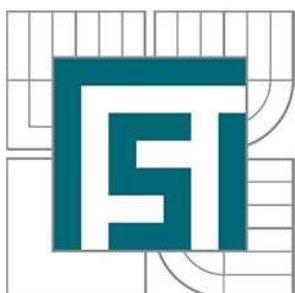


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM VLASTNOSTÍ VRSTVY UHLÍKATÉ OCELI NAVAŘENÉ VYSOKOVÝKONNÝM POLOVODIČOVÝM LASEREM

STUDY OF PROPERTIES OF LAYERS OF CARBON STEEL CLADDED BY HIGH-POWER
SEMICONDUCTOR LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR SEGEŤA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Segeřa

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Studium vlastností vrstvy uhlíkaté oceli navařené vysokovýkonným polovodičovým laserem

v anglickém jazyce:

Study of properties of layers of carbon steel cladded by high-power semiconductor laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie laserového navařování dokáže vytvářet tenké otěruvzdorné vrstvy. Cílem práce je studium laserem navařené vrstvy ocele s vysokým obsahem uhlíku při různých procesních parametrech.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se z technologií laserového navařování. Seznámení se s metodami mechanickými a metalografickými metodami vyhodnocování navařených vrstev.

Seznam odborné literatury:

1. ION C. J.: Laser processing of engineering materials. Elsevier, 2005

Němeček a kol.: Využití laseru v průmyslu, Tribun EU, ISBN 978-80-263-0359-6

3.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

4.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

SEGEŘA Petr: Studium vlastností vrstvy uhlíkaté oceli navařené vysokovýkonným polovodičovým laserem.

Diplomová práce se zabývá studiem vlastností laserem navařených vrstev. V teoretické části jsou popsány konvenční způsoby navařování, druhy a vlastnosti laserů a jejich aplikace v průmyslu. Dále je zde popsán způsob přípravy metalografických vzorků a jejich vyhodnocení, poté jsou uvedeny typy opotřebení. V experimentální části byly zhotoveny niklové návary pomocí diodového laseru. Na těchto návarech byla vyhodnocena struktura, zředění, EDS analýza a tvrdost s ohledem na vstupní parametry navařování.

Klíčová slova: laserové navařování, konvenční navařování, aplikace laserů, druhy laserů, parametry navařování

ABSTRACT

SEGEŘA Petr: Study of properties of layers of carbon steel cladde by high-power semiconductor laser.

The aim of my thesis is the analysis of properties of laser cladding. The theoretical part is focus on conventional methods of laser cladding, types and properties of lasers and its applications in industry. Then there is the description of preparing metallographic samples and its assessment, also there are types of wear enclosed. In the experimental part the nickel laser cladding were made by using semiconductor laser, in which the structure, the dilution, the EDS analysis and the hardness with respect to input parameters are assessed.

Keywords: laser cladding, conventional cladding, laser applications, types of lasers, parameters of cladding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEGEŘA, Petr. *Studium vlastností vrstvy uhlíkaté oceli navařené vysokovýkonným polovodičovým laserem*. Brno, 2014. 63s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne:

podpis:.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále panu Vojtěchu Říháčkovi za uskutečnění zkoušek tvrdosti. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

OBSAH**ZADÁNÍ****ABSTRAKT****BIBLIOGRAFICKÁ CITACE****ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ****PODĚKOVÁNÍ**

ÚVOD.....	- 11 -
1. ROZBOR PROBLÉMU.....	- 12 -
2. KONVENČNÍ TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ	- 13 -
2.1 Navařování plamenem	- 13 -
2.2 Navařování ruční obalenou elektrodou – ROE	- 14 -
2.2 Navařování v ochranných plynech MIG/MAG, WIG	- 14 -
2.3 Navařování pod tavidlem (SAW).....	- 15 -
2.4 Elektrostruskové navařování páskou (ESW).....	- 16 -
2.5 Elektrovibrační navařování	- 16 -
2.6 Elektrokontaktní navařování	- 16 -
2.7 Impulsní mikronavařování	- 16 -
2.8 Elektrojiskrové mikronavařování	- 17 -
2.9 Plazmové navařování	- 17 -
3. LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ	- 18 -
3.1 Princip	- 18 -
3.2 Procesy.....	- 19 -
3.2.1 Boční podávání drátu	- 19 -
3.2.2 Boční vstřikování prášku	- 19 -
3.2.3 Boční podávání pasty.....	- 20 -
3.2.5 Podávání prášku koaxiální tryskou	- 20 -
3.3 Přídavné materiály	- 21 -
3.4 Vlastnosti vrstvy navařené laserem	- 21 -
3.5 Rapid prototyping.....	- 22 -
4. LASER	- 23 -
4.1 Vlastnosti laserového záření	- 23 -
4.2 Druhy laserů	- 25 -
4.2.1 CO ₂ laser	- 25 -
4.2.2 Nd:YAG	- 26 -
4.2.3 Diskový laser	- 27 -
4.2.4 Vláknový laser	- 28 -
4.2.5 Diodový laser	- 29 -
5.2.6 Porovnání jednotlivých laserů	- 32 -
4.3 Průmyslové využití laserů	- 33 -
4.3.1 Vrtání	- 33 -
4.3.2 Řezání	- 34 -
4.3.3 Svařování	- 35 -
4.3.4 Značení, gravírování a mikroobrábění	- 37 -
4.3.5 Kalení	- 37 -
4.5.6 Navařování.....	- 38 -

5. VYHODNOCOVÁNÍ VLASTNOSTÍ NAVAŘENÝCH VRSTEV	- 39 -
5.1 Zkoušky tvrdosti	- 39 -
5.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	- 39 -
5.2 Metalografie	- 40 -
5.2.1 Postup přípravy vzorku	- 40 -
5.2.2 Energiově disperzní spektroskopie – EDS	- 41 -
5.3 Zkoušky opotřebení	- 41 -
5.3.1 Metoda „Pin-On-Disc”	- 42 -
5.3.2 Metoda Abrasion-Wheel-Test	- 43 -
6 EXPERIMENT	- 44 -
6.1 Návrh experimentu.....	- 44 -
6.2 Použité přístroje.....	- 44 -
6.2.1 Navařovací zařízení	- 44 -
6.2.2 Metalografické přístroje	- 45 -
6.2.3 Eds analýza	- 45 -
6.2.3 Konfokální mikroskop Olympus Lens OLS 3100	- 46 -
6.2.5 Tvrdoměry	- 46 -
6.2.6. Termokamera.....	- 46 -
6.3 Parametry při navařování a počty vzorků	- 47 -
6.3.1 Použitý materiál.....	- 47 -
6.3.2 Procesní parametry.....	- 48 -
6.4 Vyhodnocení struktury materiálu.....	- 49 -
6.4.1 Příprava vzorků	- 49 -
6.4.2 Struktura materiálu.....	- 49 -
6.4.3 Zředění	- 52 -
6.4.4 EDS analýza	- 53 -
6.5 Vyhodnocení tvrdosti.....	- 55 -
6.6 Teplotní pole.....	- 61 -
7. TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	- 62 -
8. ZÁVĚR.....	- 63 -

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků a tabulek

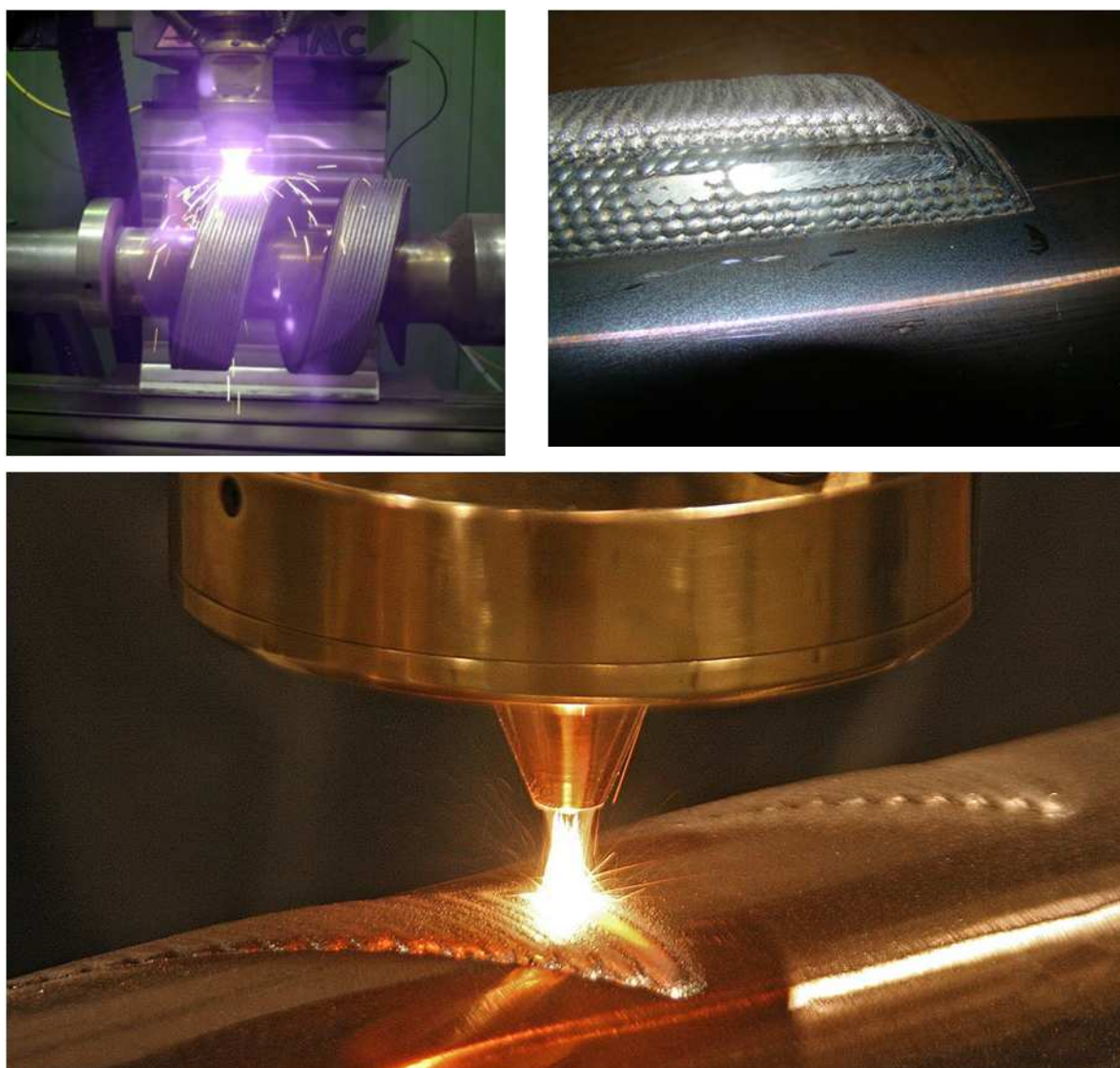
Seznam příloh

Přílohy

ÚVOD

V posledních letech dochází k velkému rozšíření laserové techniky v průmyslové výrobě. Laserové technologie se stávají rozšířenější, dostupnější a populárnější díky svým nesporným výhodám. Hlavní výhodou je zvyšování efektivity a snižování potřebného výrobního času. Mezi hlavní laserové technologie patří dělení materiálu a svařování. V poslední době se do povědomí dostává také laserové kalení a navařování. U těchto dvou aplikací se nemusí nutně jednat o sériovou výrobu, ale mohou být užívány pro vývoj, či různé opravy a úpravy dílců. S tímto úzce souvisí rapid prototyping a 3D tisk různých materiálů. Laserové navařování (anglicky laser cladding) je velmi perspektivní a rozvíjející se technologie. Na obrázku 1 jsou ukázány příklady laserového navařování.

Tato diplomová práce se zabývá laserovým navařováním. V teoretické je uvedena problematika navařování a laserové techniky. V praktické části bylo provedeno navařování niklového prášku na základní matici. Následně byly vyhodnoceny vlastnosti dané vrstvy pomocí mechanických a metalografických zkoušek. Cílem této práce je seznámení s touto technologií a s metodami vyhodnocování vlastností navařené vrstvy.



Obr. 1 Ukázky laserového navařování [15], [17]

1. ROZBOR PROBLÉMU [21] [41] [56] [83]

Významnou technologií v opravárenství a renovacích je navařování. Nejednou potřebujeme opravit pouze poškozenou část výrobku, např. vstřikovací formy. Zde je oprava mnohdy výhodnější řešení, než velmi nákladně vyrobit celý výrobek znovu. Znehodnocení



Obr. 2 Laserové navařování lopatky [16]

a poškození povrchů bývá z více než 80–90 % hlavní příčinou vyřazování výrobku z činnosti, přičemž uvnitř je daný výrobek zcela v pořádku. Řešením těchto problémů může být technologie navařování. Umožňuje nám získat požadovaný geometrický tvar a stejné nebo lepší mechanické vlastnosti povrchu dané součásti, jako například zvýšení adhezní a korozní odolnosti a také zvýšení tvrdosti. Technologie navařování se stala velmi rozvíjenou a užívanou v odvětvích automobilového, vojenského a leteckého průmyslu. Na obrázku 2 je ukázka navařování lopatky.

Princip navařování je takový, že na základní materiál je přiveden navařovaný materiál ve formě drátu, pasty či prášku. Poté je zdrojem tepla roztaven, přičemž se díky konvekci nataví také základní materiál, kde vzniká chemická vazba se základním a navařovaným materiálem. Vhodnou volbou procesních parametrů můžeme docílit požadovaných vlastností. Mezi hlavní procesní parametry patří: výkon zdroje tepla, rychlost posuvu a množství navařovaného materiálu.

Cílem navařování je tedy vytvoření nového povrchu na součásti, který má požadované vlastnosti. Hlavním rozdílem oproti svařování je to, že navařovaný materiál má většinou naprosto rozdílné vlastnosti, než základní materiál. Dále je cílem, aby nedocházelo ke zředění navařované vrstvy se základním materiálem. Tedy aby navařovaná vrstva nezměnila požadované vlastnosti.

Existuje mnoho technologií navařování, přičemž každá má svoje výhody a nevýhody. Nejčastěji používanými konvenčními metodami jsou navařování plamenem, elektrickým obloukem a plazmou. V posledních deseti letech, díky rozšíření laserové technologie, zažívá také boom technologie laserového navařování, kterou se bude tato práce dále zabývat.



Obr. 3 Renovovaná hřídel [78]

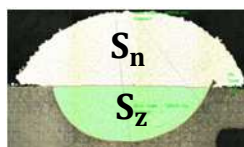
Důležitou otázkou je, jakým způsobem se vyhodnocuje kvalita navařované vrstvy. Vzniklé vrstvy můžeme vyhodnocovat podle požadovaných vlastností. Jedním se základních požadavků je tvrdost, která zvyšuje odolnost proti opotřebení. Z tvrdosti lze někdy vyvozovat další mechanické vlastnosti jako např. pevnost v tahu a obrobitelnost. Dalším možným požadavkem je adhezní odolnost, žárupevnost, otěruschopnost či korozivzdornost.

2. KONVENČNÍ TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ [39] [55] [56]

Navarování je používáno k opravám a renovacím součástí, kterým zvýšíme užité vlastnosti. U renovací požadujeme vždy lepší vlastnosti navařené vrstvy, než základního materiálu. Při výběru technologie navařování, je nutné znát přesný typ opotřebení, ke kterému došlo na dané součásti. Rozklíčování principu vzniku opotřebení vede ke správné volbě metody navařování a druhu přídavného materiálu. Postup renovace je takový, že nejprve je určen princip vzniku opotřebení, poté je identifikován druh a stav základního materiálu, ke kterému je vybrán vhodný přídavný materiál. Dále je vypracován technologický postup navařování, poté je proveden návar a jeho následné opracování. Cílem navařování je tedy vytvoření odolné vrstvy, která má lepší vlastnosti než základní materiál. S tím souvisí snaha o dosažení nízkého zředění navařené vrstvy, tedy co nejmenší podíl základního materiálu v navařené vrstvě. Zředění (promísení) se dá vypočítat podle jednoduchého vztahu 1.1.

$$Z = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (1.1)$$

Kde: S_z = plocha závaru
 S_n = plocha návaru
 Z = zředění



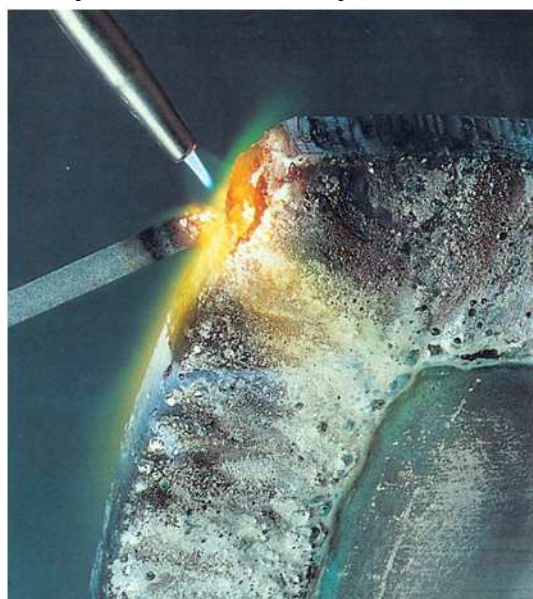
Obr. 4 Geometrie návaru

Existuje mnoho druhů technologií navařování, které vychází z běžně používaných metod svařování. Nejčastěji používané metody jsou: navařování plamenem, ručně obalenou elektrodou, navařování v ochranných plynech MIG/MAG, WIG. Dále existuje metoda navařování pod tavidlem, plazmové navařování a laserové navařování. Každá z těchto metod má své použití.

2.1 Navařování plamenem [39] [56]

Zdrojem tepla pro navařování je plamen. Je používána zapálená směs plynů, nejčastěji směs kyslíku a acetylenu. Kvůli rovinnosti návaru by měl mít plamen nízkou výstupní rychlost, tzv. měkký plamen (do $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro navařování na uhlíkové i ušlechtilé oceli je používán redukční plamen s přebytkem acetylénu. Výhodou redukčního plamene je, že nauhličuje povrch, materiálu, což snižuje jeho teplotu tavení. To způsobí, že se povrch tzv. „napotí“ a na tento povrch se poté odtavuje přídavný materiál. Přídavný materiál není v kontaktu s tavící lázní. Pro navařování plamenem je nutný vysoký předehřev materiálu. Výhoda vysokého předehřevu je ta, že nedochází k praskání návaru. Tepelné zatížení plamenem je plošné. Téměř nedochází k oxidaci prvků. Výhodou navařování plamenem, je velmi nízké zředění materiálu. Při správných provozních parametrech je možné dosáhnout hladkého, kvalitního návaru.

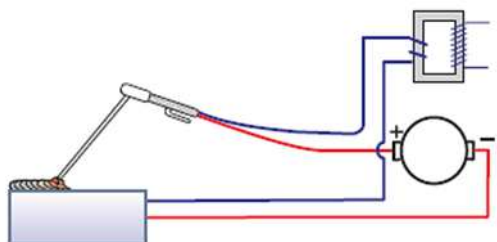
Pro navařování plamenem se používají přídavné materiály na bázi železa, kobaltu a niklu, které jsou podávány do místa návaru ve formě trubiček nebo drátů. Na obrázku 5 je ukázka navařování plamenem s přídavným materiálem ve formě drátu. Návarové trubičky Fe, Ni mohou být například plněny karbidy wolframu a kobaltu. Pro svou dobrou odolnost jsou tyto materiály používány jako návary na vrtací hlavičky pro těžbu surovin.



Obr. 5 Navařování plamenem [56]

2.2 Navařování ruční obalenou elektrodou – ROE [39] [55] [56]

Zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a povrchem materiálu. Schéma je vidět na obrázku 6. Pro navařování jsou používány rutilové nebo bazické elektrody. Bazické elektrody se používají pro rafinaci (klesá obsah P, S) a dezoxidaci (klesá obsah O_2). V obalové hmotě elektrody jsou většinou i legující prvky, např. chrom, vanad. Je nutné, aby elektrody byly předem vysušeny. Po navařování je nutný dohřev materiálu v peci, zábalu nebo zásypu. Dochází zde ke zředění 10–30 %. Výhodou jsou velmi nízké náklady na provoz. Tento typ navařování se používá, hlavně na ruční opravy součástí, např. vady u odlitků, forem apod. Tento druh navařování je používán tam, kde nevadí velké deformace a velká tepelně ovlivněná oblast. Ukázka návaru ROE je na obrázku 7. Nevýhodou je vnesené teplo do materiálu, které mění strukturu a vlastnosti podkladového materiálu. Teplota v místě navařování dosahuje až 500 °C a tepelně ovlivněná oblast se projevuje až 15 mm od tohoto místa. U navařování ROE je nutný velmi zručný a zkušený svářeč.



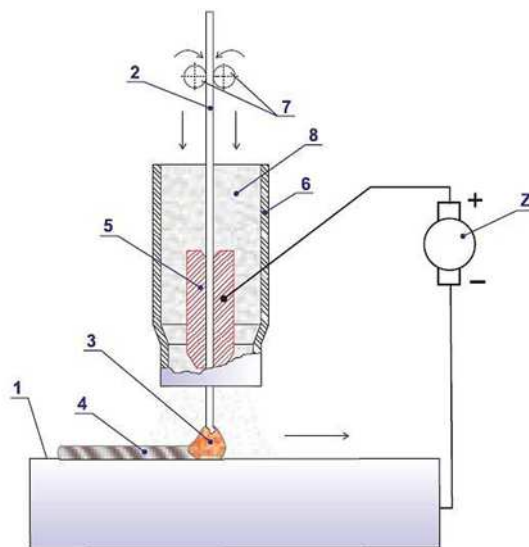
Obr. 6 Schéma navařování ROE [39]



Obr. 7 Návar ruční obalenou elektrodou [56]

2.2 Navařování v ochranných plynech MIG/MAG, WIG [39] [56]

Jedná se o navařování kontinuálně podávanou elektrodou, přičemž MIG znamená, že je použita ochranná atmosféra netečného plynu (Metal Inert Gas). Schéma je na obrázku 8. Používané inertní plyny jsou argon a helium. MAG znamená, že je použita atmosféra aktivního plynu (Metal Active Gas). Aktivními plyny jsou směsi argon + CO_2 a argon + O_2 nebo čistý CO_2 . Oblouk a svarová lázeň jsou tedy chráněny proudem plynu. Jako navařovaný materiál se používají především plněné dráty s náplní legujících prvků, karbidů a struskotvorných přísad. Tyto dráty se vyrábějí v rozměrech od průměru 1,2 do 4,0 mm. Navařování pomocí MIG/MAG je produktivnější metodou, než pomocí ručně obalené elektrody. Další výhodou oproti ROE je to, že je možné automatizovat navařovací proces.

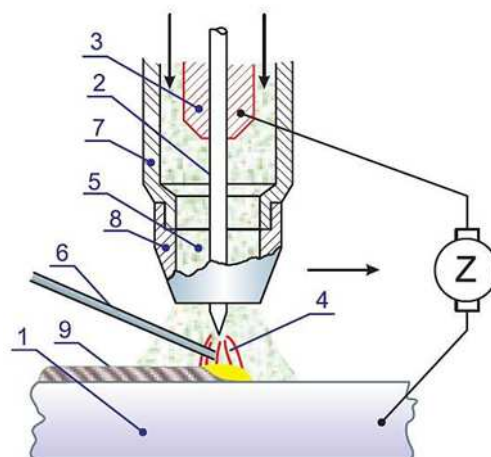


Obr. 8 MIG/MAG navařování [39]

*Legenda: 1 - základní materiál, 2 - drát,
3 - tavenina, 4 - návar,
5 - napájecí průvlak,
6 - tryska, 7 - podavač drátu,
8 - ochranný plyn, Z - zdroj napětí*

WIG, jedná se o svařování a navařování neodtavující se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře netečného plynu. Jak je vidět na obrázku 9, tak přídavný materiál ve formě drátu, tyčinky nebo prášku je dopravován do místa návaru nezávisle. Pro tento typ navařování lze použít střídavý i stejnosměrný proud. Použití stejnosměrného proudu při zapojení (+) na wolframové elektrodě a (–) na základním materiálu je výhodné pro navařování, a to z důvodu mělkého a širokého závaru, a s tím spojeného malého zředění. Nevýhodou tohoto zapojení je větší opotřebení wolframové elektrody. Touto metodou se speciálně vyrábí návarové vrstvy v oblasti nástrojových ocelí, výrobky tlakového lití, zápustky, formy, další použití je pro navařování antikoročních, otěruvzdorných materiálů. Nevýhodou WIG navařování je nízká produktivita, způsobená nízkou účinností přenosu tepla a elektrickými limity wolframové elektrody. Předností je ale vysoká kvalita navařené vrstvy.

Legenda: 1 – základní materiál, 2– w. elektroda, 3 – napájecí průvlak, 4 – el. oblouk, 5 – ochranný plyn, 6 – drát, trubička, 7 – tělo, 8 – hubice, 9 – návar, Z – zdroj napětí

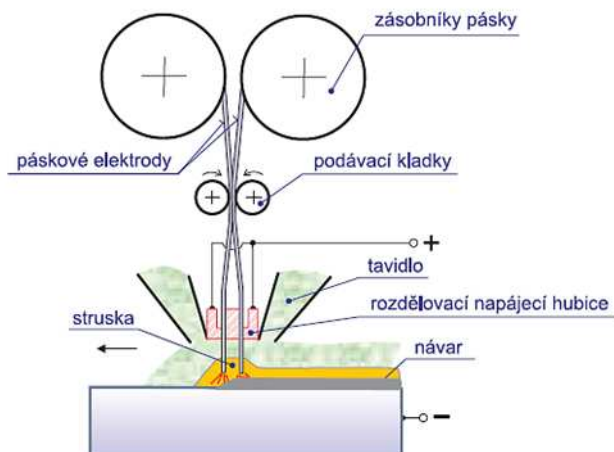


Obr. 9 WIG navařování [39]

2.3 Navařování pod tavidlem (SAW) [39] [45] [56] [67]

Navařovaný materiál ve formě drátu, pásky, trubičky je nepřetržitě pokládán do místa návaru, kde se v elektrickém oblouku (elektroda tvoří navařovaný drát) odtavuje na základní materiál. Ochranu proti okolním vlivům atmosféry tvoří tavidlo, kterým je zasypáno místo návaru, viz obrázek 11. Tavidlo zároveň leguje a formuje návar.

Výhodou této technologie je vysoký výkon a vysoká rychlost navařování. Nevýhodou této metody je velikost zředění, neboť je příliš vysoké (až 60 %). Požadované chemické složení přídavného materiálu je většinou dosaženo až ve třetí vrstvě návaru. Další nevýhodou je široká tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou je také zakrytý navařovací proces, je tedy znemožněna jeho průběžná kontrola. V praxi je používáno jednoho drátu, nebo taky dvou drátů vedle sebe, nebo za sebou. Schéma navařování pod tavidlem je vidět na obrázku 10. Navařování pod tavidlem se používá tam, kde je potřeba dlouhých návarů, pro návary na válcových součástech, pro renovaci kolejnic, aj.



Obr. 10 Navařování pod tavidlem [39]



Obr. 11 Návar kolejnice [45]

2.4 Elektrostruskové navařování páskou (ESW) [56] [67]

Elektrostruskové navařování bylo vyvinuto z metody navařování pod tavidlem, za účelem zvýšení výkonu a efektivity. Navařování je prováděno pod tavidlem páskovou elektrodou ve formě přídavného materiálu. Principem elektrostruskového navařování páskou je odporový ohřev roztavené, mělké, elektricky vodivé strusky. Teplo, které vzniká při tomto procesu, natavuje konec přídavného materiálu (pásky) i základní materiál.

Oproti navařování pod tavidlem má elektrostruskové navařování řadu výhod. Je to především o 60 až 80 % vyšší výkon navařování, malé zředění z důvodu absence elektrického oblouku a zvýšení svařovací rychlosti o 50 až 200 % při srovnatelném vneseném teplu. Rychlost chladnutí návaru ve strusce je nízká, což je výhoda, protože vzniká čistý návar bez vnitřních trhlin a bublin, oxidy mohou z taveniny včas vyplavat na povrch.

2.5 Elektrovibrační navařování [56]

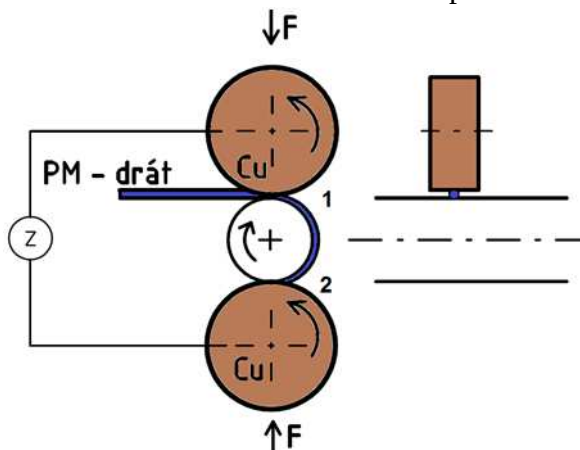
Jedná se o navařování, kdy je hubicí na povrch přiveden navařovací drát. Princip je takový, že se drát dotkne povrchu, současně se zapálí elektrický oblouk, poté je hubice oddalována přičemž oblouk stále hoří a vzniká bodový svar. Dalším oddálením oblouk zhasíná a celý proces se opakuje. Hubice kmitá s frekvencí 60–90 Hz. Technologie vychází z metody MIG/MAG, jako ochranné prostředí se používá ochranný plyn nebo i kapalina (olej, glycerin, NaOH).

Elektrovibrační navařování se používá hlavně pro renovace rotačních součástí, jako například ložiskových uložení na hřídeli. Výhodou je nízké tepelné ovlivnění základního materiálu a nízké promísení.

2.6 Elektrokontaktní navařování [56]

Principem je, že se rotační součást otáčí mezi dvěma měděnými kladkami a impulsním proudem o vysoké intenzitě dochází k ohřevu na dvou kontaktních místech. Teplota ohřevu dosahuje 0,8 až 0,9 teploty tavení. Na obrázku 12 je vidět schéma navařování, kdy v místě 1 dochází k deformaci a navaření přídavného materiálu a v místě 2 dochází k zahřazení návaru. Při použití přídavného drátu Ø 1,6 mm je dosahováno navařené vrstvy tloušťky 0,4 až 0,6 mm.

Elektrokontaktní navařování bylo prvotně vyvinuto pro navařování hydraulických válců stojek pro důlní průmysl. Používáno je hlavně pro dlouhé návary.



Obr. 12 Elektrokontaktní navařování

2.7 Impulsní mikronavařování [56]

Tavení přídavného materiálu je zajištěno pomocí krátkých, ale vysokých proudových impulsů rotující elektrody. Používaný proud se pohybuje v rozmezí 20–1100 A. Doba mezi jednotlivými impulsy je dostatečně dlouhá (0,5 s), takže nedochází k velkému tepelnému ovlivnění materiálu. Dochází k natavení základního materiálu, tím je vytvořen kvalitní metalurgický spoj. Výška návaru se pohybuje v rozmezí 0,1–0,4 mm. Přídavné materiály se používají ve formě prášku, pásky nebo drátu.

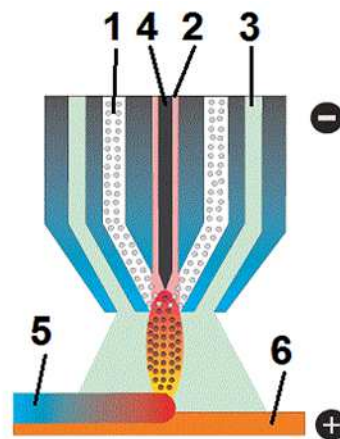
Mikronavařování je určeno pro renovace opotřeбенých a poškozených nástrojů, vstřikovacích forem pro plasty, aj. Je používáno tam, kde je nutnost nízkých deformací a nízkého tepelného ovlivnění základního materiálu.

2.8 Elektrojiskrové mikronavařování [56]

Elektrojiskrové navařování je další alternativou pro vytvoření nových povrchů. Je založeno na principu elektroeroze. Wolframová elektroda je připojena na kladný pól stejnosměrného proudu. Elektroda je rozkmitána (100 Hz) a poté přiblížena k povrchu. Při doteku (v řádu setin sekundy) je povrch základního materiálu vystaven impulsu elektrického výboje. Dochází k lokálnímu ohřevu materiálu a následného zakalení v tloušťce setin milimetru pod povrchem. Současně dochází k natavení karbidu WC, W_2C z přehřáté wolframové elektrody na povrch základního materiálu. Kromě karbidu wolframu se jako přídavný materiál používají nástrojové oceli v zušlechťeném stavu. Tloušťka natavené vrstvy je 2–40 μm a tvrdost vrstvy je až 82 HRC. Navařená vrstva má vynikající přilnavost se základním materiálem. Tuto vrstvu lze ohýbat a táhnout. Elektrojiskrové mikronavařování se používá pro zamezení začínajícího opotřebení, čímž se zvýší životnost až o 600 %.

2.9 Plazmové navařování [47] [55] [56]

Základem této metody je použití plazmového zdroje tepla. Plazmový výboj vzniká elektrickým obloukem mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem, do kterého je přidáván plyn, nejčastěji argon, dusík a kyslík. Plazma dosahuje teploty až 25000 °C a má též vysokou hustotu energie, která dosahuje až 10^6 W/cm^2 . Přídavný materiál je dodáván v podobě prášku, drátu nebo trubičky. Na obrázku 13 je schéma plazmové navařovací hlavy pro práškový přídavný materiál. Trubičky jsou pro zvýšení odolnosti vrstvy často plněny karbidy wolframu a chromu. Nejčastěji se plazmou navařují kobaltové (steallity), niklové nebo vysokolegované ocelové slitiny kovů. Pro plazmový návar je charakteristický penízkovitý tvar návaru, vysoká kvalita, vysoká výtěžnost prášku (až 95 %). Plazmový návar je hladký a velikost zředění je nízké. Mechanických vlastností udávaných přídavným materiálem lze dosáhnout již na jeden návar tloušťky 1–3 mm. Další



Obr. 13 Schéma plazmové navařování [47]

Legenda:

- 1 - Přídavný materiál - prášek
- 2 - Plazmový plyn - argon
- 3 - Ochranný plyn - dusík
- 4 - Wolframová elektroda
- 5 - Návar
- 6 - Základní materiál



Obr. 14 Ukázka plazmového návaru [47]

výhodou jsou malé přídavky na opracování. Vlivem vysoké rychlosti navařování a nízkého tepelného ovlivnění nedochází k deformacím součástí. Další výhodou je snadná automatizace. Plazmové navařování postupně vytlačilo navařování v ochranných atmosférách a ruční obalenou elektrodou. Ukázka plazmového návaru je na obrázku 14.

3. LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ [21] [32] [41] [62] [73]

Velmi efektivní metodou, používanou k ošetření povrchu součásti za účelem získání jeho lepších vlastností, je využití laserového zdroje světla. Ošetření povrchu nám pomůže zvýšit životnost součásti, zlepšit podmínky tření, či zlepšit korozní chování. Ošetření povrchu pomocí laseru se dá rozdělit do několika oblastí: kalení (hardening), přetavování povrchu (melting surface), ochrana povrchu (surface impregnation), legování (alloying) a navařování (cladding). Tato práce se zabývá výhradně navařováním. Laserové navařování lze dále rozdělit podle použití:

- Povlakování (coating, cladding), ukázka je na obrázku 15.
- Opravy a rekonstrukce (parts repair and refurbishment), ukázka je na obrázku 16.
- Vytváření nových součástí pomocí 3D tisku (rapid prototyping and tooling), viz obr. 17.



Obr. 15 Povlakování [32]



Obr. 16 Renovace [32]



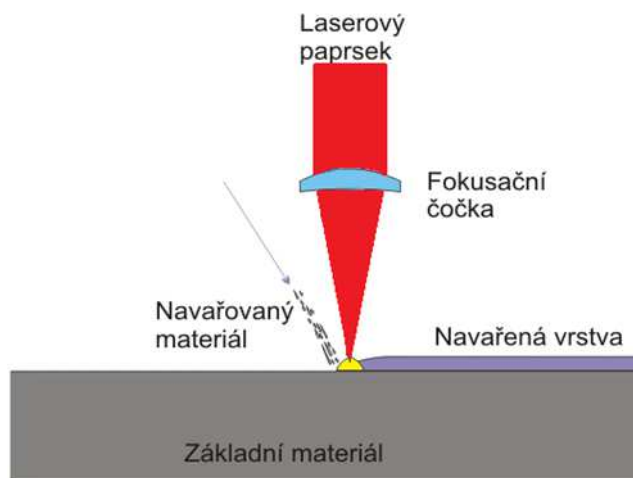
Obr. 17 Rapid prototyping [32]

Proces laserového navařování se dnes označuje několika anglickými názvy, přičemž všechny označují jednu a tu stejnou technologii. Jedná se o anglické názvy: laser cladding, direct metal deposition, laser metal deposition a jejich různé kombinace. Cílem navařování je vytvoření nových odolných vrstev materiálu o lepších vlastnostech, než má základní materiál s minimálním natavením základního materiálu.

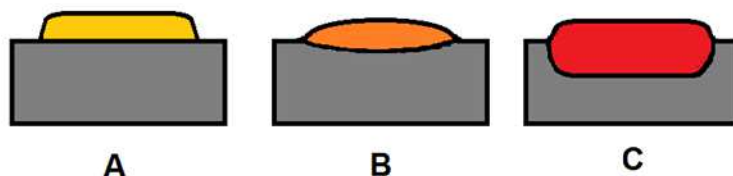
3.1 Princip [32] [41] [56] [73]

Přídavný materiál, ve formě drátu či prášku, je v místě navařování nataven vysoce výkonným laserovým paprskem. Dochází ke vzniku vazby mezi základním a přídavným materiálem. Paprsek je ostře ohraničený a má vysokou hustotu výkonu až 10^6 W/cm^2 . Paprsek není zaostřen do bodu, ale do plošky. Zaostření do plošky je uskutečněno pomocí speciální prismatické čočky. Paprsek je možno tvarovat a vychylovat s ohledem na navařovanou součást. Na obrázku 18 je ukázán princip navařování. Nejčastěji používanými lasery pro navařování jsou diodový, diskový a vláknový laser. (viz kapitola 4.2 Druhy laserů).

Jak je vidět na obrázku 19, lze rozeznat, jestli je nataven základní materiál (ZM). Lze rozlišit tyto tři možnosti: A – bez natavení základního materiálu, vzniká difúzní spoj. B – základní materiál se lehce nataví a vznikne metalurgický spoj s nízkým zředěním navařené vrstvy. C – povrchové legování, navařená vrstva je velmi zředěna základním materiálem. Všechny tyto tři případy se liší pouze dodaným výkonem, rozložením energie laseru na ploše a rychlostí pohybu svazku.



Obr. 18 Princip navařování [40]



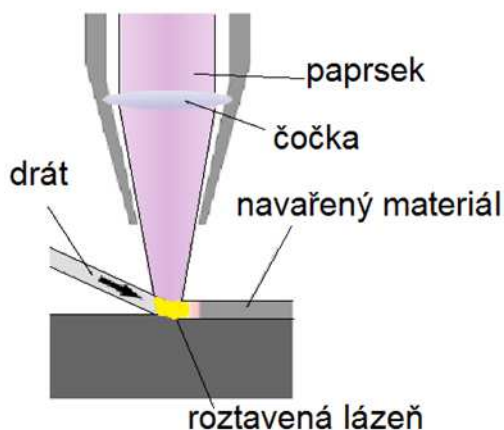
Obr. 19 Možnosti natavení základního materiálu

3.2 Procesy [21] [41] [56] [73]

Laserové navařování může být uskutečněno v jednofázovém nebo dvoufázovém procesu. U dvoufázového procesu se předem umístí přídavný materiál na podklad. Až poté je laserovým paprskem roztaven spolu se základním materiálem. Dvoufázový proces je například často využíván pro legování pomocí nanesených kovových folií. Jednofázovým procesem je myšleno vyfukování prášku nebo podávání drátu přímo do laserového paprsku, při kterém vzniká vazba mezi přídavným a základním materiálem. Jednofázový proces je velmi častý, neboť u něj odpadá nanášení přídavného materiálu na základní materiál. Používají se přídavné materiály ve formě drátů, trubiček, dále pak prášky, popřípadě různé plátky a folie. U jednofázového procesu rozlišujeme 4 hlavní způsoby podávání přídavného materiálu.

3.2.1 Boční podávání drátu [21] [40] [62] [73]

Boční podávání drátu se používá pro ruční opravy ploch nebo pro navařování rotačně symetrických součástí, které mohou být navařeny jednou dlouhou nepřetržitou drahou. Schéma je na obrázku 20. Drát je chráněn atmosférou plynu, nejčastěji argonu a dusíku. Tavení drátu je oproti tavení prášku méně účinné. Řešením je použití vyššího výkonu laseru, což ale způsobí vyšší přehřátí základního materiálu a vyšší zředění. Druhou možností je předeřev drátu (více než 1000 °C) se zvýší účinnost procesu. Důležité u této metody je přesné zajištění vedení a dávkování drátu, jinak by totiž docházelo k ucpání tavné lázně drátem. Nejčastěji jsou používány dráty od průměru 0,15 mm do 1,0 mm. Další možností zvýšení efektivity navařování u tohoto uspořádání je její kombinace s MIG svařováním. Množství přídavného materiálu může být zvýšeno až 4×. Návary poté dosahují tloušťky až 5mm, přičemž je zachováno nízké zředění. Rychlost navařování laser + MIG je přibližně třikrát vyšší než u běžného laserového navařování.



Obr. 20 Boční přidávání drátu [40]

3.2.2 Boční vstřikování prášku [21] [40] [62] [73]

Vstřikování prášku pomocí boční trysky je jednoduchý a efektivní způsob dopravy materiálu do laserového paprsku. Prášek je vyfukován tryskou pomocí inertního plynu, který zároveň chrání proces před oxidací. Průchodem přes paprsek se prášek prudce ohřeje. Tavení nastává na rozhraní základního materiálu, který je také ohříván paprskem. Ukázka tohoto uspořádání je na obrázku 21. Výkon paprsku musí být dostatečný pro natavení prášku, ale nesmí



Obr. 21 Boční podávání prášku [21]

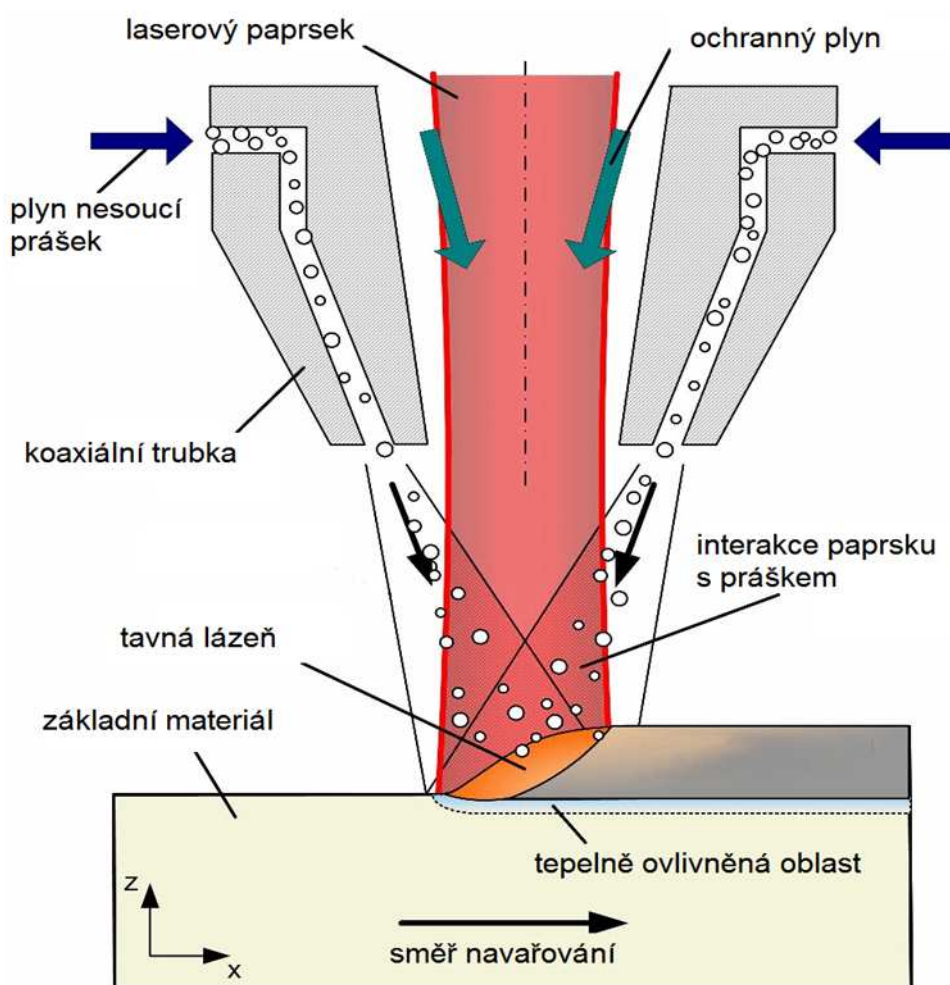
být příliš vysoký, aby nedošlo k velkému zředění. Hustota energie se pohybuje okolo 10^4 W/cm^2 . Výhodami jsou vysoká přesnost a možnost kontroly procesu. Zředění materiálu je nízké. Tloušťka navařené vrstvy se pohybuje od desetin milimetrů do několika milimetrů.

3.2.3 Boční podávání pasty [21] [73]

Pastu tvoří přídavný prášek a pojivo. Pasta se pokládá přímo mezi základní materiál a paprsek laseru, obvykle kousek před něj. Je nutné, aby byl navařovací čas krátký, jinak by mohlo dojít k vysušení pojiva. Částice prášku by mohl odnést ochranný plyn. To přináší hlavní nevýhodu, neboť díky vysušování pojiva vzniká pórovitý návar. Proto se přídavných materiálů v podobě past obvykle nevyužívá.

3.2.5 Podávání prášku koaxiální tryskou [21] [32]

Nejdokonalejším uspořádáním pro podávání přídavného materiálu je pomocí koaxiální trysky. Tato tryska byla vynalezena v roce 1999 ve Fraunhofer Institut v Drážďanech. Principiální schéma je na obrázku 22. Prášek je podáván koaxiální tryskou přímo do paprsku, kde dochází k natavení prášku, čímž následně vzniká návar. Touto tryskou je dosaženo rovnoměrného přísunu nanášeného prášku do taveniny. Spolu s vhodným laserem lze umístit takovouto koaxiální hlavu na kloubové rameno robotického manipulátoru, což umožňuje provádět návary na špatně přístupných místech.



Obr. 22 Princip podávání prášku koaxiální tryskou [32]

3.3 Přídavné materiály [25] [32] [40] [56] [62]

Pro laserové navařování existuje velká rozmanitost přídavných materiálů. Pro navařování je používáno rozmanitých materiálů. Mohou být navařovány kovové slitiny i keramika. Nejčastěji je používáno návarů na bázi kobaltových a niklových slitin nebo zušlechťených nástrojových ocelí o tvrdostech do 64 HRC. Dále mohou být navařovány slitiny obsahující karbidy wolframu a molybdenu o tvrdosti 1600 HV, také karbidy niobu o tvrdosti 2000 HV. Nejtvrdší návary jsou prováděny karbidem titanu, jehož tvrdost dosahuje až 3200 HV. Podle typu přídavného materiálu volíme způsob podávání materiálu. Navařovat je možno na ocelové podklady, ale také i na hliník a titan, což je užíváno zejména v leteckém průmyslu, kde je úkolem získat velmi odolné součásti, při zachování nízké hmotnosti. Další možností je navařování kluzných vrstev. Laserové navařování kluzných uložení z bronzu přináší úsporu výrobních nákladů. Jsou vytvářeny odolné bronzové vrstvy navařené na konstrukčních ocelích, které mají malé přídavky na obrábění a celková cena součásti je výrazně nižší oproti součásti vyrobené celé z bronzu.

3.4 Vlastnosti vrstvy navařené laserem [32] [62]

Od navařování laserem požadujeme vrstvy o vyšší kvalitě, než je základní materiál. Vlastnosti navařených vrstev mohou být rozděleny do čtyř základních skupin, viz tabulka 1. Navařená vrstva je kombinací těchto vlastností. Jednotlivé vlastnosti se mohou navzájem ovlivňovat, například zbytkové napětí a s ním spojené praskání. Nebo například odolnost proti otěru má souvislost s tvrdostí, mikrostrukturou, počtem a velikostí trhlin, vazbou mezi základním materiálem a návarem. Ne vždy lze dosáhnout všech požadovaných vlastností najednou. Oproti konvenčním technologiím, lze laserovou technologií vytvářet velmi kvalitní návary a dobrými vlastnostmi.

Tab. 1 Vlastnosti navařené vrstvy. [62]

Geometrické vlastnosti	Mechanické vlastnosti	Materiálové vlastnosti	Kvalitativní vlastnosti
- rozměry navařené vrstvy - zředění - drsnost povrchu	- odolnost proti opotřebení - zbytkové napětí - rozložení tvrdosti - pevnost v tahu	- odolnost proti korozi - zředění - velikost zrna - homogenita - mikrostruktura	- pórovitost - praskání

Hlavními požadavky při vytvoření laserového návaru jsou nízké zředění, nulová pórovitost, a s nimi spojená pevnost a odolnost proti opotřebení. U návarů je požadována kvalitní vazba se základním materiálem, tu zaručí metalurgická vazba, která vznikne promísením základního a navařovaného materiálu. Ovšem je žádaná s co nejmenším zředěním, aby vznikl co nejčistší návar předem daných vlastností (vysoká tvrdost, teplotní odolnost, apod.). Velikost zředění je používána jako údaj o kvalitě navařování. Zředění může být vyhodnoceno dvěma způsoby, prvním je určeno z geometrie návaru podle rovnice 1.1 (strana 13). Druhým způsobem je tzv. chemické zředění. Jedná se o srovnání materiálového složení čistého navařovaného materiálu a již navařeného materiálu. Metoda chemického zředění je výhodnější, než geometrická metoda, protože umožňuje sledovat velikost zředění v průběhu hloubky návaru.

Pórovitost navařené vrstvy je nežádoucí. Může vznikat dvěma základními způsoby. Prvním je uvěznění plynových bublin v tuhnoucí tavenině, což lze odstranit vibrací součástí. Přídavné vibrace snižují zbytkové napětí tedy i možný vznik trhlin. Druhý způsob je nerovnoměrným smrštěním chladnoucí taveniny. Vznikají tahová napětí, která mohou vést až ke vzniku trhliny. Další vznik pórovitosti může nastat na rozhraní základního materiálu

a navařené vrstvy a to z důvodu přítomnosti drobné vady, například mastnoty, která snižuje přilnavost navařovaného materiálu na podklad.

- **Výhody:**

Jedná se o nejlepší techniku navařování tenkých vrstev. Lze vytvářet sendvičové struktury, jejichž tvar není omezen. Navařené vrstvy mohou být z různorodých materiálů. Lze navařovat i v dutinách a těžko přístupných místech. Nevznikají velké deformace a tepelně ovlivněná oblast je malá. Díky vysoké rychlosti ochlazování vzniká většinou jemná mikrostruktura. Výsledná vrstva je bez defektů a vad.

- **Nevýhody:**

Nevýhodou mohou být vysoké pořizovací náklady a nutnost strojního vedení.

3.5 Rapid prototyping [9] [33] [81]

Rapid prototyping označuje soubor technologií používajících 3D CAD dat k vytvoření reálného prototypu. Nejčastěji jsou takto vytvářeny – tisknuty součástky z plastu nebo pryskyřice. Nás ale zajímá technologie 3D tisku kovů. Existuje zde technologie používající laser, tzv. Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Jedná se o vytvoření pevné, kovové součásti přímo z CAD dat, nejčastěji je používán formát STL, který aproximuje povrch součásti na trojúhelníkovou síť, jež reprezentuje těleso. Principem je nanášení velmi tenkých, rovinných vrstev prášku, které jsou roztaveny pomocí zaostřeného laserového paprsku. Tloušťka vrstvy se pohybuje od 20 do 60 μm , v závislosti na druhu materiálu. Po vytvoření jedné vrstvy následuje rozprostření další vrstvy prášku nad součást. Neroztavený prášek slouží, jako mechanická podpora tisknuté součásti. Neroztavený materiál je po procesu recyklován a použit při dalším tisku. Kovové díly vyrobené technologií DMLS mají stejné mechanické vlastnosti jako díly obráběné nebo odlévané. Ukázka součásti vytvořené pomocí DMLS je na obrázku 23. Jedná se o přesné a jednoduché vytvoření dílu, prototypu pomocí spékání kovového prášku. Tyto prototypy mohou být použity k reálnému testování, přičemž jejich výroba je možná v řádu hodin. Odpadají zde náklady na složitou výrobu forem, či na obrábění. Je možné vytvořit 99,99 % všech možných tvarů o vysoké přesnosti, které by jinými technologiemi šly s těžší vyrobit. Výběr materiálu je velmi široký, od součásti z bronzu a lehkých slitin, přes oceli až po titanové slitiny a kompozity.

Vývoj této technologie v posledních pár letech zaznamenal obrovský rozvoj, důkazem může být následující příklad. V roce 2013 byla vytisknuta funkční kovová zbraň Colt 1911. Tato zbraň byla složena z 33 vytištěných komponentů, které byly vytištěny pomocí metody DMLS. Komponenty byly vytvořeny z prášku z nerezové oceli nebo ze speciální slitiny kobaltu a niklu. Rukojeť byla podobně vytištěna z nylonu, tvrzeného uhlíkovými vlákny. Zbraň zvládla během testu 50 výstřelů, než se zasekla.



Obr. 23 Ukázka vytisknutého dílce [13]

4. LASER [4] [41]

Zařízení pro laserové navařování je složeno z laserového zdroje světla. Laser nemusí být umístěn přímo na pracovišti, paprsek může být dopraven pomocí optického kabelu (záleží na typu laseru). Dále je složeno z robotického manipulátoru, který nese speciální navařovací hlavu – viz obrázek 24. Pak ještě obsahuje zásobník a podavač navařovaného práškového materiálů. Vše je organizováno na specializovaném pracovišti, které je doplněno další běžnou dílenskou technikou jakou je stlačený vzduch pro ofuk dílců, speciální vysavač, bezpečnostní pomůcky atp.

Nejdůležitějším a zároveň nejsložitějším zařízením je samotný laser. Slovo laser pochází z anglické zkratky - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation a jde do češtiny přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je tedy optický zdroj elektromagnetického záření – světla, který pracuje na principech kvantové mechaniky. Dnes existuje mnoho typů laseru a k nim mnoho příslušenství. V dnešních dnech je laserová technologie již plně ovládnuta a je rozšířená. Za posledních pět let klesla cena laserové technologie o polovinu, což přispívá k jejímu ještě většímu rozšíření.



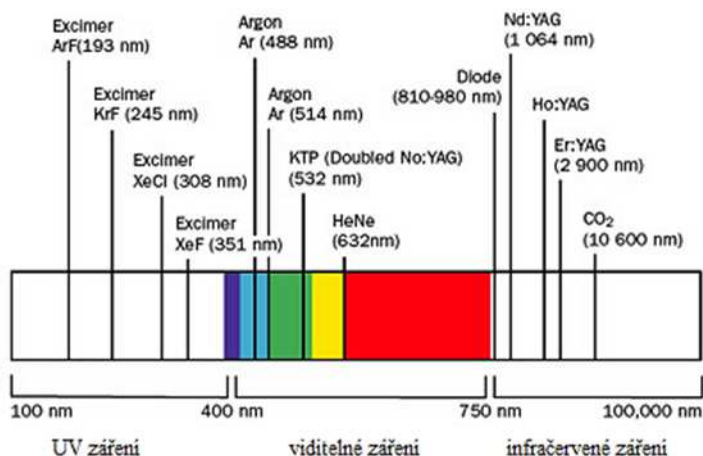
Obr. 24 Manipulátor s navařovací hlavou

4.1 Vlastnosti laserového záření [2] [31] [38] [51] [61] [68]

Laserové světlo má oproti normálnímu zdroji světla specifické vlastnosti. Laserové světlo je především koherentní, monochromatické, dalšími vlastnostmi je malá rozbíhavost, módomá struktura. Tyto vlastnosti jsou odlišné od běžných zdrojů světla a umožňují zaostřit paprsek do úzkého svazku s minimální rozbíhavostí a s velkou plošnou hustotou energie.

- **Monochromaticita**

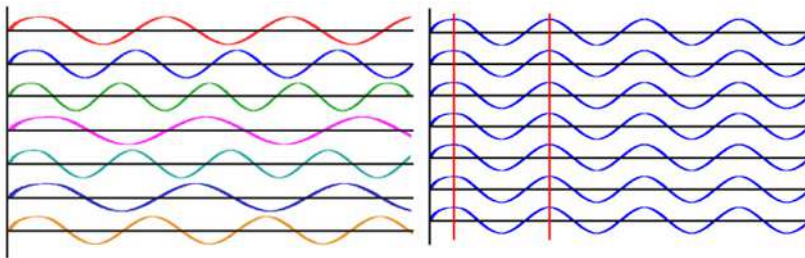
Laserové světlo je monochromatické, tedy záření má pouze jednu vlnovou délku, to znamená, že každý foton má stejnou energii. Laserové světlo je tedy „jednobarevné“. S kratší vlnovou délkou roste energie fotonů. Vlnová délka, ve které se nachází většina dnes používaných laserů, leží mimo viditelné spektrum záření. Jak je vidět na obrázku č. 25, tak různé druhy laserů pracují na různých vlnových délkách celého spektra. Lasery pracující v oblasti mikrovlnného záření se nazývají masery, v oblasti gama záření grasery.



Obr. 25 Vlnové délky laserů [38]

• Koherence

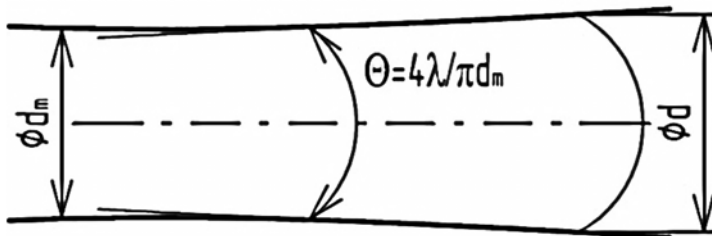
Obvykle používané zdroje světla jsou nekoherentní, např. žárovka. Laserem generované fotony jsou ve společné fázi, která je jak prostorová, tak časová. Jsou tedy uspořádané, koherentní.



Obr. 26 Nekoherentní a koherentní paprsek [12]

• Rozbíhavost paprsku

Výhoda laserového světla je ta, že je velmi málo rozbíhavé. Opakem rozbíhavosti neboli divergence je směrovost. Směrovost laserového paprsku je hodnocena a definována prostorovým úhlem. Jestliže má prostorový úhel paprsku tvar kužele, tak se v praxi uvádí rovinný úhel divergence θ , viz obrázek 27. Jestliže má laserový paprsek jiný tvar, tak se uvádějí hodnoty dvou rovinných úhlů navzájem kolmých na sebe. Nízká rozbíhavost a vysoká koherence umožňuje zaostření laserového paprsku na velmi malý průměr, čímž je získána vysoká hustota energie laserového paprsku, až 10^9 W.cm^{-2} . Divergenci θ lze určit jako závislost vlnové délky na výstupním průměru paprsku podle vztahu (1.2).



Obr. 27 Rozbíhavost laserového paprsku [2]

$$\theta = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot d_m} \quad (1.2)$$

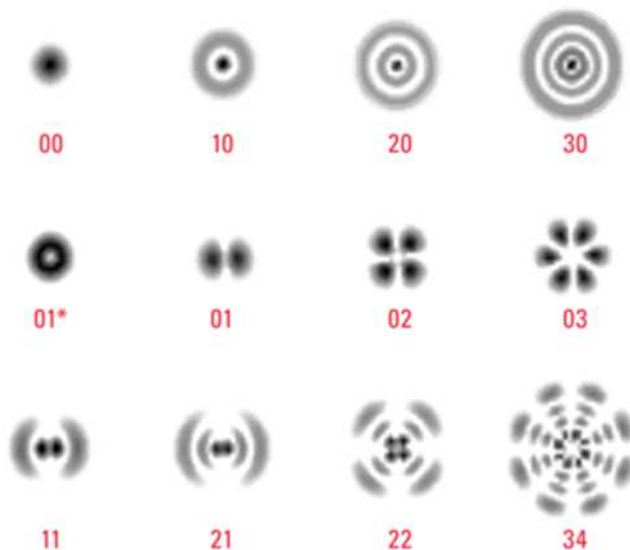
kde: π – Ludolfovo číslo [-],

d_m – průměr paprsku na výstupu z rezonátoru [mm],

λ – vlnová délka [mm],

• Módová struktura

V příčném řezu paprsku rozlišujeme tvar paprsku, tzv. elektromagnetický mód TEM. Základní tvar paprsku, módu je dán geometrickou konstrukcí rezonátoru, závisí na nastavení zrcadel v rezonátoru. Jak je vidět na obrázku 28, rozlišujeme mnoho tvarů módové struktury. Každý tvar je vhodný pro jinou aplikaci. Nejjednodušší TEM00 má Gaussovské rozložení intenzity energie s maximem v ose. Dokonalá symetrie paprsku je klíčová pro správnou činnost v řadě aplikací.



Obr. 28 Módové struktury TEM [31]

4.2 Druhy laserů [83]

Od představení prvního laseru na začátku šedesátých let minulého století pokročil vývoj mílovými kroky kupředu. Bylo vyvinuto mnoho druhů laserů, přičemž každý má své výhody a nevýhody, a je vhodný pro odlišnou aplikaci. Lasery můžeme rozdělit podle mnoha hledisek, jako například:

Podle druhu aktivního prostředí

- plynové
- kapalinové
- pevnolátkové
 - tyčové
 - diskové
 - vláknové
 - polovodičové

Podle typu čerpání

- elektrický výboj
- optické čerpání
- chemická reakce

Podle režimu provozu

- pulzní
- impulzní
- kontinuální

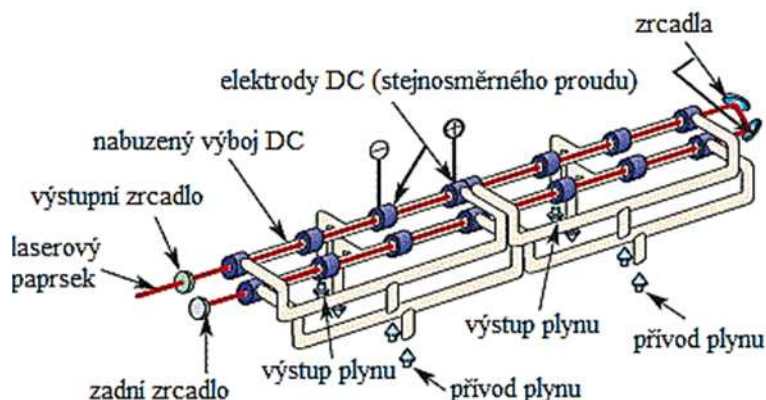
Vlnové délky zařízení

- infračervené lasery
- lasery viditelného pásma
- ultrafialové lasery
- rentgenové lasery

4.2.1 CO₂ laser [2] [29] [50] [52] [54]

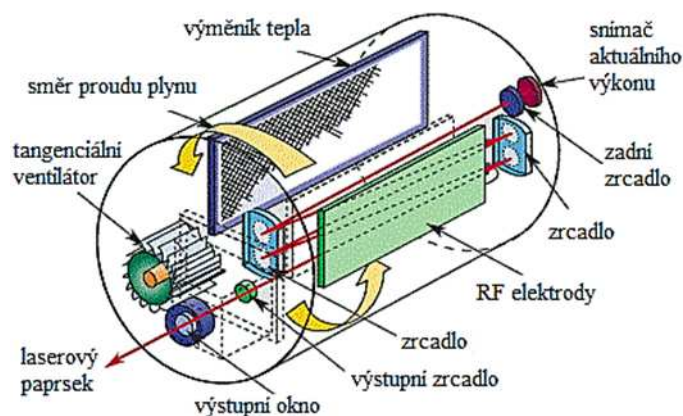
Základní a nejvíce rozšířený laser je CO₂ laser. Jedná se o plynový laser, jehož aktivní prostředí je směs plynů obsahující molekuly oxidu uhličitého, dusíku a helia, většinou v poměru 1:4:5. Tento laser vydává infračervené záření o vlnové délce nejčastěji 10,6 μm . CO₂ laser je buzen obvykle elektrickým výbojem nebo radiofrekvenčně. Nejběžnějším konstrukčním uspořádáním CO₂ laseru je podélné a příčné. Podélné uspořádání (obrázek 29) vyniká tím, že výstupní paprsek má vysokou kvalitu a využívá se hlavně pro dělení materiálů. Na obrázku 30 je příčné uspořádání, které má sice horší kvalitu výstupního paprsku, ale zase je zde výrazně nižší spotřeba aktivních plynů, což je ekonomicky výhodnější. Příčné uspořádání se využívá hlavně pro svařování. Další možné rozdělení je podle plnění rezonátoru, na lasery, které mají hermeticky uzavřený rezonátor, a na tzv. průtočné lasery, tj. kdy směs plynů neustále proudí rezonátorem, což je nezbytné u laserů s vysokým výkonem okolo 10 kW.

Účinnost CO₂ laseru se pohybuje od 8 do 13 %. Výkon závisí na typu buzení, velikosti rezonátoru a způsobu výměny pracovního plynu. Výkon se pohybuje od několika desítek wattů až po desítky kilowattů. Výhodou CO₂ laseru je, že může pracovat v kontinuálním režimu při vysokých výkonech. Vlnová délka CO₂ laseru je vhodná pro aplikaci dělení materiálů. Tyto lasery vynikají vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady.



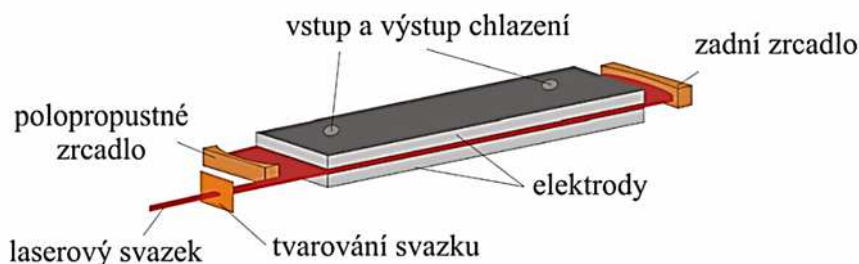
Obr. 29 Schéma podélného uspořádání CO₂ laseru [5]

Nevýhodou je, že paprsek nelze vést optickým kabelem, ale je nutné vedení paprsku pomocí speciální optické soustavy, která je složena z Zn–Se čočky, zrcátka a vedení. Použití těchto laserů je velmi rozmanité, velmi častá je jejich aplikace pro řezání a svařování, dále je možné užití pro kalení a gravírování.



Obr. 30 Schéma příčného uspořádání CO₂ laseru [5]

Na obrázku 31 je deskový, difuzně chlazený Slab CO₂ laser (slab = deska). Tento typ CO₂ laseru nepotřebuje nepřetržitý přísun vnějších laserových plynů, ale obsahuje nádobu o objemu 10 litrů, jejíž životnost je jeden rok nepřetržitého provozu. Chlazení probíhá rozptylem tepla nad vodou chlazenými elektrodami. Čerpání aktivního plynu je uskutečňováno radiofrekvenčně mezi dvěma velkými elektrodami.



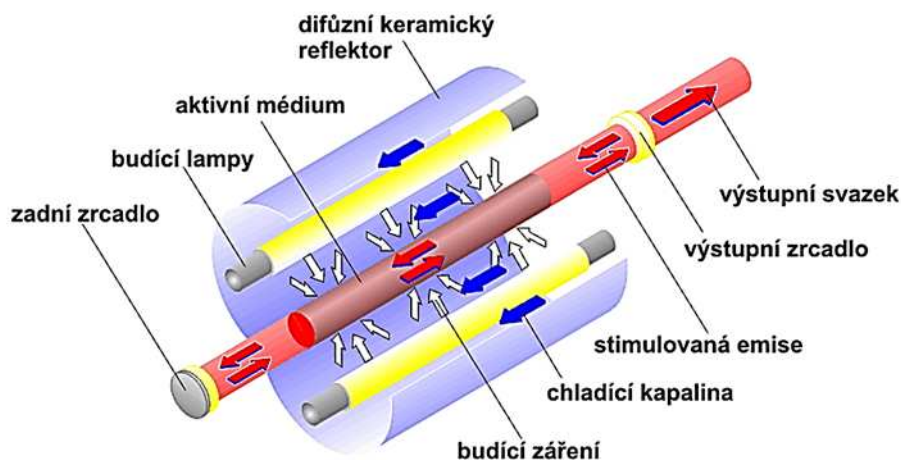
Obr. 31 Schéma deskového CO₂ laseru [29]

4.2.2 Nd:YAG [29] [52] [82] [83]

Nd:YAG je pevnolátkový laser tyčového uspořádání, kde je aktivní prostředí krystal yttrium-aluminium-granátu, který je obohacen ionty neodymu. Aktivní prostředí je buzeno optickými výbojkami nebo pomocí laserových diod. Tento typ laseru generuje záření o vlnové délce 1,0641 μm . V závislosti na typu buzení může Nd:YAG laser pracovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu. Buzení pomocí výbojek má nižší účinnost přenosu světla, než buzení laserovými diodami. Výhodou Nd:YAG laseru je ten, že laserový paprsek lze navázat do optického vlákna a tím je usnadněna cesta svazku z laseru do místa procesu. Další výhodou jsou kompaktní rozměry oproti CO₂ laseru. Nevýhodami mohou být nízká účinnost, vysoké náklady na provoz způsobené častými výměnami budících výbojek a tedy nízká životnost. Pro laserové diody je životnost až 10000 h, pro výbojky jen 1000 h.

