

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:

N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Laserové navařování nástrojových ocelí

Autor: Bc. Vladyslav Arseniuk

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vladyslav ARSENIUK**
Osobní číslo: **S20N0092P**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Laserové navařování nástrojových ocelí**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Základy přímého laserového navařování
2. Druhy laserů pro aplikaci navařování
3. Volba přídavného materiálu
4. Druhy laserových zdrojů používaných pro navařování
5. Současný stav poznání – laserové navařování
6. Experimentální část
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Hemmati, I. – Laser-deposited metallic coatings. PhD. Thesis 2013, Groningen ISBN 9789077172940.

Toyserkani, E., Khajepour, A., CORBIN, S. – Laser cladding. ISBN 9780849321726. Published August 12, 2004, CRC Press.

Ion, J. C. – Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. 2005 Elsevier Ltd. ISBN 978-0-7506-6079-2.

William M. Steen – Laser Material Processing, 2005 Springer-Verlag London 2010, ISBN 978-1-84996-061-8.

Sindo Kou – Welding Metallurgy, 2003 John Wiley & Sons, Inc., ISBN:9780471434917.

G. Buchfink: Trumpf – The laser as a tool, ed. N. Leibinger-Kammuler, 2007 Vogel Buchverlag Wurzburg, ISBN 13-978-3-8343-3072-7.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Pavla Bartoň Klufová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Arseniuk	Jméno Vladyslav	
STUDIJNÍ PROGRAM	N2301 – Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němeček, Ph.D.	Jméno Stanislav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Laserové navařování nástrojových ocelí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	47	GRAFICKÁ ČÁST	25
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se věnuje teplotnímu ovlivnění navařovaných vrstev. Porovnává návary z nástrojových ocelí AISI H13 a Capilla 66 z hlediska náchylnosti k popouštění při navařování. Byly optimalizovány parametry navařování, na jejich základech byly připraveny vzorky. Byly sledovány parametry vlivu množství podávaného prášku, typu prášku a strategie navařování na geometrii návaru a interpas teploty během navařování. Také byl ověřen vliv tepelného zpracování po navaření na homogenizaci tvrdosti v návaru.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Technologie laserové navařování, laser, laserový zdroj, přídatný materiál ve formě prášku, Capilla66 , H13, metalografická analýza, světelná mikroskopie, tvrdost</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Arseniuk	Name Vladyslav	
STUDY PROGRAMME	N2301 – Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němeček, Ph.D..	Name Stanislav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Laser cladding of tool steels		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	47	GRAPHICAL PART	25
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the temperature influence of clad layers. It compares clads made of AISI H13 and Capilla 66 tool steels in terms of susceptibility to tempering during welding. The cladding parameters were optimized and samples were prepared on their basis. The parameters of the influence of the amount of powder fed, the type of powder and the welding strategy on the geometry of the clad and the interpass temperature during cladding were monitored. The effect of heat treatment after cladding on the homogenization of hardness in the clads was also verified.
KEY WORDS	Laser cladding technology, laser, laser source, powder additional material, Capilla66, H13 , metallographic analysis, light microscopy hardness

Obsah

Úvod	14
1 Teoretická část laserového navařování	14
1.1 Současný stav navařování kovových povrchů	14
1.1.1 Historie	14
1.1.2 Stávající hlavní problémy a trend vývoje	15
1.1.2.1 Navařování elektronovým paprskem	16
1.1.2.2 Extrémně rychlé laserové navařování	18
1.1.3 Srovnání mezi laserovým navařováním a ostatními technologiemi	19
1.2 Technologie přímého laserového navařování	20
1.2.1 Principy procesu laserového navařování	20
1.2.1.1 Přidání materiálu vstřikováním prášku	20
1.2.1.2 Laserové navařování s podáváním drátu	21
1.2.1.3 Laserové navařování pastou	22
1.2.1.4 Dvoustupňové laserové navařování	22
1.2.2 Výhody a nevýhody laserového navařování	23
1.2.3 Použití laserové navařování	24
1.2.3.1 Lopatka letecké turbíny	24
1.2.3.2 Nástroje	25
1.2.3.3 Sedlo ventilu a navařování vložky	26
1.3 Volba přídavného materiálu	26
1.3.1 AISI H13.....	26
1.3.2 Capilla 66	27
1.3.3 Ostatní práškové slitiny	27
1.3.4 Schaefflerův diagram	28
1.4. Metalurgie navařovaných povlaků	28
1.4.1 Fyzikální jevy probíhající v laserovém navařování.....	29
1.4.2 Tavenina	30
1.4.3 Promíšení	31
1.4.4 Částečně roztavená	31
1.4.5 Tepelné ovlivněná oblast	31
1.4.5.1 Rekrystalizace	32

