

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Efektivní navařování titanu laserem

2020

Bc. Jakub Petrus

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrus** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **437264**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Efektivní navařování titanu laserem

Název diplomové práce anglicky:

Efficient direct deposition of titanium by laser

Pokyny pro vypracování:

Práce je zaměřena na technologii navařování titanového drátu, kdy zdrojem tepla pro tavení materiálu je laser. Jedná se o technologicky náročný způsob kovového 3D tisku s velkým aplikačním potenciálem. Pro řešení práce, aby byla vytvořena technologie celkově funkční a efektivní, je k dispozici samotné laserové zařízení a hlava pro navařování z drátu. V rámci přípravy procesu je třeba navrhnout, vyrobit a otestovat komoru pro retenci ochranné atmosféry. Dále pak navrhnout parametry procesu pro kvalitní a efektivní navařování.; Osnova: 1) Popis problematiky navařování kovových materiálů a zařízení pro navařování. 2) Detailní zpracování problematiky navařování laserem, a to včetně přehledu dosavadních vědeckých výsledků o navařování z titanového drátu. 3) Návrh, realizace a otestování zařízení pro navařování titanu včetně odladění procesních parametrů. 4) Provedení vlastních experimentů tvorby 3D titanových struktur s vlivem geometrických charakteristik procesu.; Rozsah text. částí: 60 - 80 stran;

Seznam doporučené literatury:

TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. Laser Cladding. CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-2172-7;
ION, John. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 9780750660792; MRŇA, Libor. Navařování laserem laser cladding. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno [online]; GEDDA, Hand. Laser surface cladding a literature survey. 2000. ISSN 1402-1536;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jan Brajer, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2020**

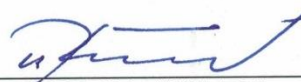
Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**



Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry




prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém 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 18.7.2020

.....

Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce a konzultantovi Ing. Janu Brajerovi, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky při jejím vypracování. Děkuji také panu Ing. Vladimíru Márovi z Ústavu materiálového inženýrství, ČVUT v Praze za pomoc s vyhodnocením metalografické studie. Dále bych chtěl poděkovat výzkumníkům z Ústavu výrobních strojů a zařízení na ČVUT v Praze za jejich cenné rady při provádění experimentální činnosti. V neposlední řadě děkuji své rodině za jejich významnou podporu během celého studia.

Tato práce vznikla za podpory projektu Centrum pokročilých leteckých technologií reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000826 financovaného z ESIF, OP VVV, Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

Anotace

Autor:	Bc. Jakub Petrus
Název DP:	Efektivní navařování titanu laserem
Rozsah práce:	94 str., 86 obr., 21 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019/2020
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Zadávací ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Brajer, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT – FS
Využití:	Navařování drátu z materiálu Ti-6Al-4V laserem
Klíčová slova:	navářování, laser, titan, Ti-6Al-4V, aditivní technologie, ochranná komora
Anotace:	Cílem této práce je zmapování problematiky navařování, zejména pak navařování laserem a následně provedení optimalizace procesu laserového navařování z drátu Ti-6Al-4V v laboratořích Ústavu výrobních strojů a zařízení na ČVUT v Praze. Před procesem optimalizace byl proveden návrh a výroba ochranné komory, její instalace do stávajícího zařízení a otestování funkčnosti. S optimalizovanými parametry byly vytvořeny 3D liniové struktury na základním materiálu z Ti-6Al-4V, které byly podrobeny metalografické studii za účelem ověření kvality navaření struktury.

Annotation

Author:	Bc. Jakub Petrus
Title of thesis:	Efficient direct deposition of titanium by laser
Extent:	94 p., 86 fig., 21 tab.
Academic year:	2019/2020
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Dr. Pavel Zeman
Consultant:	Dr. Jan Brajer
Submitter	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Laser cladding of titanium wire by laser
Key words:	Cladding, laser, titanium, Ti-6Al-4V, additive manufacturing, purge chamber
Annotation:	<p>The aim of this thesis is to describe the issue of surfacing, especially laser cladding and then perform optimization of the laser cladding by Ti-6Al-4V wire in laboratories of the Department of Production Machines and Equipment. Prior to the optimization process, the design and production of the purge chamber, its installation in the existing machine and functional testing were performed. With optimized parameters, 3D line structures were created on the base material of Ti-6Al-4V, which were subjected to a metallographic study in order to verify the quality of the structure.</p>



Obsah

1.	Úvod	10
2.	Cíle práce	11
3.	Teoretická část	12
3.1.	Alternativní metody navařování	12
3.1.1.	Wire Arc Additive Manufacturing	12
3.1.2.	Electron Beam Additive Manufacturing.....	14
3.1.3.	Plasma Transferred Arc, Plasma Arc Welding.....	16
3.1.4.	High Velocity Oxygen Fuel nástřiky	17
3.2.	Laserové navařování	19
3.2.1.	Historie laserového navařování	20
3.2.2.	Princip laserového navařování	20
3.2.3.	Metody laserového navařování	21
3.2.4.	Používané materiály	25
3.2.5.	Použití technologie laserového navařování	26
3.3.	Zařízení pro navařování laserem.....	27
3.3.1.	Laserové zdroje pro navařování.....	27
3.3.2.	Laserové hlavy pro navařování	29
3.3.3.	Přívod navařovacího materiálu	35
3.3.4.	Laserové navařovací stroje.....	36
3.4.	Navařování drátu ze slitiny titanu Ti6Al4V.....	40
3.4.1.	Problematika navařování titanové slitiny	40
3.4.2.	Rozsah použitých parametrů ve vědeckých publikacích.....	41
3.4.3.	Možná konstrukční řešení ochranných komor.....	42
3.4.4.	Shrnutí výsledků experimentů z vědeckých publikací	43
3.5.	Shrnutí teoretické části	45
4.	Praktická část.....	47
4.1.	Návrh experimentu	47
4.1.1.	Experimentální zařízení a metody.....	48
4.1.2.	Použité asistenční plyny	52



4.1.3.	Použité materiály	52
4.2.	Realizace navařovací komory	54
4.2.1.	Volba vhodné varianty	54
4.2.2.	Nízká otevřená komora	54
4.2.3.	Vysoká otevřená komora	57
4.2.4.	Vysoká otevřená komora s rovnoměrným přívodem argonu.....	60
4.2.5.	Uzavřená komora z poddajného materiálu.....	62
4.3.	Optimalizace navařovacích parametrů	66
4.3.1.	Optimalizace doby vyplachování komory	66
4.3.2.	Optimalizace posuvové rychlosti	67
4.4.	Experimenty tvorby 3D liniových struktur	71
4.4.1.	Postup navařování.....	71
4.4.2.	NC program	72
4.4.3.	Navařování 3D struktur	74
4.4.4.	Metalografie návarů.....	74
4.4.5.	Výsledky metalografie a jejich diskuze	78
5.	Závěr	80
	Seznam použité literatury	82
	Seznam obrázků.....	90
	Seznam tabulek.....	93
	Seznam příloh	94



Seznam použitých zkratk a symbolů

3DMP	Three-dimensional metal printing – Technologie 3D tisku
APS	Atmospheric Plasma Spraying – Plazmové nástřiky
CCD	Charge-Coupled Device – Typ kamery
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconducotr – Typ kamery
CMT	Cold Metal Transfer – Modifikace svařovacího procesu
CNC	Computer Numeric Control – Počítačem řízené stroje
CO ₂	Oxid uhličitý
CW	Kontinuální – Pracovní režim laseru
DED	Direct Energy Deposition – Additivní technologie
DMD	Direct Metal Deposition – Additivní technologie
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing – Additivní technologie
FAA	Federal Aviation Administration – Úřad pro letectví USA
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel – Vysokorychlostní nástřik plamenem
IAC	Intelligent Arc Control – Modifikace svařovacího procesu
LC	Laser Cladding – Additivní technologie
LMD	Laser Metal Deposition – Additivní technologie
MAG	Metal Active Gas – Metoda svařování tavící se elektrodou
MIG	Metal Inert Gas – Metoda svařování tavící se elektrodou
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier – Typ laserového zdroje
Nd:YAG	Neodym Yttrium Aluminium Garnet – Typ laserového zdroje
PAW	Plasma Arc Welding – Plazmové navařování z drátu
PETG	Polyethylentereftalát glykol – Termoplast využívaný pro 3D tisk
PTA	Plasma Transferred Arc – Plazmové navařování z prášku
PVC	Polyvinylchlorid – Plast
QCW	Kvazikontinuální – Pracovní režim laseru
QuTi5	Slitina titanu Ti-6Al-4V, obchodní označení
TIG	Tungsten Inert Gas
Ti-6Al-4V	Slitina titanu, 6 % hliníku, 4 % vanadu
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing – Navařování drátu el. obloukem

1. Úvod

Během posledních několika let bylo vyvinuto mnoho technologií spočívajících v depozici materiálu po vrstvách. Všechny tyto techniky jsou založeny na obdobném principu a lze je souhrnně nazývat jako aditivní technologie. Při výrobě součástí aditivními technologiemi dochází v porovnání s konvenčními metodami k významným úsporám času a nákladů. Dochází ke zvýšení využití materiálu a minimalizaci odpadu z následného obrábění, což má příznivý vliv na poměr buy-to-fly (poměr hmotnosti polotovaru vůči hmotnosti finálního produktu). Velký potenciál mají tyto metody v leteckém průmyslu, kde je cílem vyrábět součásti o vysoké pevnosti a nízké hmotnosti při zachování minimálních nákladů na jejich výrobu. V leteckém průmyslu je věnována velká pozornost slitině titanu Ti-6Al-4V. Díky své vysoké pevnosti a nízké hmotnosti se slitina stala nejpoužívanější a nejběžnější titanovou slitinou nejen v oblasti letectví. Výroba titanových slitin je ale finančně náročná, což se odráží i v ceně samotného materiálu. Z toho důvodu je aditivní výroba z titanových slitin silně motivována.

Mikrostruktura a mechanické vlastnosti materiálu Ti-6Al-4V jsou významně tepelně ovlivnitelné, což je pro technologie kladení materiálu problémem. Dochází zde k cyklickému ohřívání a chladnutí vytvořených vrstev. Aby aditivní technologie mohly konkurovat technologiím konvenčním, musí být zcela pochopen a kontrolován proces ukládání materiálu tak, aby bylo možné opakovaně dosáhnout konzistence materiálových vlastností a kvality stavěných dílců s různými geometriemi. Aditivní výroba dílců z Ti-6Al-4V je předmětem výzkumu několika řešitelských týmů po celém světě. Problematika byla především zkoumána u metod pracujících s přídatným materiálem v podobě prášku. Z odborných publikací vyplývá, že při použití drátu je docíleno vyšší kvality uloženého materiálu, nižší kontaminace a vyšší rychlosti depozice v porovnání s práškem. Pokud je pro tavení drátu použit laser, lze vytvářet kvalitní struktury s minimální tepelně ovlivněnou oblastí a s nízkým stupněm promíšení přídatného a základního materiálu. Všechny tyto aspekty tvoří proces laserového navařování z titanového drátu velmi atraktivním pro letecký průmysl, zejména pro výrobu tenkostěnných dílců.

Cílem této práce je získat vhled do procesu aditivní výroby z titanové slitiny Ti-6Al-4V v podobě drátu, kdy zdrojem pro jeho tavení je pevnolátkový laser. Bude zkoumán vliv základních technologických parametrů tvorby titanových návarů na jejich kvalitu. Zjištěné poznatky budou uplatněny při dalších experimentech v rámci výzkumu.



2. Cíle práce

Cílem diplomové práce je zvládnutí technologie navařování (příprava zařízení, výroba ochranné komory a otestování její funkčnosti) a následná optimalizace procesních parametrů při navařování drátu ze slitiny Ti-6Al-4V na základní substrát z téhož materiálu pomocí laseru. Součástí řešení je i hodnocení kvality návarů pomocí metalografické studie.

V teoretické části jsou v kapitole zmapovány navařovací technologie, zejména pak technologie laserového navařování. Jsou zde uvedeny principy, metody, používané materiály a zařízení vhodná pro technologii laserového navařování. Stěžejní částí teoretické části práce je kapitola 3.4, ve které jsou popsány postupy a výsledky z odborných publikací zabývajících se aditivní výrobou ze slitiny titanu Ti-6Al-4V. Ze zjištěných poznatků následně vychází praktická část diplomové práce.

Praktická část se v první fázi zabývá návrhem, výrobou a otestováním ochranných komor, které jsou nezbytné pro navařování slitin titanu. Po ověření funkčnosti komory je přistoupeno k optimalizaci procesních parametrů jako minimální doba potřebná pro vyplachování komory a posuvová rychlost strojních os. Z geometrie testovacích návarů jsou určeny výchozí hodnoty geometrických parametrů pro skladbu návarů 3D struktury.

Od 3D struktury navařené výchozími geometrickými parametry jsou odvozeny další parametry, tak aby bylo vytvořeno více 3D struktur, u kterých je následně hodnocen vliv geometrických parametrů na kvalitu navaření. Kvalita navaření je hodnocena pomocí metalografické studie, kde hodnotícími kritérii jsou správné provaření kořene, deformace ve struktuře a tepelně ovlivněná oblast.

Hlavním cílem diplomové práce je přizpůsobení stávajícího zařízení v laboratořích Ústavu výrobních strojů a zařízení pro navařování slitin titanu a optimalizace procesních parametrů s posouzením vlivu na kvalitu návarů, případně doporučení pro další experimentální práci. Poznatky z práce bude možné využít při dalších experimentech věnujících se navařování slitin titanu pomocí laseru.

3. Teoretická část

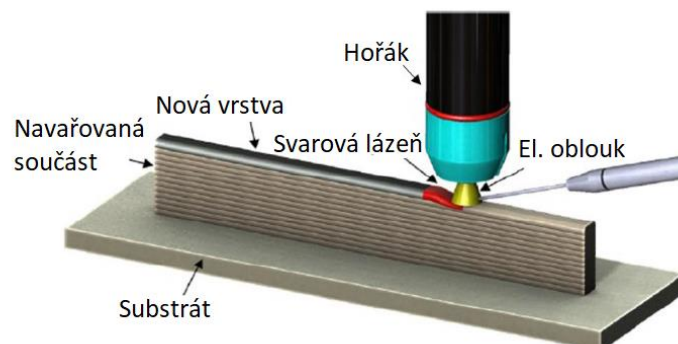
V teoretické části práce byla zpracována rešerše navařovacích technologií, zejména pak technologie laserového navařování. V této kapitole jsou uvedeny principy, používané materiály a komerčně dostupná zařízení. Další kapitola uvádí poznatky zjištěné z odborných publikací, které se zabývali laserovým navařováním z titanového drátu Ti-6Al-4V. V závěru teoretické části je shrnutí, kde jsou zmíněny důležité poznatky, ze kterých vychází praktická část diplomové práce.

3.1. Alternativní metody navařování

Navařování prakticky vychází z technologií svařování. Metody navařování jsou využívány k opravám poškozených strojních částí, k vytvoření vrstvy na povrchu materiálu za účelem výroby funkčních povrchů nebo k výrobě zcela nových dílců. Navařování spočívá v natavení základního materiálu, na který je ve vrstvách nanášen natavený přídavný materiál. Materiály se promíchají a po jejich zchladnutí vzniká pevný homogenní spoj. Pro natavení materiálů se používají různé zdroje tepla, podle kterých lze technologie dále dělit na navařování plamenem, elektrickým obloukem, elektronovým svazkem, plazmou anebo laserem. V této kapitole budou popsány vybrané navařovací technologie. [1]

3.1.1. Wire Arc Additive Manufacturing

Wire and Arc Additive Manufacturing, zkráceně WAAM (Obr. 1), je technologie vyvíjená odborníky z Cranfield University od 90. let 20. století. Jedná se o technologii vycházející z metody svařování obloukem metodami TIG a MIG/MAG. WAAM využívá standartní svařovací zdroje, hořáky a podavače drátu v kombinaci s polohovacími systémy buď ve formě průmyslových robotů nebo počítačem řízených strojů. Svůj potenciál nachází především v letectví. [2] [3]

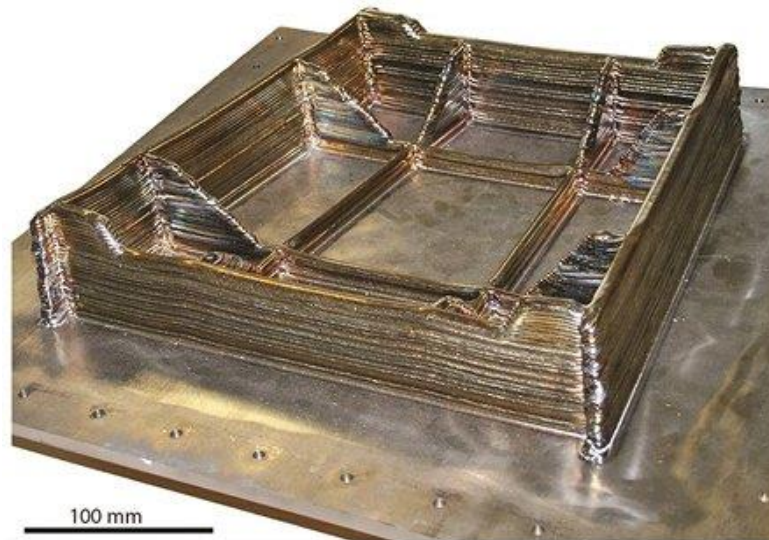


Obr. 1: Princip navařování metodou WAAM [4]

WAAM spočívá v ukládání svarových housenek vedle sebe, respektive na sebe. Kladením velkého počtu návarů je vytvořen buď finální výrobek, nebo vhodný polotovár

pro obrábění. Metoda je vhodná pro navařování velkých kovových dílů díky poměrně vysokým depozičním rychlostem. Nesporná výhoda tkví v použití konvenčních zařízení pro svařování, což pozitivně ovlivňuje cenu navařovacího zařízení. [3]

Při navařování metodou TIG dosahují rychlosti nanášení až 1 kg/hod. Při navařování metodami MIG/MAG mohou být depoziční rychlosti v řádu několika kilogramů za hodinu. Nedostatkem MIG/MAG je v porovnání s TIG méně stabilní elektrický oblouk, rozstřík materiálu, porozita návaru nebo velké vnesené teplo. Výrobci svařovacích zdrojů se proto snaží o eliminaci těchto jevů modifikací svařovacích procesů. Například se jedná o metodu CMT (Cold Metal Transfer) od společnosti Fronius nebo IAC (Intelligent Arc Control) od firmy Migatronik. Z výzkumných zpráv je patrné, že při používání těchto modifikací dochází k významnému zlepšení procesu navařování. [3]



Obr. 2: Navařený titanový dílec metodou WAAM [3]

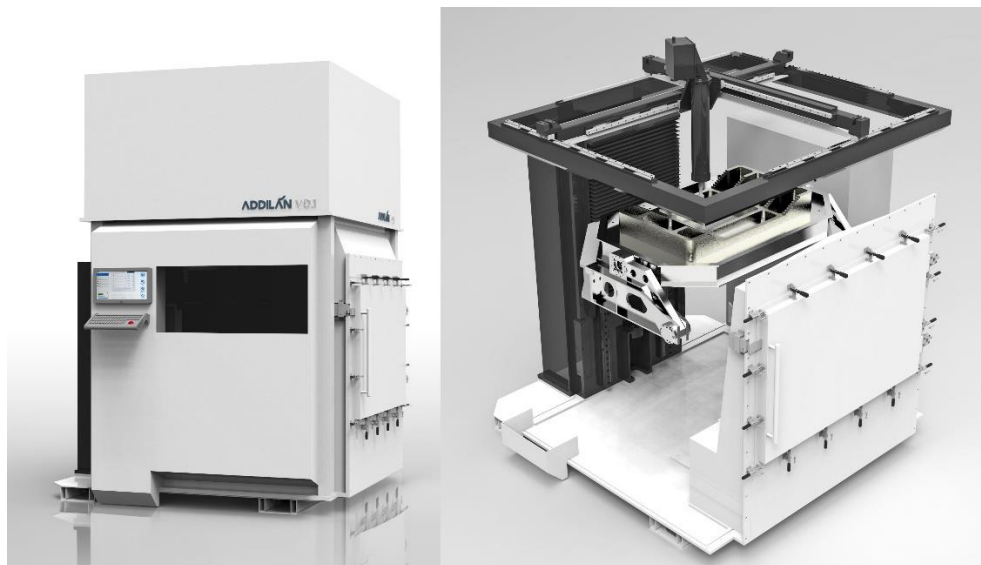
Vytvářené dílce mohou být z nejrůznějších materiálů, pokud je materiál svařitelný a je k dispozici v podobě svařovacího drátu. Součásti mohou být vyrobeny z uhlíkových i nerezových ocelí, slitin na bázi niklu, titanu nebo hliníku. Možná je i kombinace více materiálů v rámci jedné součásti. V tomto případě musí ale být dodržen přesný technologický postup. [5]

Komerční zařízení využívající metodu WAAM nabízí například španělská firma Addilan nebo Německý Gefertec. Gefertec nabízí celem 4 stroje kombinující tříosé nebo pětiosé obrábění s navařováním elektrickým obloukem. Technologii navařování společnost nazývá jako 3DMP (three-dimensional metal printing). Největší stroj arc603 (Obr. 3) je s tříosou kinematikou a dokáže vyrábět kovové součásti do objemu 3,0 m³ o maximální hmotnosti 3000 kg. [6]



Obr. 3: Gefertec arc603 [6]

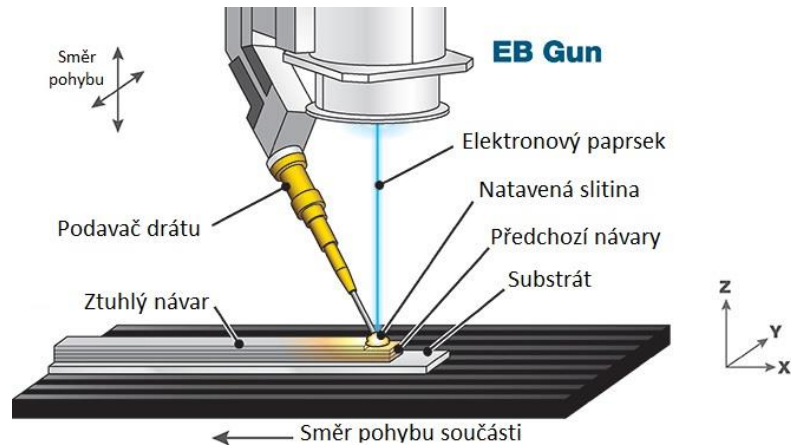
Oproti tomu Addilan nabízí pouze jedno zařízení, a to Addilan V0.1 (Obr. 4). Jedná se o stroj využívající technologii WAAM pro navařování oceli, titanových a hliníkových slitin v ochranné atmosféře inertního plynu. Celý pracovní prostor je utěsněn a tvoří tak ochrannou komoru se speciálním systémem pro nakládání a vykládání dílce. Zařízení dokáže navařovat rychlostí až 6 kg/hod. [7]



Obr. 4: Addilan V0.1 [7]

3.1.2. Electron Beam Additive Manufacturing

EBAM je zkratka pro Electron Beam Additive Manufacturing (Obr. 5), což je technologie využívající elektronový paprsek k tvorbě návarů z drátového polotovaru. Elektronový paprsek je zde jako zdroj tepla, který natavuje základní materiál. Do vzniklé taveniny je přiveden drát, který je působením paprsku taktéž roztaven. Materiály se promíchají a po jejich ztuhnutí vzniká návar. Vhodné přídavné materiály jsou všechny materiály dostupné ve formě svařovacích drátů. Technologie je využívána pro výrobu součástí nebo pro opravy a repasování opotřebovaných dílů. [8]



Pro navařování musí být v pracovním prostoru stroje vytvořeno vakuum. Díky vakuu, které brání oxidaci kovů, vykazují navařené dílce vyšší kvalitu v porovnání s ostatními technologiemi navařování. Technologie je tedy zejména vhodná pro navařování vysoce reaktivních materiálů, jako je titan a jeho slitiny. Další výhodou technologie spočívá ve vysoké hustotě energie v elektronovém paprsku, čímž lze účinně navařovat jakékoliv elektricky vodivé materiály včetně vysokoreflexních slitin, jako jsou například slitiny mědi a hliníku. [8] [9]

Kvůli vytvořenému vakuu je zhoršeno chlazení součásti během navařování. Není zde proud plynu (vzduchu), který by z procesu odebíral teplo. Elektronový paprsek je také citlivý na magnetická pole. Zbytkový magnetismus v pracovním prostoru stroje může způsobit odklonění záporně nabitého elektronového paprsku, čímž může dojít i k přerušení paprsku. [10]

Problematikou navařování pomocí elektronového paprsku se zabývá společnost Sciaky INC., a to již od šedesátých let minulého století. Společnost nabízí několik CNC strojů ve třech řadách. Řady jsou rozděleny dle velikosti vakuových komor na malé, střední a velké systémy. Největší rozměr výrobku je dán maximálním pracovním prostorem vakuové komory. Systém s největší vakuovou komorou je EBW 300 (Obr. 6). Ten dovoluje vytvářet součásti o rozměrech až 5,8 x 1,2 x 1,2 m s rychlostí depozice až 9 kg/hod. Na Obr. 7 je zobrazena navařená součást metodou EBAM. [11]



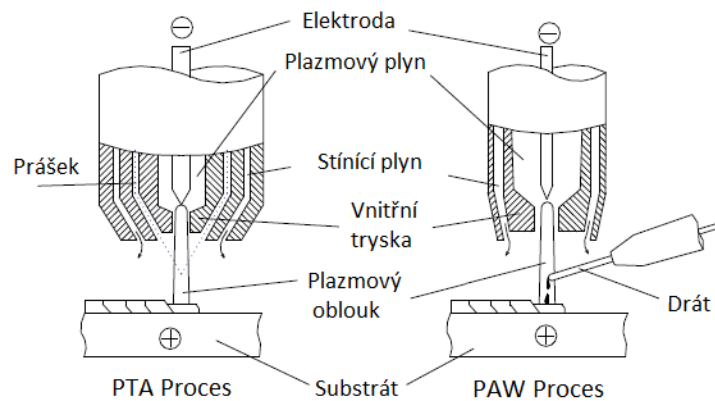
Obr. 6: EBW 300 System [11]



Obr. 7: Navařená součást technologií EBAM [11]

3.1.3. Plasma Transferred Arc, Plasma Arc Welding

Plasma Transferred Arc (PTA) je technologie navařování odvozená z technologie svařování nazývané Plasma Arc Welding (PAW). Rozdíl mezi metodami je patrný z Obr. 8. Navařování plazmou je realizováno s přídatným materiálem v podobě prášku. Navařování z drátu je možné metodou „cold wire“, nebo „hot wire“, tedy se studeným nebo přehřátým drátem. V takovém případě je ale navařovací proces označován jako PAW. Technologie se zejména využívají pro povlakování součástí. [12]



Obr. 8: Schéma metod PTA a PAW [12]

Procesy PTA i PAW využívají wolframovou netavící se elektrodu, vodou chlazenou vnitřní trysku a vnější trysku. Tyto komponenty tvoří plazmový hořák neboli plazmatron. Do hořáku je přiváděn stínící plyn pro ochranu taveniny a plazmový plyn (nejčastěji argon). Vzhledem k tomu, že elektroda je umístěna uvnitř hořáku, je obtížně oblouk vytvořit kontaktem. Z toho důvodu je nejprve elektronickým zapalovačem vytvořen tzv. pilotní oblouk mezi wolframovou elektrodou a měděnou částí hořáku. Díky pilotnímu oblouku je následné vytvoření hlavního oblouku mezi elektrodou a navařovanou součástí mnohem snazší. Plazma vzniká ionizací procházejícího plazmového plynu hlavním elektrickým obloukem. Teplota vzniklého plazmatu se pohybuje v rozmezí 8000 °C až 18000 °C. [12]

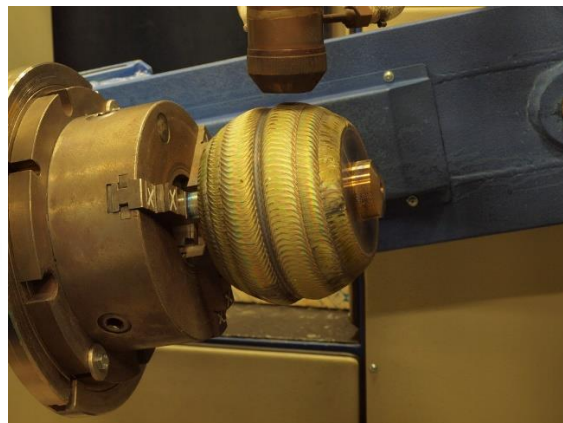
Navarování plazmatem se vyznačuje dobrou schopností řízení procesu s ohledem na investiční náklady. Při navarování je možné nezávisle řídit přívod přídavného materiálu a energii hlavního oblouku. Tím lze dosáhnout zředění 5 % až 20 %. Rychlost depozice se pohybuje od 0,5 kg/hod při navarování z prášku až do 6 kg/hod v případě navarování metodou „hot wire“. Navarování plazmatem je vhodné téměř pro všechny materiály, zejména se ale využívá pro navarování slitin na bázi kobaltu, niklu a železa. Nevýhodami technologie jsou vysoká teplota a vyzařování plazmatu. Velké vnesené teplo může negativně ovlivnit základní materiál a intenzivní vyzařování zhoršuje podmínky pro práci obsluhy. [13] [14]