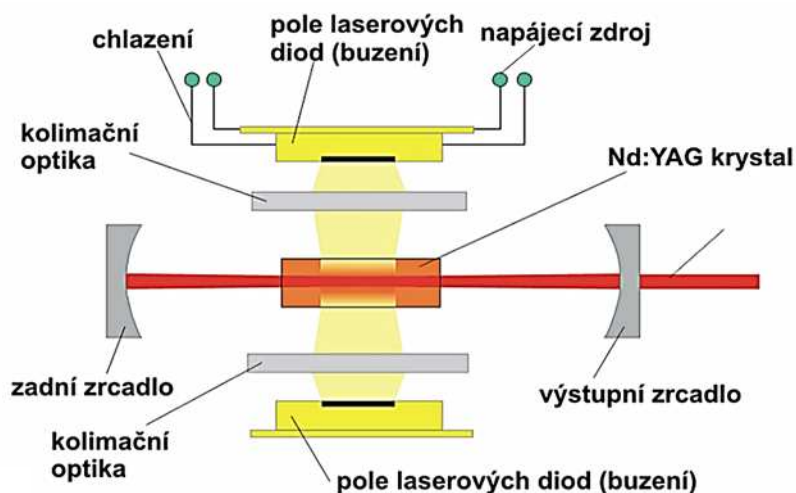
Nd:YAGy buzené pomocí výbojek jsou užívány v pulzním režimu hlavně pro svařování (hluboký průvar) a vrtání, zejména tam, kde je nutná malá tepelně ovlivněná oblast. Předností

výbojkou buzeného Nd:YAG laseru (viz obrázek 32) je vysoká energie v pulsním režimu, která je pro tyto aplikace vyžadována. Nevýhodami jsou nízká účinnost přibližně 3 %, vysoké náklady na provoz, nutnost účinného chlazení a krátká životnost výbojek, okolo 1000 h.

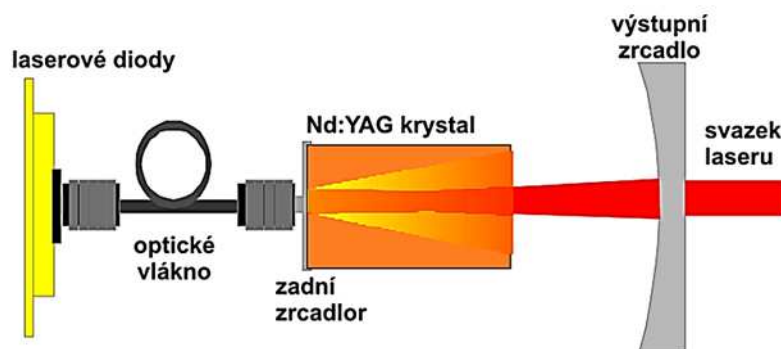


Obr. 32 Nd:YAG buzený výbojkami [82]

Nd:YAGy buzené pomocí laserových diod jsou užívány pro značení a gravírování. Existuje dvojí uspořádání buzení – boční (transversální) a zadní buzení. U zadního buzení jsou laserové diody mimo rezonátor a budící záření se vede do rezonátoru optickým vláknem. Toto uspořádání je z hlediska případné výměny diody výhodné, můžeme jej vidět na obrázku 34. U zadního buzení je dosahováno lepší kvality paprsku, ale nižších výkonů, než u bočního buzení, viz obr 33. U bočního buzení lze naopak dosáhnout vyšších výkonů, ale nižší kvality paprsku.



Obr. 33 Boční uspořádání [82]



Obr. 34 Zadní uspořádání [82]

4.2.3 Diskový laser [54] [72] [76] [82] [83]

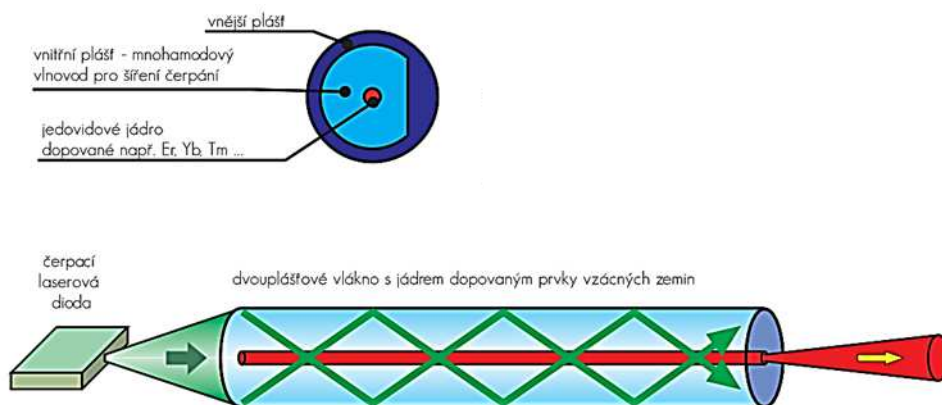
Diskový laser je modifikací Nd:YAG laseru. Jde tedy o pevnolátkový laser, který generuje záření o vlnové délce 1,030 μm . Aktivní prostředí tvoří malý tenký disk krystalu Nd:YAG. Toto uspořádání je výhodné z hlediska teplotního profilu a umožňuje dosáhnout vysokých výkonů až 27 kW (firma Boeing) s dobrou kvalitou výstupního svazku. Použití je pro operace, které vyžadují vysoký výkon, zejména řezání a svařování. Nevýhodou je nižší životnost a účinnost oproti vláknovým laserům. Diskové lasery mohou být zapojeny v sérii, čímž se zvýší výkon paprsku, přičemž zůstane jeho kvalita. Na obrázku 35 je uspořádání 8kW laseru Trumpf, který je sestaven ze čtyř samostatných diskových laserů.



Obr. 35 Diskový laser Trumpf [76]

4.2.4 Vláknový laser [46] [54]

Nejmodernějším pevnolátkovým laserem je vláknový laser. Aktivním prostředím je optické křemíkové vlákno, které je obohaceno ionty ytterbia, thulia nebo erbia. Buzení je prováděno pomocí mnohamódových laserových diod, které jsou přivedeny přímo do aktivního vlákna. Rezonátor tvoří zde tzv. Braggovy mřížky nebo vnější dichroická zrcadla. Braggovy mřížky jsou speciální struktury vytvořené přímo na optickém vlákne, kde dochází ke specifickým změnám indexu lomu. Záření je následně z vlákna vyváděno pomocí kolimátoru.

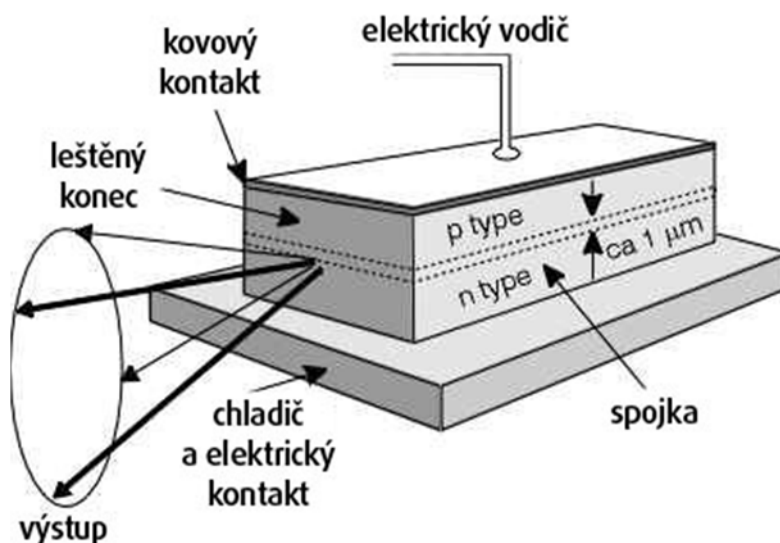


Obr. 36 Vláknový laser [46]

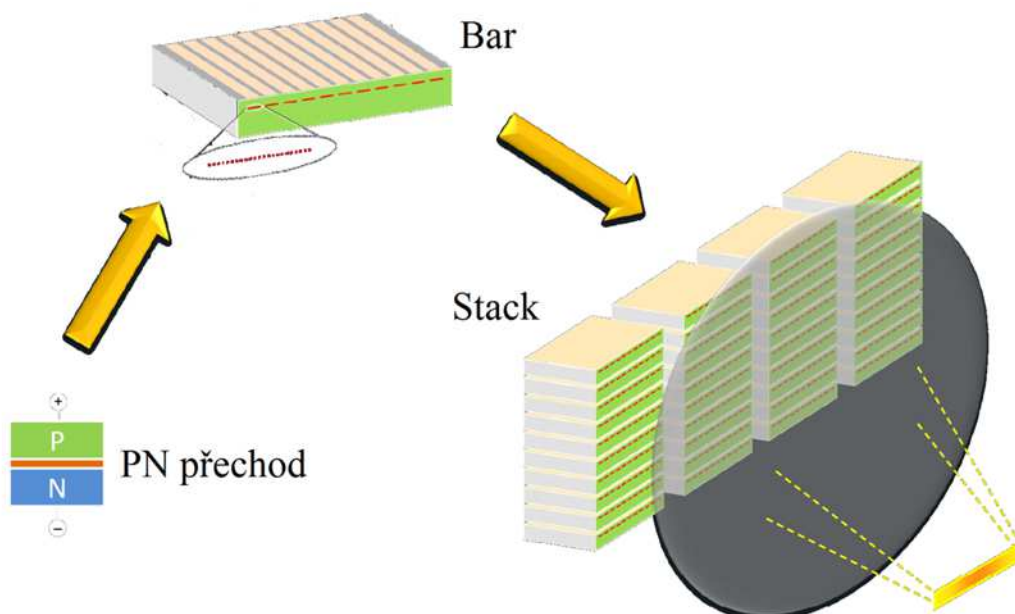
Vláknové lasery mohou pracovat v pulzním, kvazipulzním nebo kontinuálním režimu. Výhodou je jednoduchá konstrukce zařízení, robustnost a modularita. Výkon jednovláknového laseru dosahuje až 10 kW v kontinuálním režimu. Vláknové lasery lze vhodně spojit a dosáhnout tím vysokého výkonu až 80 kW. Vysoká je také účinnost tohoto laseru, pohybuje se mezi 30 až 35 %. Dobrá je také životnost stroje, jež dosahuje až 100000 h. Vláknový laser nepotřebuje téměř žádné náklady na provoz (kromě elektrické energie). Tento laser nepotřebuje téměř žádnou údržbu a poskytuje velmi kvalitní svazek záření. Využití vláknových laserů je velmi rozmanité. Díky svému výkonu a malým rozměrům je používán v lékařství, vojenském průmyslu ve strojírenství pro svařování, řezání a gravírování. Vláknový laser s největší pravděpodobností v budoucnosti nahradí běžně užívané CO₂ lasery.

4.2.5 Diodový laser [5] [10] [14] [52] [77]

Diodový, též polovodičový laser je druh pevnolátkového laseru, který využívá k buzení elektrický proud a aktivní prostředí je polovodič (GaAs, AlGaAs), kde na jeho PN přechodu o ploše řádově 10^{-6} mm^2 je generováno záření o vlnové délce 808 - 980 nm. Schéma tohoto základního členu diodového laseru je ukázáno na obrázku 37. Polovodičový laser pracuje pouze v kontinuálním režimu. Jak je vidět na obrázku 38, tyto jednotlivé miniaturní polovodiče, emitory (výkon v mW) se skládají do řad, které jsou dlouhé několik mm (o výkonu přibližně 10W). Tyto řady, které se označují *bars*, které se dále skládají do sloupců na sebe. Těmto sloupcům se říká *stacks* a jejich maximální výkon je až 600W. Vyššího výkonu je dosaženo spojením několika stacků, až do výše 25kW (diodový laser od firmy Laserline). Jednotlivé emitory nepracují na stejné vlnové délce, ale na různých délkách, které se od sebe nepatrně liší (např. 960 nm, 980 nm, 1000 nm). Ty jsou dále spojovány pomocí speciální optických modulů. Principiální schéma je uvedeno na obrázku 39. Laserový svazek vycházející z rezonátoru ve vertikálním a horizontálním směru má různý profil a také různou divergenci. V ose kolmé na PN přechod dosahuje divergence až 90° . K odstranění této divergence jsou na stěnu bloku umísťovány válcové mikročočky, ze kterých již vystupuje rovnoběžný svazek.

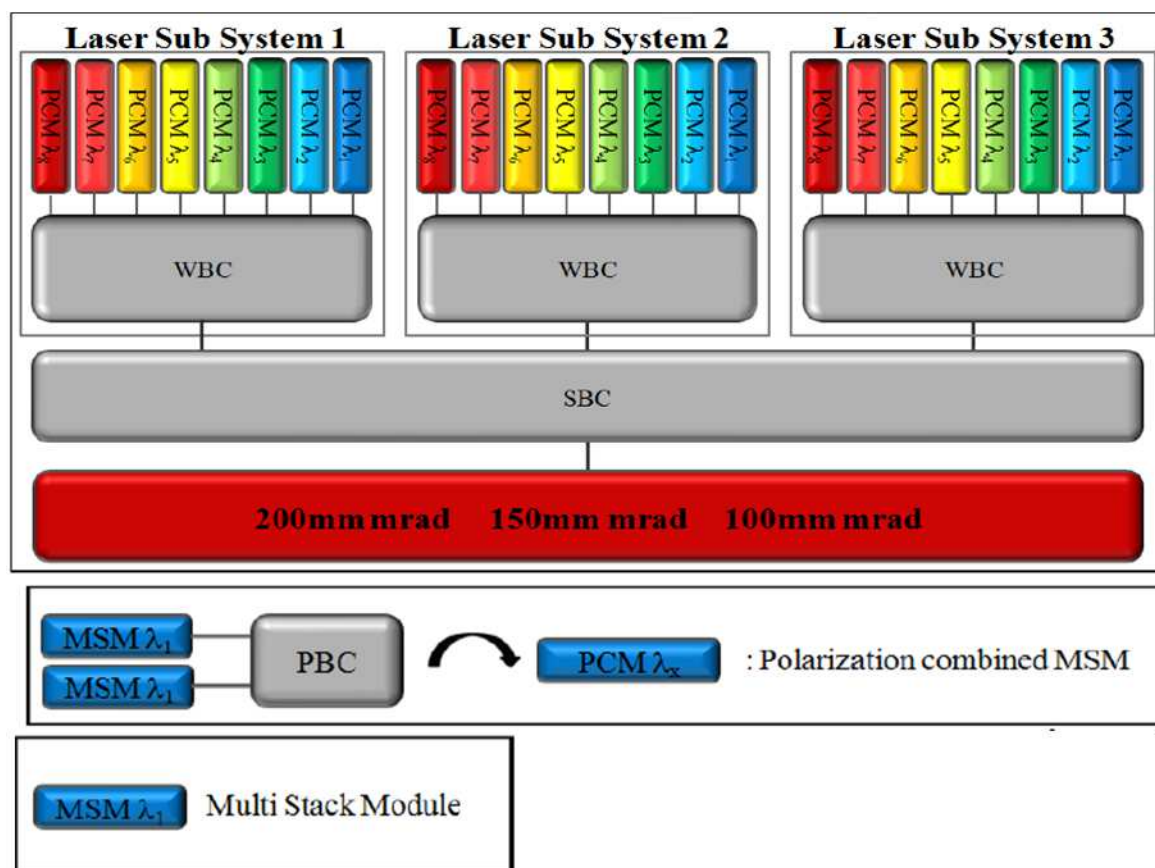


Obr. 37 Schéma laserové diody [10]



Obr. 38 Formování laserového paprsku [5]

Vytvořené zařízení je navázáno do optického vlákna, což byl při vývoji této technologie problém, neboť výstupní energetický profil svazku nebyl kruhový. Dnes je již tento úkol dostatečně zvládnut a vytvořené zařízení je dopravováno do místa aplikace optickým vláknem bez větších problémů. Ukázka energetického profilu diodového laseru je ukázána na obrázku 40.

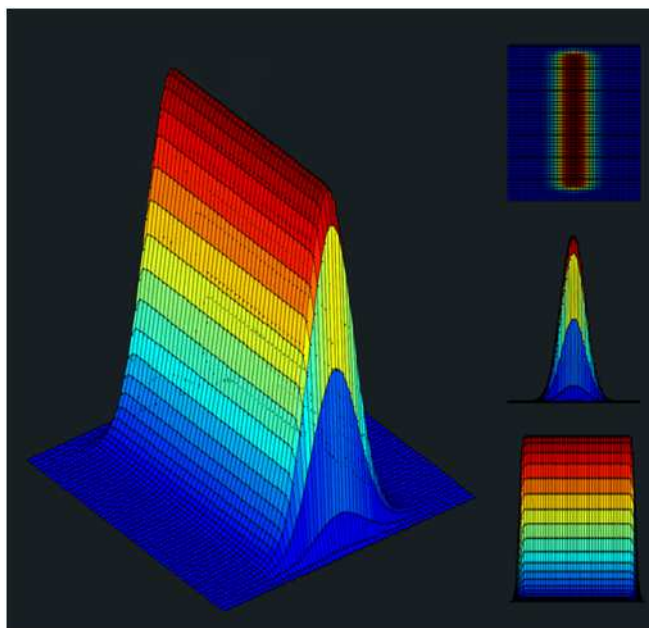


Obr. 39 Princip modulární kombinace paprsku [77]

legenda: *MSM* Multi Stack Module – více zásobníkový modul
PBC Polarization Beam Combining – kombinace polarizovaného paprsku
WBC Wavelengths Beam Combining – kombinace vlnových délek paprsku
SBC Spectral Beam Combining – spektrální kombinace paprsku
Laser Sub Systém – podsystém laseru
 Jednotka $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ = BPP = Beam Parameter Product uvádí kvalitu výstupního paprsku

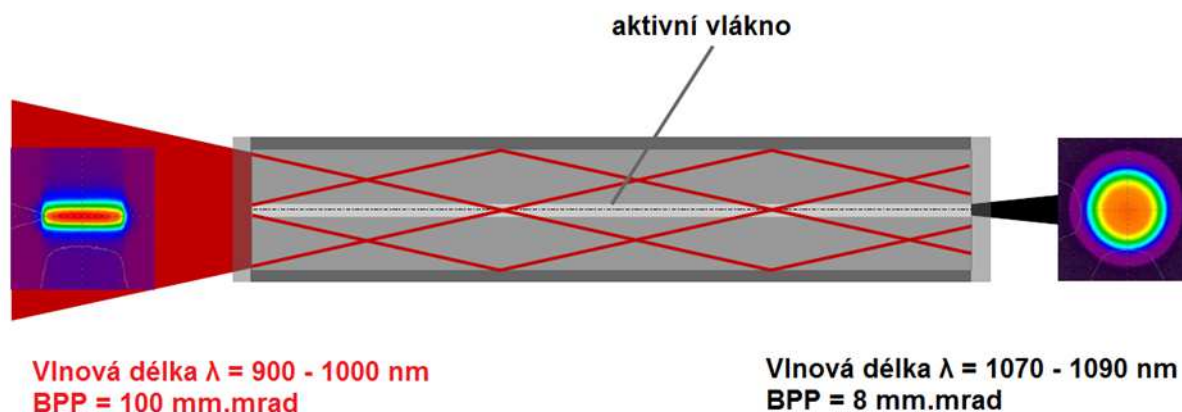
Výhodou těchto zařízení je jejich vysoká účinnost 50–60 %. Předností je také téměř nulová údržba těchto zařízení. Další výhodou je nízká hmotnost a vysoká kompaktnost, což umožňuje umístění diodových laserů přímo na ramena robotických manipulátorů. Díky tomu odpadá povětšinou složité vedení záření od zdroje k obrobku. Tohoto se využívá např. pro svařování složitých svarů v automobilovém průmyslu. Nevýhodou může být nízká kvalita výstupního paprsku. Nízkou kvalitou je myšlena vysoká rozbíhavost, která znemožňuje zaostřit paprsek do bodu.

Díky svým vlastnostem je diodových laserů užíváno pro průmyslové aplikace, kde není potřeba vysoké kvality výstupního paprsku, tedy například pro kalení, povrchové úpravy, svařování, navařování. Dále jsou tyto lasery hojně využívány k optickému čerpání pevnolátkových laserů. Polovodič arsenid gallitý (GaAs) generuje záření s vlnovou délkou 808 nm, které je hojně využíváno pro buzení Nd:YAG laserů. Dále mohou být užívány ke kontrole jakosti při výrobě polovodičů a také v lékařství – dermatologii. S diodovými lasery je možné se setkat nejenom v průmyslových aplikacích, ale také v běžném životě, neboť jsou užívány ke čtení a zápisu v CD/DVD mechanikách počítačů nebo také jako laserová ukazovátka na tabuli používaná ve škole nebo jako zaměřovače zbraní.



Obr. 40 Energetický profil paprsku diodového laseru [5]

Výrobce diodových laserů Laserline před nedávnem představil na trh upravený typ laseru, který kombinuje diodový a vláknový laser. Jak je vidět na obrázku 41, záření z jejich diodového laseru je navázáno do aktivního vlákna, které je stejné jako u vláknových laserů. Tím se zlepší vlastnosti laseru, hlavně kvalita a módomá struktura výstupního záření. Změní se také vlnová délka.



Obr. 41. Modifikovaný tvar paprsku diodového laseru [77]

5.2.6 Porovnání jednotlivých laserů [52][82]

Tab. 2 Porovnání jednotlivých laserů

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon / Energie	Aplikace	Údržba	Životnost [h]
Nd:Yag	1 064	LD	~ 7 %	CW	až 6kW	Ř, S	Ano	~ 10 000
				pulzní	~ mJ@ns(~100W)	Z, G		
		Lampy	~ 3 %	pulzní	~ J@ms(~600W)	S, V		~ 1000
CO₂	10 600	RF	~10 %	CW / pulzní	10 - 250W	Z,G,Ř nk	Ano	~ 20 000
					až 5kW(SLAB)	Ř, S		
		EL	~ 25 %		až 20kW(průtočné)	Ř, S		
Diskový	1 070	LD	~15 %	CW	až 16kW	Ř, S	Ano	~ 10 000
Vláknový	1 070	LD	~ 30 %	CW	až 80kW	Ř, S	Ne	~ 100 000
				QCW	~ J@ms(~1,2kW)	Z,G,M		
				pulzní	~ mJ@ns(~100W)	Z,G,M		
Diodový	808 - 980	EL	~ 60 %	CW	až 10kW	S,K,N	Ne	~ 15 000

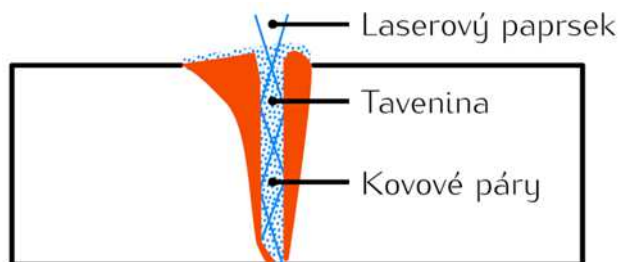
Legenda: U pulzních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce), CW - kontinuální, QCW - kvazi kontinuální, Ř - řezání, S - svařování, Z - značení, G - gravírování, K - kalení, N - nanášení vrstev, M - mikroobrábění, nk - nekovů, LD - laserové diody, RF - radiofrekvenčně, El. - elektricky (výboj, proud).

4.3 Průmyslové využití laserů

Lasery se užívají v mnoha odvětvích lidské činnosti, od výpočetní techniky, přes lékařství, až po průmyslové využití, kterým se budou zabývat následující kapitoly. Základním průmyslovým využitím laseru je vrtání, řezání, svařování, kalení, značení a navařování.

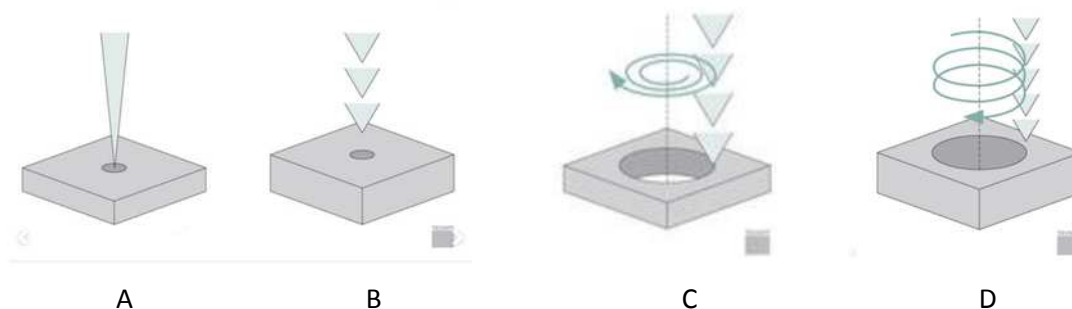
4.3.1 Vrtání [29] [30] [80]

Principem technologie laserového vrtání je vytvoření vysoké teploty k roztavení a vypaření materiálu v místě vrtání. Je užíváno krátkých impulsů o vysoké hustotě energie v řádu 10^8 W/cm^2 . Při vyšší energii impulsu se materiál taví a odpařuje rychleji, než při nižší. Během odpařování vznikne ve vrtaném otvoru vysoký tlak par kovů, který má za následek vytlačení materiálu z místa vrtání. Při průniku paprsku do materiálu je vytvořena dutina, která se nazývá keyhole, viz obrázek 42. Uvnitř této dutiny dochází k mnohočetným odrazům záření. To působí náhlý vzrůst absorpce záření a prohloubení otvoru.



Obr. 42 Laserové vrtání [29]

Obrázek 43 nám ukazuje různé strategie vrtání. První je vrtání jednotlivými pulsy, kde otvor je vytvořen jediným pulsem. Takto lze vytvořit za krátký čas velké množství otvorů. Druhým typem je nárazové vrtání, kde otvor je vytvořen více impulsy, o kratší době trvání a nižší energii pulzu. Tímto lze vytvořit hlubší a přesnější díry. Třetím typem je trepanační vrtání. Pomocí nárazového vrtání je nejprve vyvrtán počáteční otvor, který je poté zvětšen tím, že laser jezdí nad obrobkem v kruhových drahách, nejvíce materiálu je vypuzováno směrem dolů. Posledním typem je spirálové vrtání, kde laser se prohlubuje do materiálu po spirálové dráze. Velké množství materiálu odchází směrem nahoru. Takto je možné vytvářet hluboké a velké otvory o vysoké kvalitě a přesnosti.



Obr 43 Druhy laserového vrtání [80]

*Legenda: A Vrtání jednotlivými pulsy
B Nárazové vrtání
C Trepanační vrtání
D Spirálové vrtání*

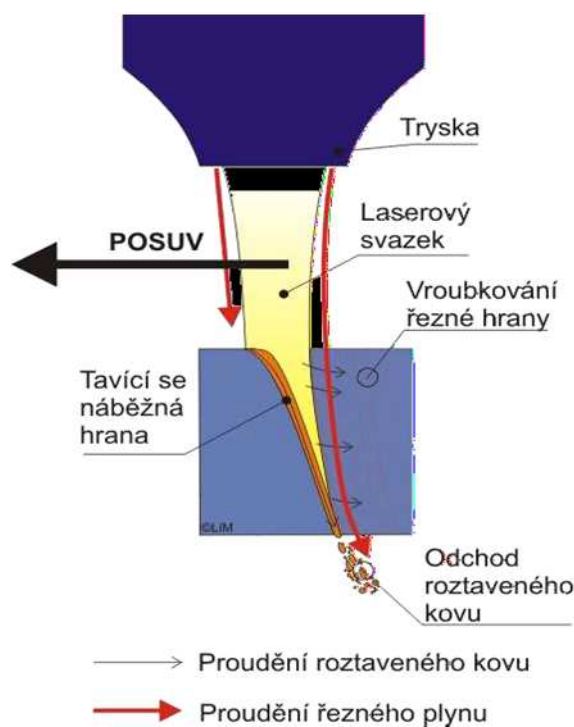
Pro vrtání jsou užívány nejčastěji výkonné pulsní Nd:YAG lasery nebo vláknové lasery fokusované do malého průměru. Výhodou vrtání pomocí laseru je to, že mohou být vytvořeny díry o velmi malých průměrech, v řádu desetin milimetru. Další výhodou může být to, že otvory jsou vytvářeny bezdotykově. Existuje možnost vrtání pomocí pikosekundových laserů, kdy doba impulsu je v řádu pikosekund, čímž nedojde k natavení materiálu, ale rovnou k jeho sublimaci. Vznikne tak otvor, přičemž obrobek zůstane studený. Laserovým vrtáním lze obrábět nejen kovy, ale i plasty, dřevo, kevlar a keramiku. Ukázky laserového vrtání jsou vidět na obrázku 44.



Obr. 44 Ukázky laserového vrtání [19]

4.3.2 Řezání [8] [26] [53] [58] [59] [80]

Nejrozšířenější technologií používající laserovou techniku je laserové dělení materiálu. Jedná se o tepelné dělení materiálu, které využívá vysokou energii svazku dopadající na povrch materiálu. Velikost plošné energie se pohybuje v rozmezí $10^7 - 10^9 \text{ W/cm}^2$. Rychlost ohřevu dosahuje 10^6 K/sec , což způsobí, že difuze tepla z místa dopadu je menší, než ohřev. Tímto vznikne spára roztaveného kovu, ve které dochází k tavení a odpařování materiálu. Roztavený kov je potřeba ze spáry dostat pryč. To je prováděno řezným plynem, který zároveň ochraňuje fokusační optiku. Schéma řezání je na obrázku 45. Pro řezání jsou používány výkonné CO_2 lasery, diskové a vláknové lasery, které mohou být umístěny na 2D plotterových nebo 3D robotických systémech. Vedení paprsku u CO_2 laseru je obtížné, proto se používají převážně pro 2D řezání. Naopak vedení paprsku optickým vláknem u vláknového laseru umožňuje použití na 3D robotech. Vlnová délka a s ní spojená absorpce u vláknových laserů je vhodnější pro řezání hliníkových slitin, než u CO_2 laseru. Současné možnosti technologie řezání jsou rozmanité. Společnost Trumpf představila laser TruLaser 5000, který zvládne řezat až tloušťku 50 mm u nerezového plechu. Druh přídavného plynu určuje typ řezání. Existují několik druhů laserového řezání, a to:



Obr. 45 Schéma laserového řezání [59]

- **Sublimační řezání**

Jedná se o řezání materiálu, při kterém se materiál z místa řezu odpařuje. Nedochozí k natavení materiálu. Aby se materiál začal odpařovat, je nutná vysoká plošná energie svazku. Kovové páry jsou z místa řezu vyfukovány pomocí plynu. Nejčastěji se jedná o plyny argon a dusík, zabráňující oxidaci povrchu řezu. Sublimačním řezáním vzniká velmi kvalitní řez bez otřepů.

- **Tavné řezání**

Roztavený kov je ze spáry vyfukován proudem inertního plynu. Tavné řezání nepotřebuje tak velké množství energie, jako sublimační řezání. Je zde vysoká spotřeba řezného plynu. Spotřeba dusíku je přibližně 50 Nm³/hod, při tlaku 15 bar. Tavné řezání je vhodné pro nerezové ocele a barevné kovy.

- **Oxidační řezání – řezání plamenem**

Jedná se o druh řezání, kdy namísto inertního plynu je používán kyslík. Použití kyslíku způsobí exotermickou reakci, která dodá řezání energii a snižuje potřebný výkon laseru. Rychlosti oxidačního řezání jsou přibližně dvakrát tak vyšší, než u tavného a sublimačního. Tento druh řezání je vhodný pro konstrukční uhlíkaté ocele z důvodu vysoké rychlosti řezání. Vzniká řez s okujemi, který je pro většinu běžných aplikací dostatečný.

- **Remote cutting**

Jedná se o řezání, při kterém je dvouosá skenovací hlava umístěna vysoko nad obrobkem (1 až 2m). Před touto skenovací hlavou je dynamický expandér, pomocí kterého je zajištěno optimální nastavení velikosti řezného bodu. Usměrnění paprsku po řezné ploše je zajištěno vychylováním paprsku dvěma galvoskenery ve skenovací hlavě. Skenovací hlava při procesu řezání zůstává na jednom místě. Remote cutting je převážně používán pro nekovové materiály, jako jsou papír, tkaniny a plasty.

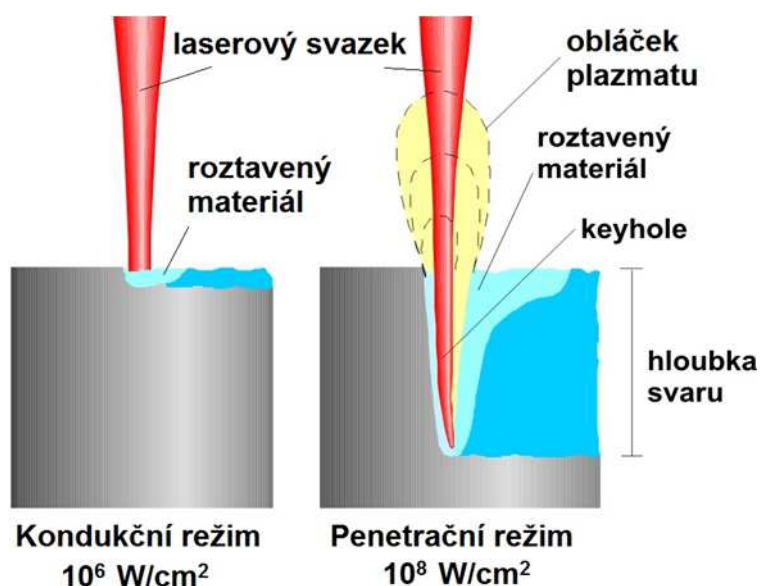


Obr. 46 Ukázka laserového řezání [19]

4.3.3 Svařování [19] [60] [65] [66]

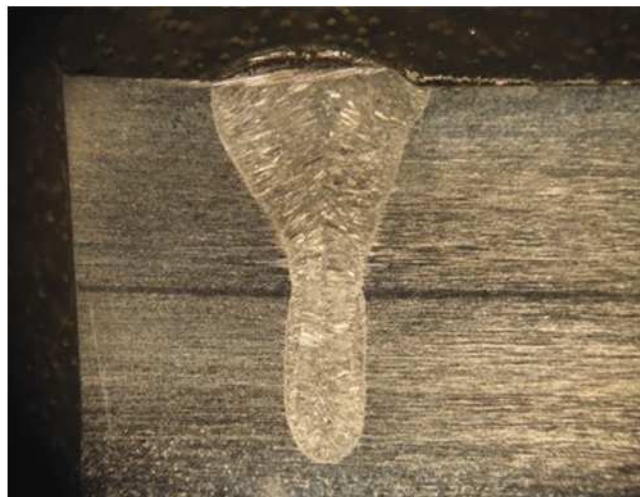
Svařování lasem se díky rozvoji laserové techniky velmi rychle začalo uplatňovat v průmyslové praxi. Pro vytvoření svarového spoje existují dva režimy laserového paprsku dopadajícího na povrch. Tyto režimy jsou na obrázku 47.