1.4.5.2 Růst zrna	32
2 Experimentální program	34
2.1 Stroje, přístroje a zařízení používané pro laserové navařování a vyhodnocení vzorků	34
2.2 Specifikace zařízení pro laserové navařování Trumpf TruDisk 4006	36
2.3 Specifikace použitých materiálů	37
2.3.1 Specifikace substrátu pro laserové navařování	37
2.3.2 Specifikace přídavného prášku pro laserové navařování.....	37
2.4 Optimalizace procesních podmínek a parametry laserového navařování	38
2.4.1 Procesní podmínky množství prášku	38
2.5 Příprava laserových návarů	39
2.5.1 Příprava a metalografické hodnocení vzorků	40
2.5.2 Hodnocení průběhů tvrdosti laserových návarů	41
2.5.2.1 Vzorky návarů z Capilla 66	42
2.5.2.2 Vzorky návarů z H13	45
2.5.2.3 Vzorky po tepelném zpracování	48
2.6 Rotační navaření vzorku trubky	49
2.6.1 Tvrdost navařeného příčného průřezu trubky	49
2.6.2 Simulace navaření vzorku trubky	50
2.7 Diskuze	52
2.8 Závěr.....	54
Seznam použité literatury	55
PŘÍLOHA č. 1	57

Přehled použitých zkratk a symbolů

CAD – Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)

CAM – Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)

TOZ – Tepelně ovlivněná zóna

LMD – Laser Metal Deposition (laserové nanášení kovů)

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)

v_c – rychlost navařování [m/min]

λ – vlnová délka [nm]

P – výkon laseru [W]

I_e – intenzita záření [W/m²]

F – rychlost podávání prášku [g/min]

S – velikost spotu [mm x mm]

ČSN – Česká soustava norem

MTU – Maximum Transmission Unit (maximální přenosná jednotka)

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel (vysokorychlostní žárový nástřík)

IMTI - Integrated Manufacturing Technologies Institute

HEA – High Entropy Alloys (vysoko entropické slitiny)

EHLA – Extreme High-Speed Laser Material Deposition (extrémně rychlé laserové navařování)

PVD – Physical Vapor Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)

CVD - Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze)

TIG - Tungsten Inert Gas (wolframový inertní plyn)

PTA - Plasma Transferred Arc (plazmově přenesený oblouk)

HAZ – Heat Affected Zone (zóna ovlivněná teplem)

PMZ – Partially Molten Zone (částečně roztavená zóna)

