect of some machining parameters on clad properties*. [S.l: s.n.], 1998. ISBN 9036510988.
- [31] J. TUOMINEN. *Laser cladding - applications and development trends* [online]. KokkolaFinland, 2011 [cit. 2016-07-07]. Dostupné z: https://tutcris.tut.fi/portal/files/3250899/Esitys_Tuominen_25v_juhlaseminaari.pdf. Tampere University of Technology, Department of Materials Science.
- [32] *KMAS: MCV Line* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://www.masmachinetools.com/storage/1_97_mcvlinecz-rus-web.pdf
- [33] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6.

9.2 Seznam obrázků

obr. 1	Metody laser claddingu [1]	12
obr. 2	Výroba dílce na hybridním stroji Lasertec 65 3D DMG MORI [6]	14
obr. 3	Navařovací hlava a hybridní stroj - Röders [8]	15
obr. 4	Pracovní prostor hybridního stroje - Missouri University	16
obr. 5	Lasertec 65 3D DMG MORI [11]	18
obr. 6	Mazak INTEGREGX i-400 [12]	19
obr. 7	Hermle C40 MPA [14]	20
obr. 8	Hamuel Reichenbacher HSTM 1500 [15]	21
obr. 9	WFL - MILLTURN M80 [16]	21
obr. 10	Sodick OPM 250L [17]	22
obr. 11	Matsuura Lumex Avance-25 [19]	23
obr. 12	Typy laserových procesních hlav [1]	27
obr. 13	Navařovací hlava s boční tryskou	28
obr. 14	Příklady konfigurace procesní hlavy YC52 - Precitec [21]	28
obr. 15	Typy trysek pro přívod prášku - Precitec [21]	29
obr. 16	Modulární design procesních hlav OTS - Laserline [22]	30
obr. 17	Systém procesních hlav Coherent	31
obr. 18	Procesní hlava COAXwire - Fraunhofer IWS	32
obr. 19	Diodový laserový zdroj LDM - Laserline [26]	34
obr. 20	Laserový zdroj Laserline řady LDF [27]	35
obr. 21	Laserový zdroj IPG Photonics řady YLS [29]	36
obr. 22	Navařovací hlava Laserline OTS-5 [22]	37
obr. 23	Příklad zpětnovazebního řízení navařovacího procesu [1]	38
obr. 24	Parametry navařování se zpětnou vazbou od kamery E-MAqS [31]	39
obr. 25	Vertikální frézovací centrum MCV 1000 5AX [32]	40
obr. 26	Rozložení pohybových os na stroji MCV 1000 5AX	42
obr. 27	Varianta 1 - umístění navařovacích hlav na stroji	43
obr. 28	Varianta 2 - umístění navařovacích hlav na stroji	44
obr. 29	Varianta 3 - umístění navařovacích hlav na stroji	45
obr. 30	Varianta 4 - umístění navařovacích hlav na stroji	46
obr. 31	Pracovní schéma uložení navařovacích hlav	49
obr. 32	Schéma pro výpočet potřebného rozsahu os W1 a W2	50
obr. 33	Sestava pohybové osy W ₁	52
obr. 34	Sestava pohybové osy W ₂	53

obr. 35	Uložení sestav pohybových os na vřeteníku stroje	54
obr. 36	Schéma pohybové osy pro výpočet zrychlení	55
obr. 37	Schéma uložení navařovací hlavy pro výpočet tuhosti k_h	58
obr. 38	Rozměrový obvod lineárních vedení pohybové osy	59
obr. 39	Schéma pracovního rozsahu navařování	61
obr. 40	Krytování prostoru vřeteníku	62
obr. 41	Systém zavírání prostor vřeteníku	63
obr. 42	Nový systém AVN v pozici výměny nástroje	64
obr. 43	Nový systém AVN v řezu	65
obr. 44	Detail uložení nosného kotouče	67
obr. 45	Stroj MCV 1000 5AX s upravenou kapotáží	68
obr. 46	Schéma periférií hybridního stroje	69
obr. 47	Možné uspořádání periférií hybridního stroje	70

9.3 Seznam tabulek

tab. 1	Parametry hybridních strojů [20]	24
tab. 2	Parametry procesních hlav pro laserové navařování	33
tab. 3	Parametry laserových zdrojů	36
tab. 4	Technická data MCV 1000 SPRINT 5AX [32]	41
tab. 5	Kriteriální zhodnocení variant uložení hlav na vřetení stroje	46
tab. 6	Parametry výpočtu dynamických veličin pohybové osy W_1	56
tab. 7	Základní parametry ozubeného soukolí	66
tab. 8	Náklady na sestavy pohybových os W_1 a W_2	71
tab. 9	Náklady na sestavy zavírání prostoru vřeteníku	72
tab. 10	Náklady na sestavu zásobníku nástrojů	72
tab. 11	Náklady na položky systémů laserového navařování	73
tab. 12	Celkové náklady za všechny skupiny	73

9.4 Seznam použitého softwaru

- SIEMENS NX 10.0
- Autodesk Inventor Professional 2016
- AutoCAD Electrical 2017
- SIZER for Siemens drive v 3.14
- Microsoft office word 2013
- Microsoft office excel 2013
- MITCalc
- Snagit 9
- T_EXmaker