Kondukční režim nastává tehdy, kdy se materiál taví vedením a absorpcí tepla z laserového paprsku. Nepochází téměř k odpařování kovu. Pro kondukční svařování je používáno plošné hustoty energie menší, než 10⁶ W/cm². Šířka svaru je vždy větší než hloubka svaru. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je větší, než u penetračního režimu. Tento režim je vhodný pouze pro svary o malé hloubce průvaru. Výhodou kondukčního režimu je vysoká rychlost svařování.



Obr. 47 Režimy laserového svařování [60]

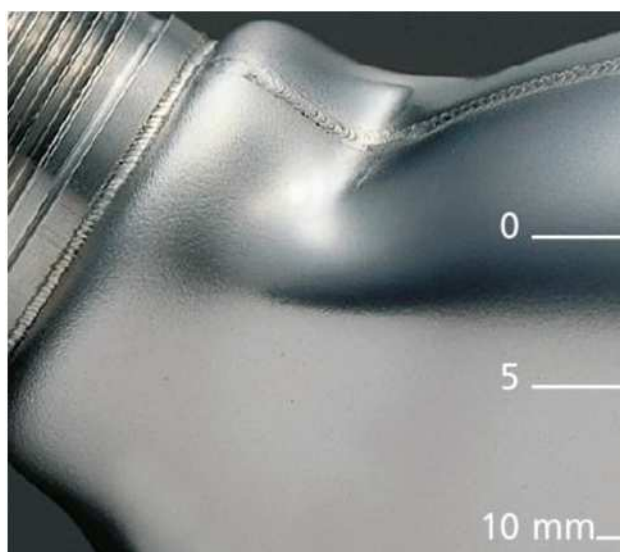
Penetračního režimu dosáhneme zvyšováním plošné hustoty energie nad 10^6 W/cm^2 . Tehdy se začnou tvořit nad roztaveným materiálem páry kovu. Interakcí par kovů s laserovým paprskem vzniká obláček plazmatu. Vlivem vysoké koncentrace energie je rychlost ohřevu o mnoho řádů vyšší než odvod tepla, to má za efekt vznik kapiláry tzv. keyhole. Tato kapilára je naplněna parami kovů o vysoké teplotě, kde stěnu tvoří roztavený materiál. V keyhole dochází k mnohonásobné reflexi záření, která zvyšuje absorpci a tím je umožněno proniknutí paprsku více do hloubky materiálu, což má za následek hluboké provařování materiálu. Ukázka penetračního svaru je na obrázku 48. Výhodou svařování pomocí keyhole je to, že umožňuje svařovat tupé spoje různých tlouštěk, bez předchozí přípravy hrany svaru. Hloubka svaru může být až desetkrát větší, než šířka svaru. Penetrační režim umožňuje vytvářet u oceli až 25mm hluboké svary.



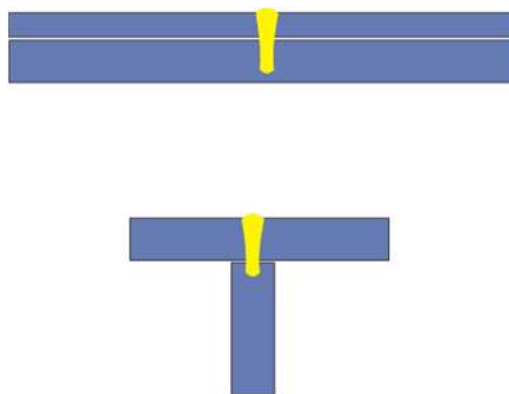
Obr. 48 Výbrus penetračního svaru [27]

Vnášení energie do materiálu je příznivě ovlivňováno použitím ochranných plynů (Ar, N₂, CO₂ nebo He). Tyto plyny pomáhají stabilizovat absorpci plazmatu, což způsobí, že energie paprsku může skoro celá vniknout do materiálu a zvýšit tak efekt hlubokého provaření. Ochranné plyny zároveň také chrání chladnou svar před oxidací.

Výhodou laserového svařování je vysoká kvalita svaru, vysoká rychlost svařování, efektivita, dále pak možnost vytvářet svary s vysokou štíhlostí a nízkým vneseným teplem, možnost svařování bez přídavného materiálu. Na obrázku 49 je ukázka jemného svaru nádoby. Laserové svařování umožňuje tvořit průvarové svary (přepletováním), které nelze vytvořit konvenčními metodami svařování, viz obrázek 50. Nevýhodou laserového svařování je vysoká pořizovací cena zařízení a složité přípravkování. Proto je laserové svařování vhodnější pro sériovou výrobu. Pro svařování kovových materiálů jsou používány plynové CO₂ lasery a pevnolátkové lasery, diodový, vláknový, diskový, které jsou výhodnější, díky své vlnové délce a snížené absorpci záření.



Obr. 49 Ukázka laserového svaru [22]



Obr. 50 Průvarové svary [65]

4.3.4 Značení, gravírování a mikroobrábění [20] [28] [36] [37] [86]

Nedílnou součástí laserových technologie je značení. Jedná se bezdotykové značení, při kterém laserový paprsek pomocí vneseného tepla modifikuje (změna struktury povrchu) nebo odpařuje část povrchu o určité tloušťce, čímž vzniká požadovaný motiv. Velkými výhodami této technologie jsou vysoká rychlost značení (až 8 m/s) při nízkých provozních nákladech (příkon ve stovkách wattů). Laserové značení vyniká trvalostí a odolností motivu. Jedná se o velmi flexibilní metodu. Při tomto značení není používáno žádných přídavných materiálů, inkoustů, barev atp. Je tedy ekologické. Nedochází zde k mechanickému znehodnocení struktury povrchu součásti. Velkou výhodou je, že neexistuje tvarové omezení výsledného motivu. Značení pomocí laseru je rozšířené nejen v průmyslu, ale také v reklamě a designu. Značit lze kovové i nekovové materiály jako ocel, sklo, hliník, dřevo, plast, kůži, papír, keramiku. Pro značení jsou používány plynové CO₂ lasery a pevnolátkové lasery. Vyšší vlnová délka u CO₂ laserů je vhodná pro značení organických materiálů (kůže, dřevo). Pevnolátkové lasery jsou vhodné pro značení kovových a plastových materiálů.

Gravírování je v principu to stejné jako značení. Rozdíl je ten, že u gravírování jsou používány větší výkony, které jsou potřebné pro vypařování většího objemu materiálu (tloušťky až 10 mm).

V posledních letech se rozvíjí také laserové mikroobrábění, které je využíváno v oblastech nástrojářství, elektroniky, polovodičové techniky, fotoniky a medicíny. Při mikroobrábění je využíváno ultra krátkých pulsů (pikosekundy), a pro lepší absorpci záření také nižších vlnových délek (355 nm a 532 nm). Každý impuls vytváří prohloubeninu o průměru 10 μm a hloubce několik mikrometrů. Výhodou je rychlost procesu, řízený úběr materiálu, nízká tepelně ovlivněná oblast a vysoká přesnost obrábění. Další výhodou je bezkontaktnost a spolehlivost při sériové výrobě.

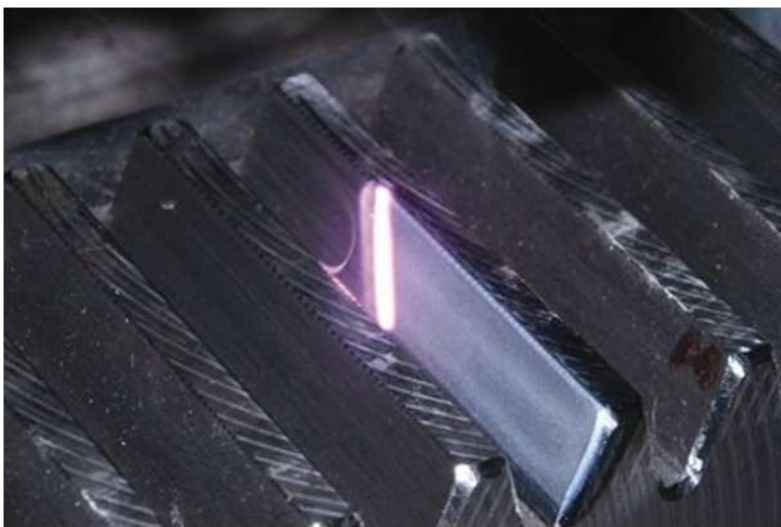
4.3.5 Kalení [23] [24] [79]

Principem laserového kalení je intenzivní ohřev povrchu materiálu pomocí laserového paprsku, krátké výdrži na kalící teplotě a následném rychlém ochlazení, kdy vnesené teplo je poté vstřebáno do základního materiálu. Laserové kalení je druh zušlechťování povrchu materiálu. Laserem lze kalit všechny kalitelné materiály (oceli s obsahem uhlíku větším než 0,2%). Při povrchovém kalení je zvýšena tvrdost povrchové vrstvy do hloubky 0,1 - 1,5 mm. Čím větší má být hloubka prokalení, tím větší objem materiálu musí být v okolí kalící oblasti. U laserového kalení není používána ochlazovací lázeň jakou konvenčních metod, ale je používán tzv. samoochlazovací efekt. Pro tuto aplikaci je nutná speciální kalící hlava, která paprsek nezaostřuje do bodu, ale do plošky o stejné hustotě záření. Pro kalení větších plošek je možno použít vychylovací optiku, která pohybuje paprskem velmi rychle do stran a umožňuje tak vytvořit až 60 mm širokou stopu. Protože je vnesené teplo malé, nedochází k deformacím a vzniku trhlin. Laserové kalení je přibližně desetkrát energeticky méně



Obr. 51 Ukázky laserového značení [28]

náročné než, indukční kalení. Pro kalení jsou používány vláknové a diodové lasery o relativně malých výkonech pracující v kontinuálním režimu. Dále je možné použít také CO₂ laser, zde je ale nutné jej opatřit speciální prizmatickou čočkou, aby bylo zajištěno zaostření paprsku do plošky. Výhodou laserového kalení je, že je možné kalit špatně přístupná místa, jako je na obrázku 52 kalení ozubení hřebenu. Další výhodou je výborná kvalita kalené vrstvy, nízké tepelné zatížení okolního materiálu, minimální deformace a nízká oxidace povrchu. Jedná se o velmi efektivní metodu.



Obr. 52 Ukázka laserového kalení [79]

4.5.6 Navařování

Laserové navařování je velice progresivní způsob vytváření nových povrchů. Tato metoda je podrobně popsána v kapitole 3.

5. VYHODNOCOVÁNÍ VLASTNOSTÍ NAVAŘENÝCH VRSTEV

5.1 Zkoušky tvrdosti [85]

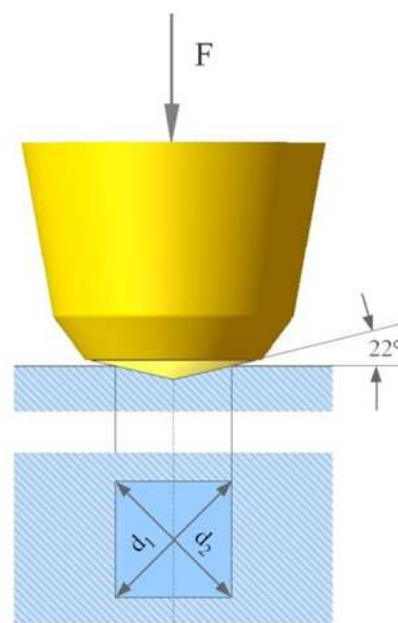
Tvrdost je jednou z nejčastěji měřených vlastností materiálu. Tvrdost lze definovat, jako odpor proti vnikání cizího, tvrdšího tělesa. Cílem je zjištění vhodnosti daného materiálu pro různé aplikace. Z tvrdosti lze také vyvozovat další mechanické vlastnosti, jako například mez kluzu a mez pevnosti. Tvrdost lze měřit několika různými metodami. Základní rozdělení je na statické a dynamické metody. Dalším možným rozdělením je měření makro a mikrotvrdosti, kde základním rozdílem je ve velikosti vtláčovací síly.

Nejčastěji využívané dynamické – plastické metody měření tvrdosti jsou pomocí Poldiho nebo Baumanna kladívka. U Poldiho kladívka je vtisk porovnáván s etalonem, u kterého je známo chemické složení a tvrdost. U Baumanna kladívka je vtisk vytvořen pomocí stlačené pružiny, která působí na vnikající kuličku. Tyto dvě metody jsou vhodné pro velké a těžko přenosné součásti. Další možností dynamických měření tvrdosti je pomocí Shoreho skleroskopu nebo duroskopu, kde se jedná o dynamicko – elastické metody, kde se využívá elastických vlastností materiálu k vyhodnocení tvrdosti.

Běžně používanými statickými metodami jsou měření tvrdosti pomocí Brinnela, Rockwella, Vickerse a Knoop. Principem těchto metod je vtláčování předem definovaného tělesa do měřeného materiálu a následné vyhodnocení vtisku. Podrobněji bude popsána zkouška podle Vickerse, neboť byla tato metoda použita v experimentu. Měření podle Vickerse je jednoduché a velmi často užívané.

5.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [84] [85]

Podstatou je vtláčování tělesa do měřeného materiálu. Vnikající tělesko je pravidelný čtyřboký jehlan, o daném vrcholovém úhlu $\alpha = 136 \pm 0,5^\circ$, který je vtláčován do materiálu po určitou dobu při určité zatěžující síle. Zatěžující síla je volena podle materiálu měřené součásti a je volena v rozmezí od 10 do 1000 N. Doba zatěžování se pohybuje od 10 do 180 s. Po odlehčení se na vzorku měří velikosti úhlopříček vtisku, pomocí kterých je následně určena výsledná tvrdost. Na obrázku 53 je vidět princip tohoto měření. Pomocí vztahu 1.3 je výsledná tvrdost určena jako poměr zatěžující síly a plochy vtisku. Povrch měřeného materiálu musí být hladký, rovný a bez okujů. Díky pestrosti používaných zatěžujících sil, je měření podle Vickerse možno použít pro, měkké konstrukční oceli i pro tvrdé kalené materiály. Výhodou této metody je vysoká přesnost naměřených hodnot. Vtisky nejsou velké. Výsledné hodnoty tvrdosti jsou minimálně závislé na hodnotě zatížení. Využívá se hlavně pro měření tvrdosti velmi tvrdých, homogenních materiálů, dále pro hodnocení cementačních a nitridačních vrstev. Zkouška tvrdosti podle Vickerse se řídí normou ČSN EN ISO 6507-1.



Obr. 53 Měření tvrdosti podle Vickerse [84]

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1.3)$$

kde: F = zatěžující síla [N]

d = aritmetický průměr délek úhlopříček d₁ a d₂ [mm]

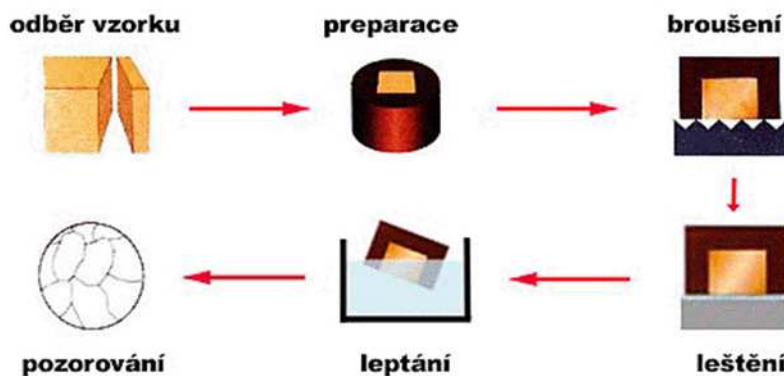
α = vrcholový úhel jehlanu [°]

5.2 Metalografie [34] [35] [63]

Metalografie je nauka zabývající se pozorováním vnitřní stavby kovů a slitin. Cílem je zviditelnění struktury materiálu a její studium pomocí mikroskopu. Umožňuje nám určit souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho mechanickými vlastnostmi. Dále je možné kontrolovat vlastnosti materiálu, již při jeho výrobě. Metalografie umožňuje nalézt příčiny vad materiálu u defektních výrobků nebo nalézt příčiny selhání různých zařízení. Rozlišujeme vyhodnocení vzorku na makro a mikro úrovni. U makrostruktury nás při vyhodnocování nezajímá vnitřní struktura materiálu, ale hlavně geometrie, jako např. velikost průvaru u svařování, hloubka protavení materiálu, velikost tepelně ovlivněné oblasti, místo vzniku trhliny apod. Makrostrukturu lze běžně pozorovat okem nebo lupou, popř. mikroskopem o malém zvětšení. Naopak u mikrostruktury nás zajímá vnitřní uspořádání, například vyhodnocení velikost a tvaru zrn, fázové složení, poměrné rozložení strukturních složek, apod. Mikrostrukturu lze vyhodnotit pomocí různých mikroskopových metod.

5.2.1 Postup přípravy vzorku [34] [35]

Na obrázku 54 je ukázán postup přípravy vzorku pro pozorování struktury, tzv. metalografického výbrusu. Rovný a hladký výbrus je nejvhodnější pro pozorování z důvodu nejlepšího odrazu světla. Postup přípravy vzorku je následující. Nejprve je nutné vzorek vhodně odebrat ze součásti. Odebíraný vzorek musí charakterizovat studovanou součást. Odběr vzorku je prováděn pomocí různých metod, např. řezání, vrtání, rozbrušování, frézování, atd. U těchto metod vzniká při odebírání vzorku teplo, jež může nepříznivě ovlivnit studovanou strukturu. Díky vnesenému teplu může vzniknout modifikovaná povrchová vrstva, tzv. Beilbyho vrstva. Nebo může dojít k lokálnímu natavení materiálu. Tomuto se snažíme vyhnout přidáváním chladicích kapalin při dělení. Po odebrání vzorku následuje jeho preparace, jež usnadňuje práci se vzorkem. Vzorek je možné zalít do válcového tvaru pomocí umělé hmoty (za tepla) nebo pryskyřice (za studena). Poté následuje broušení vzorku. Broušení vzorku je prováděno z důvodu zarovnání vzorku do roviny. Broušení je rozlišováno na ruční a mechanizované. Při broušení také vzniká nežádoucí Beilbyho vrstva. Po broušení následuje leštění, při kterém už nedochází k úběru materiálu, ale jeho cílem je získání kvalitního výbrusu, na kterém nejsou vidět žádné stopy od předchozí přípravy vzorku. Existují tři druhy leštění, mechanické, elektrolytické a chemické. Po broušení lze již vyhodnocovat makrostrukturu vzorku. Pokud je potřeba většího zviditelnění struktury, tak následuje další operace leptání. Struktura kovu je po mechanickém broušení a leštění zakryta tvářenou Beilbyho vrstvou, kterou je nutné odstranit. Leptání je prováděno ponořením vzorku do vybraného leptacího činidla. Pro každý materiál se hodí jiné leptadlo. Každé leptání je prováděno pro určitou dobu, při dané konkrétní teplotě. Rozlišujeme dva druhy leptání. Plošné leptání (k rozlišení jednotlivých zrn) a leptání na hranicích zrn.



Obr. 54 Příprava metalografického výbrusu [34]

Po odebrání vzorku následuje jeho preparace, jež usnadňuje práci se vzorkem. Vzorek je možné zalít do válcového tvaru pomocí umělé hmoty (za tepla) nebo pryskyřice (za studena). Poté následuje broušení vzorku. Broušení vzorku je prováděno z důvodu zarovnání vzorku do roviny. Broušení je rozlišováno na ruční a mechanizované. Při broušení také vzniká nežádoucí Beilbyho vrstva. Po broušení následuje leštění, při kterém už nedochází k úběru materiálu, ale jeho cílem je získání kvalitního výbrusu, na kterém nejsou vidět žádné stopy od předchozí přípravy vzorku. Existují tři druhy leštění, mechanické, elektrolytické a chemické. Po broušení lze již vyhodnocovat makrostrukturu vzorku. Pokud je potřeba většího zviditelnění struktury, tak následuje další operace leptání. Struktura kovu je po mechanickém broušení a leštění zakryta tvářenou Beilbyho vrstvou, kterou je nutné odstranit. Leptání je prováděno ponořením vzorku do vybraného leptacího činidla. Pro každý materiál se hodí jiné leptadlo. Každé leptání je prováděno pro určitou dobu, při dané konkrétní teplotě. Rozlišujeme dva druhy leptání. Plošné leptání (k rozlišení jednotlivých zrn) a leptání na hranicích zrn.

5.2.2 Energiově disperzní spektroskopie – EDS [11] [42]

Během experimentu byla použita k vyhodnocení složení navařované vrstvy metoda EDS. Jedná se o typ elektronové mikroskopie, jež vyhodnocuje charakteristické rentgenové záření, které vzniká po dopadu primárních elektronů na povrch vzorku. Používá se pro analýzu chemického složení. Metoda dokáže zjistit, jaké prvky a v jakém množství se nacházejí ve vzorku. Každý prvek má jinou energii rentgenového záření, a tím je přesně určen. Podle typu a množství rentgenového záření je určen druh a množství prvků ve vzorku. EDS je rychlou (do 100 s) a přesnou (desetiny procent) analýzou prvků ve vzorku. EDS je někdy označováno jako EDX.

5.3 Zkoušky opotřebení [7] [44] [48]

Tenké vrstvy mohou být testovány podle vlastností, které se od těchto vrstev očekávají. Většinou se jedná o vrstvy, které odolávají opotřebení. Existuje několik základních mechanismů opotřebení:

- **Adhezivní**

Adheze = přilnavost. Při adhezivním opotřebení se oddělují a přemísťují částice materiálu mezi dvěma stykovými plochami. V důsledku relativního pohybu ploch dochází k porušování povrchových vrstev materiálu. Při působení velkých sil na kontaktních plochách dochází ke vzniku plastické deformace a mikrospojů na výstupcích površích. Poté při dalším pohybu dochází k jejich utržení a vzniku opotřebení površích. Ukázka adhezivního opotřebení čepu je na obrázku 55.



Obr. 55 Adhezivní opotřebení [7]

- **Abrazivní**

Abraze = obrušování. Při abrazivním opotřebení dochází k oddělování částic z povrchu součásti pomocí tvrdých mikročástic druhého tělesa, nejčastěji se jedná o tvrdé karbidy a nitridy. Projevem abrazivního opotřebení jsou rýhy na povrchu součásti. Ukázka abrazivního opotřebení pístu spalovacího motoru je na obrázku 56.



Obr. 56 Abrazivní opotřebení [7]

- **Únavový**

Jedná se o střídavé zatěžování a odlehčování povrchu součásti, při kterém zatížení není větší, než mez kluzu materiálu. Postupně dochází ke vzniku podpovrchových trhlin, které vedou k porušení, odlupování povrchu součásti. Kontaktní únava se projevuje v místě styku součástí, které jsou opakovaně vystaveny zatížení. Projevem je tzv. pitting, tedy vydrolování materiálu z povrchu při současném vzniku důlků. Ukázka pittingu zdvihátka ventilu je na obrázku 57.



Obr. 57 Únavové opotřebení [7]

- **Erozivní**

Tento druh opotřebení je způsoben dopadem kapalných nebo plynných částic na povrch. Pokud má částice dostatečnou rychlost, energii způsobí vytlačení nebo oddělení materiálu z plochy. Nebezpečný je hlavně turbulentní proud částic, který způsobí velké poškození součásti a zvýší korozní rychlost.

- **Kavitační**

Kavitace je způsob opotřebení, který vzniká na povrchu součástí, pracujících v kapalném prostředí. Tento proces charakterizuje oddělování částic kovu z funkční plochy součásti. K tomuto dochází v důsledku zániku kavitačních bublin, vznikajících v kapalině. Ke kavitaci dochází v proudící kapalině, v místě, kde se zvyšuje rychlost proudění kapaliny a zároveň v místech, kde se sníží tlak kapaliny. Bubliny jsou vyplněny parou (plynem), která ulpí na povrchu kovu. Tyto bublinky poté zaniknou implozí. V okamžiku zániku bubliny vzniká uvnitř kapaliny rázová vlna, která působí na povrch kovu ničivým účinkem. Vznikají velmi malé oblasti, kde tlak kapaliny dosahuje řádu 10^3 MPa a teploty dosahují řádu stovek stupňů. Negativními důsledky kavitace jsou rázy, otřesy a hluk ve vodních strojích, které způsobují snížení účinnosti a životnosti stroje.

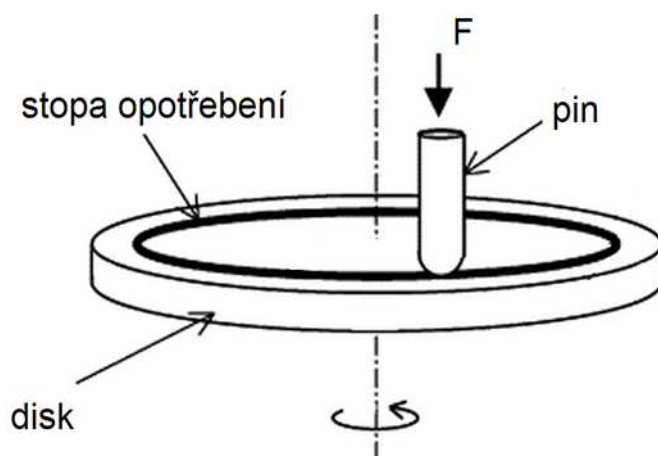
- **Korozivní**

Koroze představuje chemickou nebo elektrochemickou reakci, při které dochází k porušování povrchu součásti pomocí plynných nebo kapalných látek.

Tyto mechanismy opotřebení se mohou vzájemně doplňovat a kombinovat. Bylo vyvinuto mnoho metod testování těchto vrstev. Z důvodu velkého množství metod, které by přesáhly rozsah této práce, budou v následujícím textu popsány jen dvě základní metody vyhodnocování vlastností tenkých vrstev.

5.3.1 Metoda „Pin-On-Disc” [43] [74] [75]

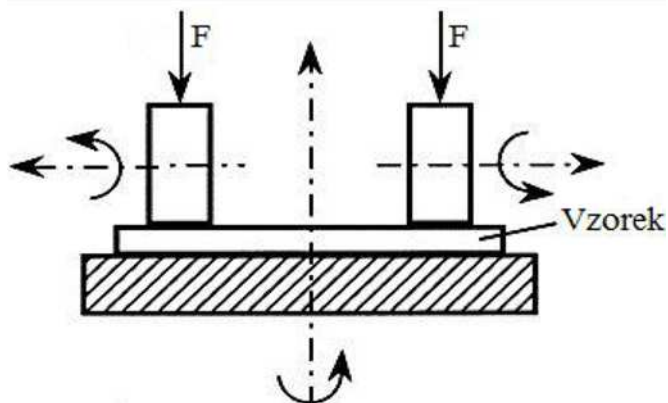
Tato metoda je využívána pro měření tribologických vlastností vrstev. Principem je vtlačování pevného tělíska (pinu) tvaru kuličky daného materiálu do zkušebního tělesa (disku), které se otáčí. Vtlačované těleso je umístěno na pružném rameni. Velikost vtlačovací síly se pohybuje od 0,25 do 60 N, otáčky disku jsou voleny v rozmezí 10 až 500 min^{-1} . Princip je ukázán na obrázku 58. Zařízení, na kterém je tato zkouška prováděna, se nazývá tribometr. Součástí zařízení je třecí snímač. Koeficient tření mezi vzorkem a kuličkou je určen během testu měřením odchylky elastického ramene. Během procesu jsou monitorovány okolní podmínky. Rozsah opotřebení a průběh koeficientu tření závisí na použitém materiálu desky a pinu, na přítomnosti mazací vrstvy. Dále pak na zatěžující síle a relativní rychlosti pohybu kuličky a vzorku. Pak také výsledek zkoušky závisí na teplotě vzorku a okolním prostředí (vlhkost, teplota). Vypovídající hodnota experimentu bude vysoká, jestliže budou použity vysoké rychlosti a vysoké zatížení. Pro vzájemné porovnání jednotlivých vzorků, je nutné dodržet shodné podmínky při experimentu (zatížení, rychlost otáčení vzorku, teplotu).



Obr 58. Metoda Pin-On-Disc [43]

5.3.2 Metoda Abrasion-Wheel-Test [1] [71] [69]

Tato metoda se využívá ke zjištění abrazivního opotřebení součásti. Někdy se také tato metoda označuje jako Taber test, podle zařízení na kterém se měření provádí (Taber Abraser). Princip, který je ukázán na obrázku 59, je takový, že testovaný vzorek je umístěn na otočný stůl, který se během testu otáčí ($60\text{--}72\text{ min}^{-1}$). Na vzorek jsou přivedeny dva brusné kotouče, které se během testu také otáčejí (díky rotaci vzorku). Tyto kotouče působí na vzorek silou $1\text{--}10\text{ N}$ (vlastní vahou). První brusný kotouč otírá vzorek ven směrem k okraji součásti a druhý zase dovnitř k jejímu středu. Kotouče vytvářejí na povrchu součásti opotřebovanou stopu po kotoučích, která má tvar zkřížených oblouků. Plocha této stopy je přibližně 30 cm^2 . Důležitá je volba brusného kotouče, který se liší podle druhu materiálu. Metoda Abrasive wheel test se využívá nejen na kovové slitiny a tenké navařené vrstvy, ale také na plasty, lamináty, keramiku, papír, kůži, apod. Existuje několik možností, jak vyhodnotit tento abrazivní test:



Obr. 59 Metoda Abrasion-Wheel-Test [1]

- Cykly potřebné k dosažení konkrétního koncového bodu
Tím je myšleno počet cyklů ke stanovení určitého koncového bodu, stavu, vzhledu vzorku. Nebo stav součásti, po provedení určitého počtu cyklů. Kritériem pro určení koncového stavu může být ztráta pevnosti, změna barvy, změna lesku, zlomení nebo ztrátu povlaku.
- Ztráta hmotnosti
Měří se hmotnost materiálu, který byl odstraněn otěrem brusnými kotouči.
- Index opotřebení
Udává míru opotřebení, které je vypočteno jako úbytek hmotnosti v miligramech při 1000 cyklech otěru. Čím menší je index opotřebení materiálu, tím je jeho proti otěru lepší odolnost.

6 EXPERIMENT

6.1 Návrh experimentu

Cílem experimentu je vytvoření a studium navařených vrstev. Jednotlivé vrstvy byly navařeny pomocí vysokovýkonného diodového laseru při různých procesních parametrech, což jsou velikosti výkonu, rychlosti posuvu a množství přídavného materiálu. Navařovaný materiál ve formě prášku bude Surfit 1560 od společnosti Höganäs, jedná se o kovovou slitinu na niklové bázi s vysokým obsahem uhlíku a chromu. Tento prášek byl navařen na běžnou konstrukční uhlíkovou ocel ČSN 11375 (S235 JR), viz obrázek 60. Poté byly jednotlivé vrstvy vyhodnoceny z pohledu makro a mikrostruktury, kde bylo určeno jejich zředění, jejich tvrdosti a dále byla vyhotovena EDX analýza. Záměrem experimentu bylo tedy vytvoření a studium několika laserem navařených vrstev. Navařování se uskutečnilo v brněnské firmě Fermat, která se zabývá výrobou a renovacemi přesných obráběcích strojů, horizontálních vyvrtávaček. Následné vyhodnocování vrstev proběhlo na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.



Obr. 60 Navařování vrstev

6.2 Použité přístroje

Nejprve jsou popsána jednotlivá zařízení, na kterých se experiment prováděl.

6.2.1 Navařovací zařízení [70] [57]

Zařízení pro laserové zařízení je složeno ze samotného zdroje laserového záření, robotického manipulátoru, navařovací hlavy a podavače prášku. Laserové navařování, stejně jako ostatní laserové aplikace, musí být prováděno na chráněném pracovišti, kde pracovníci musí nosit ochranné pomůcky.

- **Diodový laser**

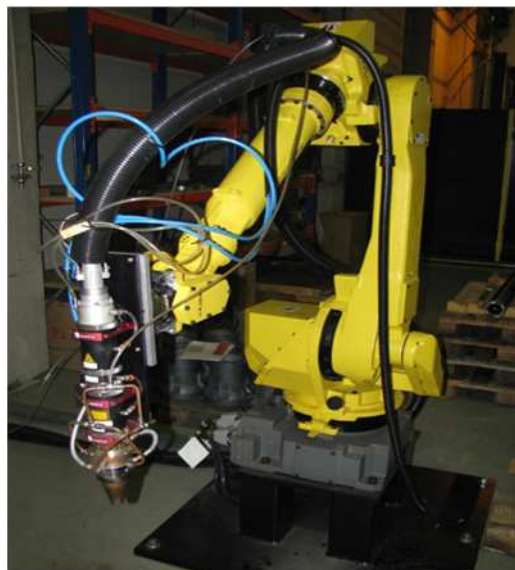
Zdrojem laserového záření byl diodový laser Laserline LDF 6.000 – 100. Jedná se o 6 kW laser, jehož záření je dopravováno do navařovací hlavy pomocí optického vlákna. Minimální kvalita výstupního paprsku je 40 mm·mrad. Vlnová délka se pohybuje od 900 do 1070 nm. Minimální velikost zaostření při ohnisku $f = 150$ mm je 600 μ m. Účinnost laseru se pohybuje okolo 35 %. Samotný laser je kompaktních rozměrů, viz obr. 61. K tomuto laseru existuje mnoho druhů příslušenství. Pro naši aplikaci to byla navařovací hlava, taktéž od společnosti Laserline. Jednalo se o koaxiální hlavu pro navařování prášku, jež měla ohnisko $f = 300$ mm. Tato hlava byla umístěna na robotickém manipulátoru.



Obr. 61 Diodový laser

- **Robotický manipulátor**

Na pracovišti byl umístěn robotický manipulátor Fanuc Robot m-710ic 50. Tento robot je v průmyslu velmi oblíbený z důvodu jeho rychlosti, přesnosti a spolehlivosti. Vyniká vysokou nosností až 50 kg. Umožňuje pohyb v šesti osách a jeho dosah je 2050 mm. Velmi často je využíván pro bodové, obloukové nebo laserové svařování, dále pak pro manipulaci s materiálem nebo například pro lepení. Na obrázku 62 je vidět tento robot s nainstalovanou navařovací hlavou.