TZ – Tepelné Zpracování

ASTM - American Society for Testing and Materials

Seznam obrázků

Obrázek 1. Laserové navařování[4]	15
Obrázek 2. Schéma procesu navařování elektronovým paprskem pomocí drátu[7].....	17
Obrázek 3. Schéma vzájemné polohy hrotu přídavného materiálu k elektronovému paprsku[12]	18
Obrázek 4. Schéma extrémně rychlého laserového navařování[11]	19
Obrázek 5. (a) Boční a (b) koaxiální nastavení pro laserové navařování vstříkáváním prášku[3]	21
Obrázek 6. Schéma laserové navařování s podáváním drátu[1]	21
Obrázek 7. Schéma laserové navařování pastou[1]	22
Obrázek 8. Schéma dvoustupňové laserové navařování[1]	23
Obrázek 9. (a) Obraz pórovitosti při laserovým nanesení povlaku pomocí optickou mikroskopií; (b) Skenovací obraz elektronové mikroskopie ukazující vnitřní póry[3]	24
Obrázek 10. (a) Povlakování a (b) opravy lopatek turbíny pomocí laseru navařování[3]	25
Obrázek 11. (a) Laserem navařování skleněné plunžry, (b) laserové navařování formy pro tváření za tepla[3].....	25
Obrázek 12. Vrtací nástroje s kompozitními povlaky WC navařováními laserem ve vybraných oblastech. Navařované oblasti jsou zvýrazněny šipkami[3]	26
Obrázek 13. (a) Laserové navařování čela sedla ventilu, (b)laserová depozice jako náhrada za vločky ventilových sedel[3]	26
Obrázek 14 Schaefflerův diagram[16]	28
Obrázek 15. Různé zóny laserem navařované struktury[17]	29
Obrázek 16. Schéma vlivu konvekce během procesu laserového navařování[1]	30
Obrázek 17. Schéma bazénu taveniny při laserovém navařování[1]	30
Obrázek 18. Vzorec promíšení[3]	31
Obrázek 19. Základní geometrické charakteristiky laserového návaru[3].....	31
Obrázek 20. Růst zrna v HAZ: (a) fázový diagram; b) tepelné cykly; c) variace velikosti zrn [16]	32
Obrázek 21. Vliv tepelného příkonu na jednotku délky návaru na: (a) šířku HAZ (stínované), (b) tepelné cykly blízko tavné hranice a (c) profily pevnosti nebo tvrdosti. [16]	33
Obrázek 22. Metalografické stroje a zařízení a) Struers LABOFORCE-100 b) DuraScan 70 G5 od Emcotestu c) Struers DISCO-TOM-6 d) Struers CITOPRESS-10.....	36
Obrázek 23. Diskový laser Trumpf TruDisk 4006 a navařovací hlava.....	37
Obrázek 24. Obrázek vzorků po zalití v příčných řezech	41
Obrázek 25. Tisky tvrdosti v tepelné ovlivněné zóně CK8, zvětšení x2,5	42
Obrázek 26. Makrostruktura návaru vzorku a)CZ7 a b)CK7 při zvětšení x2,5	43

Obrázek 27. Mikrostruktura návaru vzorku a) CZ7 a b) CK7 při zvětšení x50.....	43
Obrázek 28. Makrostruktura návaru vzorku a) CZ8 a b) CK8 při zvětšení x2,5	44
Obrázek 29. Mikrostruktura návaru vzorku a) CZ8 a b) CK8 při zvětšení x50.....	44
Obrázek 30. Tisky tvrdosti v tepelné ovlivněné zóně HK8, zvětšení x2,5	45
Obrázek 31. Průběh tisků tvrdosti ve HZ7	46
Obrázek 32. Mikrostruktura návaru vzorku a) HZ8 a b) HK8 při zvětšení 50x	47
Obrázek 33. Porovnání struktury vzorků vyřezaných z trubky z materiálu: a) Capilly 66 a b) H13	47
Obrázek 34. Obr. 34: Makrostruktura návaru vzorku a) HZ7 a b) HK7 c) HZ8 a d) HK8 při zvětšení 2,5x.....	48
Obrázek 35. Simulace průběhu navařování po 9s. a teplotní stupnice.....	50
Obrázek 36. Simulace průběhu navařování po 30s. a teplotní stupnice.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 1. Porovnání mezi laserovým navařováním a jinými technikami povlakování[1].....	20
Tabulka 2. Chemické složení oceli AISI H13 podle normy ASTM A681[13].....	27
Tabulka 3. Chemické složení oceli Capilla 66.....	27
Tabulka 4. Stroje, přístroje a zařízení použité v rámci realizace experimentálního programu..	35
Tabulka 5. Specifikace infračerveného diskového laseru Trumpf TruDisk 4006[20].....	36
Tabulka 6. Chemické složení S355.....	37
Tabulka 7. Fyzikální a mechanické vlastnosti H13.....	38
Tabulka 8 Fyzikální a mechanické vlastnosti C66.....	38
Tabulka 9. Porovnání chemického složení H13 a Capilla 66.....	38
Tabulka 10. Prozkoumání parametry laserového navařování.....	38
Tabulka 11. Množství podání prášku (g/min) od zvoleného režimu.....	39
Tabulka 12. Seznam vyrobených vzorků.....	40
Tabulka 13. Seznam leptadel pro použité materiály.....	40
Tabulka 14. Seznam hodnot geometrie a parametru návaru.....	41
Tabulka 15. Seznam hodnot po průběhu tisků.....	46
Tabulka 16. Porovnání výšky a objemu návarů z H13.....	47
Tabulka 17. Souřadnice jednotlivých bodů.....	51
Tabulka 18. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu ve vzorkách z Capilly66.....	57
Tabulka 19. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu ve vzorkách z H13.....	58
Tabulka 20. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelné ovlivněné zóně ve vzorkách.....	59
Tabulka 21. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách CK8 TOZ a HK8 TOZ.....	60
Tabulka 22. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách z Capilly66 tepelné zpracování.....	61
Tabulka 23. Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách z H13 tepelné zpracování.....	62