Výrobou zařízení se například zabývají společnosti Deloro a KSK s.r.o. Deloro nabízí zařízení pro navarování z prášku technologií PTA. Stroje jsou rozděleny do řad Basic, Compact a Premium line. Nejsilnější plazmový zdroj je k dispozici pouze pro řadu Premium line, a to o jmenovitém proudu 500 A. Společnost dále nabízí navarovací stroje určené pro povlakování ventilů spalovacích motorů. Ve svém portfoliu mají plazmové hořáky a podavače prášku vlastní konstrukce. [15]

KSK s.r.o. je česká společnost se sídlem v České Třebové. Krom ostatních aktivit se zabývá výrobou navarovacích plazmových automatů řady PPC250, které lze modifikovat dle přání zákazníka. Všechny nabízené stroje navarovají metodou PTA z prášku. Stroje jsou určeny pro navarování otěruvzdorných, antikorozních, žáruvzdorných a jiných povlaků. Na Obr. 9 a Obr. 10 je zobrazeno plazmové navarovací zařízení PPC 250 GMR a na něm modifikovaná součást pomocí PTA. [16]



Obr. 9: KSK PPC 250 GMR [16]



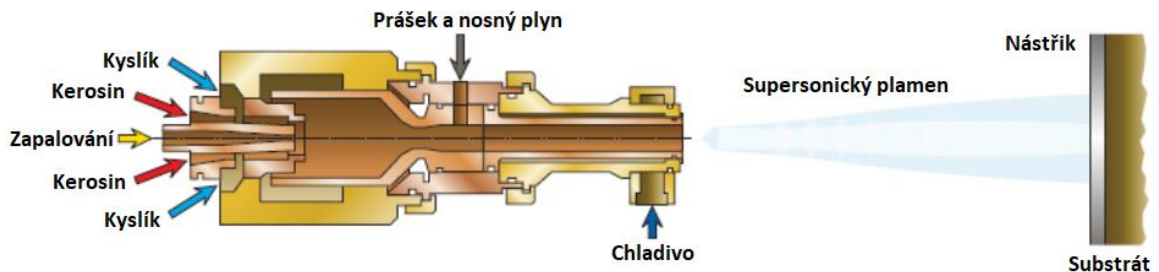
Obr. 10: Navařená vrstva metodou PTA [16]

3.1.4. High Velocity Oxygen Fuel nástřiky

High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) nástřik je technologie spadající do oblasti žárových nástřiků. Žárové nástřiky obecně spočívají v nanášení roztavených, nebo natavených částic materiálu na povrch základní součásti. Cílem technologie je vytvoření povlaku, který vykazuje lepší mechanické vlastnosti než základní materiál. Kromě úpravy

povrchů metoda nachází uplatnění i při opravách a renovacích opotřebovaných dílů. Polotovarem pro nanášený materiál mohou být dráty nebo prášky. Přídavný materiál bývá nejčastěji natahován kyslíko-acetylenovým plamenem nebo elektrickým obloukem, případně lze využít i plazmový oblouk (APS – Atmospheric Plasma Spraying). Před samotným nanášením povlaku musí být povrch základního materiálu zbaven nečistot a mastnoty, a také musí být zdrsňen, jinak nemusí dojít ke kvalitnímu navaření. [17] [18]

Jednou z nejrozšířenějších metod je právě technologie HVOF. Jedná se o metodu vynalezenou v roce 1958 firmou Union Carbide, ale komerčně byla využita až v 80. letech minulého století. HVOF spočívá v nanášení kovového materiálu ve formě prášku na povrch součásti pomocí plamenu při velmi vysokých rychlostech pomocí speciální pistole. Na Obr. 11 je zobrazen princip technologie. [18]



Obr. 11: HVOF nástřík [19]

Jako palivo se zde používají různé plyny, zejména však vodík, propylen, propan, acetylen nebo kerosin. Palivo je spolu s kyslíkem (okysličovadlo) přiváděno do spalovací komory, ze které dále putuje 80 až 300 mm dlouhou tryskou, na jejímž ústí mohou plyny dosahovat nadzvukové rychlosti až 1825 m/s. Do vzniklého supersonického plamene je přiváděn kovový prášek speciálním injektorem v proudu inertního plynu (dusík). Prášek je plamenem nataven a urychlen směrem k povlakované součásti. Pro HVOF nástříky se nedají použít keramické prášky díky jejich nízkým teplotám tavení. [18]

Vysokorychlostní nástříky lze dělit dle vzniklého tlaku ve spalovací komoře na vysokorychlostní a hyper-rychlostní. U vysokorychlostních nástříků se tlaky v komoře pohybují okolo 240 kPa a s tepelným příkonem 527 MJ. V případě hyper-rychlostních nástříků se tlaky pohybují v rozmezí 620 až 827 kPa. Tepelný příkon je v tomto případě přibližně 1 GJ. Typicky se v hyper-rychlostních pistolích používá jako palivo kerosin v kombinaci s kyslíkem nebo vzduchem pro podporu hoření. [18]

Díky mnohem vyšší rychlosti proudu částic v porovnání s ostatními metodami žárových nástříků vykazují takto stříkané povlaky dobrou adhezi a vysokou hustotu. Také jsou zde kladeny vyšší nároky na řízení rychlosti přísunu prášku, protože proces vysokorychlostních nástříků je citlivější na objem přiváděného prášku mnohem více než ostatní metody. Nevýhodou je náročnost na provoz, díky složitosti technologického zařízení a relativně vysoká hluchost během procesu přesahující hranici 120 dBA. [18]

Výrobou zařízení pro technologii HVOF nástřiků je například německá společnost GTV Verschleiss-Schutz GmbH. GTV se dále zabývá výrobou podavačů prášků a zařízení pro nástřiky metodami Plasma Spraying, Wire Flame Spraying, Powder flame Spraying nebo Arc Spraying. Tato zařízení a potřebné periferie jsou dodávána individuálně dle požadavků jednotlivých zákazníků. [20]

Příkladem vyráběného zařízení je GTV-K2 (Obr. 12). Jedná se o systém s hmotnostním řízením průtoků plynů, který pracuje s kyslíkem a kerosinem. Skládá se z kontrolní a řídicí jednotky, podavače prášku MF-PF-2/2, hořáku HVOF K2 a dalších drobných příslušenství (hadice, kabely atd.). Hořák HVOF K2 pracuje s tekutým kerosinem a kyslíkem díky čemuž dosahuje vysokého výkonu nanášení až 7,5 kg/hod (dle druhu materiálu). [20]



Obr. 12: GTV-K2 [20]



Obr. 13: FST eGun [21]

Nizozemská společnost FST se zabývá výrobou strojů pro technologie žárových nástřiků a podavačů prášků nebo dodávkou navařovacích systémů na klíč. Jedním z nabízených systémů pro technologii HVOF je eGun System (Obr. 13). Jedná se o vysokotlaké zařízení používající jako palivo směs ethanolu s kyslíkem. Použití ethanolu je oproti kerosinu příznivější k životnímu prostředí. Zařízení se skládá z řídicího modulu, chladiče, práškového podavače PF-50 a hořáku eGun. [21]

3.2. Laserové navařování

Laserové navařování je technologie vyvinutá v osmdesátých letech minulého století jejímž výsledkem je kvalitní návar s minimálním ovlivněním základní součásti v porovnání s ostatními metodami navařování. Laserové navařování má v anglickém jazyce více pojmenování, avšak všechny odkazují na stejnou technologii. Jsou jimi laser

cladding (LC), direct metal deposition (DMD), laser metal deposition (LMD) nebo direct energy deposition (DED). [22]

3.2.1. Historie laserového navařování

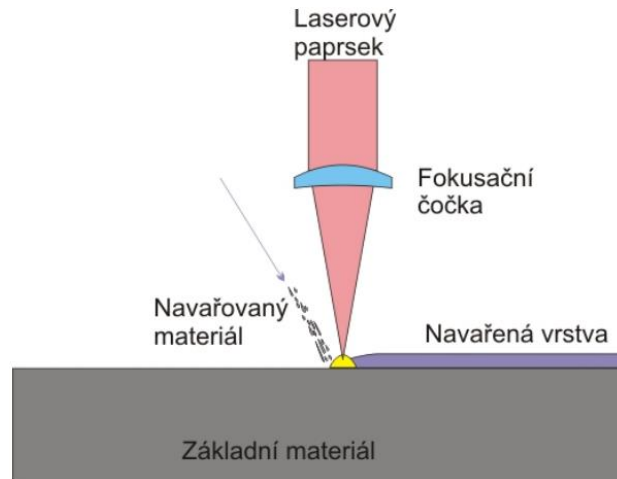
Technologie laserového navařování představil a patentoval Daniel S. Gnanamuthu z Rockwell International Corporation v Thousand Oaks v Californii již v roce 1976. Gnanamuthu pomocí laseru nanášel na kovové součásti keramické povlaky. Přibližně ve stejné době začaly s výzkumem laserového navařování i ostatní výzkumné skupiny. Jednou ze skupin, jejíž výsledky měly významný vliv na vývoj technologie, byla skupina pod vedením Williama M. Steena z Imperial College v Londýně. On a jeho tým v osmdesátých letech představili povlakování materiálů pomocí laseru a přídavného materiálu ve formě prášku. [22]

Laser Cladding díky svým schopnostem zlepšovat odolnost vůči korozi a otěru začíná vzbuzovat pozornost v průmyslu. První nasazení v průmyslové aplikaci bylo v roce 1981 firmou Rolls-Royce pro povlakování konců lopatek turbín proudových motorů typu RB-211. Povlakování laserem se stále více prosazuje do oblasti automotive. Výrobci vozů jako například Fiat, Toyota a Mercedes Benz začínají povlakovat sedla ventilů ve svých motorech. Kromě navařování povlaků je technologie využívána v opravárenství, převážně pro obnovu opotřebovaných lopatek turbín. [22]

Od devadesátých let se navařování laserem využívá v additive manufacturing a rapid prototyping, tedy jako metoda pro výrobu nových součástí nebo 3D struktur. Vývoj těchto technologií přetrvává až dodnes. [22]

3.2.2. Princip laserového navařování

Laserové navařování využívá laserový paprsek coby zdroj tepla k nanášení tenké vrstvy přídavného materiálu s požadovanými vlastnostmi na povrch základního materiálu. Plocha, na kterou má být nanesen návar, je zahřívána laserem. Základní materiál absorbuje energii laserového záření a tím dochází k jeho natavení. Zároveň dochází k natavení přídavného materiálu, který může být přiváděn ve formě prášku, drátu nebo pasty. Tyto dva natavené materiály spolu vytvoří spoj. Protože laserový paprsek ohřívá základní materiál pouze lokálně v místě působení paprsku, okolní materiál zůstává teplotně beze změn. Základní substrát nyní funguje jako tepelný vodič a odebírá z místa návaru vzniklé teplo. Tím je docíleno rychlého ochlazení a vzniká tak kvalitní návar s nízkým stupněm promíšení základního materiálu v návaru (při optimálních podmínkách je promíšení nízké, obvykle okolo 5 %). Princip laserového navařování je zobrazen na Obr. 14. [23] [24]



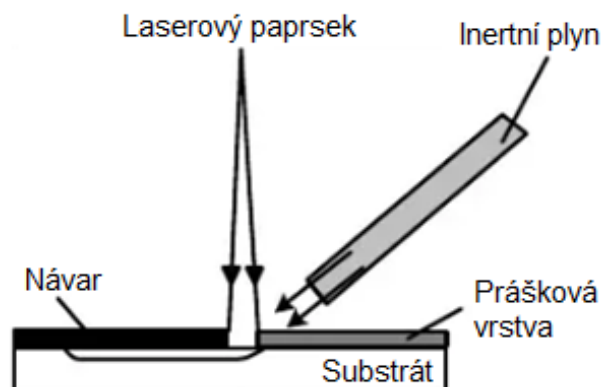
Obr. 14: Princip navařování [25]

3.2.3. Metody laserového navařování

Základní metody pro laserové navařování jsou tyto dvě:

- Two-step proces (predepozice)
- One-step proces (kodepozice)

V případě predepozice (Obr. 15), je prvním krokem umístění přídavného materiálu ve formě prášku přímo na povrch substrátu. Prášek by měl být smíchan s chemickým pojivem, aby byla zaručena soudržnost částic prášku během navařování a prášek nebyl rozfoukán proudem inertního plynu. V druhém kroku dochází působením laseru k vytvoření taveniny z přídavného materiálu. Vzniklá tavenina natavuje povrch základního materiálu a tím vzniká výsledný návar. [22] [23]



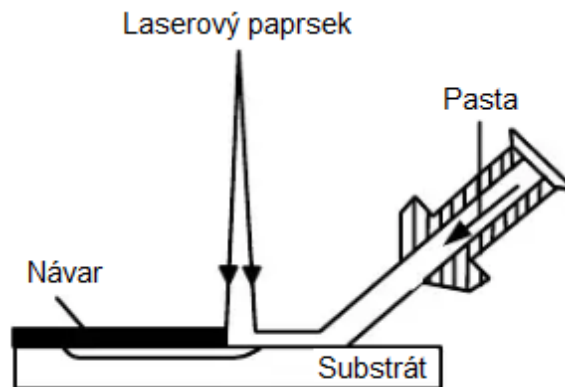
Obr. 15: Predepozice [22]

Výhodou této metody je její jednoduchost. Nevýhodou je velká pórovitost návaru díky použití pojiva. Také zde vzniká problém s regulací tepla při navařování, což má vliv na stupeň promíšení materiálů, a tedy i na kvalitu návaru. Z two-step procesu vznikl samostatný obor 3D tisku s využitím laseru. [22]

Při metodě one-step je přídavný materiál přiváděn do nataveného základního materiálu. Laserový paprsek v tomto případě natavuje základní i přídavný materiál. To se děje v ochranné atmosféře inertního plynu, která brání oxidaci návaru. Materiál může být přiváděn ve formě pasty, drátu ale nejčastěji ve formě prášku. [22]

Laserové navařování z pasty

Pasta je nanášena přímo na základní substrát obvykle těsně před laserový paprsek tak, jak je zobrazeno na Obr. 16. Laser taví pastu a tím je vytvářen návar. Pasta je složena z tvrdého prášku s vhodným pojivem. Navaření musí proběhnout v krátkém čase, neboť může dojít k vysušení pojiva a následnému odfouknutí prášku obsaženého v pastě. Zároveň se ale pojivo musí během svařování odpařit, jinak dojde ke kontaminaci návaru, což se projeví jeho zvýšenou pórovitostí. Tato skutečnost je zásadní nevýhodou při navařování z pasty, a proto není metoda tolik využívána. [22] [26]



Obr. 16: Princip navařování z pasty [22]

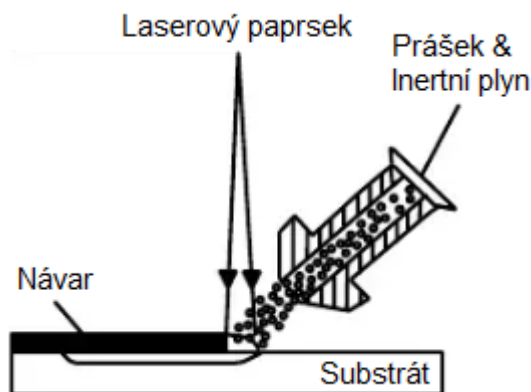
Pro tento proces musí být navržen speciální podavač pasty. Pokud je přiváděno málo pasty, nebo je rychlost navařování moc velká, dochází k vyššímu promíšení se základním materiálem a výsledný návar je moc nízký. Nadměrné množství pasty způsobuje tvorbu pórů, protože pojivo je hůře odpařováno. [22]

Laserové navařování z prášku

Výsledkem navařování z prášku jsou vysoce kvalitní návary s nízkým stupněm promíšení. Zatímco laserový paprsek natavuje plochu základního materiálu, je prášek přiváděn do taveniny v proudu inertního plynu. Při průchodu prášku laserovým svazkem se jeho částice zahřejí. Teprve po dopadu částic na taveninu substrátu se prášek roztaví, čímž vznikne spoj. Částice, které dopadnou mimo taveninu, se od základního materiálu odrazí anebo ulpí na jeho povrchu. Energie laseru musí být dostatečně velká, aby došlo k natavení prášku bez příliš velkého natavení substrátu. [26] [28]

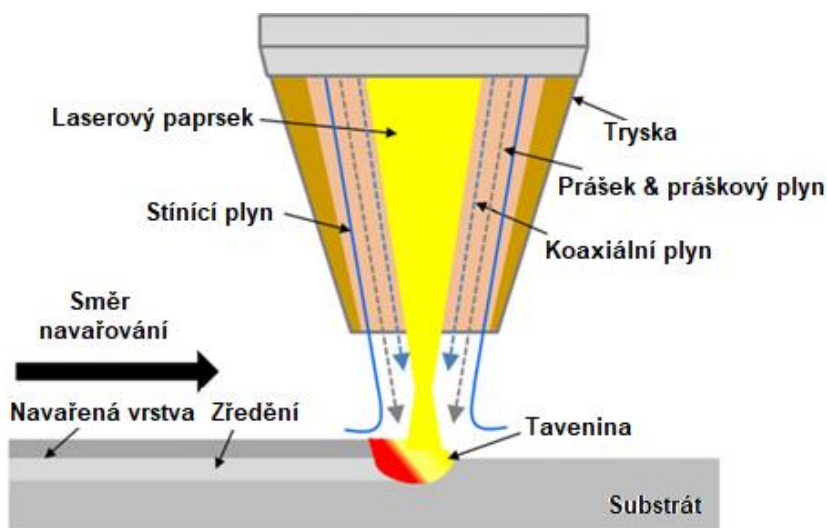
Existují dva způsoby přívodu prášku. Laterální nebo koaxiální. V případě laterálního, tedy bočního přísunu, je prášek přiváděn mimo osu paprsku tak, jak je to znázorněno na Obr. 17 a na povrch substrátu dopadá pod určitým úhlem. Největší

efektivitu při navařování je dosaženo, když je tryska přívodu prášku umístěna před laserovým paprskem ve směru navařování. S bočním přívodem materiálu lze efektivně navařovat pouze v jednom směru, což je podstatným omezením. Výhodami bočního podávání jsou nižší pořizovací náklady a jednoduchost konstrukce. [26] [28]



Obr. 17: Princip navařování z prášku s bočním přívodem [22]

Pokud je požadavek na navařování složitějších geometrií nebo na špatně dostupných místech, je možné využít koaxiální hlavu. Koaxiální hlava (Obr. 18) je zařízení, které se obvykle skládá ze třech koncentrických trysek. Z vnitřní trysky vychází laserový paprsek. Z prostřední trysky vychází prášek, který je unášen nosným plynem. Z vnější trysky vychází ochranný plyn, který kromě ochrany návaru proti oxidaci formuje proud prášku a směřuje ho do spotu paprsku. Hlava potom může být umístěna na CNC stroji anebo na rameni robota. Nevýhodou je poměrně vysoká cena zařízení v porovnání s bočním podáváním prášku. [23] [28]

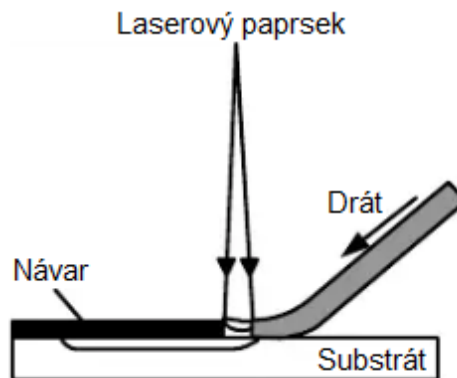


Obr. 18: Schéma koaxiální navařovací hlavy [29]

Laserové navařování z drátu

Při navařování z prášku není plně navařen všechen materiál a proces se vyznačuje zvýšenou prašností. Tyto problémy odpadají při navařování z drátu. Laserový paprsek je

rozostřen na základním materiálu tak, aby došlo k natavení jeho tenké vrstvy na povrchu. Do natavené oblasti je přiváděn drát, který interaguje s paprskem. Drát se roztavuje a se substrátem vytváří metalurgicky pevný spoj. Princip lze vidět na Obr. 19. Drát je obvykle podáván mezi rotujícími bubny. Vzhledem k povaze mechanismu je nezbytné použít drát, který byl navinut bez plastické deformace. Tím je zajištěn stabilní přívod materiálu bez vibrací. [23] [26]



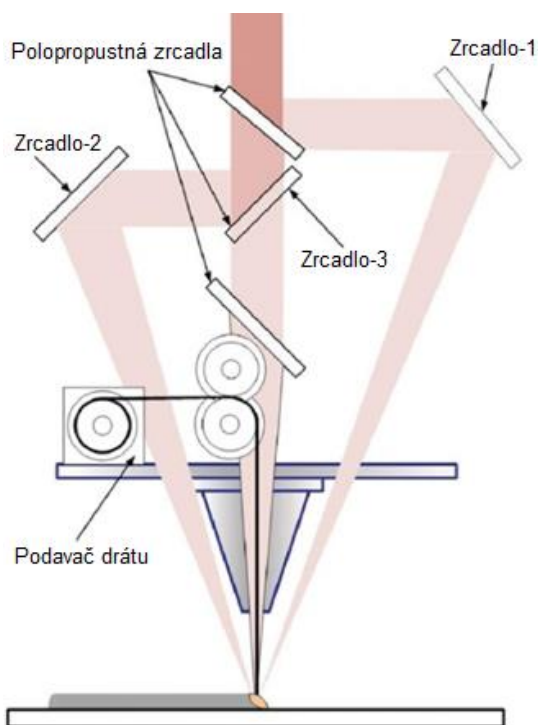
Obr. 19: Princip navařování z drátu s bočním přívodem [22]

Jak již bylo zmíněno, výhodou oproti navařování z prášku je vyšší míra využití přídavného materiálu a žádné prašné prostředí. Další podstatnou výhodou je nízká cena v porovnání s kovovými prášky. Naproti tomu návary z drátu jsou méně kvalitní, více pórovité a náchylné k praskání, což je způsobeno odkapáváním materiálu na konci drátu. Také ne všechny materiály musí být dostupné ve formě drátu. Poměrně značnou nevýhodou je skutečnost, že laserový paprsek je ve velké míře absorbován drátem, což omezuje natavení základního materiálu. Produktivitu kladení materiálu lze zvýšit předehřevem drátu (a to až čtyřikrát), anebo použitím silnějšího laserového zdroje. [23] [26]

Při navařování z drátu je možné přivádět materiál do procesu bočně nebo koaxiálně. Navařování s bočním přívodem je zobrazeno na Obr. 19. Princip je téměř totožný, jako u navařování z prášku laterální tryskou. Opět lze takto navařovat pouze v jednom směru, proto se tento způsob přívodu používá u navařování rotačních součástí nebo liniových struktur. Aby došlo k správnému navaření materiálu, je nutné dbát na správné polohování drátu vůči paprsku jak v horizontálním, tak i vertikálním směru. Nejlepších výsledků je dosahováno při sklonu 15–40° mezi drátem a základním materiálem. [23] [30] [31]

Jedním z posledních produktů v rámci vývoje technologie navařování je koaxiální laserová hlava pro navařování z drátového polotovaru. Schématické znázornění koaxiální hlavy je na Obr. 20. Díky ní je možné navařovat ve všech směrech a vytvářet tak složitější 3D struktury. Hlava je schopna pomocí děličů svazku rozdělit paprsek symetricky na tři části. Drát tedy může být veden středem laserové hlavy, aniž by

paprsek blokoval. Dílčí paprsky jsou potom zaostřeny do kruhového bodu. Drát je při průchodu tímto bodem roztaven a dochází k jeho navaření na podklad. Typické průměry používaných drátů jsou v rozmezí od 0,8 do 1,2 mm, avšak díky pokročilé technologii lze navařovat i dráty s průměrem okolo 0,3 mm. Kromě drátu z hlavy vychází i inertní plyn pro ochranu návaru. [32] [33]



Obr. 20: Schématické znázornění koaxiální laserové hlavy pro přívod drátu [32]

3.2.4. Používané materiály

Vhodné přídavné materiály pro navařování laserem musejí dostatečně absorbovat laserové záření s příslušnou vlnovou délkou, aby došlo k natavení přídavného materiálu. Po ztuhnutí taveniny by měl vzniknout dostatečně silný spoj bez výskytu křehkých fází na rozhraní přídavného a základního materiálu. Problémy s křehkostí návaru mohou vznikat, pokud je navařován materiál se zcela odlišným složením, než je materiál základní (například keramický povlak na kovovém substrátu). [23]

Další podstatnou vlastností přídavných materiálů je tepelná vodivost. Vodivost musí být dostatečná, aby došlo k přestupu tepla mezi materiálem a substrátem. Tepelná roztažnost materiálu a substrátu by měla být zhruba stejná, jinak může dojít k praskání návaru. Požadovaný povlak musí být možné vytvořit z komerčně dostupných materiálů, ať už ve formě prášku, drátu nebo pasty. [23]

Většinu komerčních slitin vhodných pro navařování lze rozdělit do 4 skupin. Jedná se o slitiny na bázi kobaltu, železa, niklu anebo karbidů (karbidy wolframu, titanu

a křemíku). Nejpoužívanější materiály jsou zobrazeny v následující tabulce (Tabulka 1). Nicméně existují i materiály na bázi chromu, hliníku, hořčíku, mědi nebo keramiky. [23]

	Cr	C	Si	Mo	Fe	Ni	Co	B	Mn	W
Cenium Z20	27	0,26	-	-	zbytek	18,8	0,33	-	9,4	1,5
Delcrome 90	27	2,7	1,0	-	zbytek	-	-	-	1,0	-
Colmonoy 4	10	0,4	2,4	-	2,8	zbytek	-	2,1	-	-
Colmonoy 5	18	0,45	3,3	-	4,8	zbytek	-	2,1	-	-
Deloro 60	15	0,9	4,5	-	4,5	zbytek	1,0	3,5	-	-
Eutrolloy 16262	27,7	1,69	0,95	7,4	0,88	zbytek	0,02	-	0,01	-
Nicrobor 40	8,0	0,25	3,7	-	1,3	zbytek	-	1,7	-	-
Tribaloy T700	15,5	-	3,4	32,5	-	zbytek	-	-	-	-
Stellite 6	29	1,2	1,4	0,6	2,0	2,0	zbytek	-	1,0	4,5
Stellite SF6	19	0,7	2,5	-	3,0	13	zbytek	1,7	0,5	7,0
Stellite 158	26	0,7	1,2	-	-	-	zbytek	0,7	-	-
Tribaloy 66	8,0	-	2,0	28	-	-	zbytek	-	-	-

Tabulka 1: Běžně užívané slitiny pro navařování [23]

3.2.5. Použití technologie laserového navařování

Laserové navařování lze využít v mnoha aplikacích v oblastech povlakování, opravárenství a aditivních technologiích nebo rapid prototyping.