Obr. 62 Robot Fanuc s navařovací hlavou

6.2.2 Metalografické přístroje [49]

Pro vytvoření metalografických výbrusů byly využity přístroje, které se nacházejí na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR. Nejdříve byly vzorky rozříznuty na přesné pile MTH model MIKRON 110, která umožňuje přesné oddělení vzorků bez tepelného ovlivnění materiálu (díky intenzivnímu chlazení brusného kotouče). Ukázka dělení vzorku je na obrázku 63. Poté se již nadělené vzorky umístili do lisu Struers CitoPress-1, který je automaticky zalisoval za horka do plastu. Následovalo broušení a leštění, již zalitých vzorků na leštičce Struers Tegramin 20. Tato leštička pracuje v automatickém režimu a je možno si z knihovny programů broušení zvolit vhodný program pro daný vzorek. Tato leštička je ukázána na obrázku 64.



Obr. 63 Dělení vzorku na pile MTH



Obr. 64 Broušení vzorku na leštičce Struers

6.2.3 Eds analýza

Eds analýza byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu MAGELLAN 400. Tento přístroj pracuje se subnanometrovým rozlišením a je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR.

6.2.3 Konfokální mikroskop Olympus Lens OLS 3100

Tento konfokální řádkovací laserový mikroskop je představitelem nové generace 3D optických systémů. Umožňuje měření velmi jemných součástek, povlaků, spojů, sledování struktur rozličných materiálů, dále je možné jej použít na kontrolu drsností povrchů s vysokou přesností měření. Principem konfokálního mikroskopu je to, že se obraz netvoří najednou, ale bod po bodu, řádkováním. Rozsah zvětšení je $120\times$ až $14400\times$. Vzorky se umísťují přímo na mikroskopový stolek a pozorování vzorků probíhá v reálném čase. Na tomto mikroskopu byly pořízeny 2D snímky mikro a makro struktury navařených vrstev.



Obr. 65 Olympus Lens OLS 3100

6.2.5 Tvrdoměry

Měření tvrdosti laserem navařených vrstev bylo prováděno Vickersovým tvrdoměrem Zwick 3212. Tento tvrdoměr umožňuje stanovit tvrdost podle Vickerse v rozmezí zatížení 0,2 až 30 kg, tedy HV0,2 až HV30. Jak je vidět na obrázku 66, tvrdoměr je opatřen CCD kamerou, kde je poté na monitoru počítače zobrazen vtisk a pomocí softwaru testXpert se vyhodnocuje tvrdost. Tento tvrdoměr je umístěn na Fakultě strojního inženýrství, Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.

Tvrdosti srovnávacích návarů plamenem byly měřeny Rockwelovým tvrdoměrem Rapid RR – IV. Tento přístroj je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Tímto přístrojem lze měřit tvrdost dle HRB a HRC. Vnikající tělísko je tedy kulička (vnikající síla 100 kg) nebo diamantový kužel (vnikající síla 150 kg). Hodnota tvrdosti se odečítá přímo na stupnici umístěné na přístroji.



Obr. 66 Tvrdoměr ZWICK 3212

6.2.6. Termokamera

Při laserovém navařování bylo snímáno teplotní pole v okolí návaru. K tomuto snímání byla použita termokamera FLIR AX5. Kde byla nastavena emisivita na hodnotu $\varepsilon = 0,87$. Tato termokamera umožňuje snímání povrchové teploty pouze přibližně do 600°C . Neslouží tedy k měření teploty v laserovém paprsku, nýbrž k měření rozložení teplotního pole. Průběhy rozložení teploty při laserovém navařování jsou uvedeny v přílohách.

6.3 Parametry při navařování a počty vzorků

6.3.1 Použitý materiál

Základním materiálem, substrátem byla běžná konstrukční ocel 11375 (evropský ekvivalent je S235JR) ve formě plechu, tloušťky 10 mm. Dodaný základní materiál je ukázán na obrázku 67. Chemické složení je ukázáno v tabulce 3. Mechanické vlastnosti jsou v tabulce 4. Tato ocel se používá pro staticky i dynamicky namáhané svařované konstrukce. Používá se například na vtokové objekty vodních turbín, spojky a podvozky vagonů. Tento základní materiál dodala firma RW Ferra.



Obr. 67 Základní materiál

Tab. 3 Chemické složení oceli 11375. [6]

Prvek	C	P	S	N
[hm. %]	max 0,17	max 0,045	max 0,045	max 0,009

Tab. 4 Mechanické vlastnosti oceli 11375. [6]

Mez kluzu ReH [MPa] min.	Mez pevnosti Rm [MPa]	Nárazová práce KV [J] min.	Hustota [kg .m ⁻³]
235	340–470	27	7850

Navařovaným materiálem ve formě prášku byl Surfit 1560, od výrobce Höganäs. Jedná se o kovovou slitinu na niklové bázi, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce 5. Tento prášek se využívá pro otěruvzdorné a tvrdé návary. Udávaná tvrdost čistého navařeného materiálu je až 62 HRC. Velikost částecek prášku se pohybuje od 53 μm do 150 μm . Doporučuje se jej používat pro navařování karbidických nástrojů pro obrábění a broušení. Niklové návary se používají také jako ochrana oceli proti atmosferickým vlivům.

Tab. 5 Chemické složení a mechanické vlastnosti prášku Surfit 1560. [64]

Prvky	Fe	C	Si	B	Ni	Cr	Tvrdost HRC	Hustota [kg .m ⁻³]
min [hm. %]	2,40	0,65	3,90	3,00	zbytek	14,00	62	4400
max [hm. %]	4,60	0,80	4,90	3,40		16,00		

6.3.2 Procesní parametry

Nejprve budou uvedeny parametry, které byly pro všechny navařované vrstvy shodné. Výška navařovací hlavy nad vzorkem byla 34 mm. Šířka stopy laserového paprsku byla 5,1 mm, při ohniskové vzdálenosti $f = 300$ mm. Tato šířka byla určena tak, že laserový paprsek působil na základní materiál bez přidávání práškového materiálu. Následně byla změřena šířka této stopy. Množství dopravovaného prášku bylo konstantní pro všechny vzorky. Jednalo se o množství 13,5 g prášku za minutu. Tato hodnota se musela experimentálně zjistit zvážením, neboť množství prášku nastavovaného na stroji bylo udáváno v procentech celkového výkonu (40 %). Přehledně jsou tyto parametry uvedeny v tabulce 6.

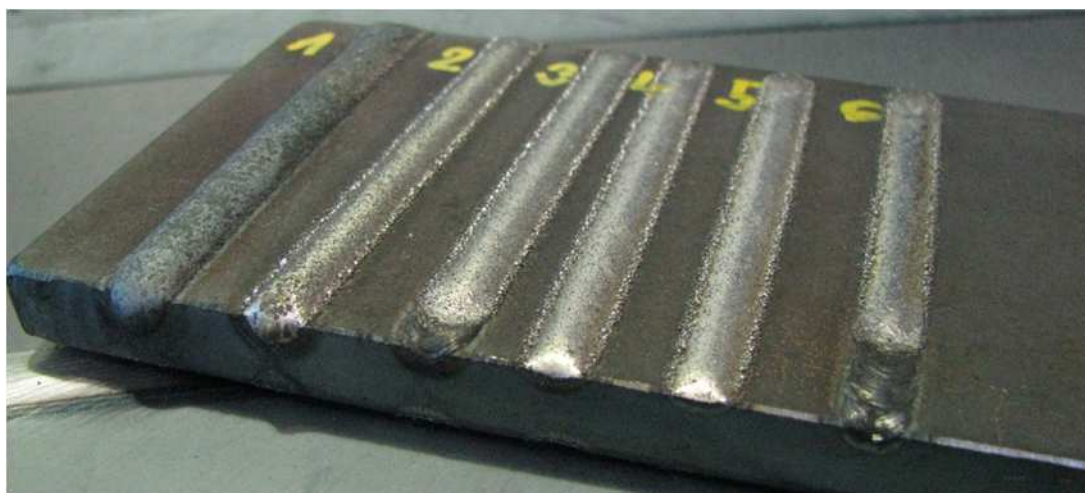
Tab. 6 Společné procesní parametry.

Výška hlavy nad vzorkem	34 mm
Šířka stopy	5,1 mm
Ohnisko	300 mm
Množství prášku	13,5 g/min

Bylo vytvořeno celkem 20 návarů o různých procesních parametrech. Nejprve byly vytvořeny návary A1–A6, o výkonu 2,5 kW, poté následovalo vytvoření návarů A7–A12, o výkonu 3 kW, přičemž u každého návaru se měnila rychlost posuvu (viz tabulka 7). Po každém navařování následovalo ochlazení ve vlažné vodě a vysušení stlačeným vzduchem. Hotové návary jsou ukázány na obrázku 68. Po vyhodnocení těchto návarů byly vytvořeny ještě další návary B1–B4 při 2,5 kW a B5–B9 při výkonu 2 kW. Tyto návary byly vytvořeny za účelem zvýšení tvrdosti návaru. Vzorek B7 v tabulce chybí, neboť operátor zadal stejné procesní parametry jako u vzorku B6. Proto jsme vzorek B7 vůbec nevyhodnocovali.

Tab. 7 parametry navařování.

Výkon	Vzorek	Posuv [cm.min⁻¹]
2,5kW	A1	5
	A2	10
	A3	15
	A4	20
	A5	25
	A6	30
3kW	A7	10
	A8	15
	A9	20
	A10	25
	A11	30
	A12	35
2,5kW	B1	35
	B2	40
	B3	45
	B4	50
2kW	B5	25
	B6	30
	B8	35
	B9	40



Obr. 68 Navařené vrstvy A1 – A6

6.4 Vyhodnocení struktury materiálu

6.4.1 Příprava vzorků

Po rozřezání a zalisování vzorku do plastu následovalo jejich broušení a leštění. Pro broušení byla použita leštička Struers a zvolen program Piano. Broušení bylo provedeno brusným kotoučem MD Primo 220 za stálého chlazení vodou. Následovalo leštění diamantovými kotouči, kdy z knihovny programů byl zvolen program Allegro. Tento leštící program se skládal ze dvou částí, kdy byly přidávány dvě leštící emulze Diaduo 9 μm a 3 μm .

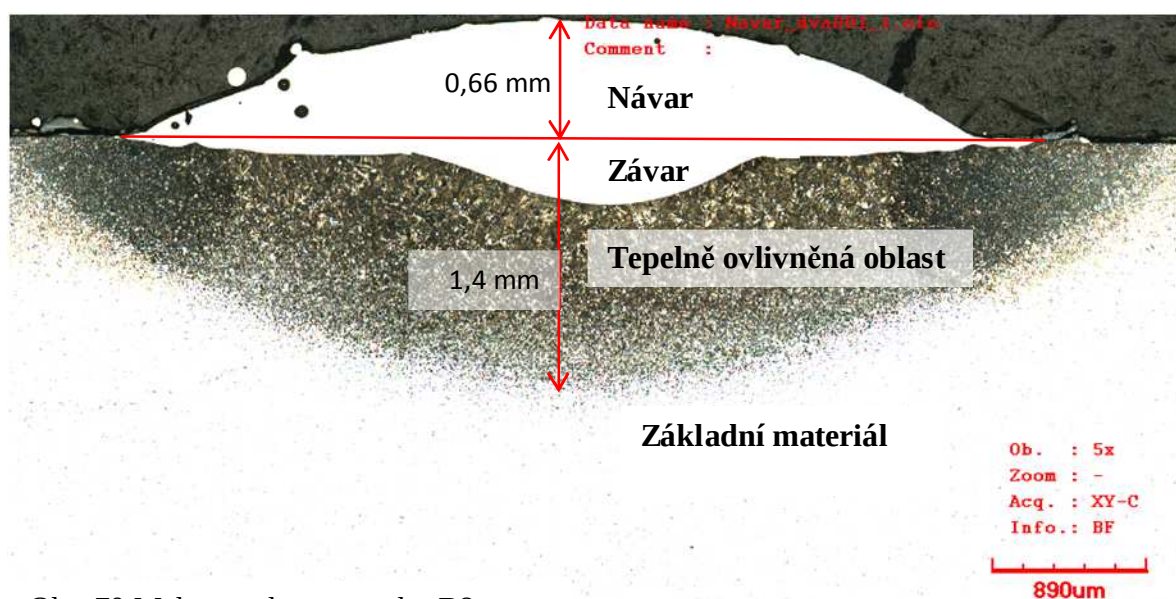
Po vyleštění a následném oplachu v lihu následovalo leptání, které bylo provedeno leptadlem Nital 3% (3% kyseliny dusičné HNO_3 v čistém lihu). Doba leptání byla přibližně 4 sekundy. Jak je vidět na obrázku 69, tak po leptání šlo snadno rozlišit navařený materiál od základního a na vzorcích se ukázala tepelně ovlivněná oblast.



Obr. 69 Vzorky po leptání

6.4.2 Struktura materiálu

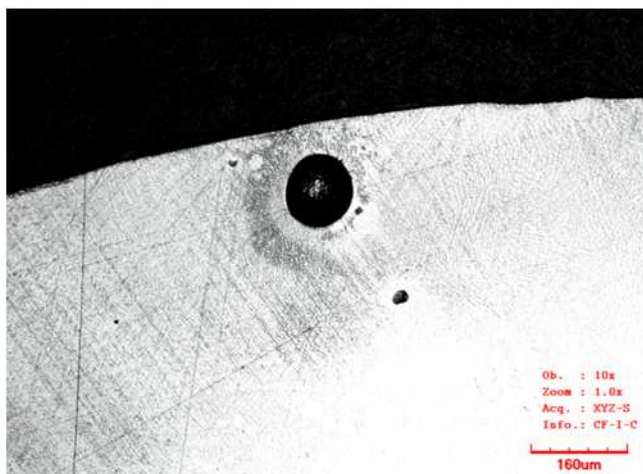
Struktura návaru byla vyhodnocována na konfokálním mikroskopu Olympus Lens OLS 3100. Nejprve byly provedeny snímky makrostruktury návarů. Jako reprezentant k popisu byl vybrán vzorek B8. Jak je vidět na obrázku 70, tak můžeme rozlišit tři oblasti. Základní materiál, vlastní návar a tepelně ovlivněnou oblast. Tepelně ovlivněná oblast dosahuje přibližně až do hloubky 1,4 mm od povrchu. V tepelně ovlivněné oblasti se mění mechanické vlastnosti základního materiálu, dochází zde zvýšení tvrdosti, ale zároveň ke snížení houževnatosti. Samotný návar je celistvý a tvoří ostrý přechod se základním materiálem.



Obr. 70 Makrostruktura vzorku B8

U vzorku B8 se dokonce vyskytly v návaru bubliny (stejně jako u vzorku B5 a B6). Tyto vady mohou být způsobeny nečistotami na povrchu základního materiálu. Na obrázku 71 je v detailu ukázána bublina v návaru vzorku B5.

Samotný návar lze popsat s ohledem na jeho zředění se základním materiálem. O zředění pojednává následující kapitola. Snímky makrostruktury byly provedeny pro všechny vzorky a jsou uvedeny v přílohách. V tabulce 8 jsou uvedeny geometrické rozměry návarů, které byly změřeny v programu Autocad 2009. Z této tabulky vyplývá, že se zvyšujícím se posuvem klesá výška návaru. Také je zřejmé, že čím nižší je hodnota posuvu laserové hlavy, tím vzniká větší tepelně ovlivněná oblast.

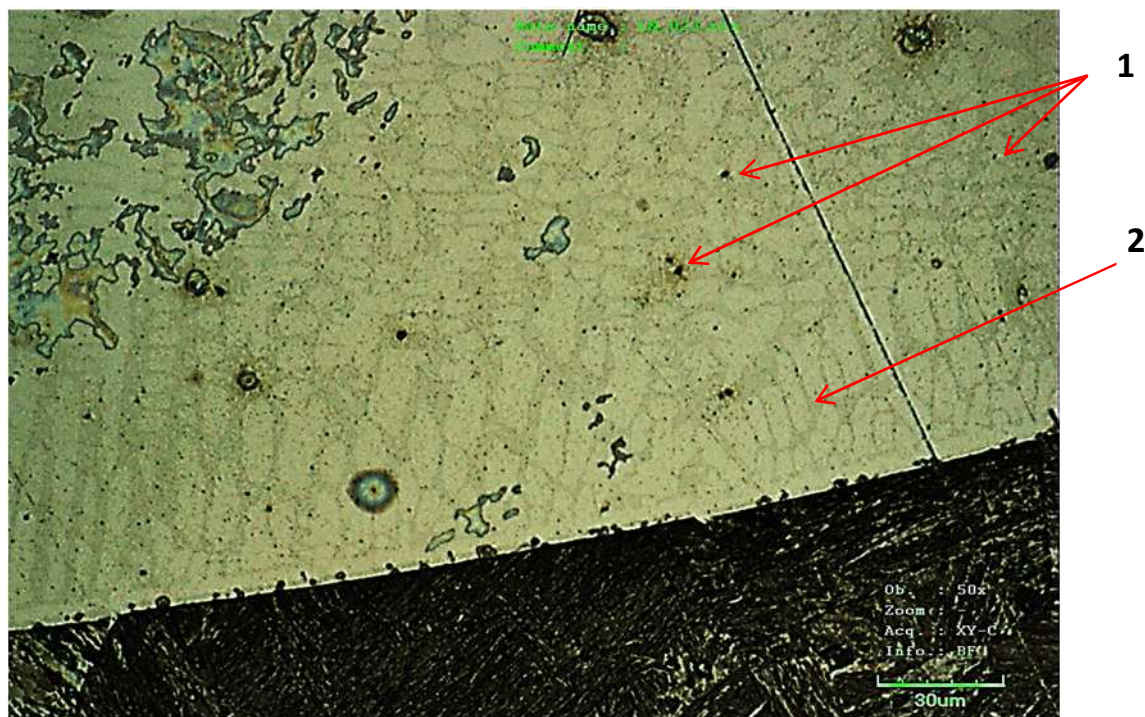


Obr. 71 Bublina ve vzorku B5

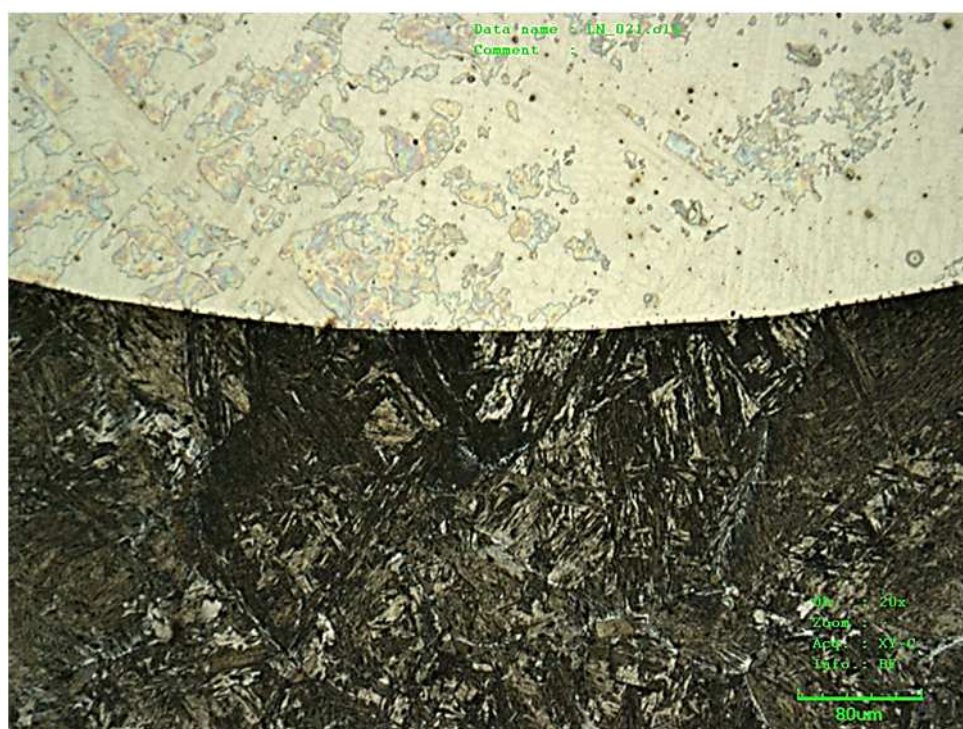
Tab. 8 Geometrické rozměry návarů.

Výkon	Vzorek	Posuv [cm.min ⁻¹]	Plocha návaru S _n [mm ²]	Výška návaru [mm]	Hloubka závaru [mm]	Hloubka TOO od povrchu ZM [mm]
2kW	B5	25	2,8559	0,84	0,27	1,80
	B6	30	2,1586	0,67	0,23	1,54
	B8	35	2,1605	0,66	0,38	1,40
	B9	40	1,799	0,55	0,31	1,36
2,5kW	A1	5	17,336	2,70	1,95	4,90
	A2	10	7,636	1,65	1,35	3,24
	A3	15	5,2	1,25	0,85	2,45
	A4	20	3,607	0,95	0,55	2,0
	A5	25	2,974	0,8	0,47	1,9
	A6	30	2,466	0,7	0,27	1,7
2,5kW	B1	35	1,6145	0,5	0,5	1,9
	B2	40	1,5909	0,54	0,46	1,9
	B3	45	1,3904	0,52	0,47	1,8
	B4	50	1,3147	0,44	0,4	1,6
3kW	A7	10	8,823	1,77	1,75	3,60
	A8	15	6,186	1,34	1,68	3,15
	A9	20	4	0,97	1,60	2,85
	A10	25	3,186	0,75	1,35	2,60
	A11	30	2,72	0,67	1,08	2,28
	A12	35	2,247	0,59	0,85	2,07

Následovalo vyhodnocení mikrostruktury. Snímky mikrostruktury byly provedeny pro vzorek A5, přičemž bylo použito zvětšení 10 $\times$, 20 $\times$, 50 $\times$. U největšího zvětšení (obrázek 72), lze pozorovat orientaci zrn v návaru u rozhraní se základním materiálem. Zrna mají protáhlý tvar směrem kolmo na rozhraní (na obrázku 72 je to odkaz 2). Tedy hlavní osa dendritů je kolmo na izotermu. V tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu lze vidět zrna feritu (světlá zrna) a perlitu. V návaru je možné rozpoznat drobné póry (tmavé tečky na bílém podkladu, odkaz 1 na obrázku 72). Barevné skvrny na snímku 72, 73 jsou odlesky nečistot na povrchu vzorku (zaschlé oplachovací) a nesouvisí se strukturou materiálu.



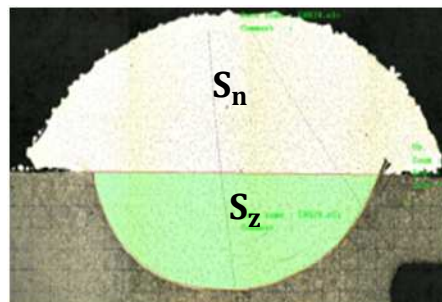
Obr. 72 Mikrostruktura vzorku A5 při zvětšení 50 $\times$



Obr. 73 Mikrostruktura vzorku A5 při zvětšení 20 $\times$

6.4.3 Zředění

Výslednou kvalitu navařené vrstvy určuje velikost zředění. U laserového navařování je požadována kvalitní vazba mezi základním materiálem a navařenou vrstvou. Je vyžadováno co nejmenší zředění navařené vrstvy z důvodu získání jejích nejlepších vlastností. Zředění lze určit dvěma způsoby, viz kapitola 3.4 Vlastnosti vrstev navařených laserem. V našem experimentu bylo zředění určeno z geometrie návaru. Jak je vidět na obrázku 74, tak lze v řezu rozdělit navařenou vrstvu na plochu návaru S_n a plochu závaru S_z . Výsledné zředění je poté určeno podle rovnice 1.1. Jednotlivé velikosti ploch a výsledné zředění u všech vzorků je uvedeno v tabulce 9.



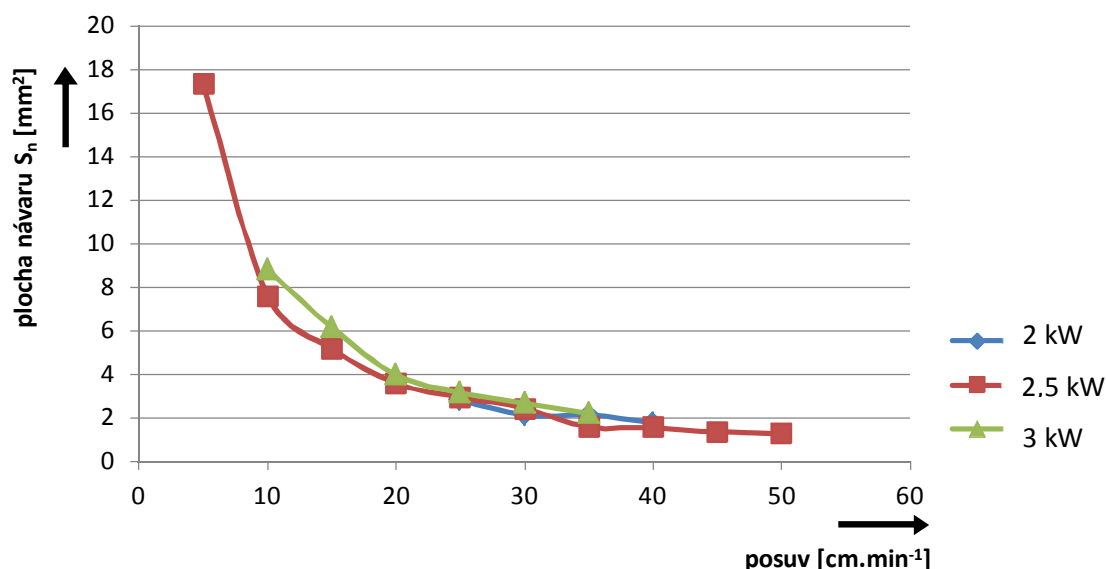
Obr. 74 Geometrie návaru

Předpokladem bylo, že se zvyšujícím se posuvem, bude klesat velikost zředění. Tento předpoklad, ale v experimentu neplatil. U vzorků B5 – B9, A7 – A12 zředění rostlo se zvyšujícím se rychlostí posuvu. To může být způsobeno tím, že při vyšším posuvu je potřeba méně energie na natavení prášku a tedy více tepla projde do základního materiálu, což může způsobit větší zředění. U ostatních vzorků se tento jev choval podle předpokladu. Velikosti zředění úzce souvisí s tvrdostmi návaru. Tato závislost bude popsána v kapitole 6.5.

Tab. 9 Plochy návarů a velikosti zředění.

Výkon	Vzorek	Posuv [cm.min ⁻¹]	S_n [mm ²]	S_z [mm ²]	S_{celk} [mm ²]	Zředění [%]
2kW	B5	25	2,8559	0,7353	3,5912	20,5
	B6	30	2,1586	0,582	2,7406	21,2
	B8	35	2,1605	0,7456	2,9061	25,7
	B9	40	1,799	0,6656	2,4646	27,0
2,5kW	A1	5	17,336	8,683	26,019	33,4
	A2	10	7,636	3,73	11,366	32,8
	A3	15	5,2	2,25	7,45	30,2
	A4	20	3,607	1,346	4,953	27,2
	A5	25	2,974	1,229	4,203	29,2
	A6	30	2,466	0,928	3,394	27,3
2,5kW	B1	35	1,6145	2,027	3,6415	55,7
	B2	40	1,5909	1,9145	3,5054	54,6
	B3	45	1,3904	1,898	3,2884	57,7
	B4	50	1,3147	1,4915	2,8062	53,2
3kW	A7	10	8,823	5,793	14,616	39,6
	A8	15	6,186	5,087	11,273	45,1
	A9	20	4	4,452	8,452	52,7
	A10	25	3,186	3,508	6,694	52,4
	A11	30	2,72	2,788	5,508	50,6
	A12	35	2,247	2,258	4,505	50,1

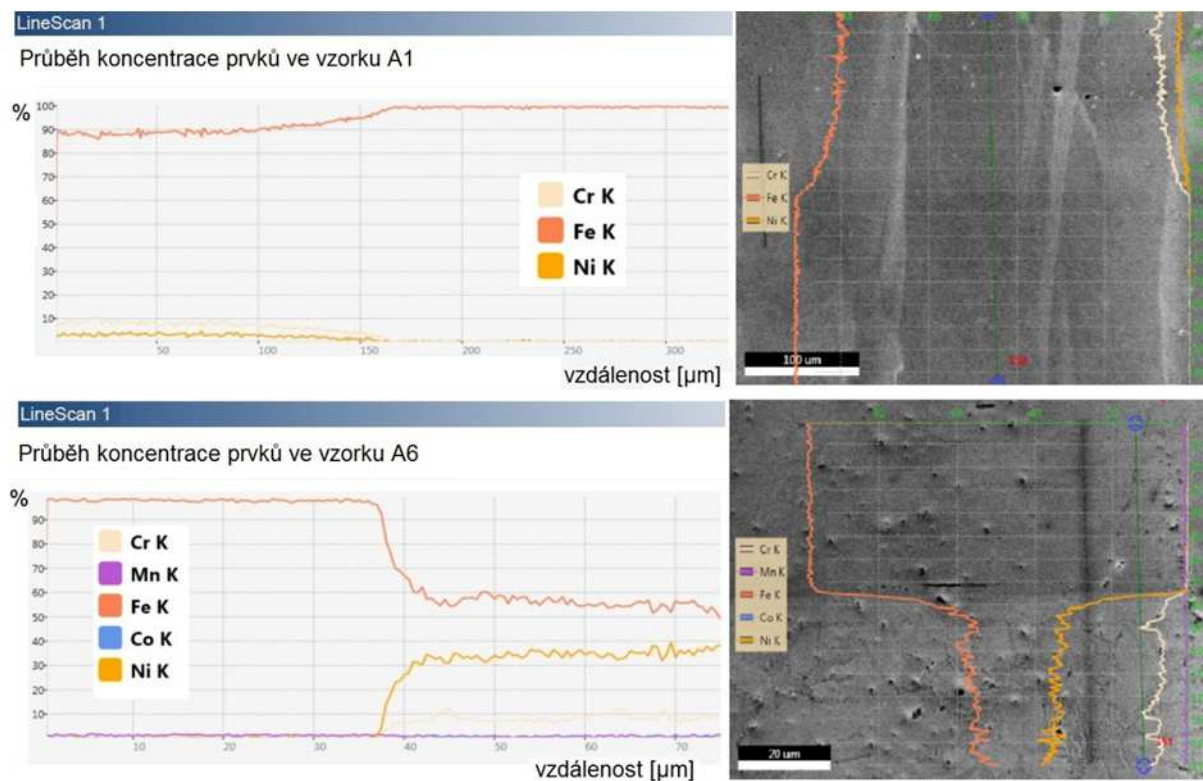
Na obrázku 75 je vidět graf závislosti plochy návaru na velikosti posuvu. Z grafu vyplývá, že plocha návaru (tedy i jeho výška) klesá se zvyšující se rychlostí posuvu. Od jisté velikosti posuvu (20 cm/min) plocha návaru příliš nezávisí na velikosti výkonu.



Obr. 75 Graf závislosti plochy návaru na velikosti posuvu

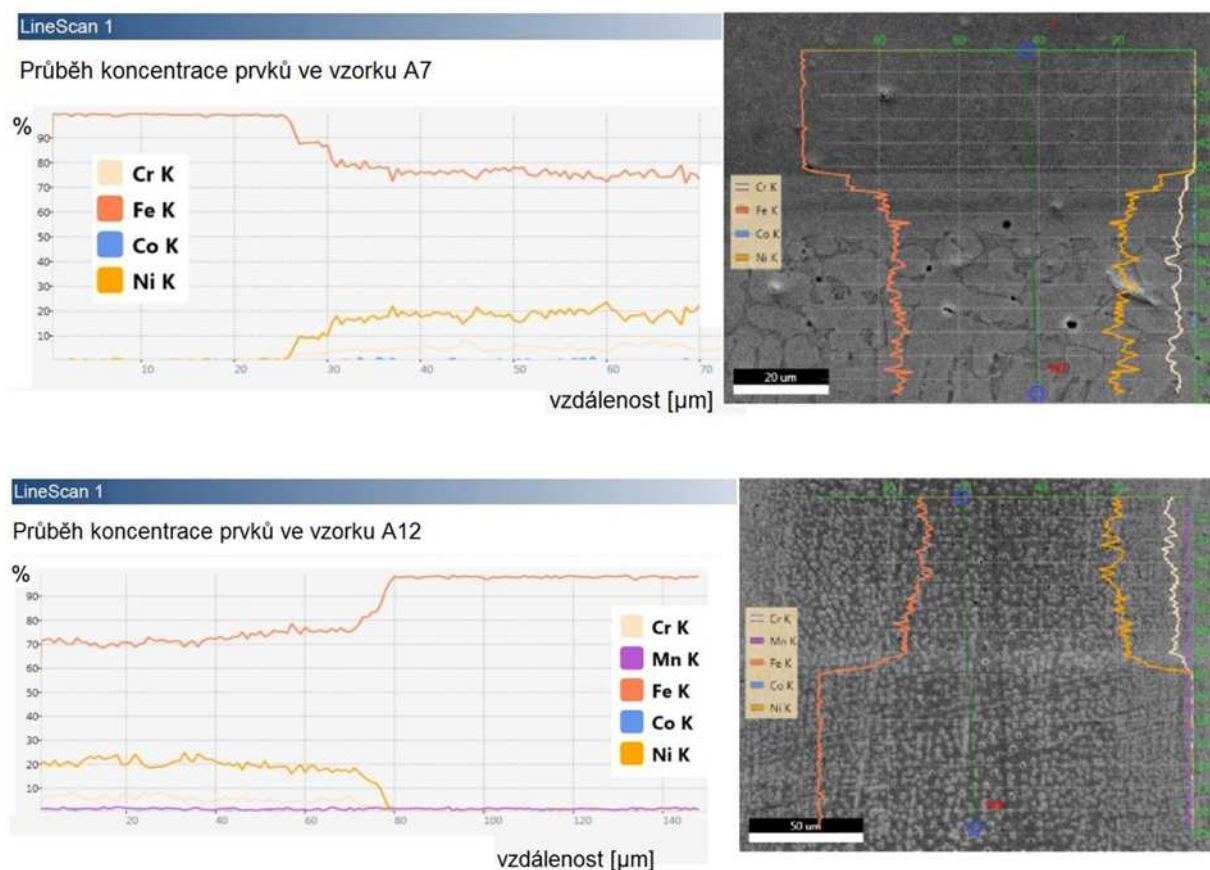
6.4.4 EDS analýza

Analýza EDS byla uskutečněna na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR. Jedná se o energiově dispersní rentgenovou mikroanalýzu. Výsledkem analýzy EDS je průběh koncentrace prvků na rozhraní základního materiálu a návaru. Základní materiál je dán koncentrací 100 % sloučenin Fe a 0 % Ni. Tato analýza byla provedena u vzorku A1, A6, A7, A12. Na obrázcích 76 a 77 jsou výsledky této analýzy.