Seznam grafů

Graf 1. Závislost rychlosti podání prášku v různých režimech.....	39
Graf 2. Porovnání tvrdosti dvou vzorků CZ7 a CK7	42
Graf 3. Porovnání tvrdosti dvou vzorků CZ8 a CK8	42
Graf 4. Závislost tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelné ovlivněné zóně ve vzorků CK8	42
Graf 5. Porovnání tvrdosti dvou vzorků HZ7 a HK7	45
Graf 6. Porovnání tvrdosti dvou vzorků HZ8 a HK8	45
Graf 7. Závislost tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelné ovlivněné zóně ve vzorků HK8	45
Graf 8. Průběh tvrdosti ve vzorku HZ7	46
Graf 9. Porovnání tvrdosti vzorků z Capilly66 TZ	49
Graf 10. Porovnání tvrdosti vzorků z H13 TZ	49
Graf 11. Porovnání tvrdosti vzorků TZ a bez TZ z Capilly 66	49
Graf 12. Porovnání tvrdosti vzorků TZ a bez TZ z H13	49
Graf 13. Porovnání tvrdosti dvou vzorků z Capilly66 a H13 v příčném průřezu trubky.....	50
Graf 14. Závislost tepla na čase průběhu navařování v různých bodech	51
Graf 15. Porovnání tvrdosti vzorků z Capilly66	52
Graf 16. Porovnání tvrdosti vzorků z H13	52
Graf 17. Porovnání tvrdosti dvou vzorků v tepelně ovlivněné zóně základního materiálu	53

Úvod

Diplomové práce se zabývá laserovým navařováním ocelových prášků z různých druhů materiálu z H13, Capilla 66 a tepelně zpracované. Úvodní část se skládá z principu laserové technologie a navařování s přídavným materiálem, diskuse o volbě materiálu a využitých analytických metodách. Druhá část diplomové práce je věnována vytvoření několika variant experimentálních vzorků, které se budou lišit materiálem přídavného prášku, a vyhodnocení navařovaných vzorků bude probíhat pomocí zkoušek tvrdosti HV1 a metalografického hodnocení.

Podstatou technologie laserového navařování je vytvoření jednotlivých vrstev s pevným metalurgickým spojením bez pórů a trhlin a s minimálním promíšením.

Cílem diplomové práce je optimalizovat technologie laserového navařování, popsat vnitřní strukturu a charakter návarů, jejich vzájemné tepelné ovlivnění, vliv tepelného zpracování na výsledné vlastnosti. Na závěr udělat simulace navařování trubky a porovnat s reálným průběhem teplotních poli v návaru.