Povlakování

Laserové navařování lze využít pro výrobu povlaků na povrchu součástí za účelem zlepšení jejich mechanických vlastností. V průmyslu se takto vytváří povrchy odolné vůči abrazivnímu, erozivnímu a adhezivnímu opotřebení, nebo vůči oxidaci a korozi. Takto modifikované povrchy byly vytvářeny například u součástí vrtných zařízení, sedel ventilů, forem nebo částí hydraulických čerpadel. Velkou roli hraje povlakování turbín proudových motorů v leteckém průmyslu. Zajímavá je aplikace v oblasti medicíny, kde byl proveden biokeramický povlak na ortopedických implantátech ze slitiny titanu. Navařený povlak byl z fosforečnanu vápenatého, jehož funkcí bylo podpořit růst kostí po vložení implantátu do těla. [22] [38]

Opravy a repase součástí

V porovnání s konvenčními metodami využívající klasické svařování, laser nevnáší do součástí tak velké množství tepla. U takto opravovaných součástí nedochází tedy ke vzniku trhlin a pórů, zkrácení životnosti nebo dokonce k destrukci. Laserovým navařením lze opravit díly běžným svařováním neopravitelné (např. některé hliníkové slitiny). Technologie může být použita pro opravu a repasování vysoce hodnotných součástí, jako například nástrojů, lopatek turbín anebo součástí pro vojenský průmysl. Konkrétní aplikací je oprava hliníkových krytů zbraní na podmořských plavidlech. [22]

Rapid Prototyping, Additive Manufacturing

Pojem Rapid Prototyping označuje soubor nekonvenčních technologií, kterými lze vytvářet velmi složité trojrozměrné objekty. Jedná se o technologie využívající vrstvení materiálu (aditivní výroba). Výsledný tvar výrobku je tvořen poskládáním vrstev, na které byl výrobek rozřezán ve vhodném software. Předností těchto technologií je rychlost, s jakou mohou být součásti vyráběny v porovnání s běžně užívanými technologiemi výroby, a také výhodný poměr buy-to-fly. Parametr buy-to-fly podává informaci o poměru hmotnosti polotovaru vůči hmotnosti finálního produktu. [35]

Technologie aditivní výroby jsou dnes uplatňovány zejména v oblastech zdravotnictví, automobilového průmyslu, letectví a kosmonautice. Například v roce 2015 byla schválena první 3D tištěná součást pro použití v komerčním proudovém motoru. Společnost Norsk Titanium se zabývá aditivní výrobou titanových dílů (Obr. 21) pro Boeing 787 Dreamliner pomocí Rapid Plasma Deposition. Tyto díly schválila FAA (Federal Aviation Administration) pro provoz v roce 2017. [36] [27]



Obr. 21: Rapid plasma deposition – součást Boeingu 787 navařená z Ti drátu [37]

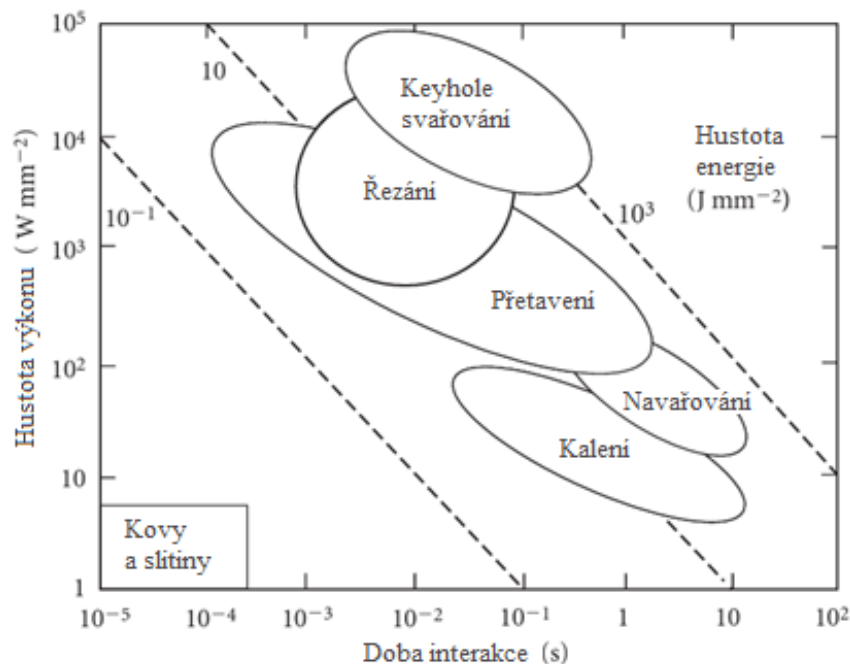
Technologie laserového navařování má potenciál zejména v leteckém průmyslu, kde je požadavek na vytváření kvalitních, složitě tvarovaných dílů s nízkou hmotností a vysokou pevností. Zejména pro navařování větších titanových dílů je vhodné volit navařování z drátu, z důvodu vyšší rychlosti navařování a nižší ceny přídavného materiálu. Drahý prášek a jeho neúplné využití by zde mohli výrazně negativně ovlivnit poměr buy-to-fly. [22] [27]

3.3. Zařízení pro navařování laserem

3.3.1. Laserové zdroje pro navařování

Proces navařování vyžaduje poměrně vysoký průměrný výkon laseru. Dříve se využívaly CO₂ a Nd:YAG lasery, nicméně v současnosti jsou používány pro navařování

zejména lasery vláknové (fiber lasery) a diodové. Pro efektivní navařování je vhodné volit lasery o výkonu minimálně 2 kW s hustotou výkonu okolo 100 W/mm² a délkou interakce v řádech sekund, viz Obr. 22. Nicméně se používají i zdroje s nižšími výkony v řádu desítek wattů, a to zejména pro ruční navařování. Používané zdroje mohou být jak pulzní, tak kontinuální. Pulzní lasery jsou voleny v aplikacích, kde je požadavek na minimální teplotní ovlivnění součásti. [23] [34]



Obr. 22: Parametry pro laserové technologie [23]

Výrobou a vývojem laserových zdrojů se zabývají například společnosti IPG Photonics, Coherent, United Winners Laser (UW Laser) nebo Laserline. Všechny zmíněné společnosti nabízí lasery vhodné přímo pro navařování a bývají často integrovány do navařovacích zařízení různých výrobců. Dalšími výrobci laserových zdrojů jsou například Trumpf, SPI Lasers nebo U.S. Laser.

Vláknové lasery pro navařování

Výkony nabízených vláknových laserů se pohybují v rozmezí od 250 W až do 120 kW a pracují na typických vlnových délkách 1070 nm. Zdroje jsou nejčastěji provozovány v kontinuálním režimu (CW) s možností modulace až do 5 kHz. V kvazikontinuálním (QCW) režimu jsou dostupné lasery pouze od společnosti UW Laser s jmenovitými výkony 250 W a 300 W. Účinnosti vláknových zdrojů jsou vyšší jak 40 %. Kromě navařování lze využít pro řezání, svařování, vrtání nebo tepelné svařování. [40] [41] [42]

Diodové lasery pro navařování

Dalším typem nabízených zdrojů jsou lasery diodové. Ty jsou dostupné s výkony od 50 W do 10 kW s vlnovými délkami od 900 nm do 1080 nm. Pracují v kontinuálním

režimu. Některé typy mají možnost modulace až do 5 kHz. Zdroje lze dále využít při řezání, svařování nebo tepelném zpracování. Na diodové lasery se specializuje firma Laserline. Firma navíc nabízí modré lasery pro navařování mědi a zpracování reflexních kovů. Jejich výkony jsou od 300 W do 1,5 kW a pracují na vlnových délkách 400 nm nebo 500 nm. [41] [42] [43]

Nd:YAG lasery

Tyto lasery se hojně využívali pro navařování v minulosti. Pevnolátkové lasery Nd:YAG nabízí jen UW Lasers s výkony od 50 W do 600 W. Ty operují na vlnové délce 1064 nm v pulzním režimu. Nejsilnější nabízený zdroj nabízí energii v pulzu až 100 J, maximální frekvenci 300 Hz. Délka pulzu může být nastavena v rozmezí od 0,5 ms do 30 ms. Dalším specifickým laserem, který nabízí stejná společnost, je laser MOPA. Tyto lasery mají výkony od 70 W do 120 W a vlnovou délku 1064 nm. Pracují v pulzním režimu s maximální energií pulzu 1,5 mJ, délkou pulzu od 9 ns do 500 ns a frekvencí v rozsahu od 1 do 1000 kHz. [42]

Shrnutí použitelných zdrojů

Zde je v tabulce (Tabulka 2) uvedeno shrnutí dostupných laserových zdrojů od zmíněných společností.

Vláknové lasery			
Výrobce	Režim [-]	Výkony [kW]	Vlnová délka [nm]
IPG	CW/modulovatelný	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 20; 40; 60; 100; 120	1070
Coherent	CW/modulovatelný	1; 2; 3; 4; 5; 6	1070
UW Laser	CW/modulovatelný	0,5; 1; 2; 3; 4	1070
	QCW	0,25; 0,3	1070
Diodové lasery			
Výrobce	Režim [-]	Výkony [kW]	Vlnová délka [nm]
Coherent	CW/modulovatelný	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	900-1100
UW Laser	CW	0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 1; 2	915
Laserline	CW	1,5; 3; 4; 6; 8	900-1080
Nd:YAG lasery			
Výrobce	Režim [-]	Výkony [kW]	Vlnová délka [nm]
UW Laser	Pulzní	0,08; 0,15; 0,25; 0,05; 0,075; 0,15; 0,3; 0,6	1064
Diodové modré lasery			
Výrobce	Režim [-]	Výkony [kW]	Vlnová délka [nm]
Laserline	Pulzní	0,3; 0,7; 1; 1,5	400-500

Tabulka 2: Shrnutí dostupných laserových zdrojů [41] [42] [43] [44]

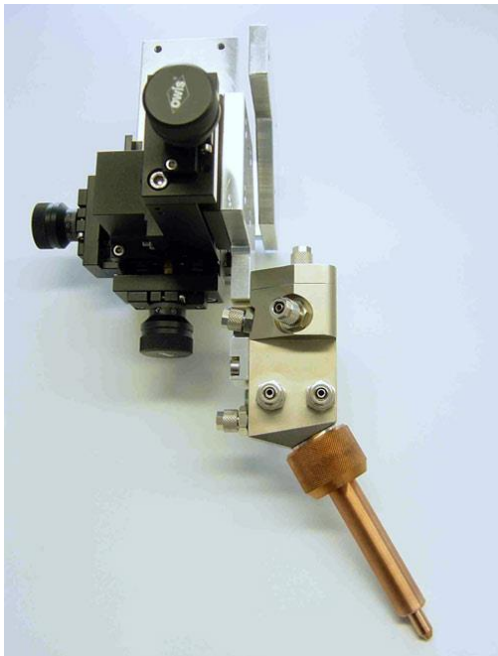
3.3.2. Laserové hlavy pro navařování

Navařovací laserová hlava je výstupním prvkem navařovacího zařízení. Hlavy mohou být přidělané ke konstrukci klasického CNC stroje nebo na ramenu robota.

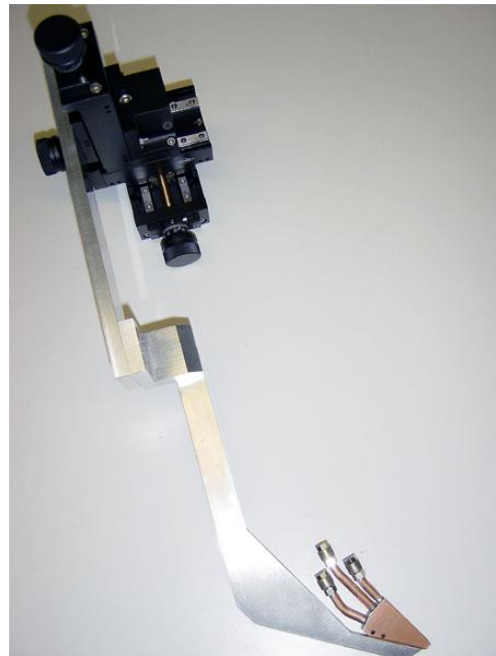
Hlavy pro navařování z prášku

V současnosti se na trhu nejvíce vyskytují hlavy pro koaxiální navařování z prášku. Díky relativně jednoduché konstrukci není cena těchto hlav příliš vysoká. Nízká cena a možnost navařování ve všech směrech je důvodem, proč se koaxiální práškové hlavy hojně využívají v navařovacích strojích. Zařízení pro navařování s bočním přívodem z prášku se sestává z navařovací hlavy a boční práškové trysky.

Boční trysky pro navařování z prášku nabízí institut Fraunhofer IWS. Na Obr. 23 je zobrazena cyklonová laterální tryska pro navařování z prášku, na Obr. 24 je tryska pro povlakování klikových hřídelí. Trysky jsou určeny pro prášky s průměry zrn ± 10 až $150 \mu\text{m}$ a dokáží mixovat dva prášky najednou. Průtok materiálu je regulovatelný v rozmezí od $0,5 \text{ g/min}$ do 25 g/min . Šířky návarů se pohybují v rozmezí od $30 \mu\text{m}$ do 4 mm . [51]



Obr. 23: Fraunhofer IWS, boční prášková tryska [51]



Obr. 24: Fraunhofer IWS, boční prášková tryska pro povlakování hřídelí [51]

Výrobce koaxiálních hlav pro navařování z prášku je například společnost Precitec. Firma Precitec má ve svém portfoliu hned dvě hlavy, a to YC30 (Obr. 25) a YC52 (Obr. 26). Obě hlavy jsou použitelné pro všechny pevnolátkové lasery s vysokou kvalitou laserového svazku a lze s nimi navařovat ve vertikálním i horizontálním směru. Hlava YC30 je navržena pro výkony laseru do 2 kW a je schopna paprsek fokusovat do průměru 2 mm . Typ YC52 dokáže pracovat s paprskem o maximálním výkonu 6 kW a fokusovat ho do průměru $0,7 \text{ mm}$ nebo 2 mm dle použité trysky. [46] [47]



Obr. 25: Precitec YC30 [45]



Obr. 26: Precitec YC52 [46]



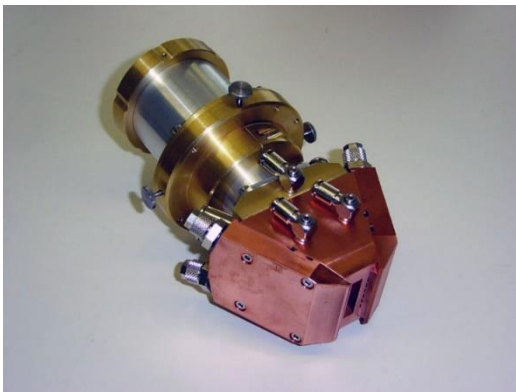
Obr. 27: Kuka MWO-I [47]



Obr. 28: IPGClad D50 [48]

Dalšími výrobci koaxiálních hlav jsou Kuka anebo již zmíněné IPG. Kuka nabízí kompaktní hlavu MWO-I (Obr. 27) pro lasery pracující na vlnové délce od 900 nm do 1080 nm s výkony do 4 kW. IPGClad D50 (Obr. 28) je hlava určená pro vláknové lasery s výkonem až do 10 kW. S hlavou je možné navařovat návary široké od 2 mm do 10 mm. Maximální hmotnostní průtok přiváděného prášku je 150 g/min. Obě hlavy používají komponenty z institutu Fraunhofer IWS. [47] [48]

Fraunhofer IWS vyvinul vlastním modulárním systémem pro koaxiální navařování z prášky. V závislosti na aplikaci je možné volit mezi tryskami s prstencovou mezerou (COAX8, COAX9) anebo tryskami s jedním proudem prášky (COAX12, COAX13). Trysky jsou určeny pro prášky s průměry zrn ± 20 až $125 \mu\text{m}$ a dokáží kombinovat až 4 prášky. Koaxiální hlavy od Fraunhoferu IWS lze použít se všemi pevnolátkovými lasery a CO₂ lasery do výkonu 10 kW. [52]



Obr. 29: Fraunhofer IWS, koaxiální modul COAX11 [51]



Obr. 30: Fraunhofer IWS, univerzální tryska COAX8 (spolupráce s Laserline) [51]

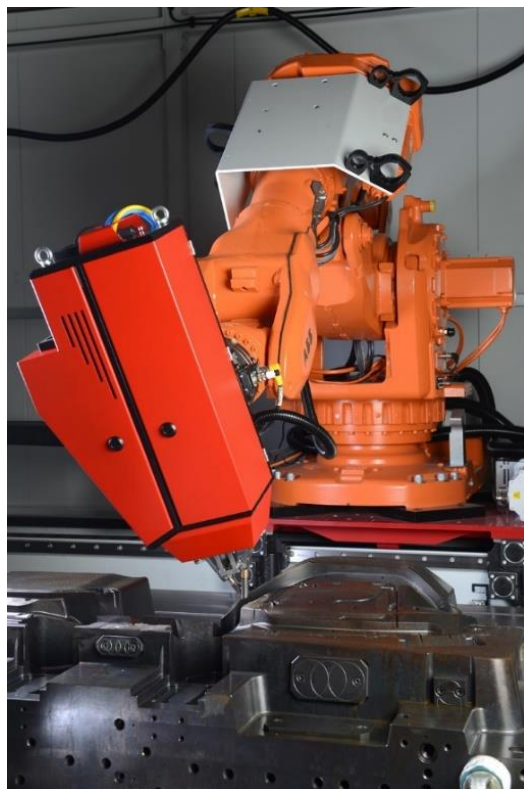
Hlavy pro navařování z drátu

V případě navařování z drátu jsou na trhu dostupné koaxiální hlavy anebo systémy s bočním přívodem. Ty se skládají z kladecí a svařovací hlavy. Takovou hlavu nabízí například společnost Lasermech. Hlava FiberWELD (Obr. 31) je určena pro svařování laserem o výkonu maximálně 8 kW. Pro lasery s výkonem až 30 kW je dostupná hlava FiberWELD HR. K svařovací hlavě je přidělena hlava kladecí, ze které je podavačem podáván drát. Obdobné řešení nabízí i IPG. [49] [50]

Institut Fraunhofer IPT nabízí navařovací hlavu s bočním přívodem drátu a podavačem v rámci jedné konstrukce. Jedná se o hlavu LMD-W-20-L, která je vhodná k integraci do stávajících výrobních linek a zařízení. Na Obr. 32 je nesena na rameni robota. Drát je do procesu přiváděn pod úhlem 20° od osy hlavy, čímž je zajištěna stabilita procesu a vysoká účinnost tavení drátu. Použitý podavač dovoluje přívod drátu o průměru až 1,2 mm. Velikost spotu laserového paprsku je 2,1 mm. Celková hmotnost hlavy je přibližně 38 kg. [53]



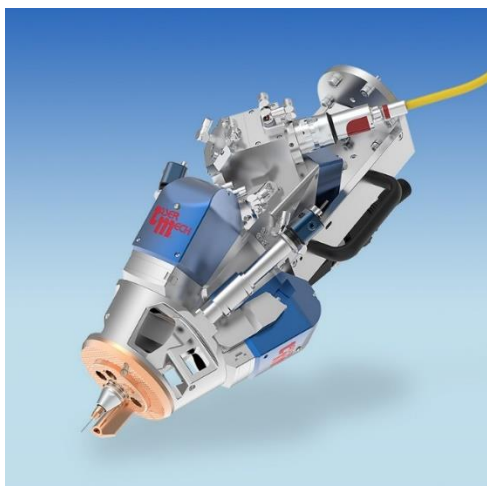
Obr. 31: Lasermech FiberWELD [49]



Obr. 32: Fraunhofer IPT, boční drátová hlava
LMD-W-20-L [53]

Lasermech, jako jeden z výrobců, nabízí i koaxiální hlavu FiberWELD DH. Hlava je konstruována pro středně výkonné pevnolátkové lasery s výkony do 30 kW. Optika hlavy je chlazená a monitorována tak, aby nedošlo k její dekontaminaci zplodinami z navařování nebo dokonce k poškození. Z Obr. 33 je patrné, že laserový paprsek vstupující do hlavy je pomocí optických prvků rozdělen na tři paprsky, které jsou fokusovány na drát vycházející z hlavy. Hmotnost zařízení se pohybuje okolo 35 kg v závislosti na přidávaných doplňcích. [54]

Další společností nabízející koaxiální drátovou hlavu je Fraunhofer IWS. Jejich COAXwire (Obr. 34) je založena na stejném principu jako předchozí hlava, tedy že vstupní paprsek je rozdělen na tři paprsky a ty jsou následně fokusovány. Hlava obsahuje senzor pohybu drátu, který v případě kolize nebo poruchy zastaví proces navařování. Volitelně je možné k hlavě přidat CCD kameru pro sledování teploty v tavenině. COAXwire lze provozovat s vláknovými a diodovými lasery s kvalitou svazku do 30 mm mrad a výkonem do 4 kW. Hmotnost hlavy je jen 13 kg a je určena pro navařování drátu o průměru od 0,4 mm do 1,6 mm. [55]

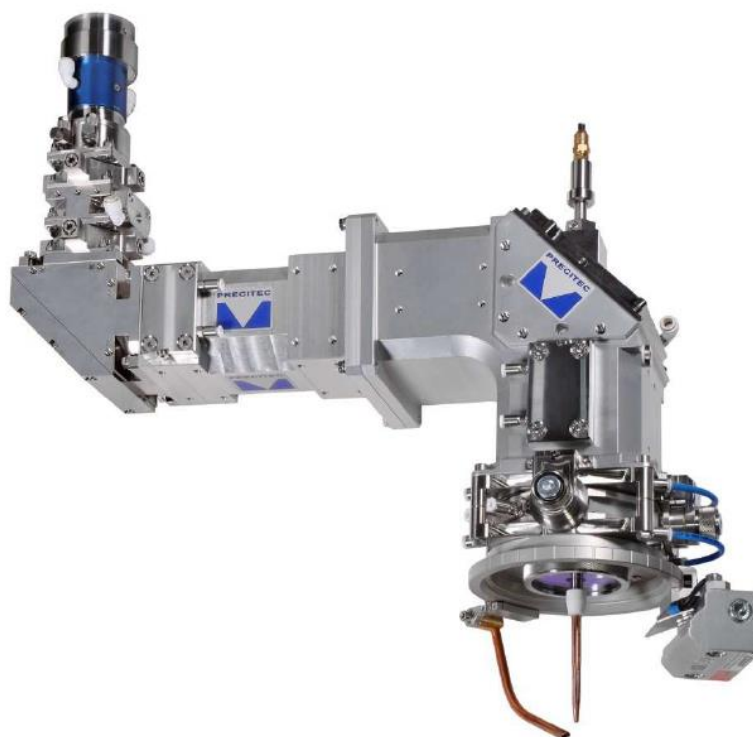


Obr. 33: Lasermech, koaxiální hlava FiberWELD DH [54]



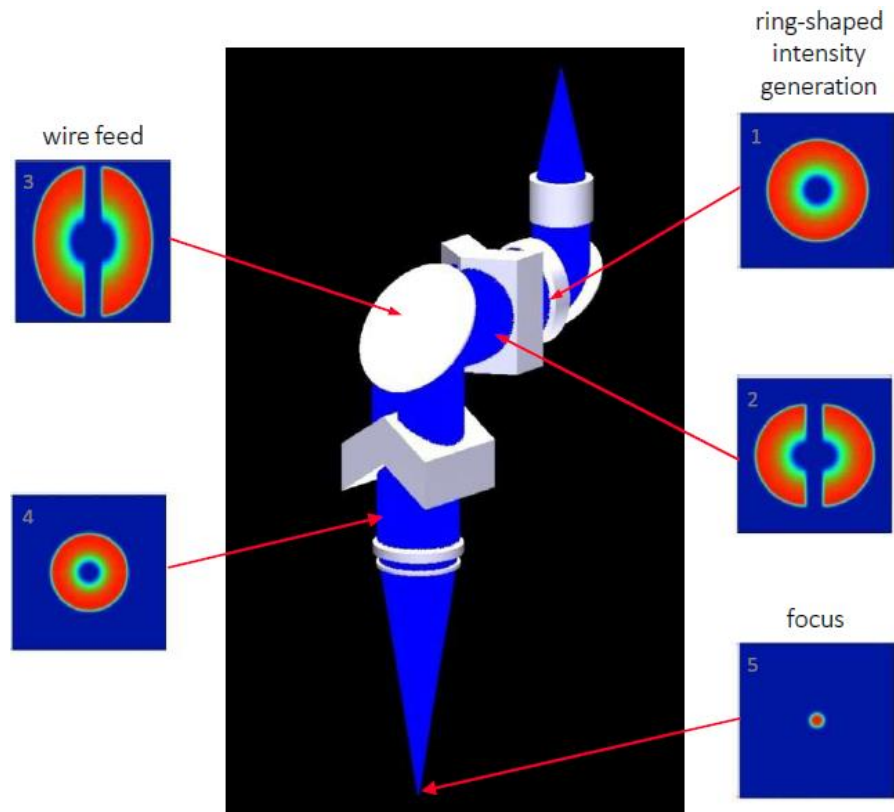
Obr. 34: Fraunhofer IWS, koaxiální hlava COAXwire [55]

Precitec nabízí koaxiální hlavu CoaxPrinter (Obr. 35). Hlavu je možné provozovat s běžnými typy laserů s maximálním výkonem 6 kW. Její hmotnost je 12 kg a je určena pro navařování z drátu o průměru od 1,0 mm do 1,6 mm. Hlavu lze poměrně snadno integrovat do již stávajících výrobních strojů nebo robotů. Rychlost navařování může být vyšší jak 5 m/min. [56]



Obr. 35: Precitec CoaxPrinter [56]

Na Obr. 36 je ukázán princip rozdělení paprsku. Vstupující paprsek má profil prstence (1). V místě (2) je prstenec rozdělen na dvě části a v místě (3) je do středu prstence přiveden drát. Následně dojde v místě (4) k opětovnému uzavření profilu a po výstupu z hlavy je prstencový paprsek fokusován do spotu (5). [56]



Obr. 36: Princip dělení paprsku v hlavě CoaxPrinter [56]

3.3.3. Přívod navařovacího materiálu

Procesní hlavy většinou nemají integrované zařízení pro přísun materiálu (výjimkou je například hlava LMD-W-20-L viz Obr. 32). Dle formy přiváděného materiálu lze podavače rozdělit na podavače drátu a podavače prášku. Výrobou a prodejem podavačů prášku pro technologie laser metal deposition se zabývá například společnost GTV Verschleiss-Schutz nebo FST.

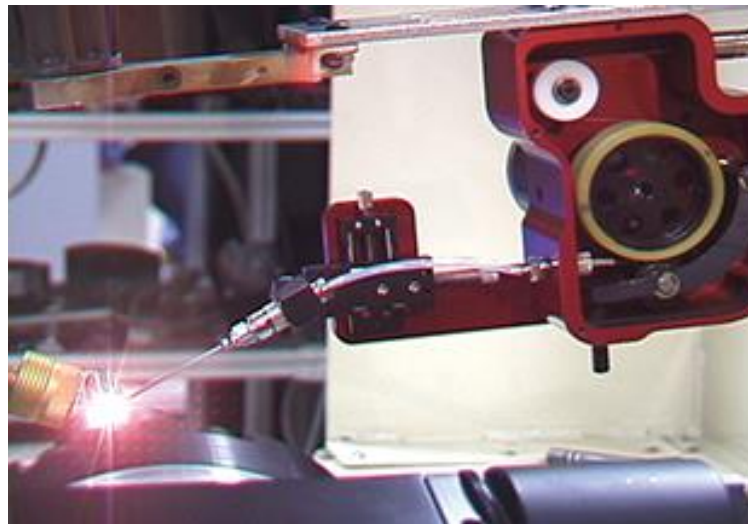
Podavače prášků mohou mít jeden nebo více zásobníků, ve kterých je umístěn přídatný materiál. Podavač je schopen prášky dodávat buď samostatně anebo je mezi sebou kombinovat. Zařízení jsou vybaveny regulátory hmotnostního průtoku nebo rotametry pro přesnou kontrolu nosných plynů. Díky tomu je možné plně kontrolovat množství přiváděného materiálu. Příkladem takového podavače je FST-20 (Obr. 37). [57]

Podavače drátu pro navařování vyrábí například Alabama Laser. V Alabama Laser byl vyvinut vlastní precizní podavač drátů malých průměrů (Obr. 38). Uživatel zadává do řídicí jednotky údaje jako je rychlost posuvu laseru a délka návaru. Regulátor

podavače poté sám automaticky přepočítá rychlost posuvu drátu a jeho potřebnou délku. V jednotce je možné časově nastavit zpoždění dodávání drátu při zahájení nebo ukončení navařování. Výstupní trysku je možné přesně polohovat. Dále se pak podavači drátu zabývá například Abicor Binzel. Firma Abicor Binzel nabízí podavače drátu jak pro klasické svařování MIG/MAG či TIG, tak i pro navařování plasmou nebo právě laserem. [58] [59]



Obr. 37: FST-20 [57]



Obr. 38: Alabama Laser, podavač drátu [58]

3.3.4. Laserové navařovací stroje

Vhodnou kombinací laserových zdrojů, podavačů a procesních hlav jsou tvořeny navařovací systémy. Na trhu existuje poměrně mnoho takových výrobců. Většina z nich se však zabývá pouze technologií navařování z prášku. Jedná se například o společnosti Trumpf, Mazak, InssTek, BeAM, DMG MORI, OR Laser, Okuma, Mepac, ALOtec a spoustu dalších.

Trumpf [60]

Všechna zařízení firmy Trumpf navařují pouze z prášku. Pro technologie Laser Metal Deposition nabízí dva stroje. Jedná se o TruLaser Cell 3000 a TruLaser Cell 7040. První z uvedených zařízení se vyznačuje svou kompaktností a univerzálností. Je to stroj s pěti osami, na kterém lze řezat, svařovat anebo navařovat se zdrojem o maximálním výkonu 8 kW. Druhý z jmenovaných strojů je taktéž univerzální, nicméně jeho pracovní

prostor je podstatně větší. Jako laserový zdroj je možné volit mezi TruDisk o výkonech 2 kW až 5 kW nebo TruFlow (CO₂ laser) o výkonech 3 kW nebo 6 kW.