Obr. 76 EDS analýza vzorků A1, A6

Na obrázku 76 jsou ukázány výsledky analýzy EDS vzorků A1 a A6. U vzorku A1 (výkon 2,5 kW, posuv 5 cm/min, zředění 33,4 %) je změna koncentrace prvků nejméně skoková. To může být způsobeno příliš nízkým posuvem, kde došlo k velkému prohřátí materiálu. Nízký posuv způsobil, že prvky v materiálu měly čas difundovat a vyrovnat chemickou koncentraci. Naopak u vzorku A6 (2,5kW, posuv 30 cm/min, zředění 27,3 %) je patrná skoková změna koncentrace. Z téměř čistého železa se během 3 μm změnila koncentrace prvků, která je poté téměř konstantní. Vidíme, že niklový návar u rozhraní se základním materiálem je složen z přibližně 35 % sloučenin niklu, okolo 9 % chromu a přibližně 55 % železných sloučenin. Další prvky jsou zde zastoupeny v podobě sloučenin manganu a kobaltu.



Obr. 77 EDS analýza vzorků A7, A12

Na obrázku 77 jsou ukázány průběhy koncentrace prvků u vzorků A7 a A12. U vzorku A7 (výkon 3 kW, posuv 10 cm/min, zředění 39,6 %) je díky vyššímu zředění v návaru nižší koncentrace sloučenin niklu (okolo 19 %) a zároveň vyšší koncentrace železa (75 %). Díky vyššímu výkonu a pomalejšímu posuvu proběhla změna koncentrace prvků na delší vzdálenosti (přibližně 13 μm), než u vzorku A6. U vzorku A12 je možné pozorovat stejnou závislost jako u předchozích třech vzorků. Obsah sloučenin železa je zde o trochu nižší, než u vzorku A7, a to z důvodu vyššího posuvu. Naopak koncentrace niklu lehce vzrostla (přes 20 %). Je to dáno tím, že základní materiál nebyl tolik nataven a proto difuze železa neproběhla v tak velkém rozsahu jako u vzorku A7 nebo A1.

Z výsledků EDS analýzy je patrné, že koncentrace prvků na rozhraní základního materiálu a navařené vrstvy se skokově mění. Po této změně jsou již vlastnosti návaru z pohledu chemické koncentrace prvků téměř konstantní. Z toho vyplývá, že vlastnosti návarů, jako např. chemické složení a tvrdost jsou v návaru téměř konstantní. Změna proběhne na velmi krátké vzdálenosti v řádu mikrometrů. Čím je nižší výkon a rychlejší rychlost posuvu, tím proběhne tato změna koncentrace rychleji.

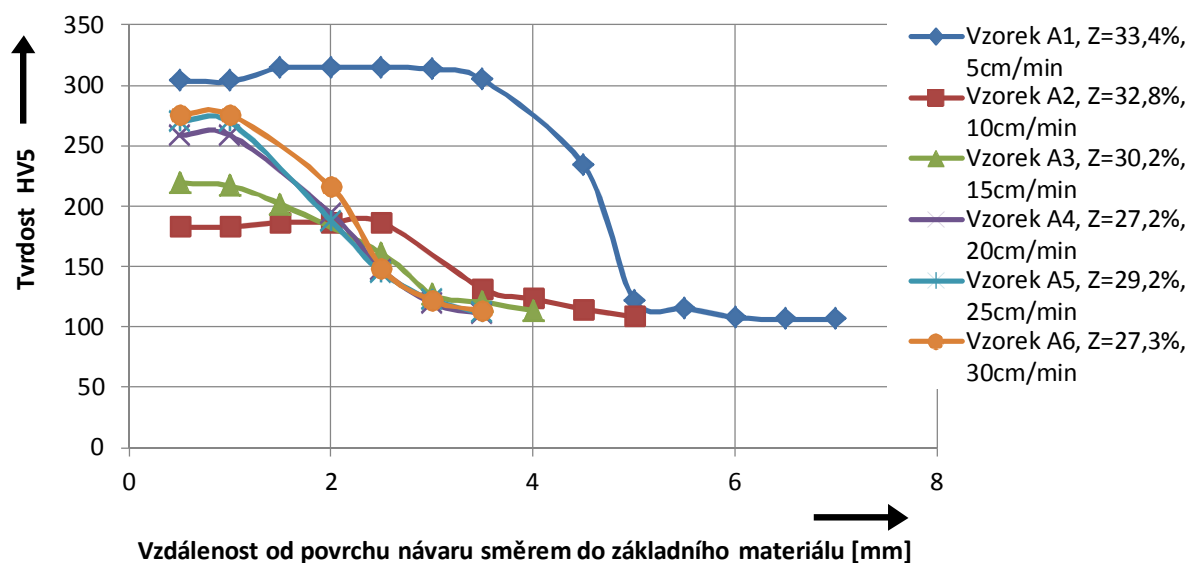
6.5 Vyhodnocení tvrdosti

Tvrdosti podle Vickerse se měřili na již dříve rozříznutých a vyleštěných vzorcích. Vickersův tvrdoměr je umístěn na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně. Velikost zatížení bylo 5 kg. Doba zatěžování byla 12 sekund. Postup měření byl takový, že první vpich začínal u povrchu návaru a postupovalo se dále hlouběji do materiálu. Pokud byla vrstva příliš tenká, tak bylo zhotoveno několik vpichů vedle sebe, přičemž z nich byl vypočítán jejich aritmetický průměr. Jednotlivé tvrdosti byly zaznamenány do tabulek rozdělených podle velikosti výkonu a poté byly tyto tvrdosti vyneseny do grafů. Šedá políčka v tabulkách tvrdostí znamenají, že vpich byl proveden v navařené vrstvě. Naopak žlutá políčka znamenají to, že vpich byl proveden již v základním materiálu, přesněji v tepelně ovlivněné oblasti.

Tab. 10 Průběhy tvrdosti ve vzorcích A1–A6.

Vzorek A1		Vzorek A2		Vzorek A3		Vzorek A4		Vzorek A5		Vzorek A6	
mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5
0,5	304	0,5	183	0,5	220	0,5	259	0,5	270	0,5	276
1	304	1	183	1	217	1	259	1	270	1	276
1,5	315	1,5	187	1,5	202	2	194	2	188	2	216
2	315	2	187	2,5	161	2,5	148	2,5	145	2,5	149
2,5	315	2,5	187	3	127	3	120	3	123	3	122
3	314	3,5	132	3,5	121	3,5	111	3,5	112	3,5	114
3,5	305	4	124	4	114						
4,5	234	4,5	115								
5	122	5	109								
5,5	116										
6	108										
6,5	107										
7	107										

Průběh tvrdosti ve vzorcích A1–A6 o výkonu 2.5 kW

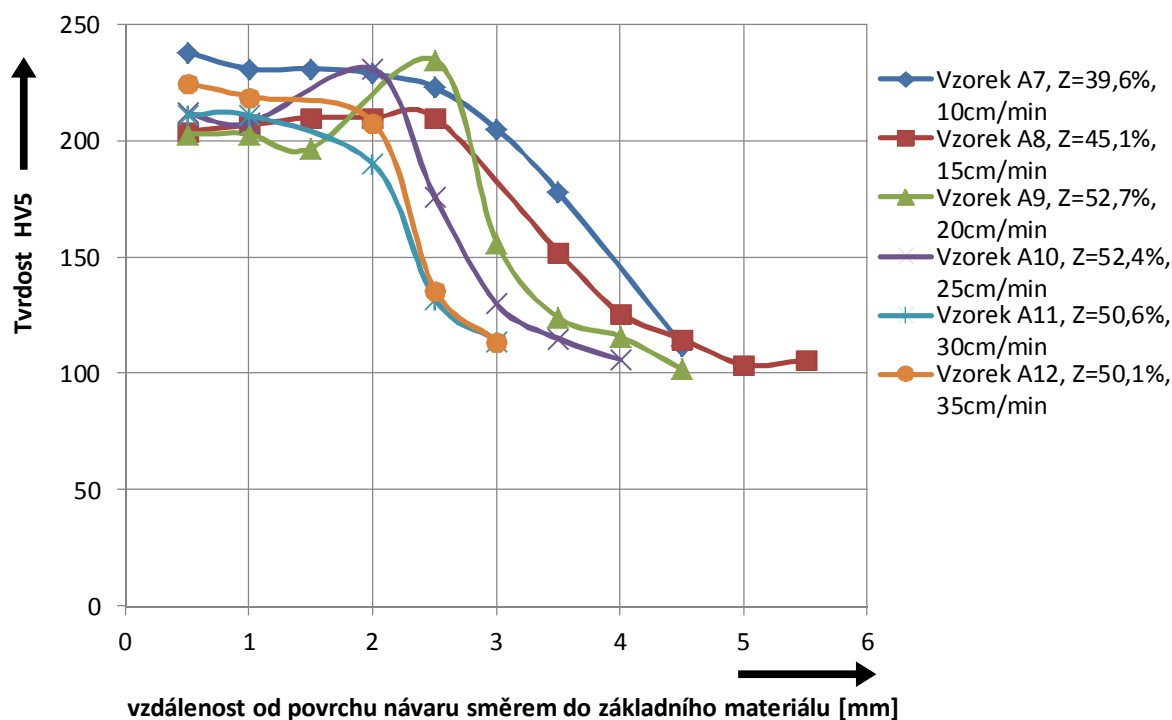


Obr. 78 Průběhy tvrdostí ve vzorcích A1–A6

Tab. 11 Průběhy tvrdostí ve vzorcích A7–A12.

Vzorek A7		Vzorek A8		Vzorek A9		Vzorek A10		Vzorek A11		Vzorek A12	
mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5
0,5	238	0,5	204	0,5	203	0,5	212	0,5	211	0,5	225
1	231	1	207	1	203	1	208	1	211	1	219
1,5	231	1,5	210	1,5	197	2	231	2	190	2	208
2	229	2	210	2,5	235	2,5	176	2,5	132	2,5	136
2,5	223	2,5	210	3	156	3	130	3	114	3	114
3	205	3,5	152	3,5	124	3,5	115				
3,5	178	4	126	4	116	4	106				
4,5	112	4,5	115	4,5	102						
		5	104								
		5,5	106								

Průběh tvrdosti ve vzorcích A7-A12 o výkonu 3 kW



Obr. 79 Průběh tvrdostí ve vzorcích A7–A12

Jak je vidět z výsledků průběhů tvrdostí, tak navařené vrstvy zdaleka nedosahují takových kvalit, jaké jsme od nich očekávali. Výrobce deklaruje tvrdost čistého navařovaného materiálu až 62 HRC, což je v přibližném přepočtu na hodnotu tvrdosti podle Vickerse cca 740 HV. Důvodem jsou nesprávné procesní parametry při navařování. Z výsledků vyplývá, že tvrdší návary vznikly při nižších výkonech a vyšších rychlostech posuvu. Tedy tvrdší návary vznikly při menším vneseném teple. Například vzorek A6 dosahuje tvrdosti v návaru až 276 HV5. U několika vzorků byla provedena analýza EDS, ze které vyplývá, že nejtvrdší návary vznikly u vzorků, ve kterých byla nejvyšší koncentrace chromu. Například vzorky A1 a A6 mají podle EDS v návaru přibližně 9 až 10% chromu. Tyto vzorky jsou téměř stejně tvrdé. Kdežto

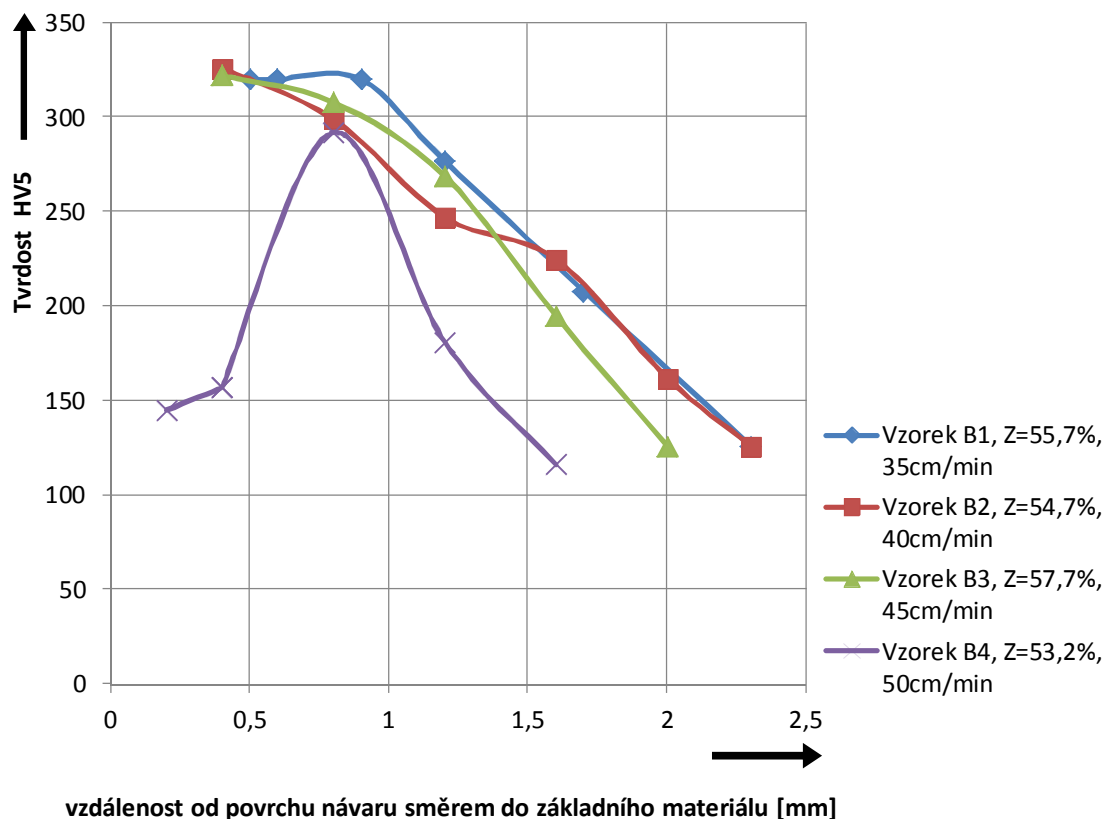
například vzorky A7 a A12, u kterých byla taktéž provedena analýza EDS, mají v návaru přibližně 5 až 6 % chromu. Tyto vzorky jsou taktéž stejně tvrdé, ale zároveň jsou výrazně měkkší, než vzorky o vyšší koncentraci chromových sloučenin.

Pro ověření, že tvrdší návary vzniknou s menším vneseným teplem, byla vytvořena ještě jedna série vzorků, vzorky B1–B9. U těchto vzorků po navaření následovalo jejich vyhodnocení z pohledu struktury a zředění. Následně u nich byla změřena tvrdost. Výsledky průběhu tvrdostí u vzorků B1–B9 jsou v následujícím textu. V tabulkách tvrdostí šedá políčka opět znamenají, že vpich byl proveden v navařené vrstvě. Naopak žlutá políčka znamenají to, že vpich byl proveden v základním materiálu.

Tab. 12 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B1–B4.

Vzorek B1		Vzorek B2		Vzorek B3		Vzorek B4	
mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5
0,5	320	0,4	326	0,4	322	0,2	145
0,6	320	0,4	326	0,4	322	0,4	157
0,6	320	0,8	299	0,8	308	0,4	157
0,9	320	1,2	247	1,2	269	0,8	292
1,2	277	1,6	225	1,6	195	1,2	181
1,7	208	2	162	2	126	1,6	116
2,3	126	2,3	126				

Průběh tvrdosti ve vzorcích B1-B4 při výkonu 2.5 kW

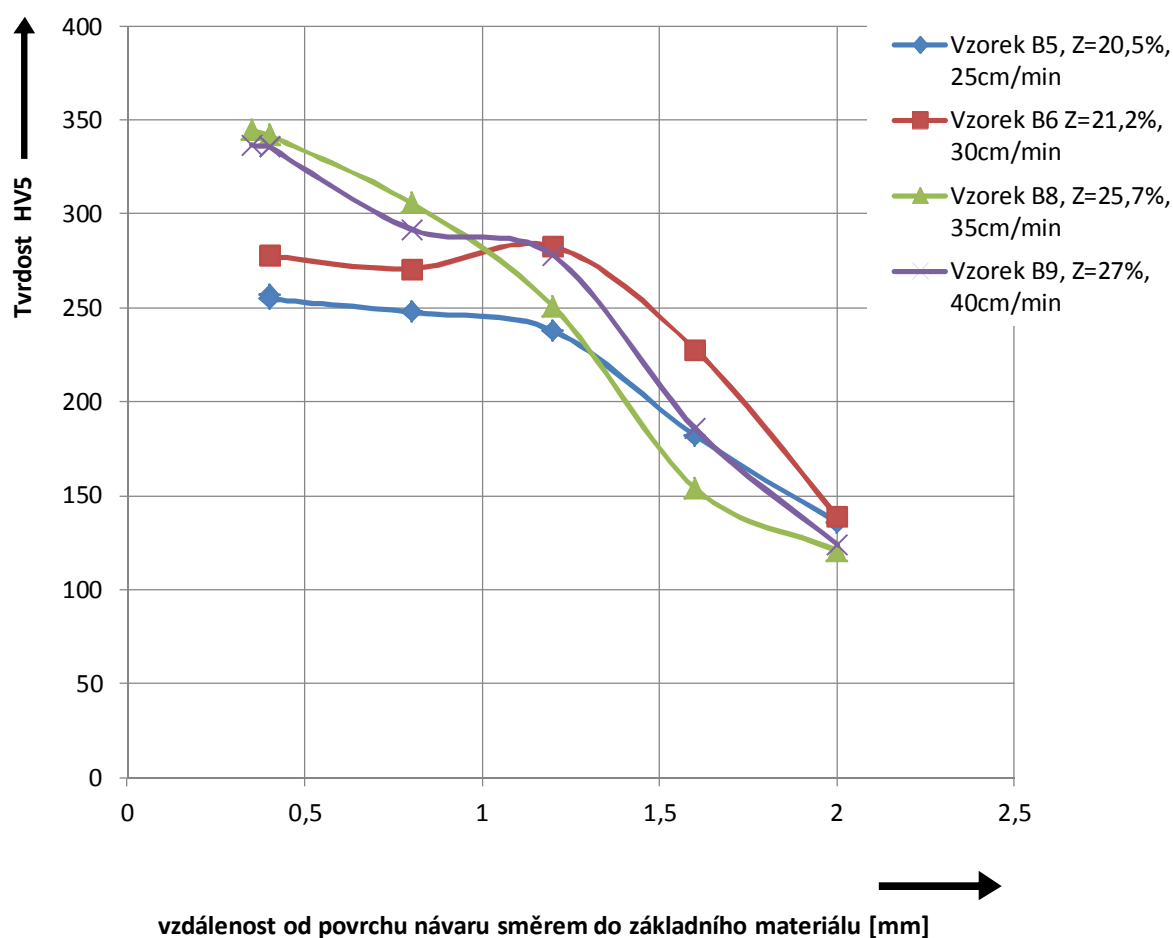


Obr. 80 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B1–B5

Tab. 13 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B5–B9.

Vzorek B5		Vzorek B6		Vzorek B8		Vzorek B9	
mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5	mm	HV5
0,4	257	0,4	278	0,35	345	0,35	337
0,4	255	0,4	278	0,4	342	0,4	336
0,8	248	0,8	271	0,4	342	0,4	336
1,2	238	1,2	283	0,8	306	0,8	292
1,6	182	1,6	228	1,2	251	1,2	278
2	136	2	139	1,6	154	1,6	186
				2	121	2	124

Průběh tvrdosti ve vzorcích B5-B8 při výkonu 2.0 kW

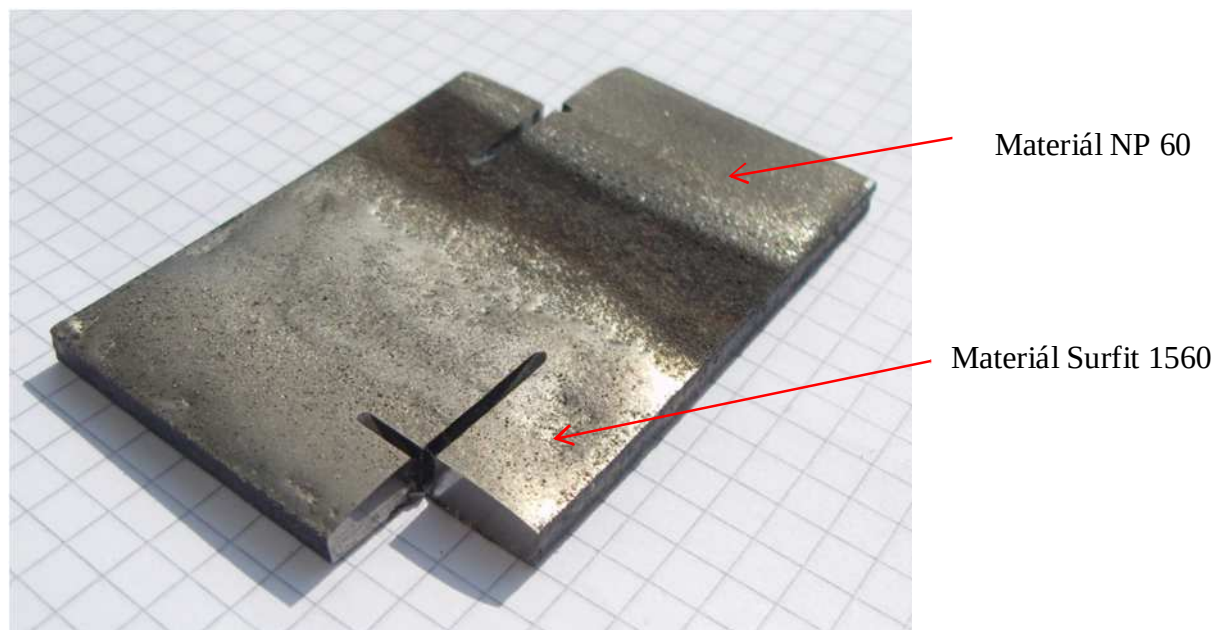


Obr. 81 Průběh tvrdostí ve vzorcích B5–B9

Z výsledků je patrné, že snížením výkonu bylo dosaženo zvýšení tvrdosti navařené vrstvy. Výjimkou je vzorek B4, kde je tvrdost navařené vrstvy velmi nízká. Důvodem může být již mezní hodnota rychlosti posuvu. Sice se dosáhlo jistého zvýšení tvrdosti navařených vrstev, přesto toto zlepšení nelze považovat za dostačující. Následující výzkum by měl proto směřovat opět cestou snižování výkonu, při nepřiliš vysoké rychlosti posuvu. Jediným parametrem, který nebyl měněn, bylo množství podávaného prášku, proto následující výzkum by se mohl ubírat také tímto směrem.

• Kontrola kvality dodaného prášku

V důsledku hledání možných příčin nízkých tvrdostí, byla ověřena ještě tvrdost navařeného prášku. Byl realizován kontrolní nástřik plamenem, který vyniká tím, že má nulové zředění se základním materiálem (což ale snižuje jeho přilnavost). Tvrdost tohoto návaru by měla být etalonem tvrdosti navařovaného prášku. Byly provedeny návary našeho prášku Surfit 1560 a prášku NP 60 za účelem srovnání tvrdostí prášků. Podrobnější informace o prášku NP jsou uvedeny v příloze 3. Tyto dva návary jsou ukázány na obrázku 82. Poté byly vzorky rozřezány a určeny jejich tvrdosti. V řezu byly určovány tvrdosti metodou podle Vickerse. Na povrchu návaru byla tvrdost měřena Rockwellovou metodou. Na každém vzorku byly tvrdosti měřeny na několika místech. Výsledné tvrdosti byly určeny jako průměrné hodnoty těchto měření. V tabulce 14 jsou výsledky těchto měření, ze kterých vyplývá, že navařovaný prášek sice nedosahuje tak vysokých tvrdostí, jak deklaruje výrobce, přesto se ale jedná o velmi kvalitní prášek, pomocí kterého by měly být vytvořeny velmi tvrdé vrstvy.

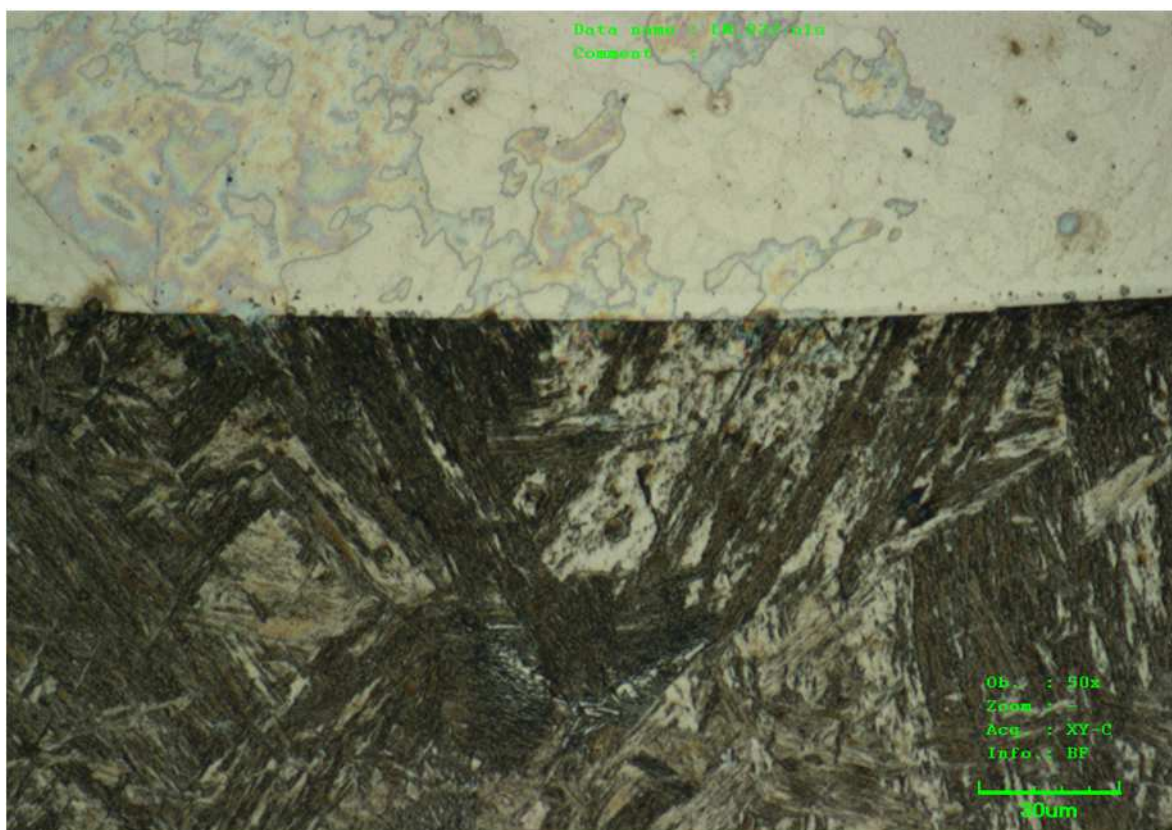


Obr. 82 Kontrolní návar plamenem

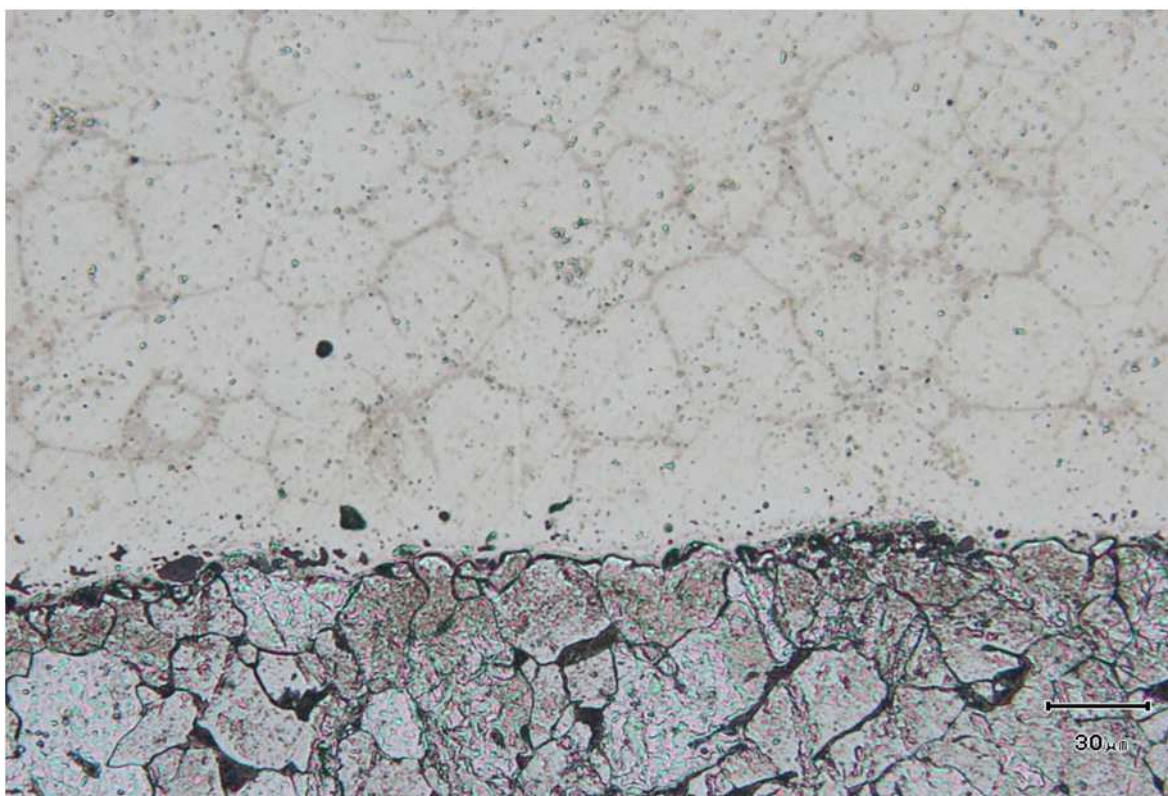
Tab. 14 Srovnání udávaných tvrdostí.

Materiál	Surfit 1560	NP 60
Změřená tvrdost v řezu dle Vickerse	626 HV	580 HV
Změřená tvrdost na povrchu dle Rockwella	55,3 HRC	51 HRC
Udávaná tvrdost dle výrobce	62 HRC	56-62 HRC

Na obrázku 84 je vidět niklový návar prášku NP 60, který je nezředěný. Lze pozorovat, že ve vzorku z NP 60 jsou větší, hrubší zrna, než ve vzorku z laserového navařování, viz obrázek 83. Z toho plyne, že u laserového navařování proběhl proces rychleji, než u navařování plamenem. U navařování plamenem z důvodu velkého vneseného tepla, dochází k výraznému hrubnutí zrna, což ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti.



Obr. 83 Mikrostruktura vzorku A5



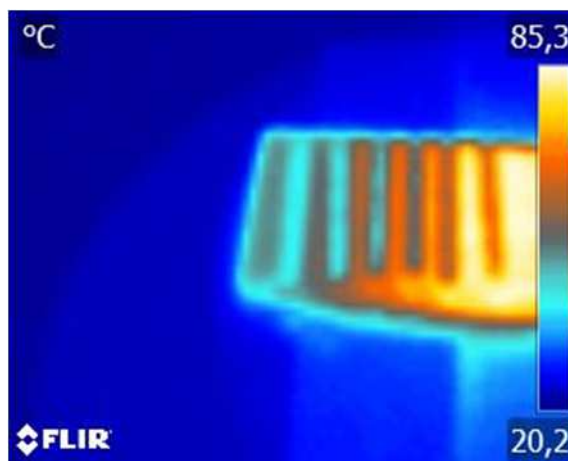
Obr. 84 Mikrostruktura niklového návaru NP 60

6.6 Teplotní pole

Během navařování každého vzorku byla snímána teplota povrchu. Na obrázku 85 je ukázka takového teplotního pole, kde lze pozorovat, rozložení teploty okolo návaru. Termovizní snímky všech vzorků jsou uvedeny v přílohách. Snímky z termokamery nelze použít pro kontrolu teploty přímo v místě dopadu paprsku a to z důvodu, že použitá termokamera snímala povrchovou teplotu maximálně do 660°C. Na obrázku 86 je vidět průběh chladnutí jednotlivých vrstev po procesu navařování. Jak je vidět, tak teplota materiálu není vysoká, nedochází tedy k vysokému tepelnému ovlivnění materiálu, což je výhodou této technologie.



Obr. 85 Teplotní pole u vzorku A3



Obr. 86 Chladnutí vrstev

7. TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato práce se nezabývala navařováním konkrétní součásti. Jednalo se zde o studium vlastností vrstev, které poskytuje technologie laserového navařování. Ekonomické zhodnocení je proto obecnějšího charakteru. Cena laserového navařování se skládá z ceny navařovaného materiálu a ceny hodiny provozu stroje a režijních nákladů. Cena 1 kg navařovaného prášku Surfit 1560 se pohybuje okolo 31 eur, tedy přibližně 850 Kč. Cena jedné hodiny provozu pracoviště laserového navařování se pohybuje mezi 2000 až 3000 Kč. Tato částka je v porovnání konvenčních metod vysoká. Je tedy nutné si předem rozmyslet, zda je nutné použít tuto technologii.

Laserové navařování je vhodné spíše pro renovace a opravy součástí, kde je vyžadována vysoká kvalita návaru, nízká tepelně ovlivněná oblast a téměř nulové deformace. Je vhodná pro častější opravy, například vstřikovacích forem, tvářecích nástrojů. Oproti návaru plamenem, kde je nulové zředění a požadované vlastnosti vrstvy jsou dané, je nutné znát přesné vstupní procesní parametry navařování. Pro dosažení kvalitních návarů je nutné tyto parametry předem vyzkoušet a optimalizovat je. Laserové navařování se tedy hodí spíše do velkých podniků, než pro kusové opravy, kde by použití laserového zařízení bylo neekonomické. Pro opravy součástí, které nevyžadují až tak vysokou kvalitu (např. z pohledu deformace součástí, tepelně ovlivněné oblasti aj.), lze použít konvenční technologie, např. navařování plamenem, plazmou nebo ruční obalenou elektrodou. Přesto je laserové navařování velmi perspektivní metodou, která umožňuje vytvoření velmi kvalitních vrstev. Velkou výhodou je, že lze toto navařování snadno automatizovat a není tedy potřeba kvalitního svářeče.

8. ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo seznámení se z technologií laserového navařování a s vyhodnocováním vlastností navařených vrstev. Tato perspektivní technologie umožňuje vytvářet velmi kvalitní vrstvy.

Navařován byl niklový prášek Surfit 1560 na základní materiál z běžné konstrukční oceli ČSN 11375. Bylo vytvořeno celkem dvacet vzorků, u kterých se vyhodnocovala makrostruktura, zředění, EDS analýza, a tvrdosti navařených vrstev. Tyto vzorky byly zhotoveny v brněnské firmě Fermat. Tyto vrstvy byly poté vyhodnoceny na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. EDS analýza zjistila, že koncentrace prvků mezi základním a navařeným materiálem se skokově mění a poté je koncentrace prvků v návaru již vcelku konstantní. To má za následek to, že tvrdost navařované vrstvy je v celém svém průřezu stejná. Dále bylo zjištěno, že se zvyšujícím se výkonem roste tepelně ovlivněná oblast. Také je zjevné, že tvrdost u vzorků s vyšším výkonem (3 kW) je nižší, než u vzorků s nižším výkonem (2 kW).

Z výsledků je patrné, že nebylo dosaženo optimálních vstupních parametrů. Výsledné tvrdosti vrstev jsou oproti předpokladům nízké. Toto je způsobeno zředěním navařovaného materiálu se základním. Při druhé sadě vzorků, bylo dosaženo jistého zlepšení, tedy zvýšení tvrdosti. Nejlepší vzorkem je vzorek B8, u kterého bylo dosaženo tvrdosti až 345 HV5. Tento vzorek byl navařován při 2 kW výkonu, posuvu 40 cm/min a množství prášku bylo 13,5 g/min. Výsledek, ale přesto není optimální, neboť deklarovaná tvrdost čistého prášku je až 62 HRC, tedy přibližně okolo 740 HV.

Pro získání vyšších tvrdostí by bylo nutné udělat další sady testovacích vzorků. U dalších vzorků by pro zrychlení postupu stačilo pouze vzorky rozříznout, lehce přeleštit a naleptat, poté by následovalo určení tvrdosti. Nemusela by se vyhodnocovat struktura, či EDS analýza. Navrhuji pokračovat cestou postupného snižování výkonu. V našem experimentu se také neměnilo množství navařovaného prášku. Tedy další možností je zvýšení nebo snížení množství navařovaného prášku. Existuje ještě možnost vytvoření vícevrstvého návaru. Jednalo by se o kladení několika housenek na sebe, kde by se tvrdost návaru postupně zvyšovala.

Laserové navařování je velmi perspektivní technologií v oblasti renovací a vytváření nových povrchů. Je však nutné přesně znát vstupní parametry, které hrají významnou roli na výslednou kvalitu návarů. Tyto parametry je nutné určit testováním, což může být časově a finančně náročné. Se současným rozvojem laserové techniky lze předpokládat, že se laserové navařování postupně stane významnou technologií, která svými výhodami zastíni konvenční metody.

Seznam použité literatury

- 1) Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. *ScienceDirect.com | Search through over 11 million science, health, medical journal full text articles and books*. [online]. 1998 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X98000048>
- 2) BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
- 3) *Citace.com: naučte se citovat* [online]. ©2004-2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
- 4) Co je laserová technologie. *Lintech: Laserové technologie a průmyslové značení* [online]. 2011 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
- 5) CO2 Lasers. *EDU.PHOTONICS.COM* [online]. 2007 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25155>
- 6) ČSN 41 1375. *Nelegovaná ocel obvyklých jakosti, vhodná ke svařování pro ocelové konstrukce*. 1994
- 7) *Degradace strojních součástí* [online]. 2003 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://degradace.tf.czu.cz/>
- 8) Dělení materiálů laserem. MRŇA, Libor. *Strojárstvo/Strojírenství* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/1308-dleni-material-laserem>
- 9) DIRECT METAL LASER SINTERING. *DMLS, Kovové prototypy* [online]. 2007 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>
- 10) DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Megablog* [online]. 2013 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- 11) Elektronová mikroskopie a RTG spektroskopie. MATĚJKA, Pavel. *Fakulta chemicko-inženýrská: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/analytika/06-Elektronova-mikroskopie-a-RTGspektroskopie.pdf>
- 12) ELEMENTS AND OPERATION OF A LASER. *Central Carolina Community College* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.cccc.edu/instruction/slymparty/ELN/236/Mod1/Mod1-1.htm>
- 13) GE's move into 3D Printing with metals: Part 2 of 3. *Nanalyze* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.nanalyze.com/2013/07/ges-move-into-3d-printing-with-metals-part-2-of-3/>
- 14) High-Power Semiconductor Lasers. *EDU.PHOTONICS.COM* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25169>
- 15) Images. *Laser Cladding Services* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.lasercladding.com/Gallery/>

- 16) Laser Cladding Process. *SULZER* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Coating-Equipment/Laser-Cladding/Processes>
- 17) Laser Cladding Restoration. *El blog de Serbusa* [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://serbusamantenimientoindustrial.com/laser-cladding-o-el-poder-de-la-tecnologia-laser/>
- 18) LASER CUTTING. *Laser Automation Gekatronics SA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://laser-automation.com/lce-laser-cutting.html>
- 19) LASER DRILLING. *Laser Automation Gekatronics SA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://laser-automation.com/lde-laser-drilling.html>
- 20) LASER MARKING. *Laser Automation Gekatronics SA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://laser-automation.com/lme-laser-marking.html>
- 21) *Laser surface cladding a literature survey*. Lulea Tekniska Universitet: Institutionen for Material, 2000. ISSN 1402-1536.
- 22) LASER WELDING. *Laser Automation Gekatronics SA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://laser-automation.com/lwe-laser-welding.html>
- 23) Laserové kalení. *MATEX PM* [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/laserove-kaleni>
- 24) Laserové kalení. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
- 25) Laserové navařování kluzných vrstev. ŠTĚPÁN, Karel. *MATEX PM. Časopis TriboTechnika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12013/laserove-navarovani-kluznych-vrstev.html>
- 26) LASEROVÉ ŘEZÁNÍ. *Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-rezani-80>
- 27) Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. *Digitovárna: Oborová verze časopisu pro strojaře MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
- 28) Laserové technologie v průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>
- 29) Laserové technologie v praxi. *Portál moderní fyziky* [online]. 2010 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- 30) LASEROVÉ VRTÁNÍ. *Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>
- 31) Lasers for Confocal. *Science Lab* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.leica-microsystems.com/science-lab/lasers-for-confocal/>
- 32) LEYENS, Christoph, BRÜCKNER a Steffen NOWOTNY. *Additive laser processes for applications in aircraft engine technologies*. Fraunhofer IWS, Institute for Material and Beam Technology Dresden, Germany, 2014.

- 33) Metal Additive Manufacturing (AM) using Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Building Success Layer By Layer* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.3trpd.co.uk/dmls.htm>
- 34) Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2008 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm
- 35) Metalografie. LOUKOTOVÁ. *Mezioborové aktivity: Západočeská univerzita v Plzni* [online]. 2010 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.ums.zcu.cz/files/NPV/ppt/loukotova_prez.pdf
- 36) MIKROOBRÁBĚNÍ. *Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mikroobrabeni-95>
- 37) Mikroobrábění. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/mikroobrabeni.html>
- 38) MYTH NO. 1: The Top Ten Myths About CO2 Lasers in Dentistry. *Dentalcetoday.com* [online]. 2009 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.dentalcetoday.com/courses/28/HTML/dt_section_1.htm
- 39) Navařování kovů. BAJDA, Miroslav. *Svět Svaru* [online]. 2005 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_cocomplete.pdf
- 40) Navařování laserem. MRŇA, Libor. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf
- 41) NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laseru v průmyslu: MATEX PM*. Plzeň: Tribun EU, 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.
- 42) Není povrch jako povrch – EDS, WDS a EBSD. *ChemPoint: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/neni-povrch-jako-povrch>
- 43) Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc: Journal of the Mechanics and Physics of Solids. *ScienceDirect* [online]. 2002 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002250960100093X>
- 44) Opotřebení strojních soustav a vznik poruch: TEORIE ÚDRŽBY. FAMFULÍK, Jan, Jana MÍKOVÁ a Radek KRZYŽANEK. *E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava* [online]. 2007 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf>
- 45) Opravy tramvajových kolejnic. *GTR DP Praha* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.gtr-dp.cz/>

- 46) PETERKA, Pavel. Vláknové lasery – jasné světlo ze skleněných nitek. *Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR* [online]. 2010 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.ufe.cz/sites/default/files/aktuality/10_peterka_cescasfyz_50_let_laseru-vlaknove_lasery.pdf
- 47) PLAZMOVÉ NAVAŘOVÁNÍ (PTA - Plasma Transferred Arc). *SERVIS ARMATUR* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>
- 48) Podstata korozní odolnosti. *Ústav materiálového inženýrství: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/podstata_korozni_odolnosti.pdf
- 49) Pokročilé preparační systémy: Broušení a leštění. *Struers* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.struers.cz/default.asp?top_id=3&main_id=10&sub_id=300&doc_id=1197
- 50) PRINCIP CO2 LASERU. *Leonardo technology* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=1>
- 51) Properties of Lasers. *World of Lasers* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.worldoflasers.com/laserproperties.htm>
- 52) Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- 53) Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání. KOŘÁN, Pavel. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- 54) Průmyslové lasery pro svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
- 55) Přehled metod svařování. LAPŠANSKÁ, Hana. *Portál moderní fyziky* [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf
- 56) Renovace a povrchové úpravy. KUBÍČEK, Jaroslav. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně* [online]. 2006 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy_kubicek.pdf
- 57) Robotics M-710iC/50. *FANUC* [online]. 2009 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.fanucrobotics.se/cs/products/a_industrial-robots/m-710_series/m-710ic%2050
- 58) Řezání laserem: TECHNOLOGIE VÝROBY. *DEFRO vytápěcí technika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.defro.cz/technologie-vyroby-str-13-1-13-2.html>

- 59) Řezání laserem: Technologie využívající laser. MRŇA, Libor. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mna.pdf
- 60) SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). RYBA, Jakub. *Lasery a Optika* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- 61) SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. RYBA, Jakub. *Lasery a Optika* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- 62) SCHNEIDER, Marcel Fredrik. *Laser cladding with powder: effect of some machining parameters on clad properties*. [S.l: s.n.], 1998. ISBN 90-365-1098-8.
- 63) STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ: Nauka o materiálu. MACEK, Karel a Josef STEIDL. *Ústav materiálového inženýrství: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/3-1_makrostruktura-a-mikrostruktura.pdf
- 64) Surfit™ 1560. *Höganäs* [online]. 2009 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://hoganasthermalspray.com/dokument/Surfit_1560_November_2013_0645HOG.pdf
- 65) Svařování laserem: Technologie využívající laser. MRŇA, Libor. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mna.pdf
- 66) Svařování laserovým paprskem a pájení laserem. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni.html>
- 67) Svařování nerezavějících ocelí: Technická příručka. *ESAB Svařování a pálení* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://products.esab.com/ESABImages/nerezy2012.pdf>
- 68) ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace. *PLS Laser Systems spol. s r.o.* [online]. 2002 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- 69) Taber Abraser. *Taber Industries* [online]. 2010 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>
- 70) Technical data LDF. *Laserline USA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.laserline.de/technical-data-ldf.html>
- 71) The steel wheel abrasion test (SWAT): A tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry: Wear. *ScienceDirect* [online]. 2009 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164809000088>
- 72) Thin-disk Lasers. *RP Photonics* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html

- 73) TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. *Laser cladding*. Boca Raton, Fl.: CRC Press, 2005, xiii, 260 p. ISBN 08-493-2172-7.
- 74) TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA „PIN-on-DISC“: METAL 2005. HÁJEK, Jiří a Antonín KŘÍŽ. *Metalurgie a materiály: mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL* [online]. 2005 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_05/papers/70.pdf
- 75) Tribologické vlastnosti. *Oddělení povrchového inženýrství: Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/tribologie.html>
- 76) Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html>
- 77) ULLMANN. *Are there Limits for multi kW Diode Laser?: laserline*. Lasersymposium 2014, [prezentace], 2014 [cit. 2014-05-13].
- 78) Undiluted hardness. *Laser Community* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.laser-community.com/technology/it-helps-me-sleep-better_1196/
- 79) Unikátní laserové technologie v praxi. MAREK, Pavel. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-laserove-technologie-v-praxi.html>
- 80) Vrtání. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
- 81) World's First 3D Printed Metal Gun. *SOLID CONCEPTS BLOG* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://blog.solidconcepts.com/industry-highlights/worlds-first-3d-printed-metal-gun/>
- 82) Základní přehled průmyslových laserů: SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *Lasery a Optika* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- 83) Základy laserové techniky. MRŇA, Libor. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
- 84) Zkouška tvrdosti podle Vickerse. *Wikipedia* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse
- 85) ZKOUŠKY TVRDOSTI. LUDVÍK, Jan, Karel BÍLEK a Štěpán LUDVÍK. *METROTEST Kladno. METROTEST s.r.o Kladno* [online]. 2010 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf
- 86) ZNAČENÍ A GRAVÍROVÁNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ. *Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znacen-89/znaceni-a-gravirovani-kovovych-materialu-91>

Seznam použitých symbolů a zkratek

d	Aritmetický průměr délek úhlopříček	[mm]
d_1	Délka první úhlopříčky vtisku	[mm]
d_2	Délka druhé úhlopříčky vtisku	[mm]
d_m	Průměr paprsku na výstupu z rezonátoru	[mm]
F	Zatěžující síla	[N]
S_n	Plocha návaru	[mm ²]
S_z	Plocha závaru	[mm ²]
Z	Zředění	[%]
α	Vrcholový úhel jehlanu	[°]
$\emptyset$	Průměr	[mm]
ε	Emisivita	[-]
θ	Divergence - rozbíhavost	[-]
λ	Vlnová délka	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]

BPP	Beam Parameter Product - uvádí kvalitu výstupního paprsku [mm . mrad]
CAD	Computer aided design- počítačem podporované projektování
ČSN	Česká technická norma
CW	Kontinuální
EDS	Energiově disperzní spektroskopie
El	Elektrický výboj, proud
ESW	Svařování pod tavidlem
HRB	Tvrdost dle Rockwella (vnikající tělísko kulička)
HRC	Tvrdost dle Rockwella (vnikající tělísko diamantový kužel)
HV	Tvrdost dle Vickerse
LD	Laserové diody
MAG	Metal aktive gas
MIG	Metal inert gas
MSM	Multi Stack Module – více zásobníkový modul
QCV	Kvazi kontinuální
PBC	Polarization Beam Combining – kombinace polarizovaného paprsku
PM	Přídavný materiál
ROE	Ruční obalená elektroda
RF	Radiofrekvenčně
SAW	Svařování pod tavidlem
SBC	Spectral Beam Combining – spektrální kombinace paprsku
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WBC	Wavelengths Beam Combining – kombinace vlnových délek paprsku
WIG	Wolfram inert gas
ZM	Základní materiál

Seznam obrázků a tabulek

<u>Název obrázku</u>	<u>strana</u>
Obr. 1 Ukázky laserového navařování	11
Obr. 2 Laserové navařování lopatky	12
Obr. 3 Renovovaná hřídel	12
Obr. 4 Geometrie návaru	13
Obr. 5 Navařování plamenem	13
Obr. 6 Schéma navařování ROE	14
Obr. 7 Návar ruční obalenou elektrodou	14
Obr. 8 MIG/MAG navařování	14
Obr. 9 WIG navařování	15
Obr. 10 Navařování pod tavidlem	15
Obr. 11 Návar kolejnice	15
Obr. 12 Elektrokontaktní navařování	16
Obr. 13 Schéma plazmového navařování	17
Obr. 14 Ukázka plazmového návaru	17
Obr. 15 Povlakování	18
Obr. 16 Renovace	18
Obr. 17 Rapid prototyping	18
Obr. 18 Princip navařování	18
Obr. 19 Možnosti natavení základního materiálu	19
Obr. 20 Boční přidávání drátu	19
Obr. 21 Boční podávání prášku	19
Obr. 22 Princip podávání prášku koaxiální tryskou	20
Obr. 23 Ukázka vytisknutého dílce	22
Obr. 24 Manipulátor s navařovací hlavou	23
Obr. 25 Vlnové délky laserů	23
Obr. 26 Nekoherentní a koherentní paprsek	24
Obr. 27 Rozbíhavost laserového paprsku	24
Obr. 28 Módové struktury	24
Obr. 29 Schéma podélného uspořádání CO2 laseru	25
Obr. 30 Schéma příčného uspořádání CO2 laseru	26
Obr. 31 Schéma deskového CO2 laseru	26
Obr. 32 Nd:YAG buzený výbojkami	27
Obr. 33 Boční uspořádání	27
Obr. 34 Zadní uspořádání	27
Obr. 35 Diskový laser Trumpf	28
Obr. 36 Vláknový laser	28
Obr. 37 Schéma laserové diody	29
Obr. 38 Formování laserového paprsku	29
Obr. 39 Princip modulární kombinace paprsku	30
Obr. 40 Energetický profil paprsku diodového laseru	31
Obr. 41 Modifikovaný tvar paprsku diodového laseru	31
Obr. 42 laserové vrtání	33
Obr. 43 Druhy laserového vrtání	33
Obr. 44 Ukázky laserového vrtání	34
Obr. 45 Schéma laserového řezání	34
Obr. 46 Ukázka laserového řezání	35
Obr. 47 Režimy laserového svařování	35
Obr. 48 Výbrus penetračního svaru	36
Obr. 49 Ukázka laserového svaru	36

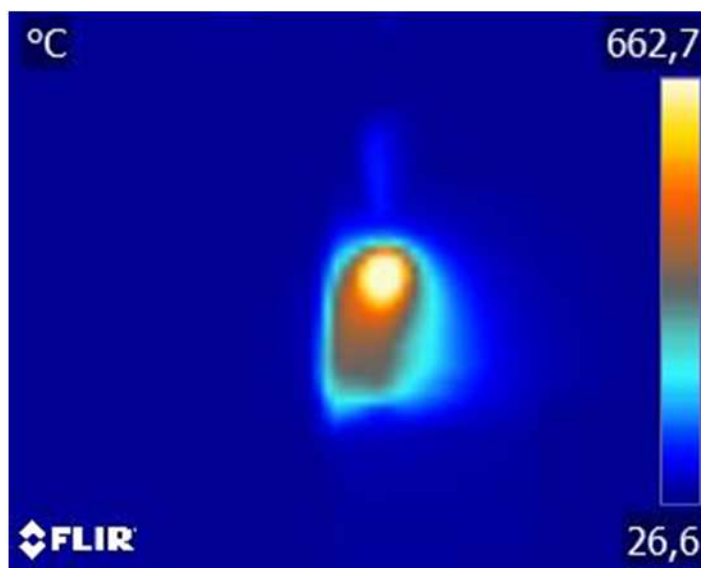
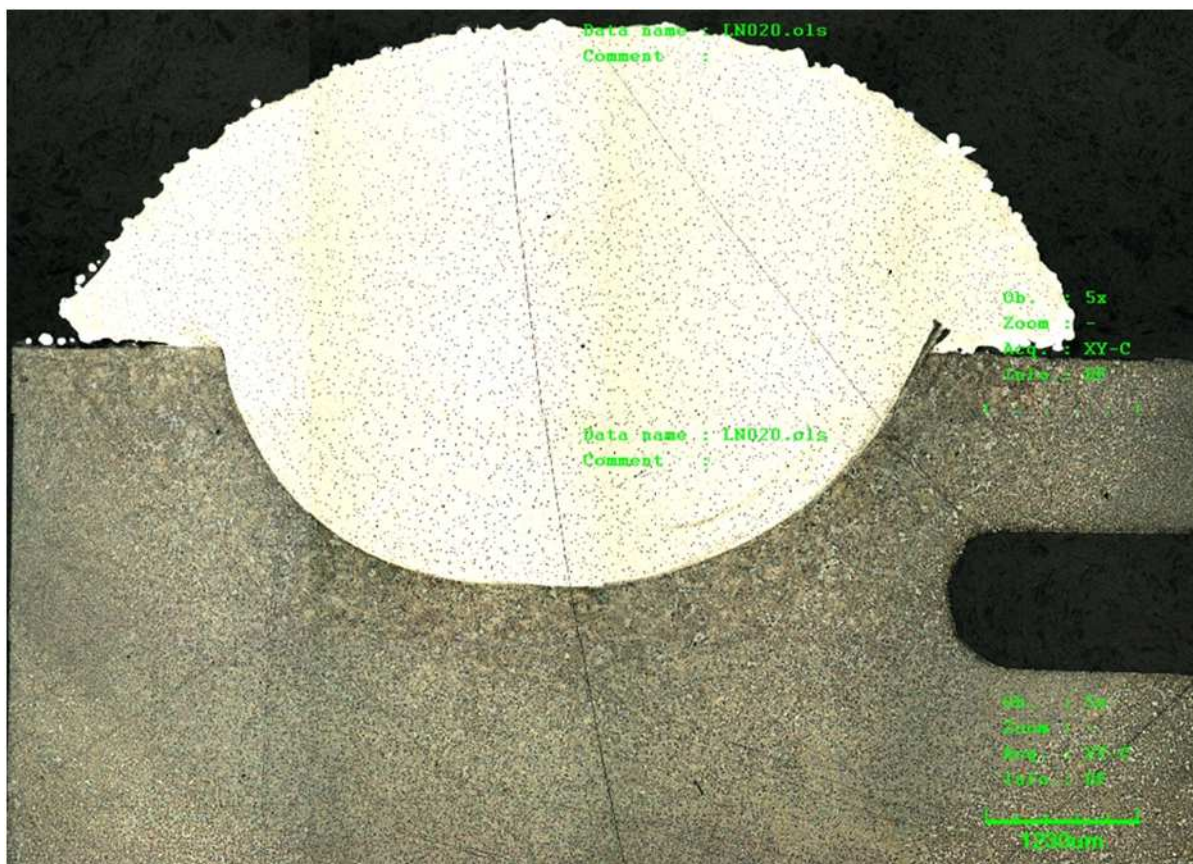
Obr. 50 Průvarové svary	36
Obr. 51 Ukázky laserového značení	37
Obr. 52 Ukázka laserového kalení	38
Obr. 53 Měření tvrdosti podle Vickerse	39
Obr. 54 Příprava metalografického výbrusu	40
Obr. 55 Adhezivní opotřebení	41
Obr. 56 Abrazivní opotřebení	41
Obr. 57 Únavové opotřebení	41
Obr. 58. Metoda Pin-On-Disc	42
Obr. 59 Metoda Abrasion-Wheel-Test	43
Obr. 60 Navařování vrstev	44
Obr. 61 Diodový laser	44
Obr. 62 Robot Fanuc s navařovací hlavou	45
Obr. 63 Dělení vzorku na pile MTH	45
Obr. 64 Broušení vzorku na leštičce Struers	45
Obr. 65 Olympus Lens OLS 3100	46
Obr. 66 Tvrdoměr ZWICK 3212	46
Obr. 67 Základní materiál	47
Obr. 68 Navařené vrstvy A1–A6	48
Obr. 69 Vzorky po leptání	49
Obr. 70 Makrostruktura vzorku B8	49
Obr. 71 Bublina ve vzorku B5	50
Obr. 72 Mikrostruktura vzorku A5 při zvětšení 50x	51
Obr. 73 Mikrostruktura vzorku A5 při zvětšení 20x	51
Obr. 74 Geometrie návaru	52
Obr. 75 Graf závislosti plochy návaru na velikosti posuvu	53
Obr. 76 EDS analýza vzorků A1, A6	53
Obr. 77 EDS analýza vzorků A7, A12	54
Obr. 78 Průběhy tvrdostí ve vzorcích A1–A6	55
Obr. 79 Průběh tvrdostí ve vzorcích A7–A12	56
Obr. 80 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B1–B5	57
Obr. 81 Průběh tvrdostí ve vzorcích B5–B9	58
Obr. 82 Kontrolní návar plamenem	59
Obr. 83 Mikrostruktura vzorku A5	60
Obr. 84 Mikrostruktura niklového návaru NP 60	60
Obr. 85 Teplotní pole u vzorku A3	61
Obr. 86 Chladnutí vrstev	61
Tab. 1 Vlastnosti navařené vrstvy.	21
Tab. 2 Porovnání jednotlivých laserů	32
Tab. 3 Chemické složení oceli 11375.	47
Tab. 4 Mechanické vlastnosti oceli 11375.	47
Tab. 5 Chemické složení a mechanické vlastnosti prášku Surfit 1560.	47
Tab. 6 Společné procesní parametry.	48
Tab. 7 parametry navařování.	48
Tab. 8 Geometrické rozměry návarů.	50
Tab. 9 Plochy návarů a velikosti zředění.	52
Tab. 10 Průběhy tvrdostí ve vzorcích A1–A6.	55
Tab. 11 Průběhy tvrdostí ve vzorcích A7–A12.	56
Tab. 12 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B1–B4.	57
Tab. 13 Průběhy tvrdostí ve vzorcích B5–B9	58
Tab. 14 Srovnání udávaných tvrdostí.	59

Seznam příloh

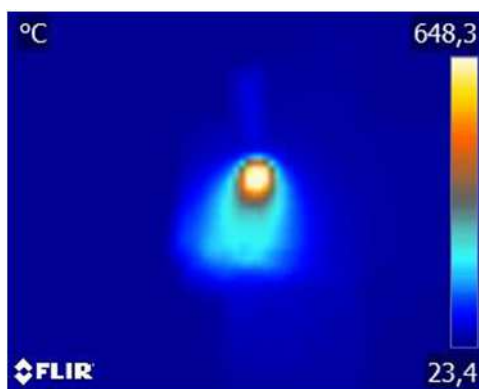
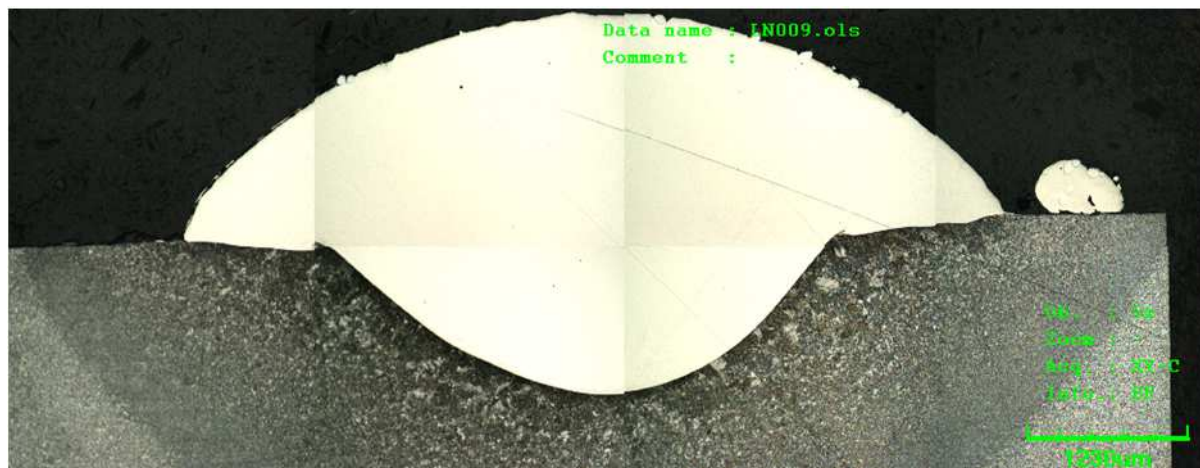
Příloha 1 Snímky makrostruktury a teplotních polí u jednotlivých vzorků.

Příloha 2 Specifikace prášku Surfit 1560.

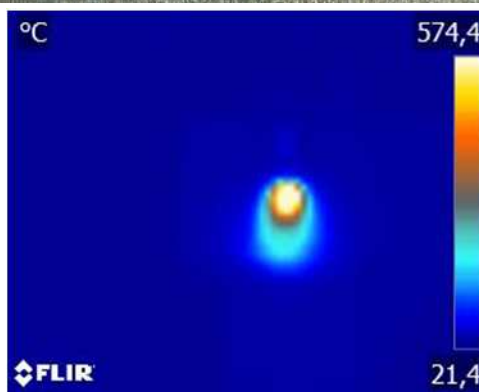
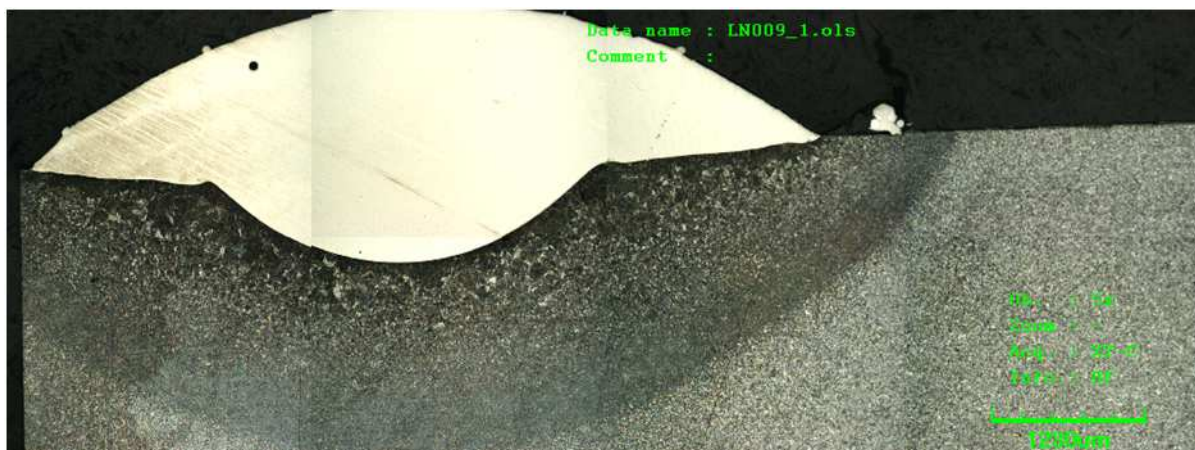
Příloha 3 Specifikace prášku kontrolního návaru NP 60.