1. Teoretická část laserového navařování

1.1 Současný stav navařování kovových povrchů

Laserové navařování je interdisciplinární technologie využívající laserovou technologii, automatizovanou výrobou (CAD / CAM), robotiku, senzory a práškovou metalurgii [1].

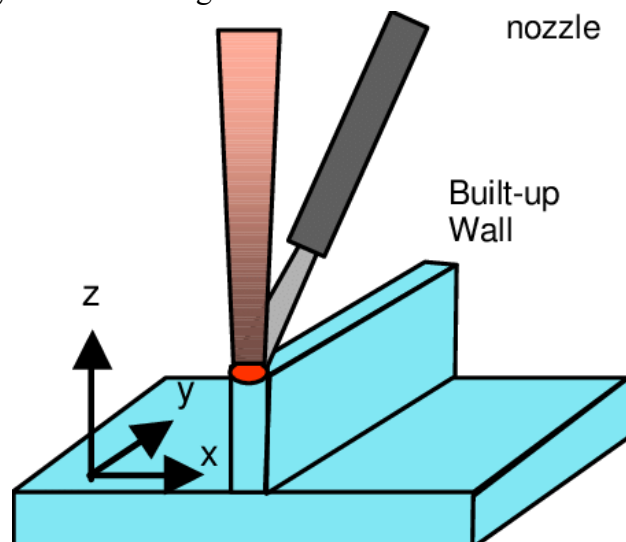
1.1.1 Historie

Mezi laserové zpracování materiálu technologií, navařování bylo používáno Gnanamuthem ve společnosti Rockwell International Corporation v Thousand Oaks, Kalifornii v pozdní 1970. K prozkoumání proveditelnosti postupu při aplikaci keramického návaru na kovové podložce byla použita metoda navařování na podložku [2].

Prvním známým průmyslovým použitím laserového navařování, datovaným v roce 1983, patří aplikace, kdy společnost Rolls Royce úspěšně navařila ochrannou vrstvu na spoje lopatek turbín s rotorem. Tento úspěch podnítil zájem o technologii laserového navařování u řady dalších společností. Následně Technologie byla přijata předními výrobci motorů, jako jsou General Electric, Pratt & Whitney, Allied Signal, Rolls-Royce, Allison, Solarand MTU [3].

Další aplikace laserového navařování, rychlé prototypování nebo vrstvená výroba si získala v devadesátých letech velkou pozornost a pokračuje být prozkoumány v novém tisíciletí. Principem této technologie je postupné navařování vrstev prášku, obdobně jako u technologie 3D tisku.

Na Universitě of Illinois v Urbaně, výzkumná skupina vedená prof. Mazumderem rozšířila svůj projekt na vývoj systémů pro rychlé prototypování, který byl později nazvaný "Direct Metal Deposition". Na konci devadesátých let vyvinula výzkumná skupina pod vedením Xue a Islama z Integrated Manufacturing Technologies Institute (IMTI) zařízení a metodu pro vrstvenou výrobu „laser consolidation“ [1] (obr. 1).



Obr. 1: Laserové navařování[4]

V posledních letech výzkumná skupina na univerzitě ve Waterloo provedla vývoj inteligentního laserového navařovacího zařízení. Znalostí získané v rámci výzkumu budou nakonec použity v autonomním laserovém navařovacím stroje, který dokáže nejen uložit široký rozsah slitin, ale může také vytvářet složité tvary bez nutnosti přítomnosti specialistů.

Flexibilitu laserového navařování začíná uznávat mnoho průmyslových a výzkumných skupin. Potenciál této technologie je velký, protože výzkumné skupiny i nadále přispívají k jejímu růstu prostřednictvím výzkumných programů v oblasti technologie laserového navařování.[1]

1.1.2 Stávající hlavní problémy a trend vývoje

Pokud jde o mikrostrukturu, v materiálu mohou snadno vznikat poruchy způsobené faktory, jako je nečistý materiál nebo vlhký prášek, nadměrný ochranný plyn, rychlé tuhnutí a ochlazování materiálů, snadné vytvářet v materiálu vady pórů. Trhliny se mohou vyskytovat i na velkých plochách vzhledem k existenci různých zbytkových napětí, jako je tepelné napětí. Současně existuje problém segregace prvků v mikrostruktuře. Jak dosáhnout vysoké kvality a automatizace laserového navařování nebo opravy povrchu je stále aktuálním problémem [5].