Další možností je vytvoření navařovacího pracoviště v rámci balíčku DepositionLine, kde je možnost nakonfigurování pracoviště přímo dle potřeb zákazníka. Zařízení lze potom využít od povlakování až po aditivní výrobu. Zákazník má možnost volby mezi laserovými zdroji TruDisk a TruDiod, dále volí vhodný dopravník prášku a vhodnou koaxiální práškovou trysku pro požadovanou aplikaci, která je následně nasazena na svařovací hlavu jejich vlastní konstrukce.



Obr. 39: Zařízení Trumpf pro navařování z prášku [60]

DMG MORI [61]

DMG MORI vyrábí zařízení pro navařování z prášku. Nabízí celkem 4 stroje z řady Lasertec, a to Lasertec 65 3D, 65 3D hybrid, 125 3D hybrid a 4300 3D hybrid. Stroje s označením hybrid kombinují laserové navařování s obráběním. Pro natavení přídavného materiálu je použito diodových laserů a koaxiálních hlav.

Na Obr. 40 je zobrazen Lasertec 125 3D hybrid. Jedná se o pětiosý stroj s otočně sklopným stolem, který kloubí technologii laserového navařování koaxiální hlavou a obrábění. Maximální průměr vytvořeného dílce je 1250 mm a výška 745 mm. Stroj disponuje termovizí pro sledování průběhu navařování nebo čidlem rychlosti transportu prášku. Díky tomu je možné adaptivně řídit proces navařování a dosáhnout tak vyšší spolehlivosti depozice materiálu. V tabulce 3 (Tabulka 3) jsou uvedeny technické parametry zařízení.

DMG MORI Lasertec 125 3D hybrid		
Rozsah os X/Y/Z	mm	1335/1250/900
Průměr stolu	mm	1250
Rozsah otáčení stolu (osa C)	°	360
Rozsah naklopení stolu (osa A)	°	-120 až +120
Maximální otáčky vřetene (standartní/volitelné)	ot/min	14000/20000
Krouticí moment vřetene (standartní/volitelné)	Nm	100/130
Výkon laserového zdroje(standartní/volitelné)	kW	2,5/3
Průměr spotu paprsku	mm	3/1,6
Hmotnost stroje	kg	27000

Tabulka 3: Technické parametry DMG MORI Lasertec 125 3D hybrid [61]



Obr. 40: DMG MORI Lasertec 125 3D hybrid [61]

Mepac [62]

Mepac je česká společnost zabývající se kromě výroby navařovacích strojů také přesným opracováním povrchů forem nebo nástrojů a jejich opravami nebo prodejem přístrojů, nástrojů a spotřebního materiálu pro přesné opracování povrchu.

V jejich nabídce se nachází navařovací systémy ACP využívající pevnolátkové Nd:YAG zdroje od společnosti UW Laser pro navařování z přídavného materiálu ve formě drátu. Průměr navařovaného drátu může být volen v rozmezí od 0,2 mm do 1,0 mm v závislosti na použitém zdroji. Zařízení mohou být v provedení pro ruční navařování (ACP A), pro navařování s pojezdovým stolem x-y (typ ACP B) anebo typ ACP C (viz Obr. 41) pro náročnější operace, který disponuje až 13 stupni volnosti.



Obr. 41: Mepac ACP C [62]

ALOtec [63]

Poslední zmiňovanou společností je německá firma ALOtec. ALOtec se zabývá integrací laserových komponent pro navařování z prášku i z drátu do výrobních systémů. Systémy jsou sestavovány vždy individuálně dle požadavků zákazníka s možností volby laserového diodového zdroje s výkonem až do 20 kW. Systémy lze kombinovat s průmyslovými roboty, posuvovými jednotkami a otočnými stoly. Na Obr. 42 je zobrazena realizace laserového navařování z drátu koaxiální hlavou COAXwire, která je umístěna na ramenu robota KUKA. Úkolem tohoto systému je renovace ohýbacích nástrojů.



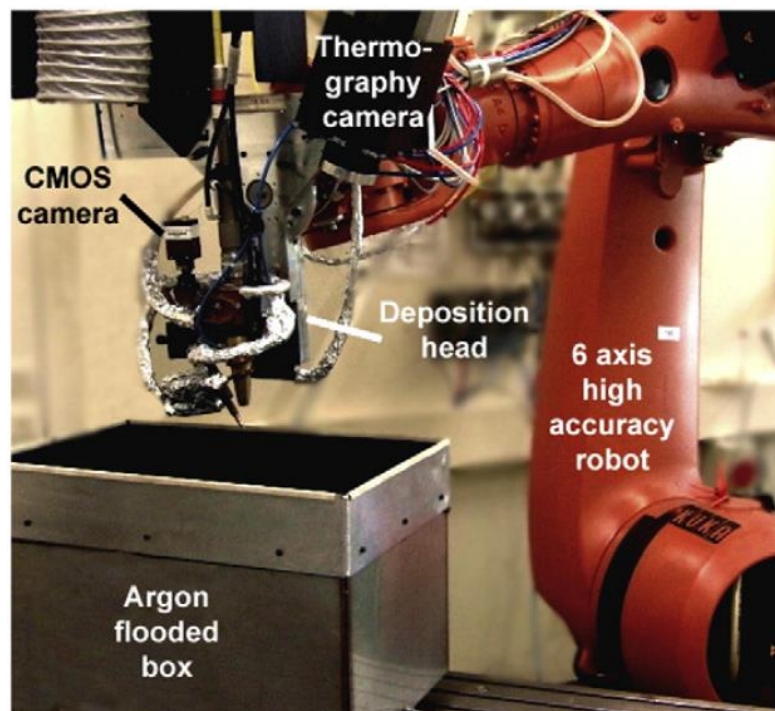
Obr. 42: ALOtec, systém pro navařování z drátu [63]

3.4. Navařování drátu ze slitiny titanu Ti6Al4V

Pro tuto práci byly vyhledány vědecké publikace týkající se navařování titanového drátu laserem. Bylo zpracováno 12 vědeckých publikací ze zahraničních univerzit a vědeckých center z Německa, Švédska, Anglie, Belgie, Číny a Portugalska. Vzhledem k nezávislosti jednotlivých týmů se liší některé parametry experimentů, jako například použitý zdroj laseru, jeho výkon, rychlost podávání drátu aj. Princip experimentů byl však obdobný, jednalo se o zhotovení několika návarů po vrstvách na sobě, ze kterých byly následně obrobena zkušební vzorky, které byly podrobeny různým materiálovým zkouškám. Všechny experimenty byly prováděny s titanovou slitinou Ti-6Al-4V (titan Grade 5).

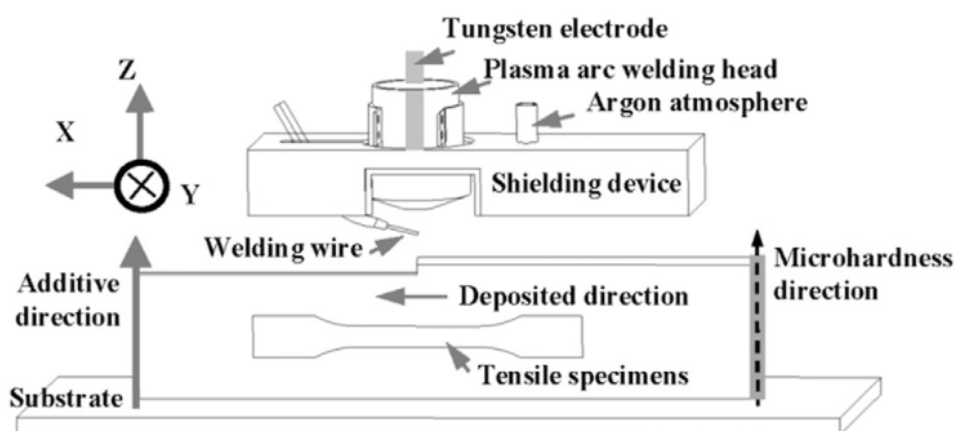
3.4.1. Problematika navařování titanové slitiny

Hlavním problémem při navařování titanu je jeho oxidace. Při vysokých teplotách má totiž titan vysokou afinitu ke kyslíku. Aby k oxidaci při navařování laserem nedocházelo, musí být návar během navařování a chlazení umístěn v ochranné atmosféře argonu. Obyčejné přivedení argonu tryskou laterálně k návaru se však projevilo jako nedostatečné, aby zabránilo oxidaci [64]. Navařování tedy většinou probíhá ve vakuu nebo v boxu, který je vyplněn argonem. Zdroje [65] [66] [67] [71] [73] používají box, do kterého je zespod přiváděn argon o čistotě 5.0 (Obr. 43). Protože argon má vyšší hustotu než kyslík, dochází k vytlačování kyslíku z komory. Komora tedy může zůstat z vrchní strany otevřená.



Obr. 43: Navařovací pracoviště s ochrannou komorou [65]

Publikace [75] uvádí, že pro laserové navařování titanu, je maximální koncentrace kyslíku v ochranném prostředí maximálně 1000 ppm. Dle [70] a [72] byla při experimentech koncentrace kyslíku vždy pod úrovní 20 ppm. Při experimentu dle [74], byla koncentrace kyslíku v argonu během průběhu navařování 0,1 %. Zdroj [75] uvádí, že pro docílení vhodné koncentrace kyslíku, je nutné poměrně dlouho komoru „vyplachovat“ argonem, což se výrazně projeví na ceně výroby dílce. Proto například v institutu IWS Fraunhofer v Drážďanech vyvinuli systém lokální ochrany návaru argonem, čímž zamezili nutnosti vyplnění celého pracovního prostoru argonem [68]. Podobný systém používá i Cranfield University při navařování metodou WAAM (WAAMShield), anebo Shanghai Jiao Tong University při navařování plasmou (Obr. 44) [76].



Obr. 44: Lokální ochrana návaru [76]

3.4.2. Rozsah použitých parametrů ve vědeckých publikacích

V tabulce (Tabulka 4) jsou zaznamenány použité parametry při experimentech navařování titanové slitiny Ti-6Al-4V.

Experimentální parametry z vědeckých publikací	
Zdroje:	Nd:YAG, vláknové, diodové
Výkon:	1,2–3,5 kW
Materiál:	Ti-6Al-4V
Velikost spotu:	4,0–4,1 mm
Průměr drátu:	1,2 mm
Sklon podávaného drátu:	13°, 45° - 60°
Rychlost podávání drátu:	0,5–9,6 m/min
Ochranná atmosféra:	Argon 5.0
Průtok plynu:	20–30 l/min
Rychlost navařování (posuv):	50–2400 mm/min

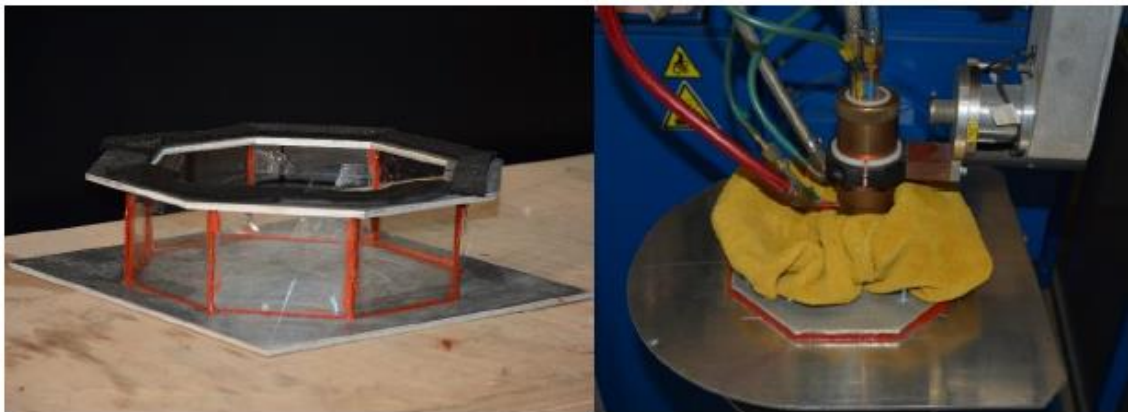
Tabulka 4: Exp.parametry [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [74] [75]

3.4.3. Možná konstrukční řešení ochranných komor

Ochrannou atmosféru lze řešit dvěma hlavními způsoby. Prvním způsobem je lokální ochrana, kdy je inertní plyn přiváděn pouze do místa návaru a jeho nejbližšího okolí. Příklad tohoto řešení je zobrazen na Obr. 44.

Druhý způsob lze nazvat jako ochranu globální, kdy je celý podkladový substrát i s vznikajícím návarem umístěn v ochranné komoře, do níž je přiváděn inertní plyn. Možnosti konstrukce ochranné komory jsou celkem čtyři. První možností je využít jako ochrannou komoru celý pracovní prostor stroje. Ten ale musí být kompletně utěsněn, aby nedocházelo k výraznému úniku inertního plynu do okolí anebo jeho kontaminaci okolním vzduchem. Obdobné řešení využívá Sciaki pro navařování elektronovým paprskem pouze s tím rozdílem, že v ochranné komoře je vakuum namísto inertního plynu viz kapitola Electron Beam Additive Manufacturing. [11]

Druhou možností je navařování v uzavřeném boxu, který je umístěn do pracovního prostoru stroje. Taková komora je používána například při ručním svařování titanu, nebo při navařování titanu technologií PTA viz Obr. 45. [77]



Obr. 45: Uzavřená ochranná komora pro navařování titanu metodou PTA [77]

Dalším možným přístupem ke konstrukci ochranné komory je využití vyšší hustoty inertního plynu, než je hustota okolního vzduchu. Taková komora může zůstat z vrchu otevřená, tudíž není nutné řešit přístup zdroje energie a přídavného materiálu do komory a následně utěsnění pracovního prostoru. Tato konstrukce je při navařování laserem používána nejčastěji viz Obr. 43. Ochranný box lze využít i při ručním svařování metodou TIG viz Obr. 46. [65]



Obr. 46: Otevřená komora pro svařování titanu metodou TIG [78]

Poslední variantou je navařování v uzavřené ochranné komoře (Obr. 47), jejíž stěny jsou tvořeny poddajným materiálem. Obvykle je používána transparentní PVC fólie. Spodní část fólie je připevněna ke stolu, vrchní část k procesní hlavě. Tímto řešením je docíleno maximální těsnosti a zároveň prakticky není omezen pohyb polohovacího zařízení. [79]

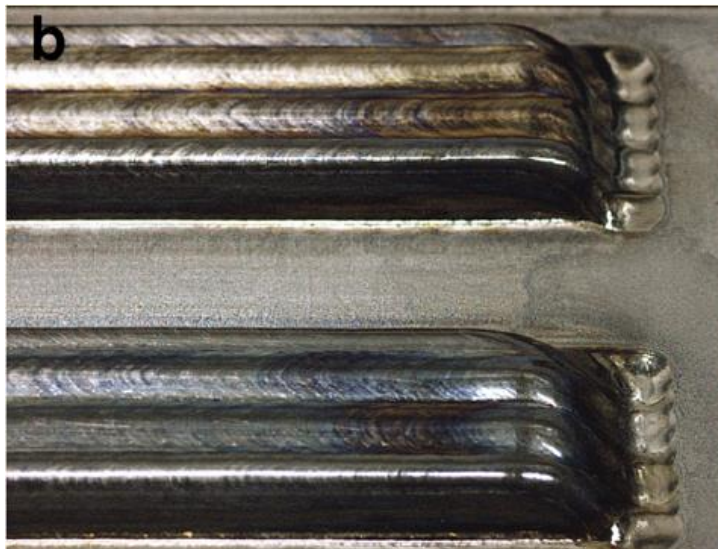


Obr. 47: Uzavřená komora z poddajného materiálu [79]

3.4.4. Shrnutí výsledků experimentů z vědeckých publikací

Na zhotovených návarech byla hodnocena jejich celistvost a kvalita povrchu. Návary byly celistvé s čistým a jemným povrchem bez pórů nebo trhlin. Velká část povrchu byla lesklá, nacházela se na něm však i matná, hnědá a modrá místa, viz Obr. 48

[66] [69] [65]. Výkon laseru ovlivňuje především šířku návaru a rychlost navařování jeho výšku [65]. Pro co nejkvalitnější návar je nutné správně nastavit vzdálenost drátu od podkladového materiálu. Pokud bude vzdálenost moc velká, natavený materiál bude vlivem gravitace odkapávat a tvořit nepravidelný návar. [64]



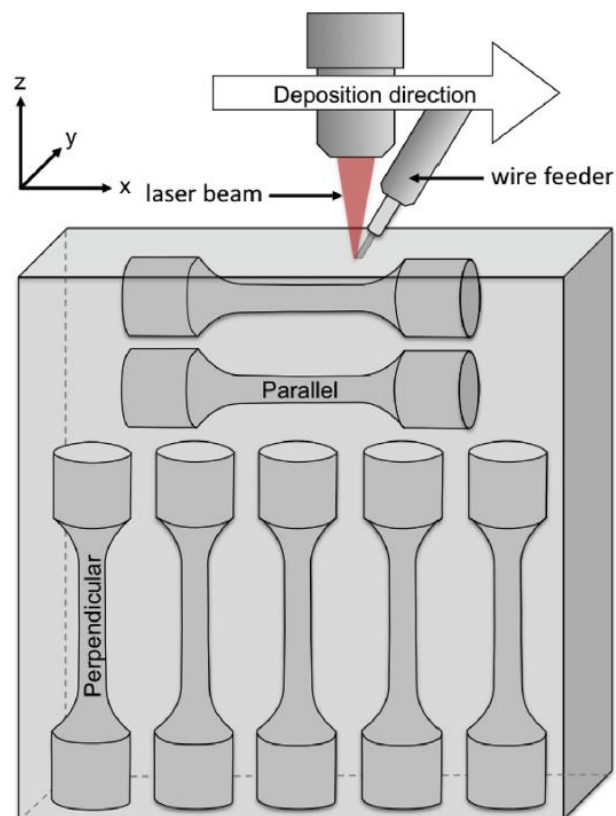
Obr. 48: Vrstvené návary z Ti-6Al-4V [66]

Při měření tvrdosti návarů bylo zjištěno, že tvrdost návaru je vyšší než tvrdost základního materiálu. Tvrdost návaru se zvyšuje s použitím vyššího výkonu laseru. Při zvýšení rychlosti podávání přídavného drátu však dochází ke snížení tvrdosti. Na tvrdost tepelně ovlivněné oblasti nemají tyto parametry výrazný vliv, s vyšší rychlostí navařování (rychlostí posuvu) se však tvrdost tepelně ovlivněné oblasti zvýší [65]. Návary dosahovaly vyšší tvrdosti než přídavný drát. Při následném tepelném zpracování při teplotě 600 °C po dobu 4 hodin byla výsledná tvrdost vyšší a bylo dosahováno menších odchylek od její hodnoty. Naopak při tepelném zpracování při teplotě 1200 °C po dobu 2 hodin byla výsledná tvrdost nižší – podobná tvrdosti drátu a bylo dosahováno vysokých odchylek od její střední hodnoty. Tvrdost návaru je tedy především ovlivněna tepelným zpracováním než parametry experimentu. Tepelné zpracování při 600 °C po dobu 4 hodin neovlivňuje výrazně morfologii, avšak výrazně ovlivňuje průměrnou tvrdost [66]. Při pozorování mikrostruktury návarů bylo zjištěno, že mikrostrukturu návarů tvoří sloupová beta zrna, která rostou ke zdroji tepla. Rychlejší ochlazování při navařování má pak za účinek vznik menších zrn, což zvyšuje pevnost. Stupeň anizotropie nebyl ovlivněn tloušťkou hrany zrna alfa [70] [66].

Z návarů byly následně obrobena zkušební tyče pro tahové zkoušky. Byly vytvořeny celkem dva typy tyčí – orientované rovnoběžně se směrem navařování a orientované kolmo ke směru navařování (Obr. 49). Rovnoběžné vzorky vykazovaly vyšší pevnost, kolmé vzorky vykazovaly naopak větší prodloužení a vyšší houževnatost. Při tahové zkoušce byla trhлина iniciována vždy dle směru navařování – u rovnoběžných

vzorků podélně, u kolmých příčně. Žihání při 600 °C nemá významný vliv na mechanické vlastnosti, žihání při 843 °C však významně zvýší napětí potřebné k porušení [70] [71] [72]. Výsledky únavových zkoušek ukázaly, že při nižších zatíženích vykazují vzorky orientované rovnoběžně se směrem navařování vyšší únavovou životnost než kolmé vzorky, při vyšším zatížení tento rozdíl zaniká. Šíření únavové trhliny následuje rozhraní alfa-beta [72].

Mechanické a korozní vlastnosti titanové slitiny Ti-6Al-4V jsou ovlivňovány zejména obsahem uhlíku, vodíku, dusíku a kyslíku. Při porovnání návarů vytvořených za použití přídavného materiálu ve formě drátu a prášku (metoda powder bed – práškové lože), vykazovaly návary z drátu nižší hodnoty výskytu těchto prvků. V obou případech vykazovaly návary nižší hodnoty nečistot, než je povolená hodnota základního materiálu. Vzorky navařené za pomoci drátu vykazovaly vyšší mez kluzu, vyšší mez pevnosti, nižší tažnost a nižší kontrakci než vzorky navařené za pomoci prášku. Při vysokocyklickém namáhání byla stanovena mez únavy 700 MPa pro návary z drátu a 600 MPa pro návary z prášku [73].



Obr. 49: Schéma orientace zkušebních tyčí [70]

3.5. Shrnutí teoretické části

Teoretická část práce seznamuje s metodami navařování a blíže popisuje technologii laserového navařování. Dále se teoretická část zabývá dostupnými zařízeními pro navařování a problematikou navařování titanového drátu z materiálu



Ti-6Al-4V. Z rešerše vyplývá, že pro navařování je ve většině případů využíván přídavný materiál ve formě drátu nebo prášku za asistence ochranného plynu. Při navařování z prášku jsou výsledkem velice kvalitní návary s nízkým promíšením základního a přídavného materiálu. Nevýhodou je zde skutečnost, že ne všechny prášky jsou navařeny a musí tedy být řešen jeho odvod z pracovního prostoru. S tím souvisí i zvýšená prašnost v průběhu navařování. Tyto problémy odpadají při navařování z drátu. Drát je totiž využit téměř na 100 %. Při navařování z drátu lze produktivitu procesu zvýšit předehřevem drátu anebo použitím silnějšího laserového zdroje. Velmi důležité je dbát na správnou polohu drátu vůči paprsku.

Z provedené analýzy trhu lze prohlásit, že většina z výrobců zařízení pro laserové navařování se zabývá navařováním z prášku pomocí koaxiálních hlav. Stroje pro navařování z drátu jsou stavěny zejména na zakázku dle specifických požadavků zákazníka. Zařízení využívající koaxiální hlavu pro navařování z drátu se na trhu mezi komerčně dostupnými stroji zatím nevyskytuje. Výrobci nejčastěji používají diodové nebo vláknové lasery, které pracují v kontinuálním režimu o výkonech od 300 W do 6 kW. Zejména pak pro ruční navařování jsou využívány i Nd:YAG zdroje s nižšími výkony.

Z výzkumných zpráv je zjištěno, že je pomocí laseru možné z titanového drátu navařovat komponenty s homogenní strukturou a mezí pevnosti v tahu 900–1000 MPa o vyšší tvrdosti, než má základní materiál. Pevnost a houževnatost těchto součástí je srovnatelná s tvářenými a odlévanými díly, dynamická pevnost je vyšší než u odlévaných dílů. Tyto součásti mají také vysokou mez únavy okolo 700 MPa. Součásti vyrobené pomocí laserového navařování z titanového drátu tedy mohou dosahovat vlastností potřebných pro letecký průmysl. Při navrhování dílů však musí být brán ohled na orientaci zatížení jednotlivých součástí (zdali jsou návary namáhány kolmo či podélně vůči směru navařování).

Co se týče možnosti navařování titanového drátu na Ústavu výrobních strojů a zařízení na ČVUT v Praze na zařízení Lumonics JK701H, je zde několik omezení. Navařovací a kladecí hlava jsou konstruovány na použití drátu o průměru 0,6 mm, drát o větším průměru nebude možné použít kvůli konstrukčním omezením a nízkému maximálnímu výkonu laseru. Problém nastává také ohledně argonové ochranné atmosféry. V současnosti je argon přiváděn tryskou přímo do místa návaru, což by bylo nedostačující pro zabránění oxidace titanu, kdy musí být návar i s tepelně ovlivněnou oblastí chráněn argonem během navařování i celé fáze chladnutí návaru.

Pro technologii laserového navařování z titanového drátu musí být nejprve vytvořen vhodný systém pro ochranu návaru. Po vytvoření a zajištění dostatečné ochranné atmosféry je možné přistoupit k optimalizaci procesu navařování z titanového drátu o průměru 0,6 mm na zařízení JK701H.

4. Praktická část

Praktická část diplomové práce je zaměřena na zvládnutí a následnou optimalizaci procesu navařování titanového drátu laserem. Cílem práce je realizace vlastního zařízení pro navařování titanového drátu a zjištění optimálních technologických parametrů pro navařování. Praktická část práce byla provedena v laboratořích Ústavu výrobních strojů a zařízení na ČVUT v Praze.

4.1. Návrh experimentu

Z provedené rešerše vyplývá, že pro navařování titanu je nezbytná kvalitní ochranná atmosféra. Prvním krokem v praktické části tedy bylo navržení a následné vyrobení ochranné komory. Po výrobě prototypu komory byla otestována kvalita poskytované ochranné atmosféry provedením několika testovacích návarů. Kvalita atmosféry byla hodnocena pouze na základě vizuální kontroly zbarvení návarů, kdy výsledný návar musí vykazovat stříbrnou barvu. Jakékoliv jiné zbarvení je nepřípustné a svědčí o vysokém obsahu kyslíku v atmosféře [80]. Výchozí laserové a navařovací parametry byly nastaveny na základě předchozích zkušeností z testů navařování konstrukční a nerezové oceli (Tabulka 5 a Tabulka 6).

Výkon laseru odpovídá průměrnému výkonu laserového paprsku na výstupu z rezonátoru, šířka pulzu určuje délku působení laseru, zatímco frekvence definuje prodlevu mezi jednotlivými pulzy. Výška pulzu vychází z možností laserového zdroje a je nastavena pro dosažení maximálního výkonu při nastavení ostatních procesních parametrů. Poměr focus/ratio je poměr nastavení teleskopu optické dráhy laseru. Jeho nastavení je ideální pro dosažení průměru svazku 0,8 mm na povrch materiálu s použitou ohniskovou vzdáleností 80 mm.

Výchozí laserové parametry				
Výkon laseru [W]	Výška pulzu [%]	Šířka pulzu [ms]	Frekvence laseru [Hz]	Focus/ratio [-]
500	52	5	34	640/480

Tabulka 5: Výchozí laserové parametry

Výchozí navařovací parametry				
Pauza podavače [μs]	Rychlost posuvu [mm/min]	Výška vyjetí v Z [mm]	Délka vyjetí v X [mm]	Tlak [bar]
10	300	0,5	0	1

Tabulka 6: Výchozí navařovací parametry

Po zhotovení finální verze komory poskytující dostatečnou ochrannou atmosféru mohlo být přistoupeno k optimalizaci navařovacích parametrů. Vhodnou kombinací laserových parametrů, rychlosti podávání drátu, rychlosti strojních posuvů, průtoku

ochranného plynu a fokusace laserového paprsku bylo docíleno titanového návaru s kvalitním, nezoxidovaným povrchem.

Dále bylo přistoupeno k experimentům navařování 3D struktur na titanový podklad. Zde byly měněny parametry skladby housenek tak, aby bylo docíleno homogenního spoje návarů. Verifikace návarů byla provedena na metalografickém výbrusu navařených vzorků pod mikroskopem na Ústavu materiálového inženýrství ČVUT.

4.1.1. Experimentální zařízení a metody

Laserové zařízení

Experimenty navařování byly realizovány na zařízení Sitec s laserovým zdrojem JK 701H Lumonics (Obr. 50). Jedná se o pevnolátkový laser operující v pulzním režimu na vlnové délce 1064 nm s maximálním výstupním výkonem 550 W. Jeho technické parametry jsou uvedeny níže v tabulce (Tabulka 7). Kinematika stroje je tříosá s přídatnou rotační osou C. Hlavní pracovní pohyb vykonávají osy X a Y, které pohybují s křížovým stolem. Osa Z nese celý rezonátor laseru, optickou trasu a výstupní zařízení (laserová hlava) s podavačem drátu. Rotační osa C je umístována na křížový stůl. Pro snazší polohování laserového paprsku je stroj vybaven monitorem a kamerou, umístěnou na laserové hlavě.