Příloha 1 Snímky makrostruktury a teplotních polí u jednotlivých vzorků.**Vzorek A1** 2,5 kW, posuv 5cm/min, zředění 33,4 %, tvrdosti vrstvy ~ 310 HV5

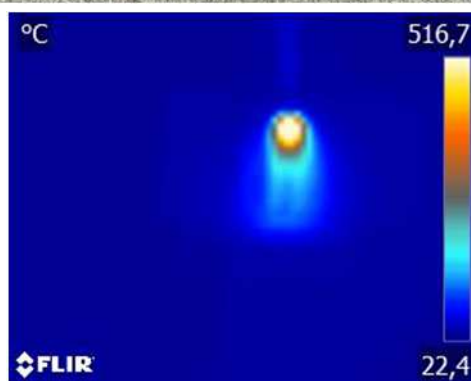
Vzorek A2 2,5 kW, posuv 10 cm/min, zředění 32,8 %, tvrdosti vrstvy ~185 HV5



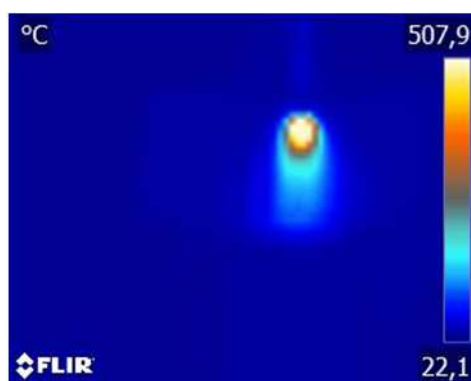
Vzorek A3 2,5 kW, posuv 15 cm/min, zředění 30,2 %, tvrdosti vrstvy ~213 HV5



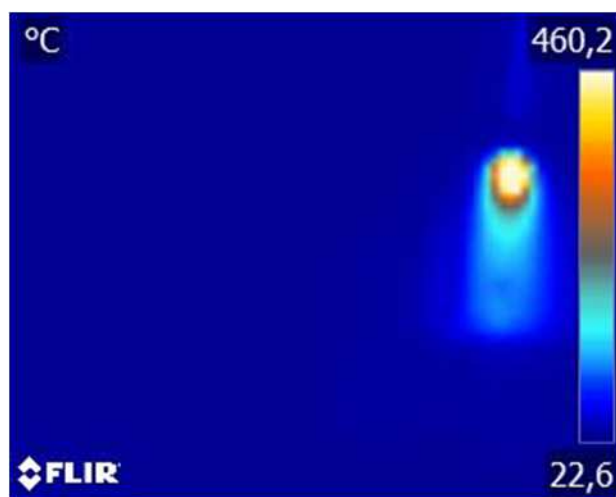
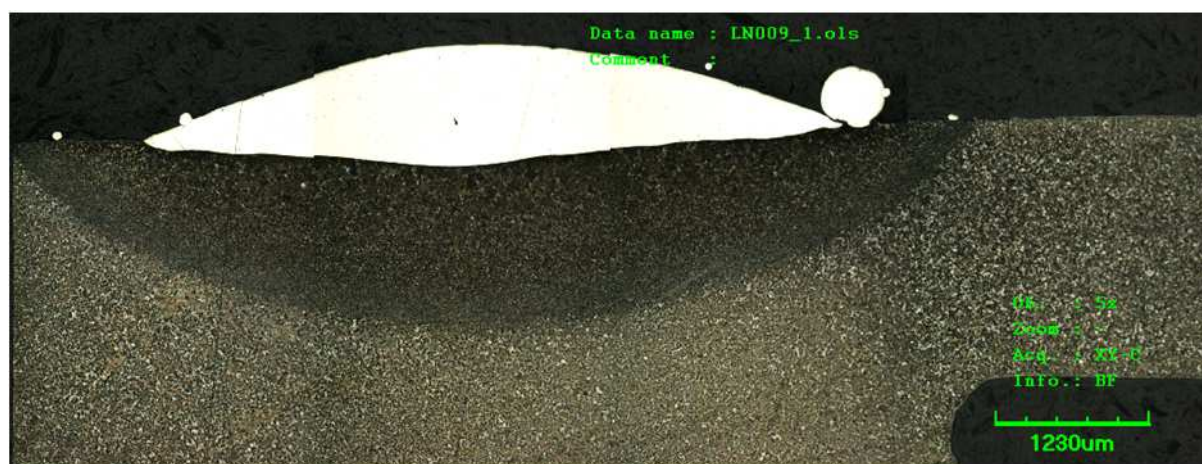
Vzorek A4 2,5 kW, posuv 20 cm/min, zředění 27,2 %, tvrdosti vrstvy ~259 HV5



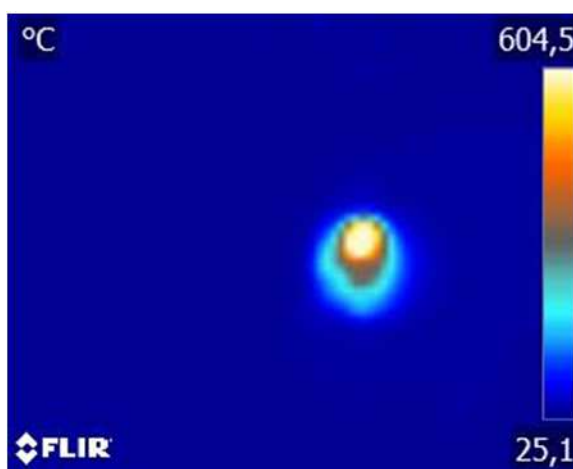
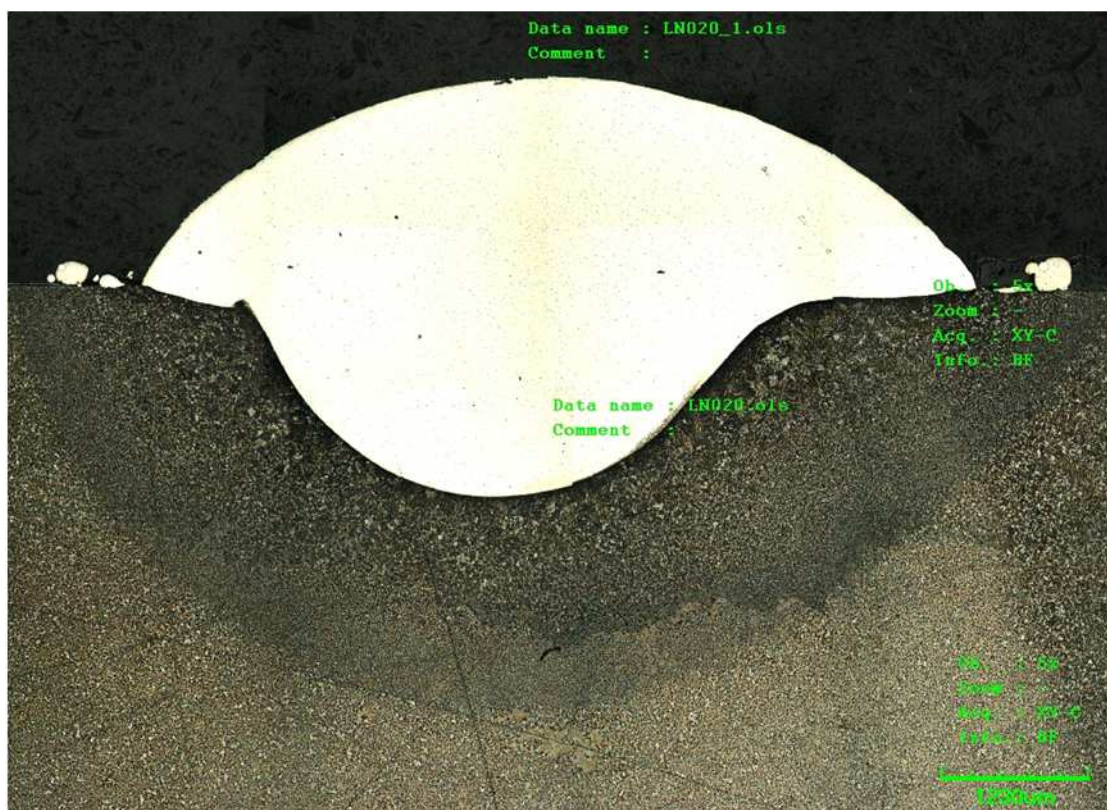
Vzorek A5 2,5 kW, posuv 25 cm/min, zředění 29,2 %, tvrdosti vrstvy ~270 HV5



Vzorek A6 2,5 kW, posuv 30 cm/min, zředění 27,3 %, tvrdosti vrstvy ~276 HV5



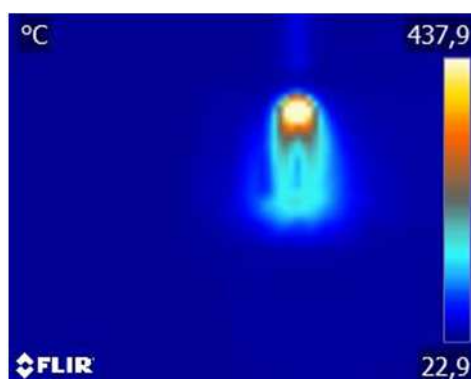
Vzorek A7 3 kW, posuv 10 cm/min, zředění 39,6 %, tvrdosti vrstvy ~ 220 HV5



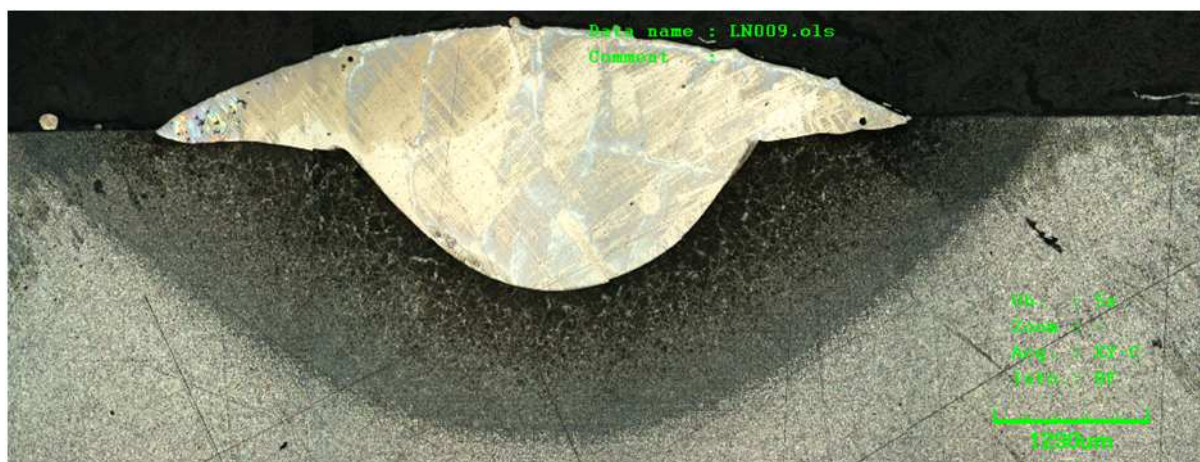
Vzorek A8 3 kW, posuv 15 cm/min, zředění 45,1 %, tvrdosti vrstvy ~210 HV5



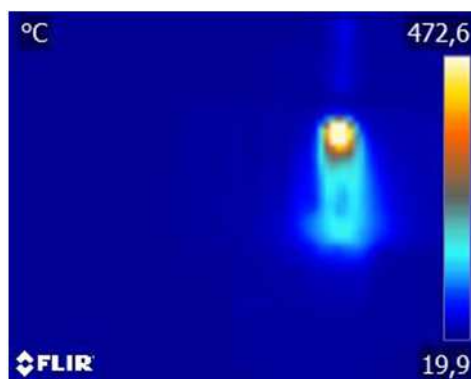
Vzorek A9 2,5 kW, posuv 20 cm/min, zředění 52,7 %, tvrdosti vrstvy ~200 HV5



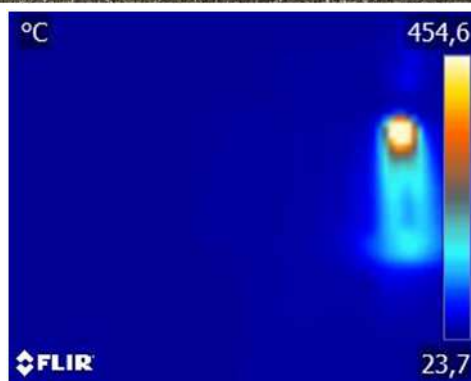
Vzorek A10 3 kW, posuv 25 cm/min, zředění 52,4 %, tvrdosti vrstvy ~ 210 HV5



Vzorek A11 3 kW, posuv 30 cm/min, zředění 50,6 %, tvrdosti vrstvy ~ 211 HV5



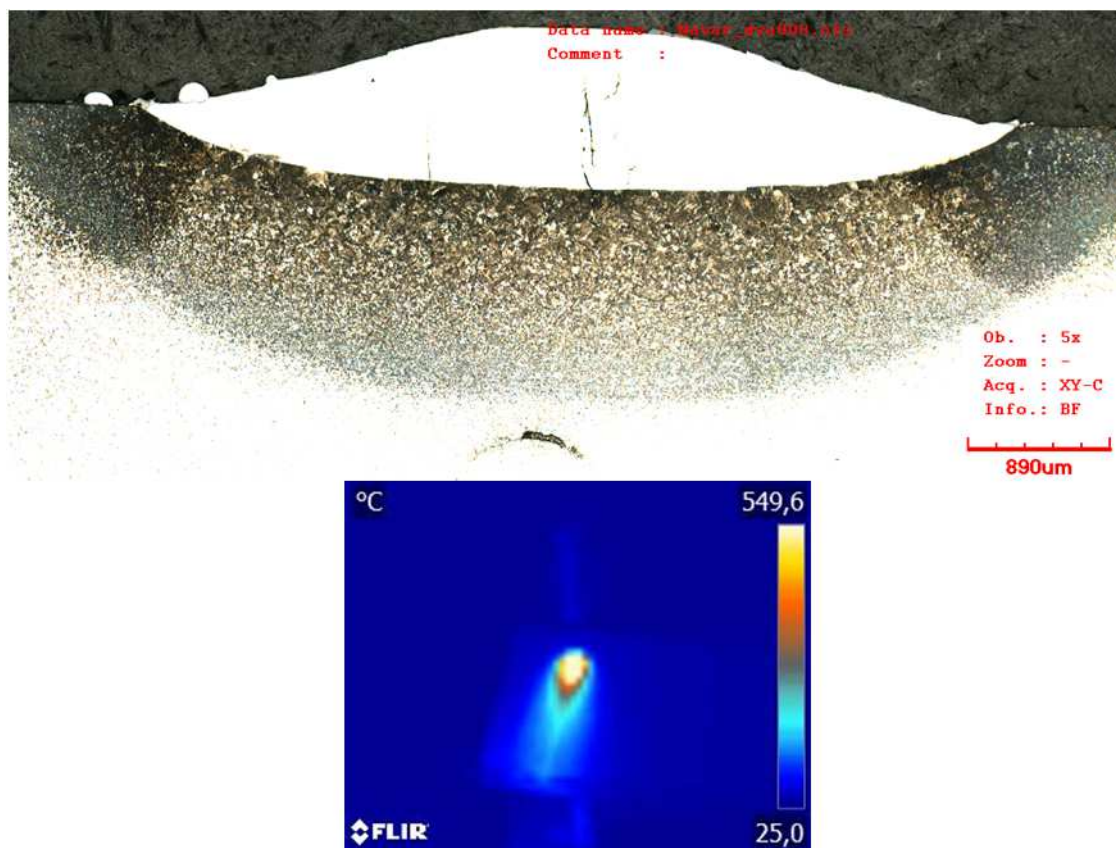
Vzorek A12 3 kW, posuv 35 cm/min, zředění 50,1 %, tvrdosti vrstvy ~ 220 HV5



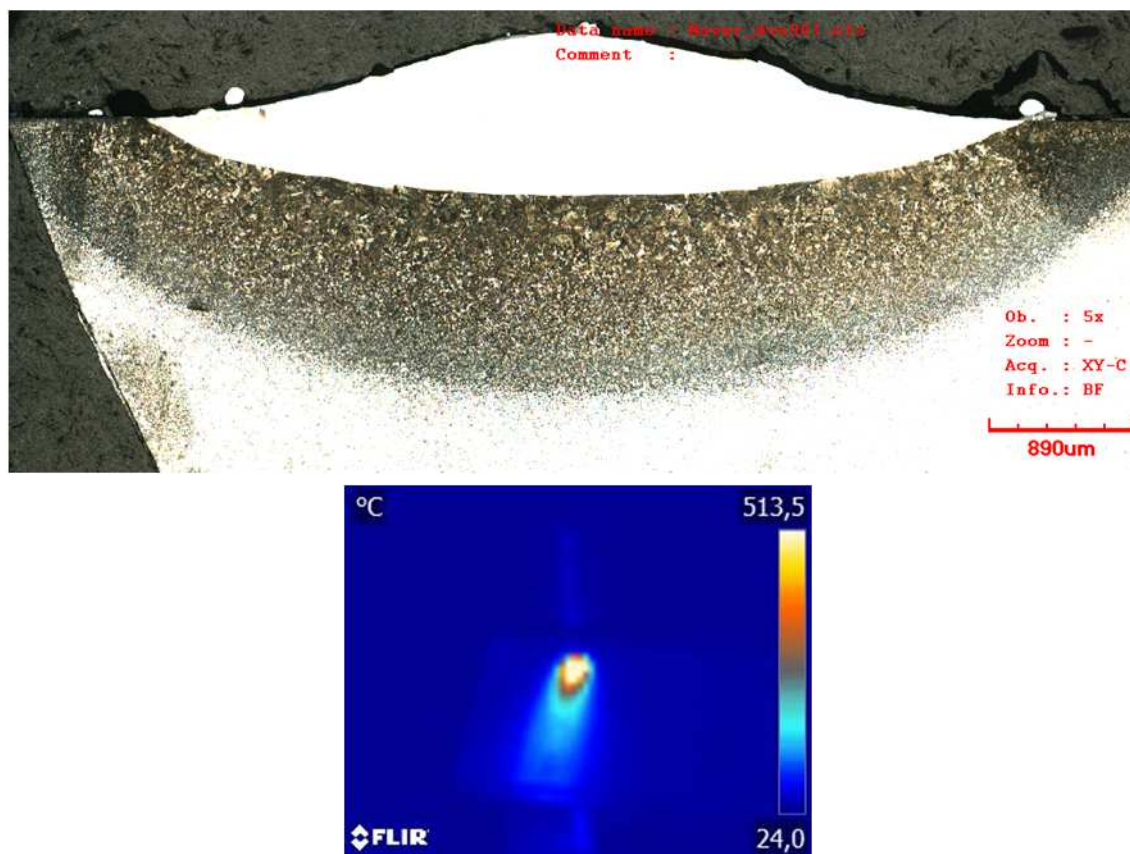
Vzorek B1 2,5 kW, posuv 35 cm/min, zředění 55,7 %, tvrdosti vrstvy ~ 320 HV5



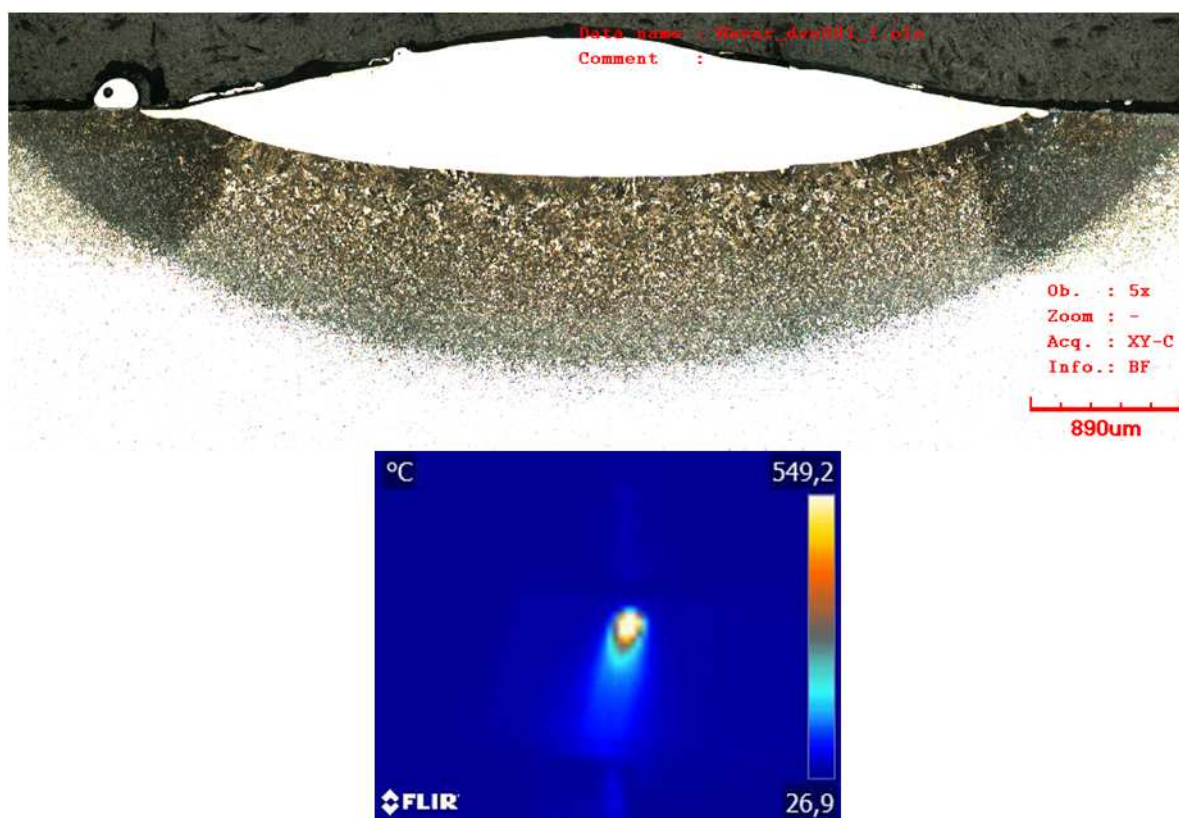
Vzorek B2 2,5 kW, posuv 40 cm/min, zředění 54,7 %, tvrdosti vrstvy ~320 HV5



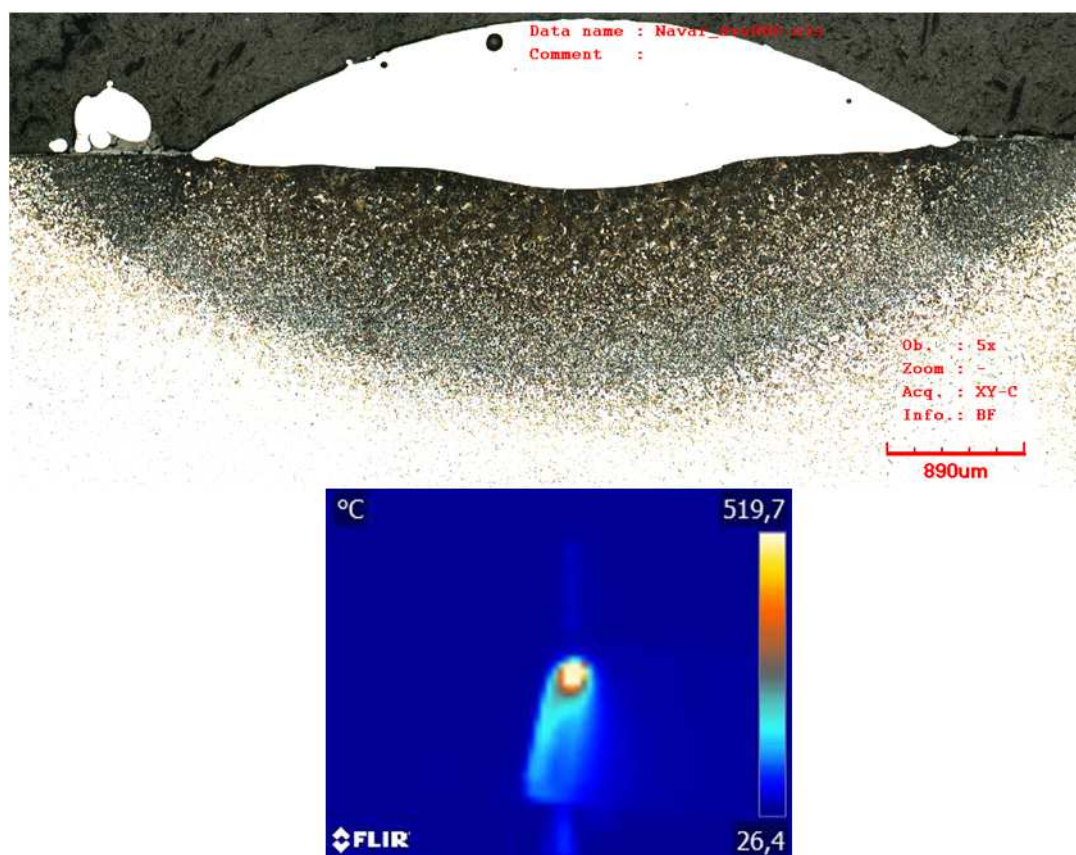
Vzorek B3 2,5 kW, posuv 45 cm/min, zředění 57,7 %, tvrdosti vrstvy ~320 HV5



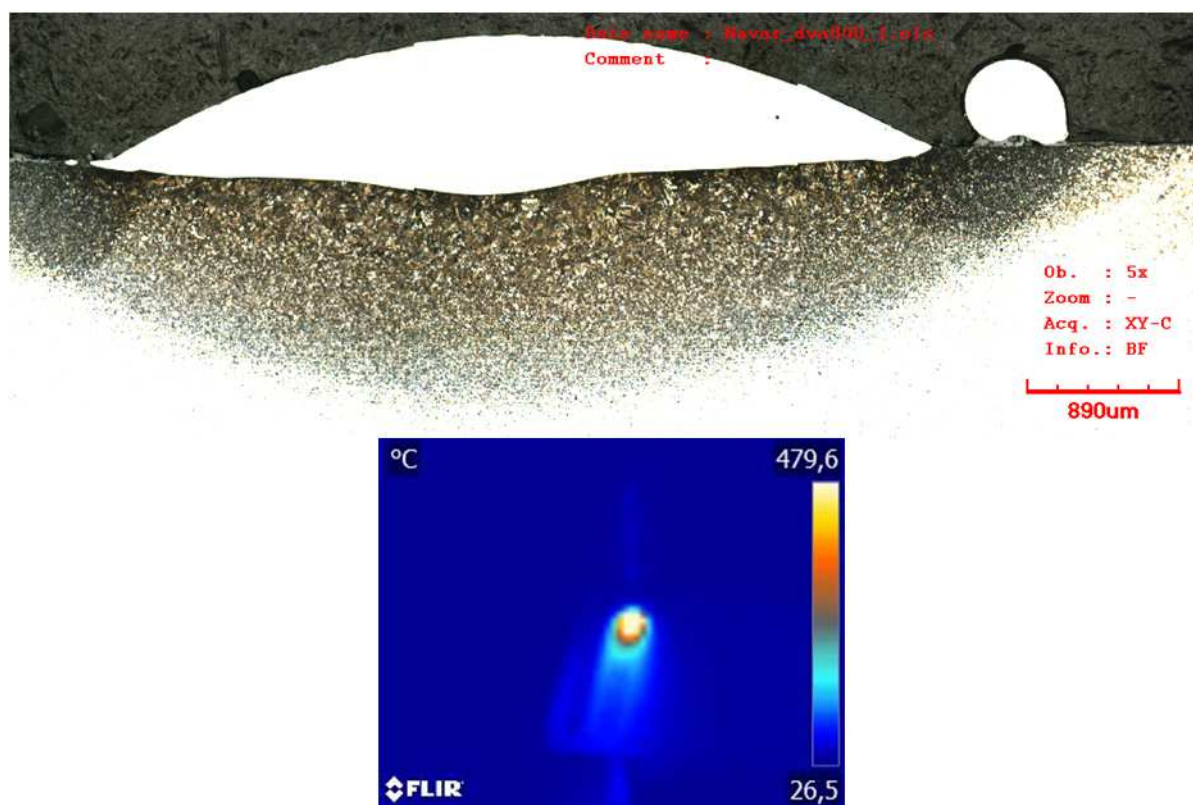
Vzorek B4 2,5 kW, posuv 40 cm/min, zředění 53,2 %, tvrdosti vrstvy ~157 HV5



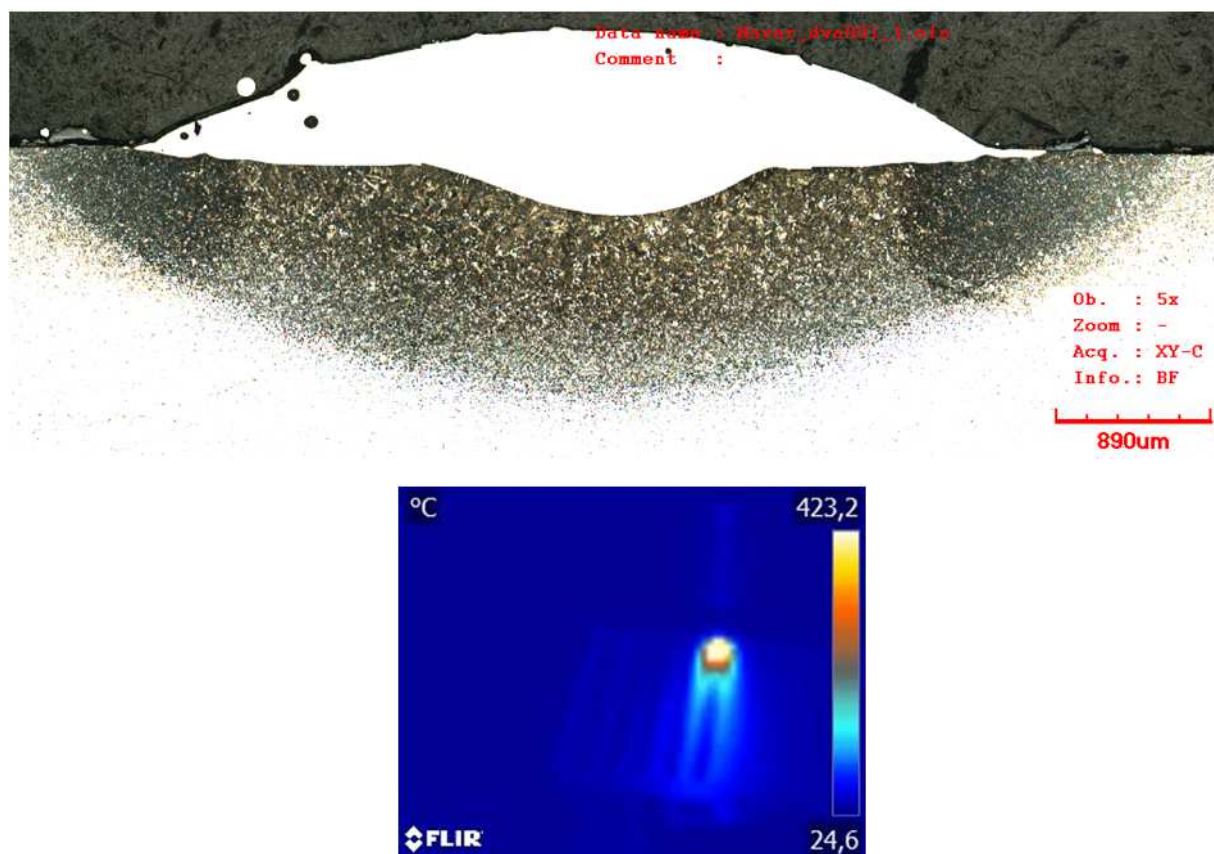
Vzorek B5 2 kW, posuv 25 cm/min, zředění 20,5 %, tvrdosti vrstvy ~255 HV5



Vzorek B6 2 kW, posuv 30 cm/min, zředění 21,2 %, tvrdosti vrstvy ~ 275 HV5

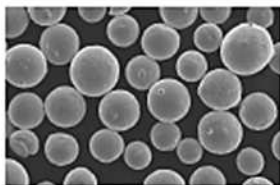


Vzorek B8 2 kW, posuv 35 cm/min, zředění 25,7 %, tvrdosti vrstvy ~ 340 HV5



Vzorek B9 2 kW, posuv 40 cm/min, zředění 27 %, tvrdosti vrstvy ~335 HV5



Příloha 2 Specifikace prášku Surfit 1560.**Höganäs** **Surfit™ 1560****Manufacturing Process**
Gas AtomisedOrigin: Belgium
Article No. 115956**Features & Benefits**hard wear resistance
recommended carbide
tools for machining &
grinding**PTA - Ni base**For more information please contact
info@hoganasthermalspray.com

www.hoganasthermalspray.com | www.hoganas.com

Product Data Sheet**Application Properties**Hardness
Solidus
Liquidus**Typical Values**62
970
1200**Unit**HRC
°C
°C**Physical Properties**Apparent Density
Flow**Typical Values**4,4
15,7**Unit**g/cm³
s/50g**Chemical Analysis**Fe
C
Si
B
Ni
Cr**Product Specifications**

Min	Max	Unit
2,40	4,60	%
0,65	0,80	%
3,90	4,90	%
3,00	3,40	%
Balance		
14,00	16,00	%

Sieve Analysis

µm	Mesh
+ 180	+80
+ 150	
53-150	
-53	-270

Product Specifications

Min	Max	Unit
	0,00	%
	3,00	%
Balance		
	2,00	%

Standard Packaging

Bottle 5 kg

Příloha 3 Specifikace prášku kontrolního návaru NP 60.

KOVOVÉ PRÁŠKY NA NANÁŠANIE ZA TEPLA

Nanášanie kyslíkovo-acetylénovým horákom, napr. NPK, Eutalloy Super Jet, prípadne plazmou

Značka	Súvisiace normy DIN	Smerné chemické zloženie (hmot. %)									Tvrdosť	Odporúčaná hrúbka nanese. vrstvy (mm)	Spotreba prášku ***	Granulácia	Nastavenie plameňa	Merná násepová hmotnosť (g/cm ²)	Teplotnosť (°/50g)
		C	Si	B	Fe	Cu	Cr	W	Mo	Ni							
NP 52	32 530	max.	max.	max.	max.	-	8,0	-	-	zv.	HRC	max.	cca	-100 +5*	neutrálny	4,8	16
	32 529	0,5	5,0	3,5	5,0	-	14,0	-	-	-	48-54	3,0	0,83				
Samotroskotvorný práškový prídavný materiál na báze NiCrBSi - na nanášanie plameňom a plazmou (granulácia pre nanášanie plazmou: -45 +5 µm). Nanosená vrstva je odolná proti opotrebeniu, korózii, oxidácii pri vysokej teplote i s nízkym koeficientom trenia proti iným kovom. Prášok sa používa na nanášanie funkčných plôch hriadeľov, puzdiel mechanických upchávkov, častí strojov a pod.																	
NP 58	32 530	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	zv.	HRC	max.	cca	-100 +5*	neutrálny	4,8	17
	32 529	0,6	4,5	4,0	10,0	2,5	15,0	2,5	2,5	-	54-59	3,0	0,82				
Samotroskotvorný práškový prídavný materiál na báze NiCrBSi - na nanášanie plameňom a plazmou (granulácia pre nanášanie plazmou: -45 +5 µm). Nanosená vrstva je odolná proti opotrebeniu, korózii a oxidácii. Prášok je vhodný na nanášanie zakrivených plôch a hrubých stien. Vrstva má vysokú tvrdosť aj pri vysokej teplote. Prášok sa používa na nanášanie funkčných plôch hriadeľov, puzdiel a pri stavbe strojov a zariadení, kde sa vyžaduje extrémna odolnosť proti opotrebeniu, korózii a teplote.																	
NP 60	32 530	max.	max.	max.	max.	-	max.	-	-	zv.	HRC	max.	cca	-100 +5*	neutrálny	4,5	17
	32 529	0,6	5,0	3,9	5,0	-	16,0	-	-	-	56-62	3,0	0,89				
Samotroskotvorný práškový prídavný materiál na báze NiCrBSi - na nanášanie plameňom a plazmou (granulácia pre nanášanie plazmou: -45 +5 µm). Nanosená vrstva je odolná proti opotrebeniu, korózii, oxidácii pri vysokej teplote s nízkym koeficientom trenia proti iným kovom. Prášok sa používa na nanášanie funkčných plôch hriadeľov, puzdiel mechanických upchávkov, častí strojov a zariadení. Pri miešaní s karbidom volfrámu (WC) slúži ako základná hmota, ktorá sa pri nanášaní taví a viaže karbidické častice na základný materiál.																	
NP 60 WC20	32 530	max.	max.	max.	max.	-	max.	****	-	zv.	HRC**	max.	cca	-125 +45*	neutrálny	5,9	12
	32 529	0,6	5,0	3,9	5,0	-	20,0			-	75-82	3,0	0,89				
Mechanicky zmiešaná zmes samotroskotvorného práškového prídavného materiálu na báze Ni (NP 60) a karbidu volfrámu - na nanášanie plameňom a plazmou. Samotroskotvorná zliatina slúži ako základná hmota, ktorá sa pri nanášaní taví a viaže karbidické častice na základný materiál. Vrstva je odolná proti korózii a napriek jej vysokej tvrdosti je odolná proti nárazom. Jemne rozdelený podiel W ₂ C zvyšuje odolnosť proti abrázii aerosólmi. Vytvára hutné nánosy vysokej tvrdosti, extrémne odolné proti opotrebeniu, silnému oteru a erózii pri teplotách do cca 550 °C. Prášok sa používa na nanášanie škrabacích a miešacích lopatiek, stieračov, hriadeľov miešaciek a závitoviek, rezných kotúčov a pod. Nanosená vrstva je zvlášť vhodná na použitie pre abrazívne prostredie pastovitých a hlienovitých médií, piesku a prachu. Maximálny obsah karbidickej zložky: 20 %.																	
NP 60 WC45	32 530	max.	max.	max.	max.	-	max.	****	-	zv.	HRC**	max.	cca	-125 +45*	neutrálny	7,0	12
	32 529	0,6	5,0	3,9	5,0	-	20,0			-	75-85	3,0	1,0				
Mechanicky zmiešaná zmes samotroskotvorného práškového prídavného materiálu na báze Ni (NP 60) a karbidu volfrámu na nanášanie plameňom a plazmou (zrinitosť pre nanášanie plazmou: -45 +5 µm). Samotroskotvorná zliatina slúži ako základná hmota, ktorá sa pri nanášaní taví a viaže karbidické častice na základný materiál. Vrstva je odolná proti abrázii, má hladký povrch odolný aj proti korózii. Je dobre zmáčavá na feritickom a austenitickom základnom materiáli a zabezpečuje rovnomerné rozloženie tvrdokovu do 750 °C. Použiteľná na hriadele čerpadiel, závitnice, lopatky používané v energetike, v chemickom, potravinárskom a krmovinárskom priemysle, atď. Nanosená vrstva je opracovateľná iba brúsením diamantovými brúsnymi prostriedkami, sústružiť sa dá iba bórnitridovými nástrojmi. Maximálny obsah karbidickej zložky: 45 %.																	

* Iná granulácia podľa požiadaviek zákazníka. Tvar zŕn práškov je sférický.

** Tvrdosť - karbidická zložka (základná hmota - pozri NP 60).

*** pri hrúbke vrstvy 0,1 mm (kg.m⁻²)**** zmes obsahuje 20% W₂C