Laserové navařování má široké vyhlídky a v budoucnu může být posíleno ve čtyřech aspektech. Vývojové tendence pro laserové navařování: [5]

- Vývoj nových materiálových systémů:
 - Gradientní povlaky
 - Optimalizace parametrů procesu.
 - Vývoj zařízení, které přesně řídí rychlost podávání prášku.
 - Amorfny slitiny
 - Návrh a kontrola složení.
 - Analýza mechanismu růstu struktury.
 - Optimalizace parametrů procesu.
 - Vysokoentropické slitiny (Superslitiny *angl.* „HEA“)
 - Teorie tuhnutí krystalů a její vztah k fyzikálním a mechanickým vlastnostem.
 - Amorfny povlak HEA.
 - Syntetický keramický povlak HEA.

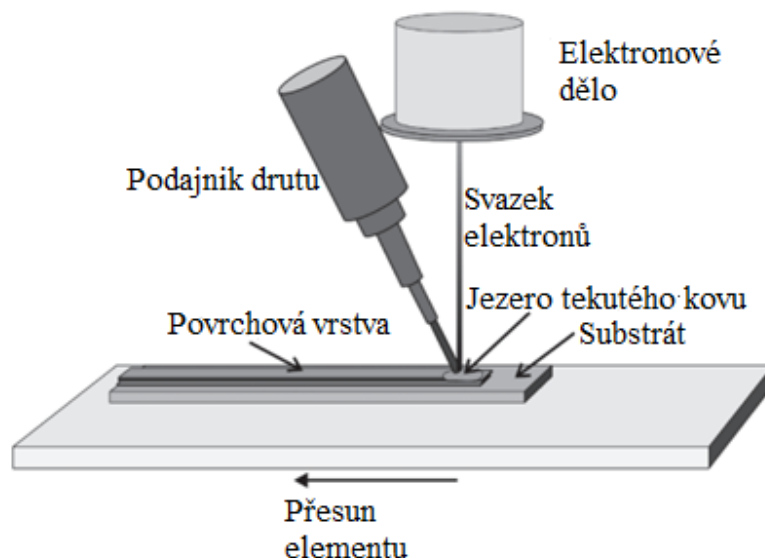
- Následné zpracování laserových návarů:
 - Řezání za pomoci ultrazvuku
 - Zjemnění zrnitosti povrchu.
 - Zvýšení tvrdosti povrchu.
 - Řezání za pomoci laseru
 - Zlepšení kvality povrchu.
 - Ultrazvukový náraz
 - Zlepšení únavových vlastností.
- Simulace, monitorování a řízení procesu:
 - Počítačová simulace
 - Společná analýza teplotního pole, pole napětí a mikrostruktury.
 - Simulace nestacionárního teplotního pole a procesu různých materiálů.
 - Monitorování a řízení
 - Dutiny, míry promíšení a další informace.
 - Sběr dat, technologie umělé inteligence a laserového navařování.
- Optimalizace procesu a zařízení:
 - Optimalizace procesu
 - Mechanismus působení ultrazvukového a elektromagnetického pole na mikrostrukturu.
 - Optimalizace zařízení
 - Malá přenosná laserová navařovací zařízení.
 - Optimalizace laserové navařovací trysky.
 - Laserové navařovací zařízení se složitým zakřiveným povrchem.

Vývoj nových materiálových systémů pro laserové navařování založený na principu vývoje nových materiálových systémů, jako jsou vysoce entropické slitiny, kompozity, amorfni a nanokrystalické materiály, by mělo být v budoucnu těžištěm výzkumu.