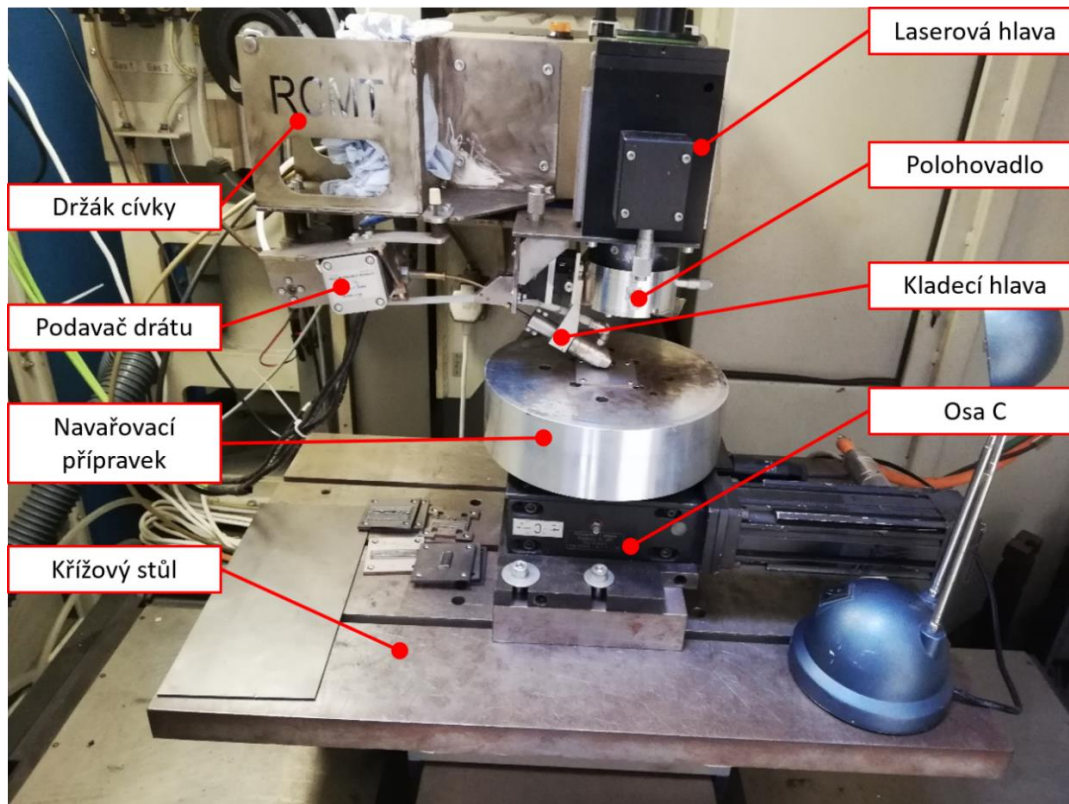
Obr. 50: Laser GSI Lumonics

Technické parametry	
Druh laseru, aktivní prostředí:	Pevnolátkový, Nd:YAG
Vlnová délka:	1064 nm
Výstupní výkon:	550 W
Energie v pulzu:	0,1 – 70 J
Šířka pulzu:	0,5 – 20 ms
Frekvence:	0,2 – 500 Hz
Ohnisková vzdálenost:	80, 120 a 200 mm
Technologické použití:	Svařování, řezání, vrtání, navařování

Tabulka 7: Technické parametry zařízení JK 701H

Navařovací zařízení

Aby bylo možné na stroji navařovat, je nutné stroj osadit dalšími komponenty. Jedná se o podavač drátu s řídicí jednotkou, držák cívky, kladecí hlavu s přívodem asistenčního plynu a polohovadlo (Obr. 51). Podavač je tvořen dvěma krokovými motory, mezi jejichž hřídelemi je podáván navařovací drát. Motory jsou připevněny k držáku cívky, ze které je drát odvíjen. Pomocí řídicí jednotky podavače drátu lze nastavit 4 rychlosti podávání, respektive 4 různé pauzy mezi jednotlivými kroky krokových motorů. Pauzy mezi kroky jsou dlouhé 30 μ s, 200 μ s, 230 μ s a 400 μ s. Při nastavené pauze 30 μ s je rychlost odvíjení drátu přibližně 10,6 mm/s, s pauzou 400 μ s je rychlost odvíjení asi 4 mm/s.



Obr. 51: Navařovací zařízení

Kladecí hlava je tvořena goniometrickým stolkem pro nastavení úhlu sklopení drátu vůči stolu, lineárním stolkem pro polohování drátu v ose Y a hubicí s bowdenem, kudy je přiváděn drát do místa navařování. Na hubici je umístěna spojka pro přívod asistenčního plynu. Tyto komponenty jsou přišroubovány ke svařenci, který je přišroubován k laserové hlavě. Na výstupu z laserové hlavy je umístěno polohovadlo, kterým lze doladit polohu fokusační čočky. Na spodní straně polohovadla je umístěno krycí sklo, které brání znečištění optiky laserové hlavy a fokusační čočky.

Optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5

Jedná se o vysoce přesný optický 3D mikroskop, který je určen zejména k měření drsností a ověřování rozměrových přesností součástí. Zařízení je zobrazeno na Obr. 52. V diplomové práci bylo zařízení použito pro změření výšky a šířky návarů a vykreslení vlnitosti jejich profilů. [81]

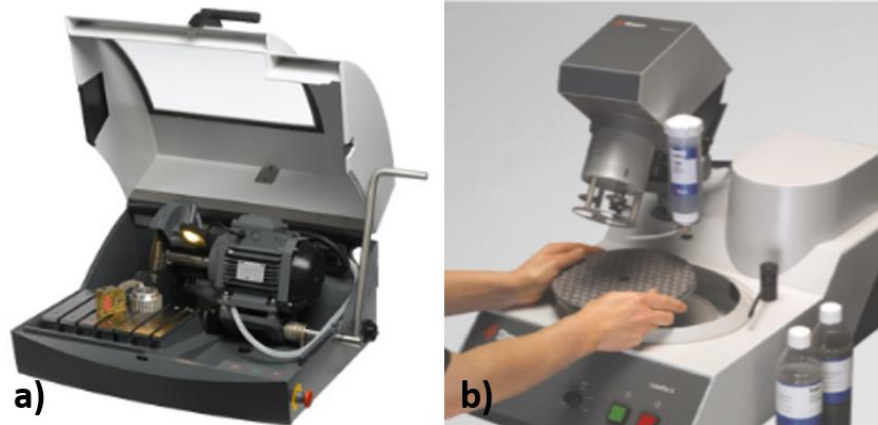


Obr. 52: Alicona Infinite Focus G5

Zařízení a postup pro vyhodnocení metalografie

Metalografie byla využita pro verifikaci provedených návarů a 3D struktur. Optická metalografie spočívá v pozorování metalografických vzorků pomocí optického mikroskopu. Výsledkem metalografie je zviditelnění mikrostruktury zkoumaného vzorku a následná analýza. Prvním krokem v rámci metalografie je odběr vzorku. Zkoumaný předmět musí být nejprve rozdělen pomocí technologie řezání na metalografické

píle (viz Obr. 53 vlevo) případně dalšími technologiemi jako je frézování či rozbrušování. Při dělení vzorku nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění struktury v oblasti řezu. [82]



Obr. 53: Metalografická pila (a), metalografická bruska (b) [84]

Pokud jsou nařezané vzorky malé, provede se tzv. preparace. Odebraný vzorek se zalije hmotou (obvykle polymerní pryskyřice). Tím dojde ke zvětšení plochy metalografického výbrusu, čímž je usnadněna manipulace se vzorkem při jeho dalším zpracování. Dále je povrch vzorku broušen buď ručně brusnými papíry s různou zrnitostí, nebo mechanizovaně na metalografických bruskách (viz Obr. 53 vpravo). Po broušení následuje leštění vzorku. To lze provádět mechanicky nebo elektrolyticky. [82] [83]



Obr. 54: Metalografický mikroskop ZEISS Neophot 32 [85]

Posledním krokem je leptání. Tím dojde ke zviditelnění struktury vzorku. Vzorek je ponořen do leptacího činidla. Činidlo odstraní tvářenou vrstvu, která vznikla na povrchu vzorku po broušení a leštění. Po naleptání povrchu výbrusu lze u vzorků hodnotit na metalografickém mikroskopu (Obr. 54) charakteristické znaky struktury, které mají vliv na vlastnosti kovu nebo slitin. [82] [83]

4.1.2. Použité asistenční plyny

Z provedeného průzkumu problematiky navařování titanu bylo zjištěno, že se jako asistenční plyn používá argon. Argon je inertní plyn, bezbarvý a bez zápachu. Využívá se v mnoha průmyslových odvětvích, nejčastěji jako ochranný plyn při svařování obloukem. K dostání je v různých čistotách. Čistota určuje minimální obsah čistého plynu v objemových procentech plynu. O tom, jak je plyn čistý, hovoří tzv. devítkový kód, který tvoří dvě číslice oddělené tečkou. První číslice vyjadřuje počet devítek, druhá číslice je hodnota posledního místa. [86]

Při experimentech byl používán argon 4.8, který byl k dispozici na pracovišti. Jedná se o plyn s minimálním obsahem 99,998 % čistého argonu. Všichni řešitelé z odborných publikací k navařování používali argon 5.0, který obsahuje 99,999 % čistého argonu. Složení plynů je pro porovnání uvedeno v tabulce 6 (Tabulka 8). [86]

Argon 4.8		Argon 5.0	
Ar	≥ 99,998 %	Ar	≥ 99,999 %
N ₂	≤ 10 vpm	N ₂	≤ 5 vpm
O ₂	≤ 3 vpm	O ₂	≤ 2 vpm
H ₂ O	≤ 4 vpm	H ₂ O	≤ 2 vpm
C _m H _n	≤ 0,2 vpm	C _m H _n	≤ 0,1 vpm
		CO ₂	≤ 0,1 vpm

Tabulka 8: Složení argonu 4.8 a argonu 5.0 [86]

4.1.3. Použité materiály

Použitým materiálem byla titanová slitina Ti-6Al-4V, neboli titan Grade 5. Jedná se o nejpoužívanější slitinu ze všech titanových slitin. Představuje přibližně 50 % celkového využití titanu ve světě. Titan Grade 5 disponuje vysokou pevností v tahu, minimálně 895 MPa, při poměrně nízké hustotě, která činí přibližně 4430 kg/m³. Slitina také vyniká svou dobrou korozní odolností. Její chemické složení je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 9). [87] [88]

Chemické složení (hmotnost %)										
O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Jiné	Rezidua
0,2	0,05	0,08	0,015	0,4	5,5 - 6,75	3,5 - 4,5	-	-	-	0,4

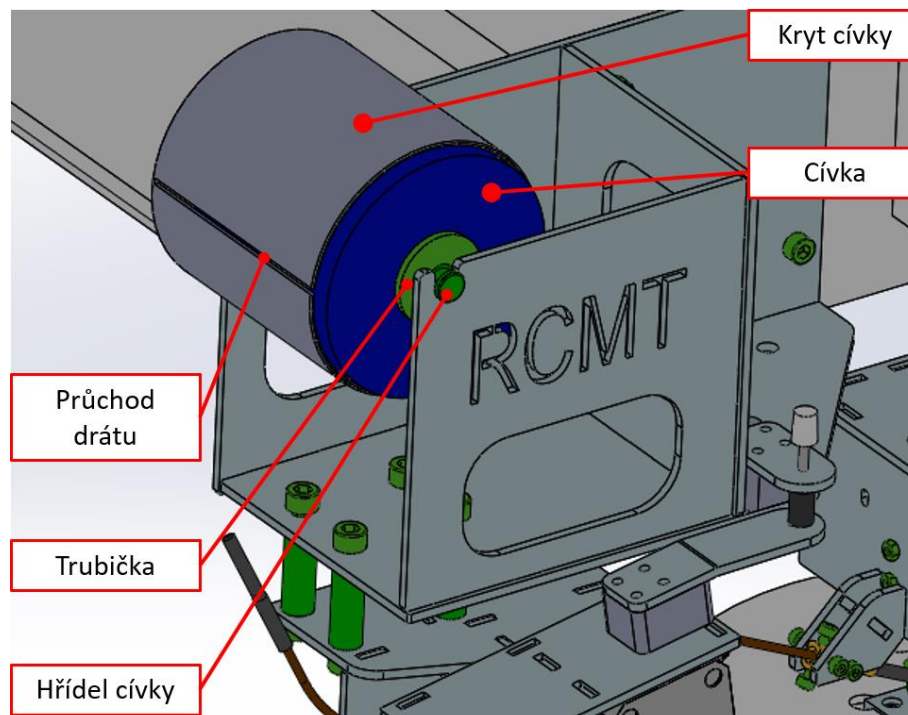
Tabulka 9: Chemické složení Ti-6Al-4V [88]

Slitina Ti-6Al-4V je dobře svařitelná, lze ji tvářet za tepla i za studena, kdy se chová podobně jako austenitická nerezová ocel. Díky svým vlastnostem se slitina používá zejména v odvětvích jako je letecký, zdravotní anebo chemický průmysl. [87] [88]

Přídavný materiál

Přídavný materiál ve formě drátu byl dodán německou společností Quada V+F Laserschweißdraht GmbH ve formátu cívky o hmotnosti 100 g s průměrem drátu 0,6 mm. Firemní označení zakoupeného drátu je QuTi5.

Vzhledem k tomu, že cívka byla jiných rozměrů než doposud používané cívky, bylo nutné provést drobné úpravy na podávacím zařízení. Úpravy spočívaly ve výrobě trubičky, která sloužila k vymezení vůle mezi cívkou a hřídelí, na které se cívka otáčí. Dále bylo vyrobeno pouzdro, které brání vymotání drátu při manipulaci s cívkou nebo při odvíjení drátu. V krytu cívky je také umístěn silica gel, čímž je drát chráněn vůči vlhkosti. Pouzdro má v sobě podélný otvor, kudy je provlečen odvíjený drát viz Obr. 55. Tyto díly byly vytisknuty na 3D tiskárně z materiálu PETG.



Obr. 55: Kryt cívky na podavači drátu

Základní materiál

Pro prvotní testy a ověření funkčnosti zařízení byly použity kvádry z Ti-6Al-4V o rozměrech 50 x 18 x 8 mm. Pro navařování 3D struktur byly použity titanové destičky o rozměru 50 x 50 x 6 mm. Všechny podkladové vzorky měly povrch upravený frézováním.

4.2. Realizace navařovací komory

4.2.1. Volba vhodné varianty

Systémy lokální ochrany návaru jsou složitá zařízení na vývoj, konstrukci i výrobu. Vzhledem ke koncepci stávajícího zařízení, zejména pak k umístění kladečí hlavy, by byl návrh lokálního systému ochrany dost obtížný. Muselo by dojít k přepracování celého systému přívodu drátu a osa Z by byla hmotností všech komponent nadměrně zatížena.

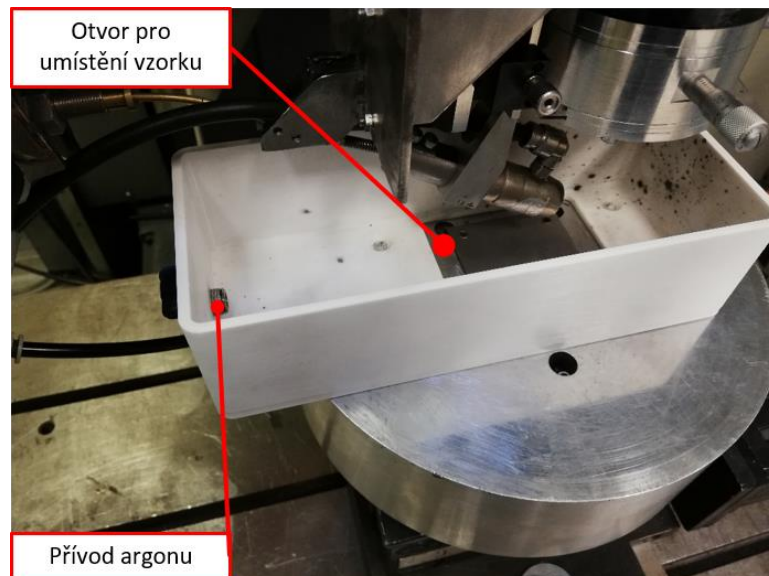
Utěsnit pracovní prostor laserového stroje a využít ho jako ochrannou komoru není vhodné z důvodu značně vysoké spotřeby argonu pro zaplnění komory v poměru k velikosti navařované součásti. Případná cena navařovaného dílce by tak byla značně vysoká. Uzavřená komora by musela být tak velká, aby obsáhla celé navařovací zařízení. Takové zařízení by ale bylo nákladné na výrobu a výrobní cena dílce opět vysoká díky množství spotřebovaného argonu pro plnění komory. Druhou možností je ochranný box uzavřít víkem, které zajistí volný posuv laserové a kladečí hlavy v pracovním prostoru. To lze nejspíše vyřešit použitím poklopu z poddajného materiálu, jako je například zobrazeno na Obr. 45. Nicméně v takovém případě by mohla být komora vyrobena z poddajného materiálu celá.

Jako optimální řešení se tedy jeví možnosti uzavřené komory z poddajného materiálu anebo otevřené komory využívající hustoty argonu. Návrhy ochranných komor a vyhotovené testovací návary jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

4.2.2. Nízká otevřená komora

Po vzoru odborných publikací bylo rozhodnuto o návrhu prvního prototypu otevřené komory. Aby byl objem přiváděného plynu co nejmenší a zároveň nemuselo dojít k přestavbě navařovacího zařízení, byla navrhována nízká komora o venkovních rozměrech 190 x 80 x 50 mm (D x Š x V). Komora byla vytisknuta na 3D tiskárně a po přišroubování plastové rychloupínací spojky pro přívod plynu umístěna na navařovací přípravek (Obr. 56). Ve dně komory je umístěn otvor 70 x 70 mm pro umístění podkladové destičky do přípravku pro navařování.

Následně bylo v komoře provedeno 27 návarů na třech podkladových substrátech. Vzorky s označenými návary jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tabulka 10, Tabulka 11, Tabulka 12). Během navařování byl měněn způsob přívodu argonu, parametry plnění komory, a rychlosti posuvu za účelem dosažení co nejkvalitnějšího vzhledu návaru.



Obr. 56: Nízká otevřená komora

Návary z nízké komory	
č.n.	Vzorek V001
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

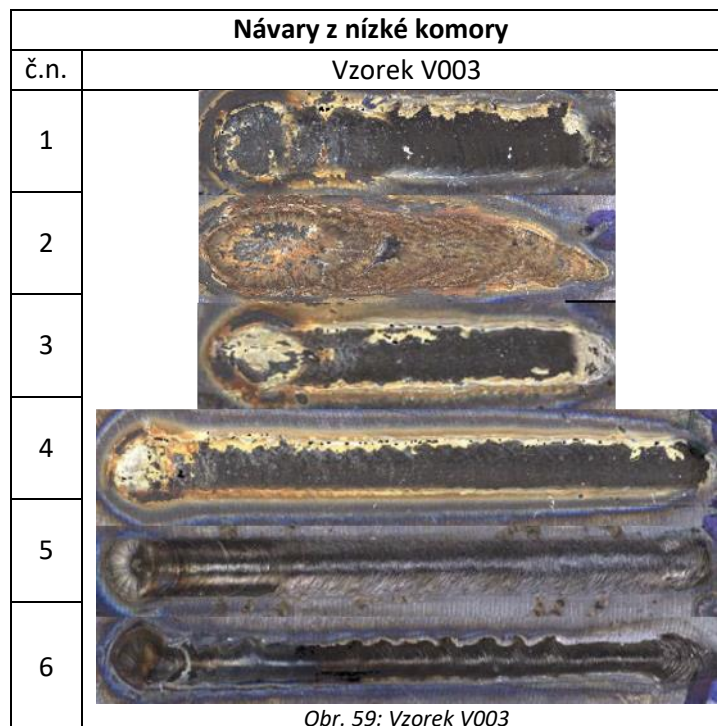
Obr. 57: Vzorek V001

Tabulka 10: Návary z nízké komory – V001

Návary z nízké komory	
č.n.	Vzorek V002
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Obr. 58: Vzorek V002

Tabulka 11: Návary z nízké komory – V002



Tabulka 12: Návary z nízké komory – V003

Při navařování první housenky byl argon přiváděn z boku komory po dobu 30 sekund pod tlakem 1 bar (průtok přibližně 27 l/min). Poté byl za stálého přívodu plynu vytvořen návar dlouhý 10 mm rychlostí 300 mm/min. Došlo ale k neúplnému upálení drátu, který musel být odstříhnut kleštěmi. To bylo vyřešeno zvětšením vzdálenosti vyjetí laserové hlavy v ose Z na 1,5 mm a přidání posunu ve směru navařování v ose X o 0,5 mm po navaření návaru. Po této změně byl druhý návar navařen korektně. Jeho povrch ale nepřipomínal vzhled správně provedených titanových návarů. U třetího a čtvrtého návaru byla mírně změněna rychlost, což ale nevedlo k jakékoliv změně. U zbylých návarů byly kromě parametrů měněny způsoby přívodu argonu, a to boční přívod do komory, přívod navařovací hubicí přímo na návar anebo jejich kombinace. U devátého návaru byla navíc zvýšena rychlost vyjetí laserové hlavy na 600 mm/min při upalování drátu, čímž byl eliminován „kráter“, který se vyskytoval u všech předchozích housenek.

Na vzorku V002 byly dále testovány možnosti plnění komory a jejich vliv na kvalitu návaru. První dvě housenky byly navařeny s bočním plněním komory. Třetí návar byl navařován bez vypláchnutí komory argonem, plyn byl dodáván pouze během navařování. Výsledný povrch je stejný, jako u všech předchozích návarů. U návaru 4 byl drát špatně nastaven do místa fokusu paprsku. Během navařování housenek 5 a 6 byl plyn přiváděn do boku komory a zároveň do místa návaru. Pro porovnání účinnosti poskytované atmosféry byl návar 7 proveden bez přívodu argonu během navařování. Z detailu je patrné zhoršení kvality oproti stávajícím návarům. Návary 8 a 9 byly provedeny pouze s přívodem argonu do místa návaru.



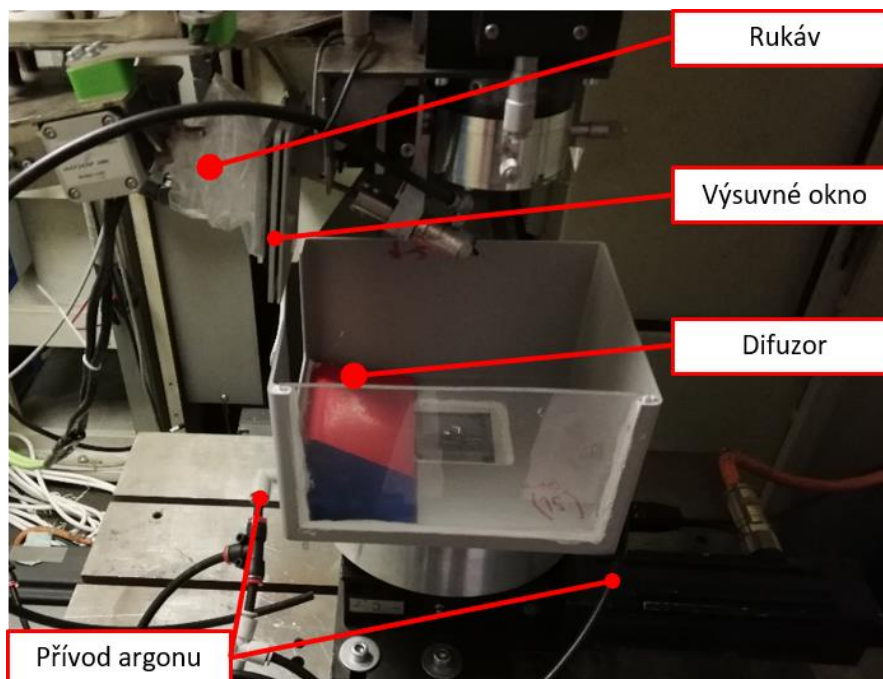
První návar na vzorku V003 byl proveden při tlaku 5 bar. Aby bylo zjištěno, jaký vliv má přítomnost kyslíku v ochranné atmosféře, byl návar 2 navařen při vyplachování komory kyslíkem a argonem zároveň. Výsledný návar byl značně nevzhledný a výrazně rozlitý po substrátu. Další housenky byly provedeny při plnění argonem bokem i do místa návaru. Návary 3 a 4 jsou totožné, pouze s rozdílem, že je čtvrtý návar prodloužen. Významná změna nastala až při utěsnění pracovního prostoru mezi komorou a laserovou a kladecí hlavou pomocí PVC fólie. Návar číslo 5 vykazuje stříbrný povrch, což svědčí o kvalitním složení ochranné atmosféry uvnitř komory. Šestý návar byl navařen s kratší dobou vyplachování komory. Výsledkem je zbarvení návaru na jeho konci. To svědčí o nárůstu kyslíku v atmosféře.

Těmito testy bylo zjištěno, že nekvalitní návary vznikaly díky nedostatečné ochranné atmosféře. Předchozí změny jakýchkoliv parametrů za účelem zlepšení kvality návaru neměly tedy smysl. Nízká komora poskytuje ochrannou atmosféru s vysokým obsahem kyslíku, ke zlepšení nedochází ani při umístění více přívodů plynu do komory nebo přívodu argonu do místa návaru.

4.2.3. Vysoká otevřená komora

Hlavní konstrukční změnou oproti prvnímu návrhu komory je zvýšení stěn komory z 50 na 118 mm, kdy se předpokládá, že zvýšení stěn pomůže udržet argon lépe v komoře. Dno komory bylo zvětšeno na 195 x 205 mm tak, aby se v něm mohlo zařízení pohybovat a zároveň bylo možné zařízení vyrobit na 3D tiskárně. Přívod argonu je řešen opět z boku, tentokrát ale na dvou místech ve stěnách proti sobě. Přední stěna komory je tvořena plexisklem tak, aby bylo možné sledovat proces navařování. Plexisklo je zasunuto do drážek v komoře a utěsněno silikonovým tmelem.

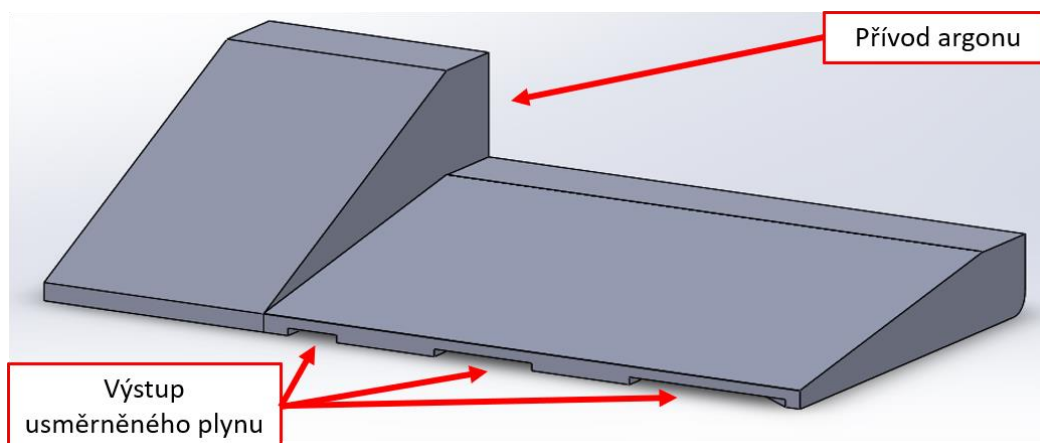
V tuto chvíli ale není možné v komoře navařovat, protože komponenty kladecí hlavy a podavače drátu jsou v kolizi s vysokou stěnou komory. Z toho důvodu je do připraveného otvoru ve stěně zasunuto okno s přilepeným rukávem z fólie. Na druhé straně je rukáv přilepen k podavači drátu. Rukávem prochází bowden, kterým je přiváděn drát do kladecí hlavy. Toto řešení je patrné z Obr. 60. Takto se může zařízení pohybovat v osách X a Y a obsáhnout tak pracovní prostor potřebný pro navařování na podkladové destičce o rozměrech 50 x 50 mm. Před začátkem navařování je nutné najet v ose Z nad navařovací přípravek tak, aby okénko správně zapadlo do výřezu. Je potřeba koordinovat posuv osy a zároveň rukou navést okno na své místo. Po skončení navařování hlava vyjíždí v ose Z a okénko je vysunuto z výřezu v komoře. Tím je zajištěn pohodlný přístup k navařovanému vzorku a případný servisní zásah na laserové či kladecí hlavě.



Obr. 60: Vysoká otevřená komora s výsuvným okénkem

Další drobnou konstrukční změnou, tentokrát na navařovacím zařízení, bylo zvednutí napínacího mechanismu podavače drátu. Při pohybu zařízení by mechanismus narážel do bočnice komory. Pod plechy mechanismu byly přidány distanční bloky vysoké 20 mm (na Obr. 60 jde o komponenty zelené barvy).