9.5 Seznam příloh

9.5.1 Výkresová dokumentace

ASM_000001294_00_PDF_1

- | ASM_000001281_00_PDF_1
- | ASM_000001281_00_PDF_2
 - | AWP_000000050_00_PDF_1
 - | AWP_000000050_00_PDF_2
 - | PRT_000003616_00_PDF_1
 - | PRT_000003619_00_PDF_1
 - | PRT_000003628_00_PDF_1
 - | PRT_000003629_00_PDF_1
 - | PRT_000003676_00_PDF_1
 - | AWP_000000051_00_PDF_1
 - | AWP_000000051_00_PDF_2
 - | PRT_000003677_00_PDF_1
 - | PRT_000003678_00_PDF_1
 - | PRT_000003679_00_PDF_1
 - | PRT_000003615_00_PDF_1
 - | PRT_000003601_00_PDF_1
 - | PRT_000003610_00_PDF_1
 - | PRT_000003577_00_PDF_1
 - | PRT_000003562_00_PDF_1
 - | PRT_000003564_00_PDF_1
 - | PRT_000003608_00_PDF_1
 - | PRT_000003696_00_PDF_1
- | ASM_000001277_00_PDF_1
 - | AWP_000000053_00_PDF_1
 - | AWP_000000053_00_PDF_2
 - | AWP_000000054_00_PDF_1
 - | AWP_000000054_00_PDF_2
 - | PRT_000003565_00_PDF_1
- | ASM_000001278_00_PDF_1
 - | PRT_000004206_00_PDF_1
 - | PRT_000004126_00_PDF_1
 - | PRT_000003969_00_PDF_1
 - | PRT_000003574_00_PDF_1
- | ASM_000001279_00_PDF_1
 - | PRT_000004209_00_PDF_1

- └ PRT_000004207_00_PDF_1
- └ PRT_000003575_00_PDF_1
- └ ASM_000001287_00_PDF_1
 - └ AWP_000000057_00_PDF_1
 - └ AWP_000000057_00_PDF_2
 - └ PRT_000004279_00_PDF_1
 - └ PRT_000004280_00_PDF_1
 - └ PRT_000004281_00_PDF_1
 - └ PRT_000004282_00_PDF_1
 - └ PRT_000004283_00_PDF_1
 - └ PRT_000004284_00_PDF_1
 - └ PRT_000004285_00_PDF_1
 - └ PRT_000004286_00_PDF_1
 - └ PRT_000004287_00_PDF_1
 - └ PRT_000004288_00_PDF_1
 - └ PRT_000004289_00_PDF_1
 - └ PRT_000004290_00_PDF_1
 - └ AWP_000000061_00_PDF_1
 - └ AWP_000000061_00_PDF_2
 - └ PRT_000004321_00_PDF_1
 - └ PRT_000004322_00_PDF_1
 - └ PRT_000004323_00_PDF_1
 - └ PRT_000004324_00_PDF_1
 - └ PRT_000004325_00_PDF_1
 - └ PRT_000004326_00_PDF_1
 - └ AWP_000000059_00_PDF_1
 - └ PRT_000004293_00_PDF_1
 - └ PRT_000004294_00_PDF_1
 - └ PRT_000004328_00_PDF_1
 - └ AWP_000000060_00_PDF_1
 - └ PRT_000004295_00_PDF_1
 - └ PRT_000004296_00_PDF_1
 - └ AWP_000000058_00_PDF_1
 - └ AWP_000000058_00_PDF_2
 - └ PRT_000004291_00_PDF_1
 - └ PRT_000004292_00_PDF_1
 - └ PRT_000003646_00_PDF_1
 - └ PRT_000003648_00_PDF_1
 - └ PRT_000003656_00_PDF_1
 - └ PRT_000003643_00_PDF_1
 - └ PRT_000003654_00_PDF_1
 - └ PRT_000003660_00_PDF_1
 - └ PRT_000003642_00_PDF_1
 - └ PRT_000003661_00_PDF_1

- | PRT_000003657_00_PDF_1
- | PRT_000003650_00_PDF_1
- | PRT_000003651_00_PDF_1
- | PRT_000003649_00_PDF_1
- | PRT_000003652_00_PDF_1
- | PRT_000003659_00_PDF_1
- | PRT_000003655_00_PDF_1
- | PRT_000003644_00_PDF_1
- | PRT_000003869_00_PDF_1
- | PRT_000004278_00_PDF_1
- | PRT_000004276_00_PDF_1
- | PRT_000003833_00_PDF_1
- | PRT_000003802_00_PDF_1
- | PRT_000004277_00_PDF_1
- | PRT_000004193_00_PDF_1

ESM_001

COAXwire_Fraunhofer_IWS

OTS-2_Laserline

9.5.2 Textové přílohy

Katalogové listy

9.5.3 Elektronické přílohy

- CD
 - | DP_Pronek_vykresova_dokumentace/
 - | DP_Pronek.pdf
 - | DP_Pronek_katalogove_listy.pdf
 - | DP_Pronek_zadani.pdf