Laserové navařování se při tavení základního i navařovaného materiálu spoléhá na laserový paprsek s vysokou hustotou energie. Ten může být ve formě prášku nebo drátu. Proces navařování vytváří úzkou oblast, ve které se roztavený navařovaný materiál a základní materiál metalurgicky spojí. Jejich tuhnutí tak vede k silným metalurgickým vazbám, které poskytují ložisku dobrou soudržnost i přilnavost k základnímu materiálu. Cílem laserového navařování je vytvořit svarový návar s požadovanými vlastnostmi a chemickým složením na základním materiálu bez rozsáhlého promíchání (< 10%) mezi dvěma kovy [6].

1.1.2.1 Navařování elektronovým paprskem

Proces navařování s využitím elektronového paprsku je unikátní technologií, která umožňuje přidávání materiálu ve formě prášku nebo drátu přímo do lázně roztaveného kovu. Navíc je možné rafinovat tekutý kov, protože proces probíhá ve vakuu (obr. 2) [7].



Obr. 2: Schéma procesu navařování elektronovým paprskem pomocí drátu[7]

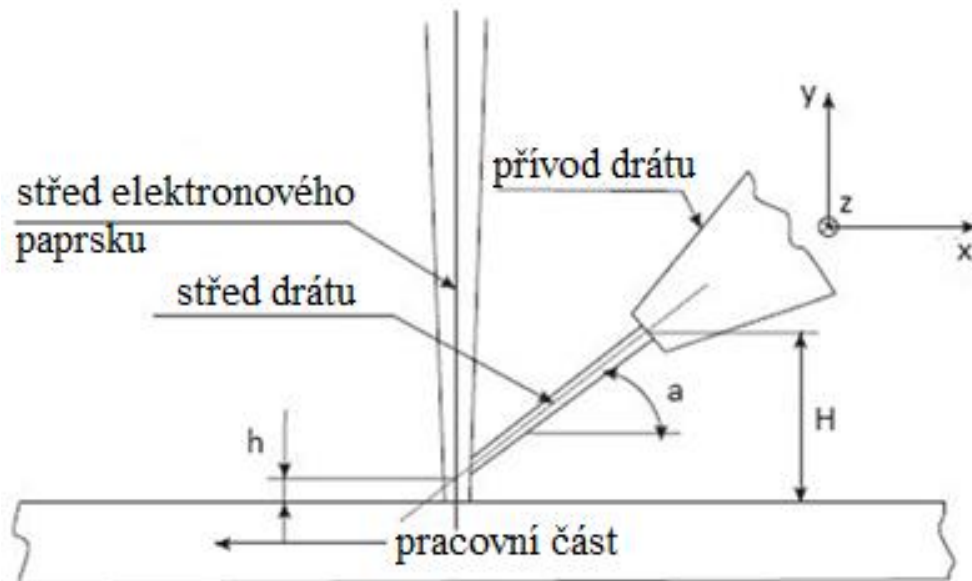
Moderní přístroje poskytují jemné doladění parametrů paprsku, jako je výkon paprsku nebo velikost ohniska. To je důležité zejména zajistit minimální množství přídavné energie do taveniny kovu, na druhou stranu využití energie paprsku o hustotě až 10^{12} W/m². Procesy nanášení lze provádět v jednom průchodu nebo vícekrát, což umožňuje optimalizovat chemické složení a vlastnosti výsledných vrstev.[8]

Stejně jako v případě navařování laserovým paprskem poskytuje technologie využívající koncentrovaný elektronový paprsek[9]:

- možnost výroby návarů z materiálů, které se výrazně liší chemickým složením;
- velmi malý podíl promíchaného materiálů v návaru se základním substrátem;
- velmi vysoká přesnost a opakovatelnost, opracování prakticky libovolného tvaru povrchu;
- navařování velmi tenkých vrstev o tloušťce 0,1 mm, tlustší vrstvy se získají vícevrstevným nanášením;
- velmi nízké tepelné ovlivnění nanášeného materiálu, minimální residuální napětí a deformace;
- snadnost automatizace.

Je třeba poznamenat, že ve srovnání s procesem laserového navařování není potřeba používat a instalovat trysky ochranného plynu.