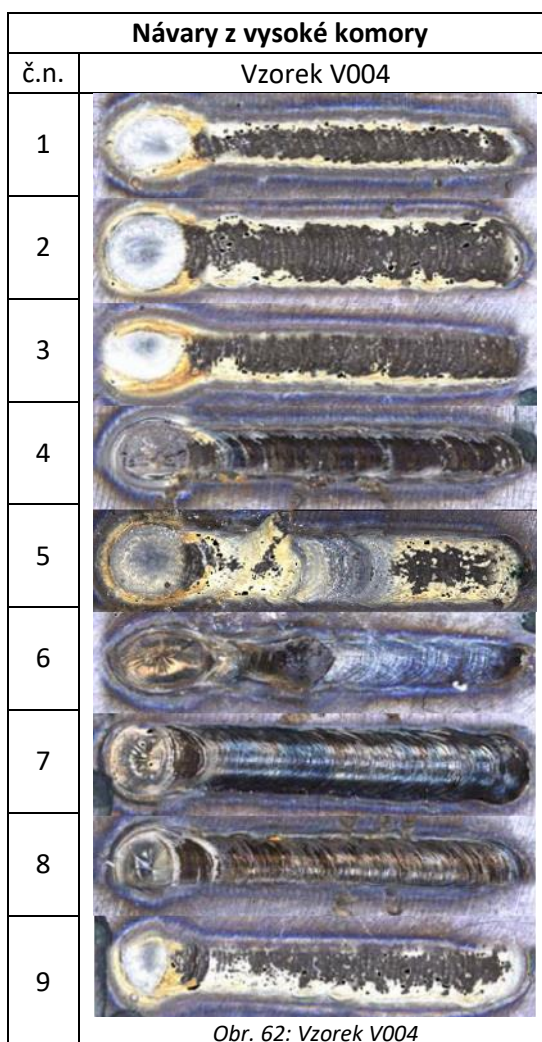
Zhotovené návary jsou zobrazeny v tabulce níže (Tabulka 13). První tři návary byly vytvořeny pouze při bočním plnění komory argonem (bez difuzoru). Při prvním návare byla doba plnění 60 sekund pod tlakem 1 bar, při druhém 300 sekund taktéž pod tlakem 1 bar a při třetím návare 60 sekund pod tlakem 2 bary. Návar číslo 4 byl navařen při plnění komory z boku a zároveň z vývodu v navařovací hubici po dobu 60 sekund při tlaku 2 bar. U tohoto návare lze pozorovat změnu zabarvení, což svědčí o eliminaci koncentrace kyslíku v atmosféře.



Obr. 61: Model difuzoru

Aby se koncentrace kyslíku ještě snížila, byl do komory před navařením páté housenky umístěn difuzor (Obr. 61) pro usměrnění a zpomalení proudu přiváděného argonu. Argon je přiváděn otvorem ve stěně komory. Difuzor je ke stěně přilepen tak, aby přiváděný argon proudil přímo do dutiny v difuzoru (otvor v zadní stěně vyvýšené části). V difuzoru je argon usměrněn třemi výstupy, z nichž argon vystupuje do prostoru navařovací komory.

Do komory byl přiváděn plyn levým difuzorem, pravým přívodem (bez difuzoru) a navařovací hubicí. Po vyplachování po dobu 60 sekund pod tlakem 2 barů došlo k navaření návaru číslo 7 (pátý i šestý návar byly navařovány stejnými parametry jako návar 7, ale drát nebyl nastaven ve fokusu paprsku). Sedmý návar vykazuje modro-stříbrno-slámovou barvu.



Tabulka 13: Návary z vysoké komory – V004

Usměrnění argonu pomocí difuzoru značně zlepšilo poskytovanou ochrannou atmosféru. Difuzor byl přidán i na pravou stranu. Plnění komory trvalo 200 sekund při tlaku přiváděného plynu 2 bary. Výsledkem je návar 8 se stříbrno-slámovou barvou. Před navařením devátého návaru byl odstraněn přívod do navařovací hubice. Komora

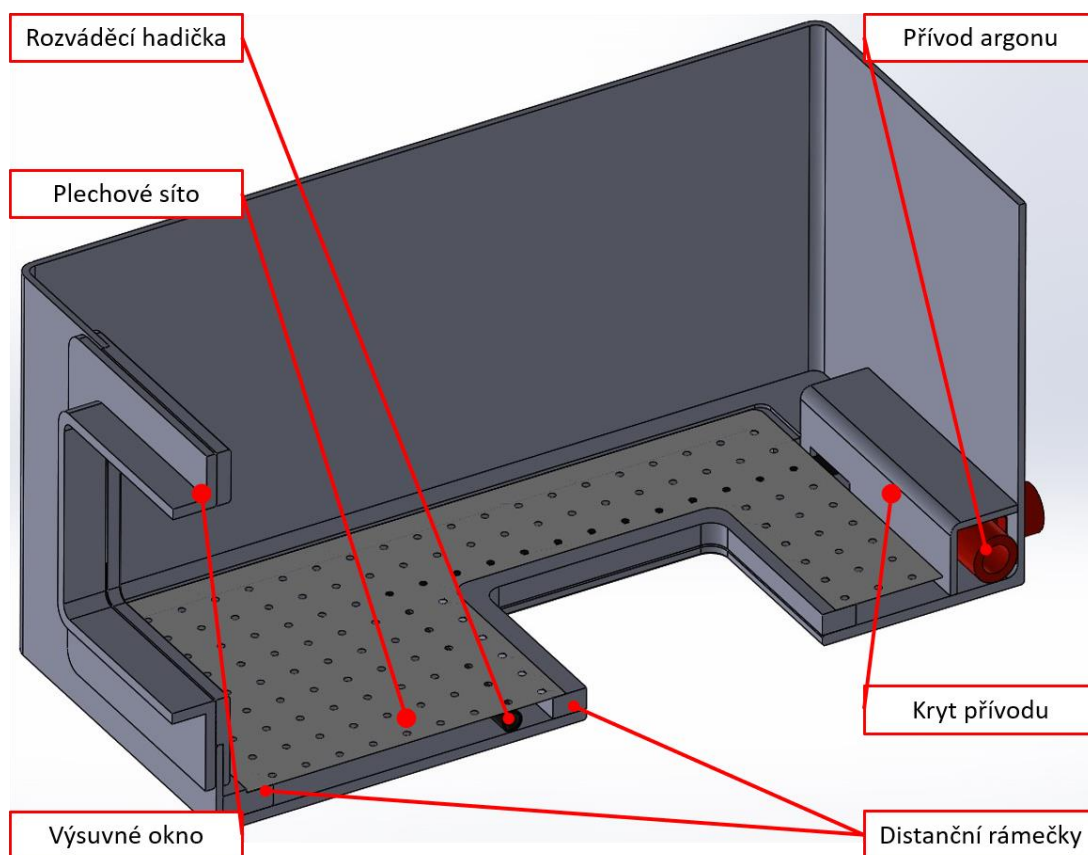
byla plněna pouze levým a pravým difuzorem. Opět vzniká návar s velmi zoxidovaným povrchem.

Z těchto testů je patrné, že významný vliv na funkci otevřené ochranné komory má přívod asistenčního plynu. Při přívodu plynu otvorem ve stěně komory je zřejmě proudění argonu turbulentní a strhává do sebe okolní molekuly kyslíku. Dalším krokem v praktické části práce bylo přepracování přívodu plynu do komory.

4.2.4. Vysoká otevřená komora s rovnoměrným přívodem argonu

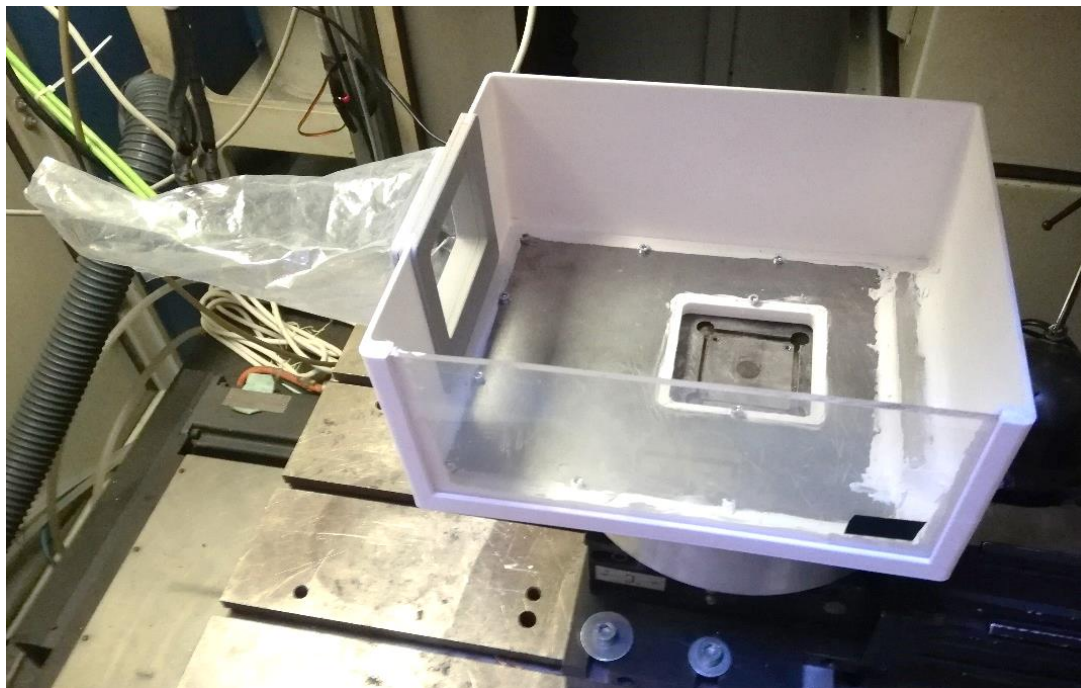
Třetí prototyp komory vycházel z předchozí komory. Změnou zde bylo falešné dno, ve kterém byla umístěna děrovaná hadička, která rozváděla argon po komoře. Falešné dno bylo zakryto ocelovým sítom s velmi malými otvory, skrz které byl protlačován plyn. Malé díry by měly co nejvíce usměrnit proudění argonu. Na Obr. 63 je zobrazen model komory v řezu. Síto bylo vloženo do komory, přišroubováno k jejímu dnu a spáry byly utěsněny silikonem.

Ocelové síto bylo vyrobeno na Ústavu výrobních strojů a zařízení na laserech JK 701H a LD50s. Z plechu o síle 0,5 mm byl vyříznut polotovar pro přípravu síta. Polotovar byl následně umístěn na pracovní stůl pevnolátkového značícího laseru LD50s, který do plechu vytvořil rastr děr o průměru 60 μm s roztečemi 3 x 3 mm.



Obr. 63: Model komory s rovnoměrným přívodem plynu v řezu

Na Obr. 64 je komora umístěna na navařovacím přípravku. Okénko s rukávem, kudy prochází bowden s navařovacím drátem, je použito z předchozí komory. V tabulce níže jsou zobrazeny jednotlivé návary vzniklé v ochranné atmosféře poskytnuté touto komorou.



Obr. 64: Otevřená komora s rovnoměrným přívodem argonu

Před navařením byla komora plněna po dobu 60 vteřin argonem při tlaku 2 bary. Posuvová rychlost byla snížena na 150 mm/min. Výsledný návar jeví známky oxidace návaru. Druhý návar byl navařován stejnými parametry, pouze s vyšším plnicím tlakem 3 bary. Vzniklá housenka vykazuje lepší, avšak stále nedostatečný povrch. Při zvýšení plnicího tlaku na 4 bar již v komoře vzniká velké víření, které negativně ovlivnilo povrch třetího návaru. Při dalších pokusech byly testovány kombinace doby a tlaku plnění a způsobu přívodu argonu (skrz síto a kombinaci skrze síto a z navařovací hubice). Nejlepšího výsledku (šestý návar) bylo dosaženo při vyplachování komory plynem o tlaku 3 bary po dobu 200 sekund.

Poskytovaná atmosféra je stále nedostatečná, ačkoliv myšlenka s usměrněním argonu průchodem malými štěrbinami se zakládá na skutečných zařízeních zejména pro ruční svařování metodou TIG (Obr. 46). Přívod argonu by musel být dále optimalizován, což by mohlo být časově náročné. Z toho důvodu bylo přistoupeno k vytvoření prototypu uzavřené komory z poddajného materiálu.

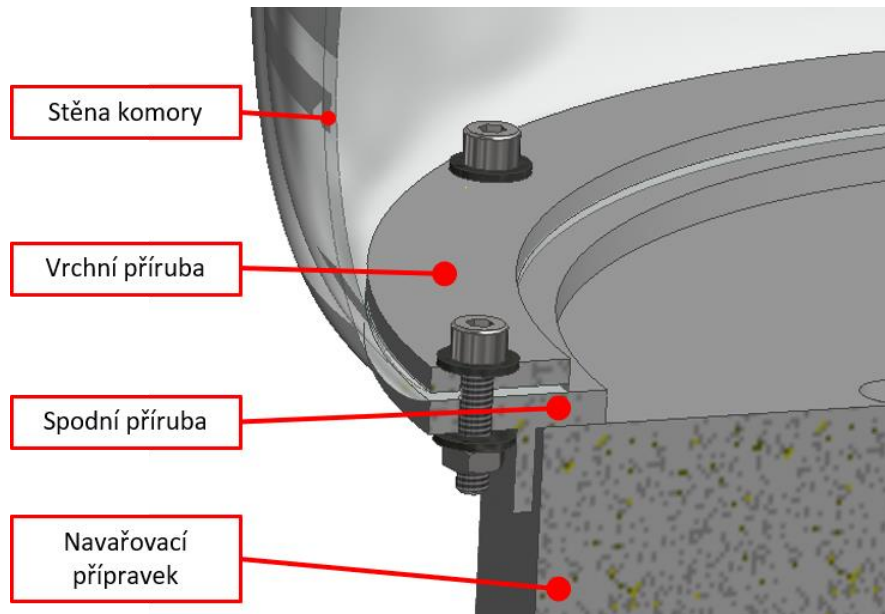
Návary z vysoké komory s vylepšeným přívodem plynu	
č.n.	Vzorek V005
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Obr. 65: Vzorek V005

Tabulka 14: Návary z vysoké komory s rovnoměrným přívodem plynu – V005

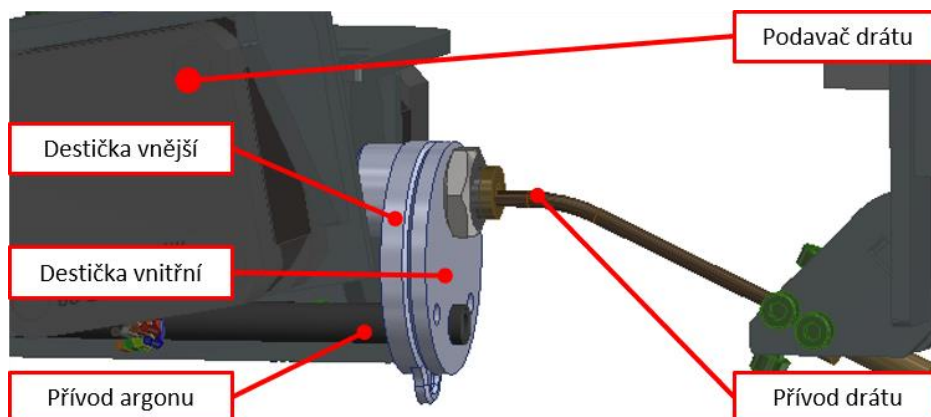
4.2.5. Uzavřená komora z poddajného materiálu

Stěny komory jsou tvořeny PVC folií. Fólie je na vrchní straně komory sevřena mezi laserovou hlavou a plastovou deskou. Po přišroubování kladecí hlavy čtveřicí zápusťných šroubů k laserové hlavě, dojde k sevření komory (Obr. 68). Spodní strana komory je tvořena dvěma plastovými přírubami, mezi kterými je fólie provléknuta. Příruby jsou sešroubovány osmi šrouby s matkami. Spodní příruba komory je osazena tak, aby lícovala s vůlí s navařovacím přípravkem (detail viz Obr. 66). Příruba je na navařovací přípravek pouze volně posazena, není k němu jakkoliv připevněna. S poddajnou komorou je tedy pro navařování možné využít i rotační osu C, což by v případě otevřené komory, která je pevně s přípravkem spojena, nebylo možné.



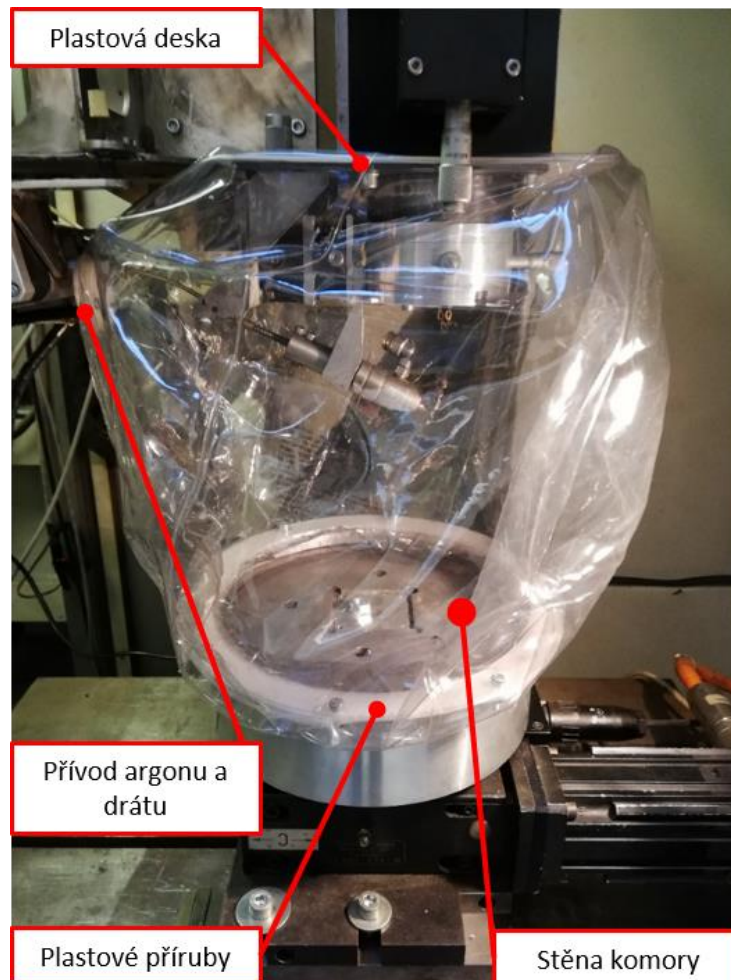
Obr. 66: Detail příruby umístěné na navařovacím přípravku

Plyn je společně drátem přiváděn skrze dvě plastové destičky s dírami (Obr. 67). Destičky jsou sešroubovány a slepeny tak, že je mezi nimi sevřena PVC fólie. Destička z vnější strany komory je připevněna maticí k vyústění z podavače drátu.



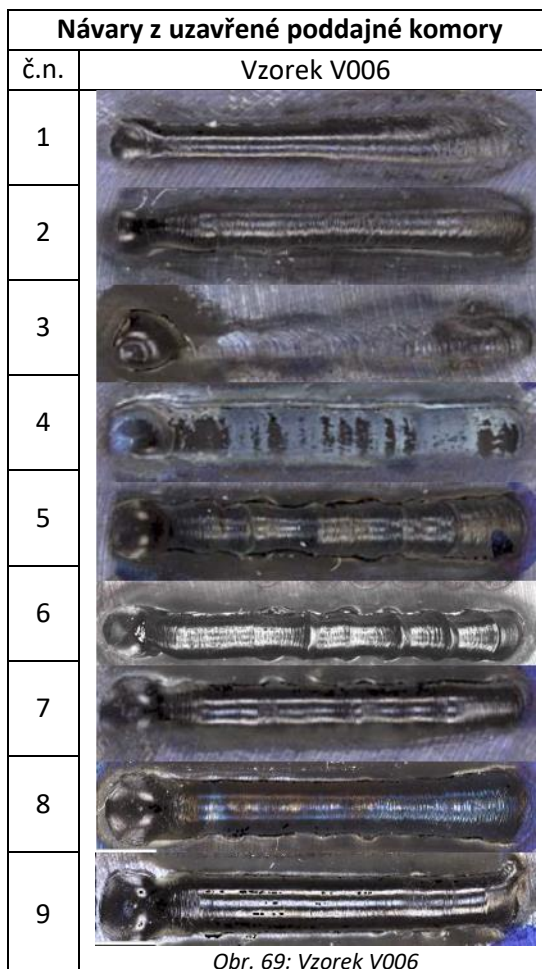
Obr. 67: Detail přívodu navařovacího plynu a drát

Tyto komponenty tvoří celou navařovací komoru. Komora je zobrazena na Obr. 68. Nevýhodou komory z PVC fólie je její obtížná implementace do navařovacího zařízení, kdy je nejprve nutné odmontovat polohovadlo z laserové hlavy a celý mechanismus kladeč hlavy. Poté je nasunuta PVC fólie s plastovou deskou na tubus laserové hlavy. Nasunutím a přišroubováním kladeč hlavy je komora pevně spojena s laserovou hlavou. Dále je otvor pro přívod drátu nasunut na závitové vyústění z podavače drátu a dotáhnout maticí M8. Během celé montáže je nutné dávat pozor, aby trubička pro přívod drátu byla zasunuta v ústí bowdenu v kladeč hlavy.



Obr. 68: Uzavřená komora z poddajné PVC fólie

Po sestavení a montáži komory mohlo být započato testování ochranné atmosféry. Bylo zhotoveno celkem 9 testovacích návarů (Tabulka 15), kdy hned první návar vykazoval kvalitní, stříbrný povrch odpovídající výsledkům z odborných článků. Komora byla před navařováním proplachována argonem o tlaku 5 barů po dobu 60 vteřin. Ze snímku prvního návaru je patrné, že návar má kapkovitý tvar, což je pro vytváření struktur nevhodné. To bylo způsobeno špatně nastavenou fokusační hladinou. Další návary byly vytvářeny za účelem správného zaostření laserového svazku na drát a podkladový materiál. Zároveň byly měněny parametry plnění komory za účelem snížení spotřeby argonu během testování.



Tabulka 15: Návary zhotovené v uzavřené poddajné komoře – V006

Druhý a třetí návar byly navařeny se stejnými parametry jako návar první, pouze byla změněna fokusace paprsku. Ani jeden z návarů nebyl vyhovující. U čtvrté, respektive páté housenky byl čas plnění snížen na 15, respektive 30 sekund při tlaku 1 bar. Zbarvený povlak i tvar návarů svědčí o nesprávném nastavení parametrů. Návary 6 a 7 byly vytvořeny po plnění komory po dobu 60 sekund při tlaku 1 bar. Ochranná atmosféra je při takovém nastavení již dostatečná, ale povrch návarů je zvlněný. Návar 9 byl vytvořen po vyplachování komory po 30 sekund při tlaku 2 bary, což se projevilo jako nedostatečné. Z tvaru návaru lze ale usoudit, že paprsek i drát jsou správně nastaveny.

Poslední návar byl vytvořen při správném nastavení zaostření a již osvědčených plnicích parametrech 60 sekund a 1 bar. Výsledkem je stříbrný titanový návar s hladkým, nezvlněným povrchem.

Z provedených testů je zjištěno, že navržená uzavřená komora s poddajnými stěnami z PVC fólie poskytuje dostatečně kvalitní ochranu titanových návarů. Tlak přiváděného plynu do komory (kdy 1 bar je přibližně 27 l/min) odpovídá hodnotám průtoků používaných v experimentech výzkumníků zmíněných v této práci. Při testech



bylo také zjištěno, že významný vliv na geometrii návarů má správné nastavení fokusu laserového paprsku vůči podkladovému materiálu a drátu. Paprsek musí být zaostřen na špičku drátu, která se dotýká podkladové destičky. V jiném případě vznikají na návaru hrboly, nebo jiné defekty viz návar 4 v tabulce výše (Tabulka 15).

4.3. Optimalizace navařovacích parametrů

Během testování ochranných komor se ukázalo, že nastavené laserové parametry jsou vyhovující a není třeba je dále optimalizovat. Optimalizována byla doba plnění komory a rychlost navařování, respektive rychlost strojních os.

4.3.1. Optimalizace doby vyplachování komory

Pro efektivní navařování je vhodné správně stanovit dobu vyplachování komory argonem. Pokud by byla doba plnění krátká, výsledkem bude zoxidovaný návar. Pokud bude čas plnění naopak moc dlouhý, argon bude zbytečně spotřebováván. Argon je přiváděn do komory před započítáním navařování (vyplachování komory) i během navařování. Důležité je také zmínit, že tlak je nastavován manuálně na redukčním ventilu tlakové lahve. Není tedy možné v průběhu navařování průtok měnit (například nastavit různý tlak při plnění komory a při navařování). V tabulce níže (Tabulka 16) jsou zobrazeny návary vytvořené a odpovídající době plnění komory při daném tlaku.

Optimalizace doby vyplachování komory			
č.n.	Tlak plnění – 1 bar	Tlak plnění – 2 bar	Doba plnění
1			10 s
2			20 s
3			30 s
4			40 s
5			50 s
6			60 s
7			70 s
8			80 s
9			90 s

Obr. 70: Vzorek V010

Obr. 71: Vzorek V011

Tabulka 16: Optimalizace doby vyplachování komory – V010, V011




Doba vyplachování byla zkoumána na dvou vzorcích označených jako vzorky V010 a V011, kdy na vzorku V010 jsou provedeny návary při tlaku plnění 1 bar, na vzorku V011 při tlaku 2 bar. Předpokladem je, že při vyšším tlaku plnění bude potřebný čas pro vyplachování komory nižší, což je vhodné pro testování krátkých návarů s častým otevíráním komory. Naopak při navařování struktur je vzhledem k spotřebě vhodné komoru plnit a dále navařovat při tlaku 1 bar. Všechny návary byly navařeny rychlostí 300 mm/min.

Z vytvořených návarů na vzorku V010 při tlaku plnění 1 bar je patrné, že minimální čas potřebný pro zaplnění komory argonem je 80 sekund. Při vyplachování komory tlakem 2 bary (vzorek V011) je potřeba přivádět argon před začátkem navařování pouze po dobu 50 sekund. Ze zbarvení jednotlivých housenek je vidět, jaký vliv má přítomnost kyslíku v ochranné atmosféře na kvalitu návaru.

4.3.2. Optimalizace posuvové rychlosti

Posledním krokem procesu optimalizace, bylo zkoumání vlivu posuvové rychlosti na vzhled a tvar návaru. Výsledný tvar návaru a jeho případné deformace mají totiž zásadní vliv na skladbu housenek při navařování struktur. Z předchozích pokusů navařování konstrukční a nerezové oceli je známá posuvová rychlost 300 mm/min. Tato hodnota byla vybrána jako střední rychlost, od které jsou odstupňovány další rychlosti s krokem 30 mm/min. Minimální rychlost byla stanovena na 150 mm/min, maximální na 450 mm/min. Ostatní laserové a navařovací parametry zůstaly neměnné.

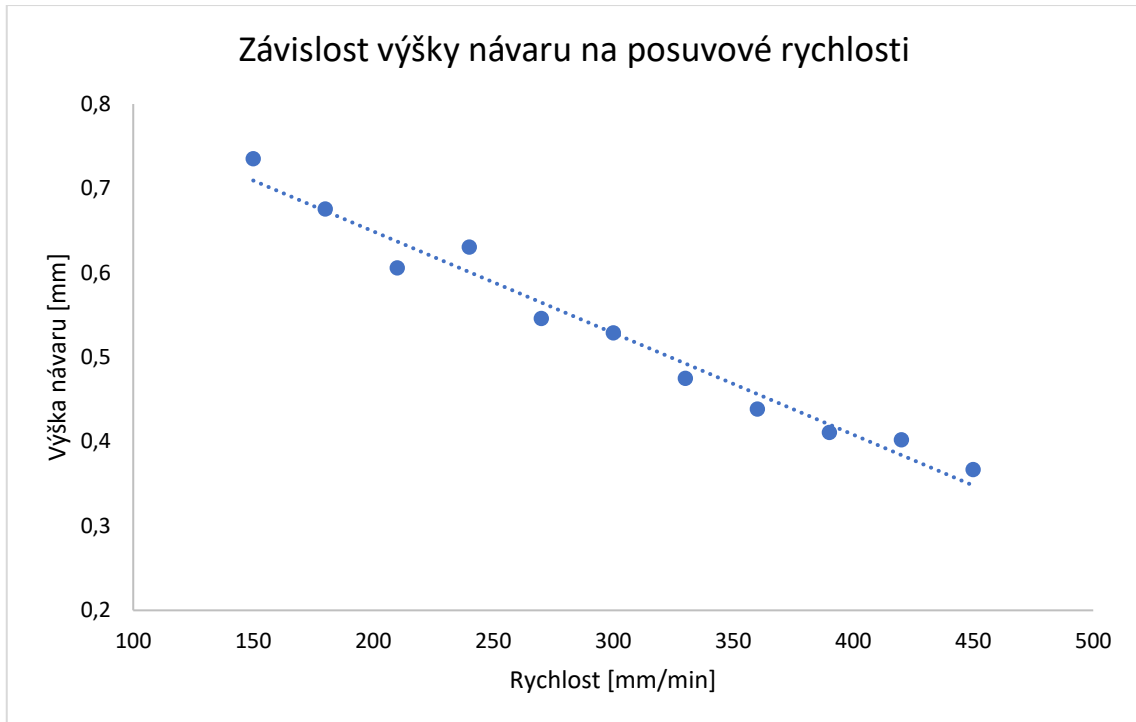
Po navaření byly jednotlivé návary nasnímány na zařízení Alicona, kde byl vyhodnocen profil návaru v podélném řezu a v příčném řezu středem návaru. V příčných řezech byly zároveň odečteny hodnoty výšky a šířky návarů. Celkem bylo vytvořeno 11 návarů, které jsou zobrazeny v tabulce níže s naměřenými hodnotami šířky a výšky návarů (Tabulka 17). Tabulka 18 zobrazuje profily jednotlivých návarů. Snímky podélných řezů nejsou v poměru stran 1:1 (poměr stran se pohybuje okolo 1:8).

Optimalizace posuvové rychlosti				
č.n.	Vzorek V012	Rychlost [mm/min]	Výška návaru [mm]	Šířka návaru [mm]
1		150	0,74	2,20
2		180	0,68	2,20
3		210	0,61	1,84
4		240	0,63	1,84
5		270	0,55	1,88
6		300	0,53	1,94
7		330	0,51	1,92
8		360	0,44	1,96
9		390	0,41	1,97
10		420	0,40	1,94
11		450	0,37	1,86

Obr. 72: Vzorek V012

Tabulka 17: Optimalizace posuvové rychlosti – V012

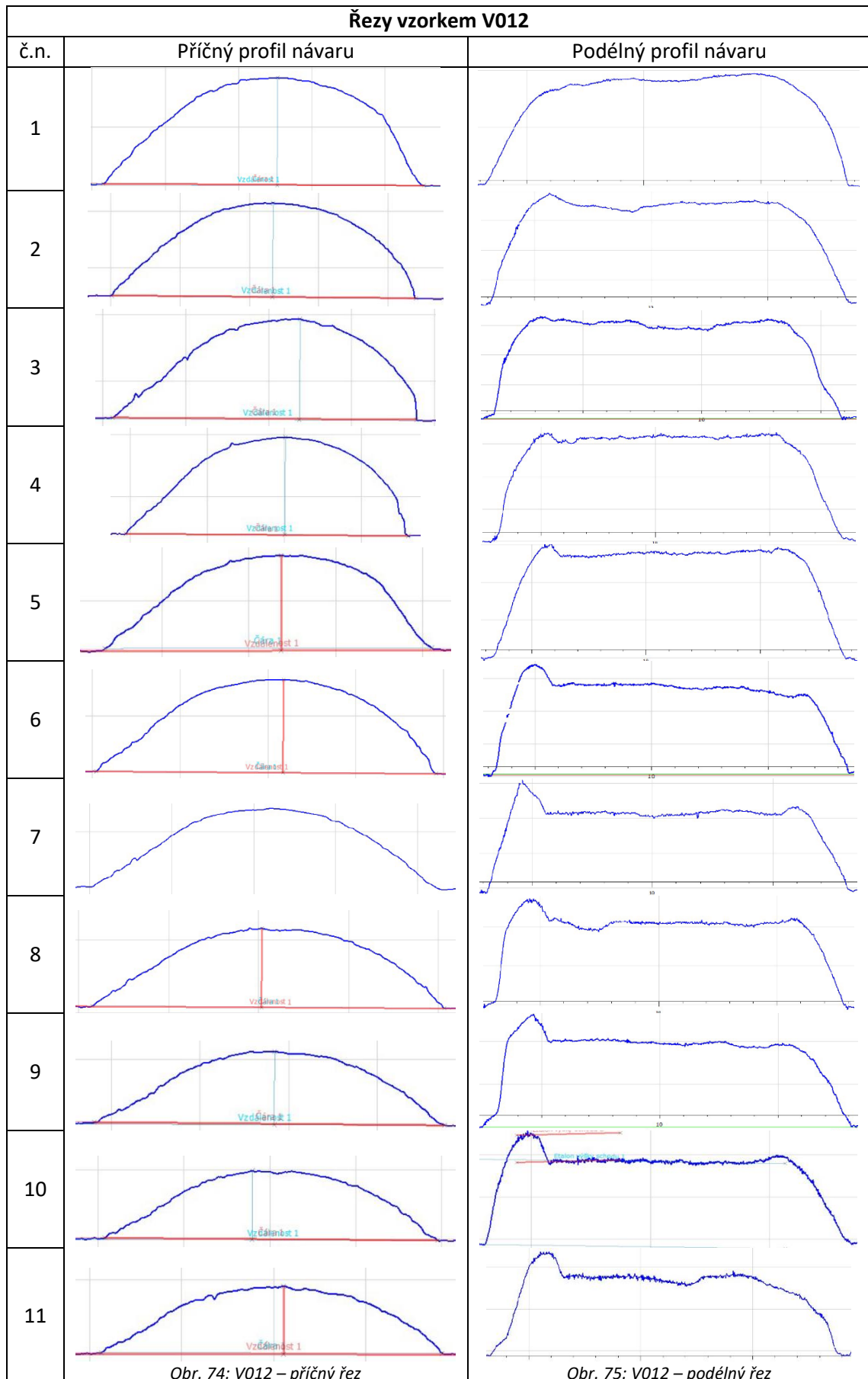
Z naměřených hodnot lze pozorovat, že mezi rychlostmi posuvu a výškou návarů je lineární závislost. Se zvětšující se posuvovou rychlostí výška návaru klesá. Tato závislost je zobrazena na Obr. 73. Naproti tomu mezi rychlostí a šířkou žádná závislost není. Pouze lze prohlásit, že při rychlostech do 180 mm/min se šířka navařené housenky pohybuje nad hodnotou 2 mm. Při rychlostech vyšších jak 210 mm/min šířka osciluje mezi 1,97 mm a 1,84 mm.



Obr. 73: Závislost výšky návaru na posuvové rychlosti

Z provedených příčných řezů v tabulce níže (Tabulka 18) je vidět, že při rychlostech do 240 mm/min jsou návary tvarově nesymetrické k jedné straně. Pro vytváření struktur by bylo vhodné navařovat symetrické návary, kdy symetrie nastává až od rychlosti 330 mm/min. Z podélných řezů můžeme pozorovat, že do rychlosti 240 mm/min mají návary konstantní výšku. U rychlosti 270 mm/min se na konci návaru objevuje hrbolek, který vzniká upálením drátu při vyjíždění laserové hlavy. S rostoucí rychlostí se tento hrbolek zvyrazňuje. Tato deformace by mohla způsobit špatné ukládání jednotlivých návarů na sebe, nebo by mohlo dojít i ke kolizi navařovací trysky s materiálem. Současně je důležité, že s rostoucí rychlostí se návar zplošťuje.

Z hlediska symetrie návaru se jako optimální rychlosti jeví všechny od 330 mm/min. Z hlediska deformace návaru jsou vhodné rychlosti do 240 mm/min. Jako optimální varianta je tedy zvolena rychlost 270 mm/min, kdy je nesymetrie návaru minimální a na jeho konci vzniká pouze malý hrbol.



Obr. 74: V012 – příčný řez

Obr. 75: V012 – podélný řez

Tabulka 18: Příčné a podélné profily jednotlivých návarů

4.4. Experimenty tvorby 3D liniových struktur

Původním záměrem bylo otestování vlivu geometrických parametrů (roztečí návarů v osách Y a Z) na kvalitu navařené struktury u celkem devíti vzorků. Experimenty navařování struktur byly započaty v době zhoršující se situace s nemocí COVID-19. Vzhledem k tomu, že byl omezen přístup do laboratoří nebylo možné provést experiment v potřebném rozsahu. Nakonec byly navařeny pouze dvě 3D struktury, u kterých byl proveden metalografický výbrus s následnou analýzou kvality navaření. Během navařování došlo navíc k poruše navařovacího zařízení, kterou nebylo možné v dostatečně krátké době odstranit, což znemožnilo další kroky optimalizace.

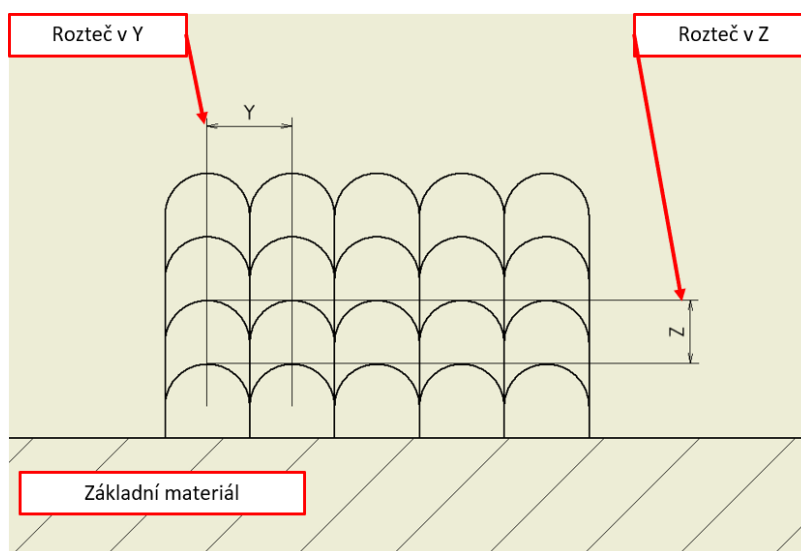
4.4.1. Postup navařování

Z optimalizace navařovacích parametrů jsou známy technologické parametry pro tvorbu 3D liniových struktur. Optimální navařovací parametry jsou zobrazeny v tabulce níže (Tabulka 19). Do programu pro tvorbu struktur byla přidána pauza mezi jednotlivými návary. Pauza byla přidána, aby došlo k ochlazení vznikající struktury. Pokud není teplo z procesu dostatečně odváděno, dochází k deformaci základního materiálu, což má následně negativní vliv na kvalitu navařované struktury.

Optimalizované navařovací parametry pro navařování struktur							
Pauza podavače [μs]	Rychlost posuvu [mm/min]	Výška vyjetí v Z [mm]	Délka vyjetí v X [mm]	Tlak/doba plnění [bar/s]	Rozteč v ose Y [mm]	Rozteč v ose Z [mm]	Pauza mezi návary [s]
10	270	1,5	0,5	1/80	0,95	0,55	5

Tabulka 19: Optimalizované parametry pro navařování z drátu Ti-6Al-4V

Jednotlivé návary na sebe byly kladeny dle Obr. 76, tedy přímo na sebe s pevně danými roztečmi. V ose Y bylo kladeno 5 návarů, v ose Z návary 4. Housenky byly navařeny v horizontálních vrstvách, vždy v jednom směru (zleva doprava).



Obr. 76: Schématické znázornění 3D titanové struktury



4.4.2. NC program

```
Navary.mpf
%_N_Navary_MPF
; $PATH=/_N_MPF_DIR
; Navary
N0000 G90
N0010 G55
N0015 SOFT
N0020 G0 X0 Y0 Z10 F600
N0030 ; Parametry
N0040 R11=30
N0045 R12=15
N0050 R2=20
N0055 R13=5
N0060 R3=1.5
N0070 R9=0.3
N0080 R4=0.8
N0090 R5=10
N0100 R6=0.6
N0110 R8=5
N0120 R10=((R5-1)*R4)
N0130 N0020 G91 ; Program
N0140 G1 X=(R2/2) Y=(R10/2) F600
N0145 G1 Z0
N0150 G64
N0160 M33
N0170 M66 G4 F=R11
N0180 R1=0
N0190 R7=0
N0200 ; Opakovani
N0210 AAA:
N0220 R1=R1+1
N0230 T13
N0240 G1 X=-R2 F300
N0250 T4
N0260 G1 X=-R9 Z=R3
N0270 T2
N0280 G1 X=R2+R9 F600
N0290 G1 Y=-R4
N0300 G1 Z=-R3
N0305 G4 F=R13
N0310 IF R1<R5 GOTOB AAA ; Podminka
N0320 BBB:
N0330 R7=R7+1
N0340 G1 Z=R3+R6
N0350 G1 Y=R5*R4
N0360 G1 Z=-R3
N0370 R1=0
N0380 IF R7<R8 GOTOB AAA ; Podminka
N0390 G4 F=R12
N0400 M30
```

Tabulka 20: Program „Navary.mpf“



V rámci diplomové práce bylo vytvořeno vícero NC programů, které byly vytvořeny ručním programováním v poznámkovém bloku pomocí parametrického programování v ISO kódu. Takto vytvořené programy byly následně nahrány do řídicího systému stroje. Pro názornost je uveden a popsán program „Navary.mpf“, který obsahuje programovací funkce a cykly potřebné pro automatické navařování 3D struktur. Zobrazen je v tabulce (Tabulka 20).

Tento program slouží k vytváření 3D liniových struktur. Liniové struktury je možné vrstvit na sebe, čímž vzniká libovolně vysoký (s respektováním průměru drátu) titanový kvádr. V programu je definováno několik parametrů R. Parametr R2 určuje délku návaru (délku navařené struktury) v ose X. Parametr R4 udává rozteč mezi jednotlivými housenkami v ose Y, R5 definuje celkový počet návarů v ose Y. Rozteč návarů v ose Z je dán parametrem R6 a počet návarů určuje parametr R8. Změnou výše uvedených parametrů je možné měnit velikost navařovaného kvádru. Parametry R3 a R9 určují délku a výšku vyjetí laserové hlavy v osách Z a X. R11 a R12 definuje dobu plnění komory argonem před začátkem navařování a po jeho dokončení. Parametr R13 určuje délku pauzy mezi jednotlivými návary. Příkaz SOFT zajišťuje plynulý pohyb stroje mezi jednotlivými bloky posuvů.

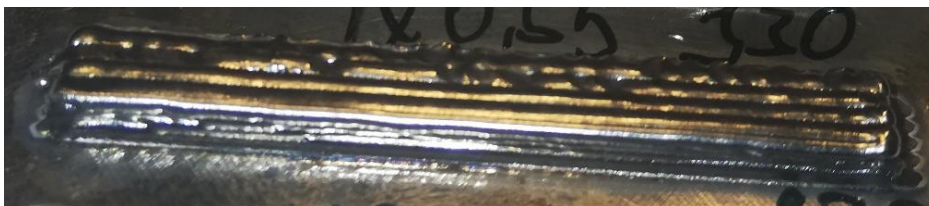
Po spuštění programu strojní osy najedou rychlostí 600 mm/min 10 mm nad střed souřadného systému. Ten je definován ve středu vyfrézované kapsy navařovacího přípravku v osách X a Y, v ose Z na horní ploše titanového substrátu. Poté strojní osy interpolují na souřadnice X a Y, kde se nachází začátek prvního návaru. Souřadnice jsou vypočteny z definovaných parametrů na řádku N0140 (souřadný systém se vždy nachází ve středu půdorysu navařovaného objektu). Po sjetí kladecí hlavy o 10 mm na pracovní výšku je aktivováno buzení laseru a puštěn přívod argonu. Po uplynutí pauzy definované parametrem R11 program přechází do fáze cyklu AAA. Pro správnou funkci cyklů je nutné před jejich spuštěním vynulovat parametry R1 a R7 (řádky N0180 a N0190).

Na řádku N0310 je uvedena podmínka. Řádek N0220 představuje „čítač cyklů“. Pokud je počet cyklů nižší, než počet požadovaných návarů v ose Y, laserový program je zacyklen. Stejně jako v předchozím programu je příkazem T13 přiveden laserový paprsek do pracovního prostoru a spuštěno podávání drátu. Křížový stůl se pohybuje rychlostí 300 mm/min v záporném směru osy X o hodnotu parametru R2. Následně dochází k vypnutí posuvu drátu příkazem T4, vyjetí kladecí hlavy v osách X a Z a přerušení laserového paprsku příkazem T2. Poté křížový stůl najíždí na místo dalšího návaru. Po uplynutí pauzy definované parametrem R13 program pokračuje. Cyklus AAA tedy vytváří liniové pole. Při splnění podmínky program postupuje do fáze cyklu BBB.

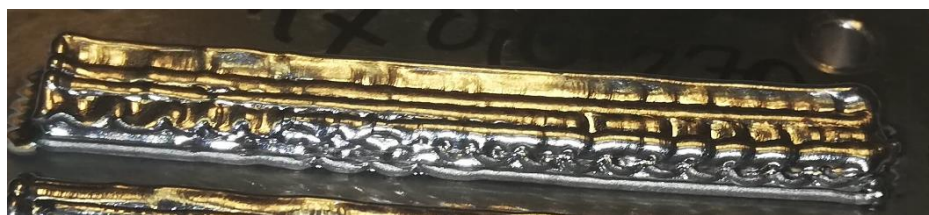
Stejně jako u cyklu AAA je na začátku cyklu BBB umístěn čítač cyklů. Laserová hlava se posune v ose Z o součet parametrů R3 a R6. V ose Y hlava přejíždí o násobek parametrů R5 a R4. Poté se hlava sjíždí o hodnotu R3 v záporném smyslu osy Z na novou pracovní výšku. Nyní je hlava na stejných souřadnicích X a Y jako tomu bylo na začátku cyklu AAA. Pouze je posunuta o rozteč housenek v ose Z. Čítač cyklů pro cyklus AAA je vynulován. Pokud není splněna podmínka na řádku N0380, tedy počet cyklů BBB je nižší, než požadovaný počet housenek v ose Z (parametr R8), je znovu vykonáván cyklus AAA. Díky tomuto zacyklení je možné navařovat liniové pole do výšky. Pokud je podmínka splněna, je komora proplachována argonem po dobu nastavenou parametrem R12 a posléze je funkcí M30 ukončen přívod plynu, vypnuto buzení laseru a je ukončen program.

4.4.3. Navařování 3D struktur

Celkem byly vytvořeny dvě 3D struktury. První z uvedených struktur byla vytvořena s nastavenými optimalizovanými parametry (Tabulka 19) s roztečí v ose Y 0,95 mm a s roztečí v ose Z 0,55 mm (Struktura 1). Výsledná struktura je zobrazena na Obr. 77. U druhé vytvořené struktury byly hodnoty roztečí posunuty o 0,05 mm v obou osách, v ose Y na 1 mm, v ose Z na 0,6 mm (Struktura 2). Výsledná struktura je zobrazena na Obr. 78. Celkový čas navařování jedné struktury byl 15 minut.



Obr. 77: Struktura 1–Y = 0,95 mm, Z = 0,55 mm



Obr. 78: Struktura 2–Y = 0,1 mm, Z = 0,6 mm

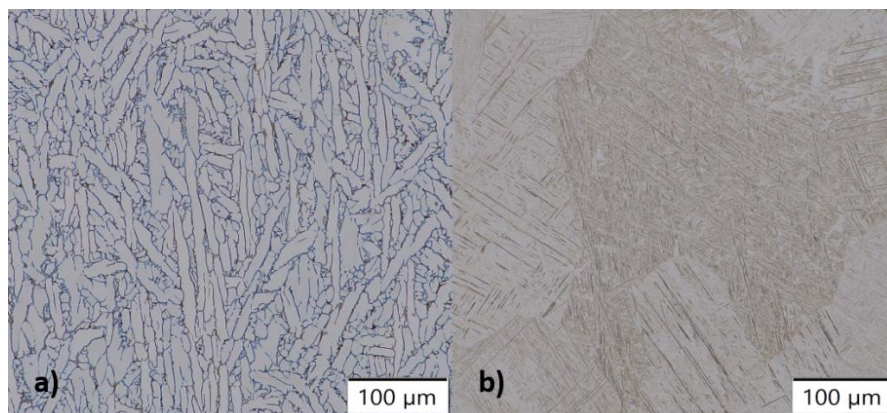
Oba vzorky vykazují stříbrný povrch, což svědčí o tom, že ochranná atmosféra je kvalitní a během vrstvení návarů atmosféra nijak nedegraduje. Povrch návarů je v obou případech nepravidelně zvlněný a místy není drát nataven.

4.4.4. Metalografie návarů

Metalografická studie byla provedena u obou 3D titanových struktur. Metalografie byla také provedena na vzorku V012, na kterém byla provedena optimalizace posuvové rychlosti. Řezy byly prováděny vždy ve směru kolmém na dráhu

laseru. Provedení metalografických výbrusů a vyhodnocení proběhlo na Ústavu materiálového inženýrství na ČVUT v Praze.

Materiál Ti-6Al-4V je alfa-beta slitina titanu. Alfa a beta fáze jsou na Obr. 79 vlevo. Světlá místa odpovídají alfa fázím, oblasti do modra odpovídají fázím beta. Při navaření drátu ze slitiny Ti-6Al-4V je přídavný materiál roztaven a po jeho ochlazení dojde k zakalení návaru. Při zakalení přechází alfa-beta fáze do martenzitické struktury. Na Obr. 79 vpravo jsou zobrazeny jemné martenzitické jehlice zakaleného přídavného materiálu. Pakliže dojde ke správnému provaření návaru, martenzitická struktura přechází i do základního materiálu. Martenzitická struktura v základním materiálu pak vymezuje oblast provaření kořene návaru.



Obr. 79: Metalografie – Základní materiál (a), martenzitická struktura (b)

Metalografie návarů provedených při optimalizaci rychlosti

Vzorek V012 byl rozříznut tak, aby rovina řezu byla zhruba v polovině délky návarů. Snímky jednotlivých návarů jsou zobrazeny na Obr. 80, Obr. 81 a Obr. 82.



Obr. 80: Metalografie-V012, návary 1, 2, 3, 4

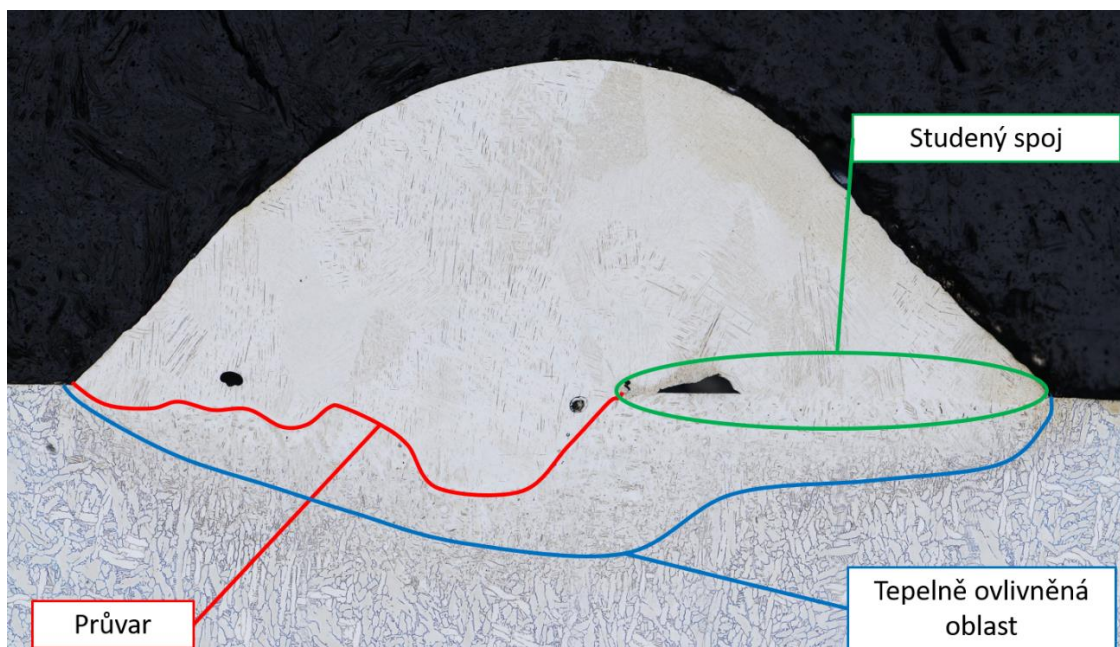


Obr. 81: Metalografie-V012, návary 5, 6, 7, 8

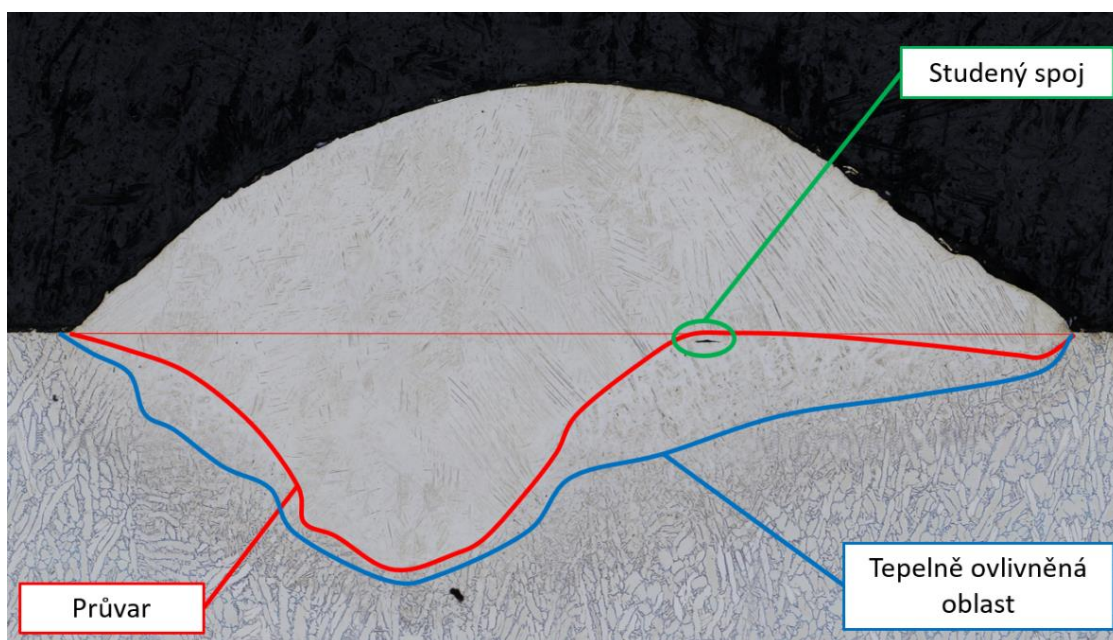


Obr. 82: Metalografie-V012, návary 9, 10, 11

Na Obr. 83 je zobrazen detailní snímek metalografického výbrusu návaru, který byl navařen zvolenou optimální rychlostí $v = 270$ mm/min. Zde je vidět malý průvar jdoucí z levého okraje návaru až zhruba do jeho středu. Mezi pravou částí návaru a základním materiálem je studený spoj. Pod celým návarem je viditelná tepelně ovlivněná oblast, která je výraznější v levé části návaru.



Obr. 83: Metalografie-V012, detail návaru pro $v = 270$ mm/min



Obr. 84: Metalografie-V012, detail návaru pro $v = 420$ mm/min







Na Obr. 84 je zobrazen detail návaru číslo 10, který byl navařen rychlostí 420 mm/min. Při vyšší rychlosti je kořen provařen více do hloubky, ale stále převládá výrazné provaření pouze na levé straně. V oblasti dobrého provaření je tepelně

ovlivněná oblast minimální, což odpovídá charakteristice navařování laserem. Zhruba uprostřed návaru vznikla trhlina v důsledku neprovaření.

Z uvedených metalografických snímků je patrné, že s rostoucí posuvovou rychlostí se zvětšuje i hloubka provaření. To je způsobeno tím, že s rostoucí posuvovou rychlostí je laserový paprsek blokován menším objemem taveniny. Paprsek je více absorbován základním materiálem a dochází tak k většímu provaření. Pro dosažení dostatečné hloubky provaření je nutné zvýšit výkon laseru, nebo zvýšit posuvovou rychlost. Důležitým poznatkem je skutečnost, že se průvar vždy nachází v levé části návaru, což svědčí o problému s intenzitou laserového svazku. Ani jeden z návarů není správně provařen.

Metalografie navařených 3D struktur

Obě navařené struktury byly hodnoceny ve třech rovinách, aby bylo zjištěno, zdali je struktura homogenní po celé její délce. Struktury byly rozděleny zhruba v první čtvrtině (segment S1), v polovině (segment S2) a ve třetí čtvrtině (segment S3) délky návaru. Výsledné makroskopické snímky řezů obou návarů jsou zobrazeny v tabulce (Tabulka 21). Modře a fialově zbarvená místa vznikly vzlínáním lihu z dutiny v návaru.

Makroskopické snímky metalografických výbrusů 3D struktur		
	Struktura 1	Struktura 2
S1		
S2		
S3		
	<i>Obr. 85: Struktura 1, Y = 0,95 mm, Z = 0,55 mm</i>	<i>Obr. 86: Struktura 2, Y = 1 mm, Z = 0,6 mm</i>

Tabulka 21: Makroskopické snímky metalografických výbrusů 3D struktur



Z provedené metalografické studie je patrné, že obě vytvořené titanové struktury jsou nekvalitně navařené. Na základě vyhotovených 3D struktur tedy nelze posoudit vliv geometrických parametrů na kvalitu návaru. U obou struktur lze pozorovat, že vždy první návar struktury (u Struktury 1 návar vlevo, u Struktury 2 návar vpravo) je částečně provařen se základním materiálem pouze na konci návaru. Počáteční část návaru není provařena vůbec. Následující návary, kladené v horizontálním směru od prvního návaru, nejsou prakticky vůbec provařené a nejsou tak pevně spojeny se základním materiálem. Pouze dochází k tepelnému ovlivnění oblasti pod návary v první vrstvě.

Při vrstvení housenek do výšky nedochází k homogennímu spojení jednotlivých návárů. Návary jsou místy vzájemně provařené, ale převládají studené spoje. Mezi jednotlivými návary se vyskytují dutiny po celé délce struktur. V 3D struktuře nejsou patrné žádné vměstky, což znamená, že mezi kladením jednotlivých návárů nemusí být zařazena operace čištění.

4.4.5. Výsledky metalografie a jejich diskuze

Metalografickou studií bylo zjištěno, že vytvořené návary jsou přes svůj dobrý vzhled nekvalitní s minimálním provařením do podkladového materiálu. Pro docílení dostatečné hloubky provaření by musel být navýšen výkon laseru, nebo zvýšena posuvová rychlost. Případně lze uvažovat o možnosti snížení rychlosti podávání drátu, čímž by byl zmenšen objem přiváděného materiálu a mohlo by tak dojít k lepšímu provaření. U všech použitých posuvových rychlostí bylo pozorováno, že provařený kořen je vždy na levé straně návaru. Tato skutečnost poukazuje na problém s intenzitou laserového paprsku. Z toho důvodu bylo provedeno rozebrání laserové hlavy. Následně bylo zjištěno silné znečištění optické trasy uvnitř hlavy a na konci laserového rezonátoru.

Při navařování titanu v uzavřené komoře vzniká dým, který není (a v uzavřené komoře nemůže být) odsáván. Stávající laserová hlava není kompletně utěsněna a dým s prachem skrze netěsnosti v hlavě pronikli až k výstupu z laserového rezonátoru. Prach se usadil na výstupní krycí sklo v rezonátoru a zrcadlo uvnitř hlavy. Tím byl značně omezen průchod laserového paprsku, což mělo za následek nesymetrii v intenzitě paprsku a snížení výkonu laseru.

U 3D struktur je omezený výkon laseru mnohem více znatelný. Vždy první návar struktury je se základním materiálem provařen pouze částečně. Další návary nejsou k základnímu materiálu prakticky vůbec přivařeny. Jednotlivé návary struktury jsou vzájemně spojeny pouze na některých místech, většinou se ve struktuře objevují studené spoje. Pozitivem je nepřítomnost vměstků ve struktuře, tudíž není nutné do procesu zařadit mezioperační čištění.



Některé návary, zvláště ve vyšších vrstvách, byly zvlněné nebo nenatavené. To bylo způsobeno nesprávným vedením drátu. Tryska, ze které přídavný materiál vstupuje pod laserový paprsek, byla opotřebovaná a drát se tak mohl nepatrně vychylovat z ohniska paprsku.

Před dalšími experimenty navařování titanového drátu je nejprve nutné utěsnit fokusační tubus vůči tělu laserové hlavy. Těsnění musí umožňovat posuvný pohyb fokusačního tubusu, kterým je zaostřován laserový paprsek do požadovaného místa. Velmi důležité je pravidelně kontrolovat čistotu optických komponent v hlavě a rezonátoru kvůli zvýšené prašnosti během navařovacího procesu. Dále musí být vyrobena nová tryska do kladečí hlavy, aby bylo eliminováno vychylování drátu z ohniska laseru. Poté je možné zopakovat experimenty navařování 3D struktur ve větším rozsahu tak, aby byl zjištěn vliv geometrických parametrů na kvalitu navaření.



5. Závěr

Diplomová práce je zejména orientována na navařování, kdy zdrojem tepla pro tavení materiálu je laserový paprsek. Jsou zde popsány principy a metody technologie, dostupná zařízení a materiály používané pro navařování laserem. V úvodu teoretické části jsou zmapovány i alternativní navařovací technologie, jako například technologie WAAM, EBAM nebo HVOF nástřiky. V kapitole navařování drátu ze slitiny Ti-6Al-4V je uveden popis výsledků z odborných publikací, které se zabývaly problematikou aditivní technologie s využitím titanového drátu jako přídavného materiálu. Na základě zjištěných informací z odborné literatury byla realizována vlastní praktická část diplomové práce.

V práci byla zvládnuta poměrně náročná technologie navařování a následná optimalizace procesních parametrů pro navařování drátu ze slitiny Ti-6Al-4V na základní substrát z téhož materiálu. Před experimentálním laděním procesních parametrů bylo nejprve nutné navrhnout, vyrobit a otestovat ochrannou komoru, která je pro navařování titanových slitin nezbytná. V práci jsou popsány celkem 4 vlastní prototypy ochranných komor. Provedením série testovacích návarů byla ověřena funkčnost jednotlivých komor, kdy se jako vhodná a funkční varianta projevila uzavřená komora z poddajného materiálu.

Po ověření funkčnosti ochranné komory bylo možno přistoupit k optimalizaci procesních parametrů. Byla zjišťována minimální doba, po kterou je nutné komoru vyplachovat při určitém průtoku argonu, než dojde k samotnému navařování titanu tak, aby výsledný návar byl kvalitní a nezoxidovaný. Testovacími návary bylo zjištěno, že pro tvorbu kvalitních návarů je nutné komoru vyplachovat argonem po dobu 80 sekund při tlaku 1 bar, nebo 50 sekund při tlaku 2 bary. Dále byl zkoumán vliv rychlosti navařování na geometrii jednotlivých návarů. Z provedených kvalitních testovacích návarů byla určena optimální posuvová rychlost strojních os 270 mm/min. Z výšky a šířky návaru vytvořeného optimální rychlostí byly určeny rozteče v osách Y a Z pro tvorbu 3D liniových struktur. Jako optimální hodnoty roztečí byly vybrány v ose Y 0,95 mm a v ose Z 0,55 mm.

Od těchto výchozích hodnot roztečí měly být určeny další hodnoty tak, aby bylo vytvořeno celkem 9 různých 3D struktur, u kterých by byl hodnocen vliv parametrů skladby na kvalitu navaření. Nicméně situace s COVID-19 společně s poruchou stroje omezili experiment pouze na navaření dvou 3D struktur. U struktur byla následně provedena metalografická studie a analýza kvality navaření.

Ačkoliv metalografická studia prokázala nekvalitní navaření jednotlivých návarů i obou 3D struktur, byly zjištěny cenné informace, které budou využity při dalších



experimentech. Při navařování vzniká dým, který není možné v uzavřené komoře odsávat. Pokud není procesní hlava řádně utěsněna, může dojít ke vniku prachových částic do optických cest laseru. Usazený prach na optických komponentech může způsobit jejich zahřívání a následnou destrukci. Zároveň usazeniny omezují průchod paprsku a snižují tak výstupní výkon laseru a jeho intenzitu. Pro kvalitní navařování a opakovatelnost výsledků je velmi důležité dbát na čistotu optických komponent laserového zařízení. Nutné je také dbát na dostatečnou čistotu argonu v ochranné atmosféře.

Na kvalitu návarů má značný vliv i správná poloha drátu vůči paprsku. Drát musí být co nejpřesněji veden tak, aby nedocházelo k jeho vyosení zpod laserového spotu. V opačném případě vzniká nekvalitní, porézní návar se zvlněným povrchem. Pokud je kmitání drátu příliš velké, může se v návaru objevit nenatavený drát. Důležité je kontrolovat výstupní trysku kladečí hlavy. Musí mít minimální vůli, jinak dochází k výraznému vyosení drátu zpod laserového paprsku. Při navařování z drátu, který je navinut na cívce je vhodné umísťovat před podavač rovnačku drátu. Tím lze eliminovat kmitání drátu na výstupu z kladečí hlavy.

Během optimalizace procesních parametrů bylo ověřeno, že paprsek musí být zaostřen na povrch drátu, a zároveň se musí drát v místě zaostření opírat o základní materiál. Hloubku průvaru kořene návaru lze zvětšit zvýšením výkonu laseru anebo zvýšením posuvové rychlosti strojních os. Jelikož se ukázalo, že posouzení kvality optickou kontrolou návaru je nedostatečné, je vhodné návary verifikovat pomocí metalografie.

Navařování titanu laserem je poměrně složitý proces, do kterého vstupuje velké množství vlivů a procesních parametrů. Pro správné odladění technologie navařování 3D struktur je nutné provést rozsáhlý experiment zabývající se vlivem procesních a geometrických parametrů na kvalitu struktury. K tomu pomohou zjištěné výsledky z této diplomové práce. Výsledky práce mohou být aplikovány i do jiných experimentů v ostatních řešitelských týmech na nejrůznějších navařovacích strojích.



Seznam použité literatury

- [1] Portál moderní fyziky: Přehled metod svařování [online]. [cit. 2020-04-20].
Dostupné z:
http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf
- [2] WAAMMat: Wire + Arc Additive Manufacturing [online]. [cit. 2020-04-20].
Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam>
- [3] MM Průmyslové spektrum: Navařování metodou WAAM [online]. [cit. 2020-04-20].
- [4] RODRIGUES, Tiago A., V. DUARTE, R.M. MIRANDA, Telmo G. SANTOS a J.P. OLIVEIRA. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials* [online]. 2019, 12(7) [cit. 2020-04-21]. DOI: 10.3390/ma12071121. ISSN 1996-1944. Dostupné z:
<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121>
- [5] 3D Printing Media Network: Wire Arc Additive Manufacturing [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/additive-manufacturing/am-technologies/waam-wire-arc-additive-manufacturing/>
- [6] GEFERTEC: 3DMP machines [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z:
<https://www.gefertec.de/en/3dmp-machines-en/>
- [7] ADDILAN: Addilan machine [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z:
<https://www.addilan.com/en/addilan-machine/>
- [8] Sciaky, Inc.: Metal Additive Manufacturing with EBAM® Technology [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>
- [9] Sciaky, Inc.: Wirefeed Additive Manufacturing vs. Powder Methods [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>
- [10] FUCHS, J., C. SCHNEIDER a N. ENZINGER. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World* [online]. 2018, 62(2), 267-275 [cit. 2020-04-21]. DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40194-017-0537-7>
- [11] Sciaky, Inc.: EB Welding Machines | Large Chamber Systems [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/eb-welding-systems/large-chamber-systems>



- [12] VERGARA, Victor, Jair CARLOS a Ana Sofia CLIMACO DOLIVEIR. Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process. SUDNIK, Wladislav, ed. Arc Welding [online]. InTech, 2011, 2011-12-16 [cit. 2020-04-21]. DOI: 10.5772/28802. ISBN 978-953-307-642-3. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/arc-welding/hardfacing-by-plasma-transferred-arc-process>
- [13] MM Průmyslové spektrum: Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html>
- [14] EWI - Developing, Testing, and Implementing Advanced Manufacturing: Cladding with Plasma Arc Welding (PAW) - EWI [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://ewi.org/cladding-with-plasma-arc-welding-paw/>
- [15] Deloro: PTA Welding Systems [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Product_Information/PTA_Welding_Systems_eng.pdf
- [16] KSK Česká Třebová: Plazmové navařovací automaty [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty>
- [17] A&A Thermal Spray Coatings & Industrial Finishing Services: 5 Types Of Thermal Spray Coating Processes You Should Know [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.thermalspray.com/5-types-of-thermal-spray-coating-processes-you-should-know/>
- [18] DAVIS, Joseph R. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-795-6.
- [19] Oerlikon Metco: High Velocity Oxygen (Liquid) Fuel Spray [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/hvof-liquid-fuel/>
- [20] GTV Verschleiss-Schutz GmbH [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.gtv-mbh.com/_old/gtv-mbh-englisch/www.gtv-mbh.de/cms/front_content.html
- [21] FST Global Thermal Spray company: eGun™ HVOF Spray System [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/systems/hvof-high-velocity-oxygen-fuel-thermal-spray/egun-hvof-spray-system/>



- [22] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. Laser Cladding. CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-2172-7.
- [23] ION, John. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 9780750660792.
- [24] GUPTA, Kapil. Materials Forming, Machining and Post Processing. Springer, 2019. ISBN 978-3-030-18854-2.
- [25] MRŇA, Libor. Navařování laserem laser cladding. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno [online]. [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_navarovani_laserem_mrna.pdf
- [26] GEDDA, Hand. Laser surface cladding a literature survey. 2000. ISSN 1402-1536.
- [27] Aerospace America: Making 3D-printed parts for Boeing 787s [online]. 2018 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: Making 3D-printed parts for Boeing 787s
- [28] DE OLIVEIRA, U., V. OCELÍK a J.Th.M. DE HOSSON. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. Surface and Coatings Technology [online]. 2005, 197(2-3), 127-136 [cit. 2019-11-06]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.06.029. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897204004803>
- [29] OH, Wook Jin, Jong Youn SON, Gyeong Yun BAEK a Do Sik SHIM. Excess deposition for suppressing interfacial defects induced on parts repaired using direct energy deposition. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2020, 106(3-4), 1303-1316 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.1007/s00170-019-04650-w. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-04650-w>
- [30] VILAR, R. Laser cladding. Journal of Laser Applications [online]. 1999, 11(2), 64-79 [cit. 2019-11-07]. DOI: 10.2351/1.521888. ISSN 1042-346X. Dostupné z: <http://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.521888>
- [31] VILAR, R. Laser Powder Deposition. Comprehensive Materials Processing [online]. Elsevier, 2014, 2014, , 163-216 [cit. 2019-11-07]. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01005-0. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321010050>



- [32] SINGH, Rupinger a J. PAULO DAVIM. Additive Manufacturing: Applications and Innovations. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 9781138050600.
- [33] NOWOTNY, Steffen, Frank BRUECKNER, Sebastian THIEME, Christoph LEYENS a Eckhard BEYER. High-performance laser cladding with combined energy sources. Journal of Laser Applications [online]. 2015, 27(S1) [cit. 2019-11-26]. DOI: 10.2351/1.4817455. ISSN 1042-346X. Dostupné z: <http://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.4817455>
- [34] Industrial Laser Solutions. Industrial Laser Solutions: Laser cladding with direct diode lasers [online]. Endeavor Business Media, LLC., 2009 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/surface-treatment/article/16488924/laser-cladding-with-direct-diode-lasers>
- [35] 3D Tech: Rapid Prototyping [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>
- [36] GE Additive: What is Additive manufacturing? [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [37] Norsk Titanium: Norsk Titanium [online]. 2018 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.norsktitanium.com/>
- [38] MORGADO, Teresa a Catarina VALENTE. Development status of LASER Cladding and the new metallic alloys [online]. 2018 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.20944/preprints201805.0417.v1. Dostupné z: <https://www.preprints.org/manuscript/201805.0417/v1>
- [39] IK4-TEKNIKER. IK4-TEKNIKER: Contributes with three technical presentations at Basque Industry 4.0. [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.tekniker.es/en/ik4-tekniker-contributes-with-three-technical-presentations-at-basque-industry-40>
- [40] IPG Photonics: Fiber Laser Sources & Solutions [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [41] Coherent: Industrial Lasers and Laser Solutions [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/>
- [42] UWLASER Welding: UWLASER Welding [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <http://en.uwlaser.com/>
- [43] LASERLINE: Laser Company for Industrial Laser Solutions [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/>



- [44] Precitec Group: Laser material processing, laser cutting, laser soldering, laser welding and optical measuring technology. [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/precitec-group-start-page/>
- [45] Precitec Group. Precitec Group: YC30, processing heads, joining technology, cladding head. [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yc30/>
- [46] Precitec Group. Precitec Group: YC52, processing heads, joining technology, cladding head [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yc52/>
- [47] KUKA AG.: Industrial intelligence 4.0_beyond automation [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/v%C3%BDrobn%C3%AD-linky/standardn%C3%AD-produkty-pro-automatizaci/laserov%C3%A9-optiky>
- [48] IPG Photonics Corporation [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-heads/cladding/ipgclad-d50>
- [49] Laser Mechanism, Inc.: FiberWELD [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.lasermech.com/fiberweld/>
- [50] IPG Photonics: Wire Feeder Module-Laser Welding Heads [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-heads/welding/wire-feeder-module>
- [51] Fraunhofer IWS: Powder nozzles for lateral feed [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/cyclone_powder_nozzle.html
- [52] Fraunhofer IWS: Modular powder nozzle system COAXn [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXn.html
- [53] Fraunhofer IPT: LMD-W-20-L [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.ipt.fraunhofer.de/en/Competencies/processstechnology/non-conventional-manufacturing-processes-and-technology-integration/welding-head-lmd-w-20-l.html>



- [54] Laser Mechanisms, Inc.: FiberWELD® DH [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.lasermech.com/fiberweldhdh/>
- [55] Fraunhofer IWS. Deutsch: Coaxial laser wire cladding head COAXwire [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXwire.html
- [56] Precitec Group: CoaxPrinter [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/coaxprinter/>
- [57] FST Global Thermal Spray company: Powder Feeders for Thermal Spray applications [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/systems/auxiliary-equipment/powder-feeders-for-thermal-spray-applications/>
- [58] Alabama Specialty Products, Inc: Wire Feeder - Alabama Laser [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.alspi.com/wirefeeder.htm>
- [59] ABICOR BINZEL: Wire Feeder System MasterLiner [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.binzel-abicor.com/AU/eng/products/robotic-systems/robot-periphery/wire-feeder-system-masterliner/>
- [60] TRUMPF: Systémy aditivní výroby [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/
- [61] ADDITIVE MANUFACTURING Machines by DMG MORI: Prášková tryska [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska>
- [62] MEPAC CZ s.r.o Laserové navařování, CNC obrábění, leštění, servis a oprava forem, broušení, frézování, laserové kalení: ACP 300 - COMPACT [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.mepac.cz/cz/lasery---prodej/navarovaci-lasery>
- [63] ALOtec Dresden: Laser cladding by wire [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.alotec.de/en/technology/laser-wire-deposit-welding/>
- [64] MIRANDA, R. M. et al. Rapid prototyping with high power fiber lasers. Materials and Design. Vědecká publikace: 2008.
- [65] BRANDL, E. et al. Deposition of Ti-6AL-4V using laser and wire. Surface and Coatings Technology. Vědecká publikace: 2011.



- [66] BRANDL, E. A. SCHOBERTH a C. LEYENS. Morphology, microstructure and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed Materials Scienzen and Engineering A. Vědecká publikace: 2011.
- [67] BAUFELD, B. E. BRANDL a O. VAN DER BIEST. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Journal of Materials Processing Technology. Vědecká publikace: 2011.
- [68] Wire-based Laser Metal Deposition (LMD-W) of Titanium Grade 5 [online]. 2018 [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-494402.html>
- [69] MOK, S. H. et al. Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire. Surface and Coatings Technology. Vědecká publikace: 2008.
- [70] AKERFELDT, P. M.L. ANTTI a R. PEDERSON. Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering. Vědecká publikace: 2016.
- [71] BRANDL, E. et al. Additive manufactured Ti-6AL-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and Physics Procedia. Vědecká publikace: 2010.
- [72] AKERFELDT, P. R. PEDERSON a M.L. ANTTI. A fractographic study exploring the relationship between the low cycle fatigue and metallurgical International Journal of Fatigue. Vědecká publikace: 2016.
- [73] BRANDL, E. C. LEYENS a F. PALM. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes. Trends in Aerospace Manufacturing. Vědecká publikace: 2009.
- [74] ETTEFAGH, A. H. et al. Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts and the. Additive Manufacturing. Vědecká publikace: 2019.
- [75] BERGMAN, J. P. Laserstrahlschweißen von Titanwerkstoffen unter. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Vědecká publikace: 2004.
- [76] LIN, J. J. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V walldeposited by pulsed plasma arc Materials and Design. Vědecká publikace: 2016.
- [77] BOXANOVÁ, Monika. Aditivní výroba polotovarů pulzní PTA metodou. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Ústav strojírenské technologie.



- [78] Argon Purge Box part 2 - YouTube. YouTube [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-uoxKZtqXrA>
- [79] Advanced Manufacturing Technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing, edited by Kapil Gupta, Springer, 2017. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=4851844>.
- [80] XIAOGAO, L. X. JIAN a Z. YIXIANG. Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet. Journal of Materials Science. Vědecká publikace: 2005
- [81] Alicona Release 5th Generation Optical micro-co-ordinate and surface finish measurement system. Gtma Manufacturing Resource Center [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.gtma.co.uk/alicon-release-5th-generation-optical-micro-co-ordinate-surface-finish-measurement-system/>
- [82] Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii. Portál moderní fyziky [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [83] METALOGRAFIE I. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [84] BRAJER, Jan. Laserové navařování kovových materiálů. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Ústav materiálového inženýrství.
- [85] Metalografický mikroskop ZEISS Neophot 32 – Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.. Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.ipm.cz/vybaveni/metalograficky-mikroskop-zeiss-neophot-32/>
- [86] Linde gas a.s.: Argon [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/gases_atmospheric/argon.htm
- [87] Supra Alloys: Titanium Grade Overview [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://www.supraalloys.com/titanium-grades.php>
- [88] INKOSAS: Niklové, titanové, měděné, mosazné polotovary a speciální slitiny [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-5.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip navařování metodou WAAM [4].....	12
Obr. 2: Navařený titanový dílec metodou WAAM [3]	13
Obr. 3: Gefertec arc603 [6]	14
Obr. 4: Addilan V0.1 [7]	14
Obr. 5: Princip EBAM [9]	15
Obr. 6: EBW 300 System [11].....	16
Obr. 7: Navařená součást technologií EBAM [11]	16
Obr. 8: Schéma metod PTA a PAW [12].....	16
Obr. 9: KSK PPC 250 GMR [16].....	17
Obr. 10: Navařená vrstva metodou PTA [16]	17
Obr. 11: HVOF nástřík [19].....	18
Obr. 12: GTV-K2 [20].....	19
Obr. 13: FST eGun [21].....	19
Obr. 14: Princip navařování [25].....	21
Obr. 15: Predepozice [22]	21
Obr. 16: Princip navařování z pasty [22].....	22
Obr. 17: Princip navařování z prášku s bočním přívodem [22].....	23
Obr. 18: Schéma koaxiální navařovací hlavy [29]	23
Obr. 19: Princip navařování z drátu s bočním přívodem [22].....	24
Obr. 20: Schématické znázornění koaxiální laserové hlavy pro přívod drátu [32]	25
Obr. 21: Rapid plasma deposition – součást Boeingu 787 navařená z Ti drátu [37].....	27
Obr. 22: Parametry pro laserové technologie [23].....	28
Obr. 23: Fraunhofer IWS, boční prášková tryska [51]	30
Obr. 24: Fraunhofer IWS, boční prášková tryska pro povlakování hřídelí [51]	30
Obr. 25: Precitec YC30 [45]	31
Obr. 26: Precitec YC52 [46]	31
Obr. 27: Kuka MWO-I [47]	31
Obr. 28: IPGClad D50 [48]	31
Obr. 29: Fraunhofer IWS, koaxiální modul COAX11 [51].....	32
Obr. 30: Fraunhofer IWS, univerzální tryska COAX8 (spolupráce s Laserline) [51]	32
Obr. 31: Lasermech FiberWELD [49].....	33
Obr. 32: Fraunhofer IPT, boční drátová hlava LMD-W-20-L [53].....	33
Obr. 33: Lasermech, koaxiální hlava FiberWELD DH [54]	34
Obr. 34: Fraunhofer IWS, koaxiální hlava COAXwire [55]	34
Obr. 35: Precitec CoaxPrinter [56]	34
Obr. 36: Princip dělení paprsku v hlavě CoaxPrinter [56].....	35
Obr. 37: FST-20 [57]	36



Obr. 38: Alabama Laser, podavač drátu [58]	36
Obr. 39: Zařízení Trumpf pro navařování z prášku [60]	37
Obr. 40: DMG MORI Lasertec 125 3D hybrid [61]	38
Obr. 41: Mepac ACP C [62]	39
Obr. 42: ALOtec, systém pro navařování z drátu [63]	39
Obr. 43: Navařovací pracoviště s ochrannou komorou [65]	40
Obr. 44: Lokální ochrana návaru [76]	41
Obr. 45: Uzavřená ochranná komora pro navařování titanu metodou PTA [77]	42
Obr. 46: Otevřená komora pro svařování titanu metodou TIG [78]	43
Obr. 47: Uzavřená komora z poddajného materiálu [79]	43
Obr. 48: Vrstvené návary z Ti-6Al-4V [66]	44
Obr. 49: Schéma orientace zkušebních tyčí [70]	45
Obr. 50: Laser GSI Lumonics	48
Obr. 51: Navařovací zařízení	49
Obr. 52: Alicona Infinite Focus G5	50
Obr. 53: Metalografická pila (a), metalografická bruska (b) [84]	51
Obr. 54: Metalografický mikroskop ZEISS Neophot 32 [85]	51
Obr. 55: Kryt cívky na podavači drátu	53
Obr. 56: Nízká otevřená komora	55
Obr. 57: Vzorek V001	55
Obr. 58: Vzorek V002	55
Obr. 59: Vzorek V003	56
Obr. 60: Vysoká otevřená komora s výsuvným okénkem	58
Obr. 61: Model difuzoru	58
Obr. 62: Vzorek V004	59
Obr. 63: Model komory s rovnoměrným přívodem plynu v řezu	60
Obr. 64: Otevřená komora s rovnoměrným přívodem argonu	61
Obr. 65: Vzorek V005	62
Obr. 66: Detail příruby umístěné na navařovacím přípravku	63
Obr. 67: Detail přívodu navařovacího plynu a drát	63
Obr. 68: Uzavřená komora z poddajné PVC fólie	64
Obr. 69: Vzorek V006	65
Obr. 70: Vzorek V010	66
Obr. 71: Vzorek V011	66
Obr. 72: Vzorek V012	68
Obr. 73: Závislost výšky návaru na posuvové rychlosti	69
Obr. 74: V012 – příčný řez	70
Obr. 75: V012 – podélný řez	70
Obr. 76: Schématické znázornění 3D titanové struktury	71



Obr. 77: Struktura 1– $Y = 0,95$ mm, $Z = 0,55$ mm	74
Obr. 78: Struktura 2– $Y = 0,1$ mm, $Z = 0,6$ mm	74
Obr. 79: Metalografie – Základní materiál (a), martenzitická struktura (b).....	75
Obr. 80: Metalografie-V012, návary 1, 2, 3, 4	75
Obr. 81: Metalografie-V012, návary 5, 6, 7, 8	75
Obr. 82: Metalografie-V012, návary 9, 10, 11	75
Obr. 83: Metalografie-V012, detail návaru pro $v = 270$ mm/min	76
Obr. 84: Metalografie-V012, detail návaru pro $v = 420$ mm/min	76
Obr. 85: Struktura 1, $Y = 0,95$ mm, $Z = 0,55$ mm	77
Obr. 86: Struktura 2, $Y = 1$ mm, $Z = 0,6$ mm	77



Seznam tabulek

Tabulka 1: Běžně užívané slitiny pro navařování [23]	26
Tabulka 2: Shrnutí dostupných laserových zdrojů [41] [42] [43] [44]	29
Tabulka 3: Technické parametry DMG MORI Lasertec 125 3D hybrid [61].....	38
Tabulka 4: Exp.parametry [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [74] [75]	41
Tabulka 5: Výchozí laserové parametry	47
Tabulka 6: Výchozí navařovací parametry	47
Tabulka 7: Technické parametry zařízení JK 701H.....	49
Tabulka 8: Složení argonu 4.8 a argonu 5.0 [86]	52
Tabulka 9: Chemické složení Ti-6Al-4V [88].....	52
Tabulka 10: Návary z nízké komory – V001	55
Tabulka 11: Návary z nízké komory – V002	55
Tabulka 12: Návary z nízké komory – V003	56
Tabulka 13: Návary z vysoké komory – V004	59
Tabulka 14: Návary z vysoké komory s rovnoměrným přívodem plynu – V005	62
Tabulka 15: Návary zhotovené v uzavřené poddajné komoře – V006.....	65
Tabulka 16: Optimalizace doby vyplachování komory – V010, V011.....	66
Tabulka 17: Optimalizace posuvové rychlosti – V012	68
Tabulka 18: Příčné a podélné profily jednotlivých návarů	70
Tabulka 19: Optimalizované parametry pro navařování z drátu Ti-6Al-4V	71
Tabulka 20: Program „Navary.mpf“	72
Tabulka 21: Makroskopické snímky metalografických výbrusů 3D struktur	77



Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha 1 Snímky CAD modelů navařovacích komor

Elektronické přílohy (uvedeny na CD)

DP_Jakub_Petrus.pdf – Diplomová práce

Petrus_CAD_modely.pdf – Snímky CAD modelů navařovacích komor