Navařování elektronovým paprskem s přídavným materiálem drátu je technicky složitější proces než povrchové přetavování. Je nutné zajistit stabilitu procesu navařování z důvodu přesného výběru řady technologických parametrů. Na Obr. 3 znázorňuje geometrii vzájemné polohy hrotu drátu vzhledem k elektronovému paprsku a způsob přivádění přídavného materiálu.



Obr. 3: Schéma vzájemné polohy hrotu přídavného materiálu k elektronovému paprsku[12]

Proces navařování elektronovým paprskem lze provádět jak s plným drátem, tak s práškem.

1.1.2.2 Extrémně rychlé laserové navařování (EHLA)

EHLA, známý také jako extrémně vysokorychlostní laserové navařování, je proces schopný dosáhnout rychlosti 10krát vyšší než tradiční laserové nanášení kovů (LMD), pokud jde o rychlost pokrytí povrchu. Ukázalo se, že tento proces je schopen dosahovat rychlosti navařování vyšší než 300 m/min a rychlosti pokrytí povrchu až 2,0 m² za hodinu.[10]

Jediný rozdíl oproti LMD je v tom, že prášek je nataven, ještě než dopadne na povrch substrátu (Obr. 4).

Výhody:

- Extrémně nízký tepelný příkon a zkreslení.
- Nízké promíšení materiálu (<1%).
- Zpracovávání těžko svařitelné a odlišné slitiny.
- Není nutná žádná předběžná úprava povrchu.
- Zkrácení doby zpracování.
- Zvýšená přesnost díky snížené tloušťce vrstvy.



Obr. 4: Schéma extrémně rychlého laserového navařování[11]

1.1.3 Srovnání mezi laserovým navařováním a ostatními technologiemi

Aplikace laserového povlaku by měla konkurovat několika hlavním technikám povlakování, jako je žárový nástřik, svařování, chemická depozice z plynné fáze (CVD) a fyzikální depozice z plynné fáze (PVD). [1]

Žárový nástřik lze rozdělit na tři metody, což jsou spalovací hořák (např. nástřik plamenem, vysokorychlostní kyslíkové palivo a detonační pistole), elektrický (drátový) oblouk a plazmový oblouk. CVD se také dělí na: naprašování, iontové pokovování, plazmou vylepšené CVD, nízkotlaké CVD, laserem vylepšené CVD, aktivní reaktivní odpařování, iontový paprsek a laserové napařování. [1]

Výška vrstvy navařování pomocí TIGa byla vyšší a šířka širší na rozdíl od laserového navařování, hloubka penetrace a promíšení prvků velmi vysoké. Promíšení je větší ve vrstvě navařované TIGem asi na 41 % a 46 % ve srovnání s vrstvou navařování diodovým laserem. Důvodem je rozdílný tepelný příkon, který u procesu navařování metodou TIG činí 12~15 kJ/cm a u procesu navařování laserem 0,4~3 kJ/cm. Při navařování metodou TIG vzniká podstatně vyšší příkon tepla, což způsobuje větší množství navařovacích vad, například trhlin. V porovnání se svařováním TIG vytváří laserové navařování čistší povrch pro jemnější geometrii, čímž vzniká méně převisů materiálu v návaru. [19]

Tabulka 1 porovnává několik hlavních rysů těchto technik nanášení povlaku a poskytuje výhody a nevýhody těchto procesů pro aplikace kovových a nekovových povlaků. Jak je uvedeno v Tab. 1, laserové navařování vytváří velmi silnou vazbu s nízkým promíšením, kde v substrátu vzniká velmi nízká tepelně ovlivněná zóna (HAZ). [1]

Tab. 1: Porovnání mezi laserovým navařováním a jinými technikami povlakování [1]

Vlastnosti	Laserové navařování	Svařování	Žárový nástřík	CVD	PVD
Pevnost spoje	Vysoká	Vysoká	Mírné	Nízká	Nízká
Promíšení	Vysoká	Vysoká	Nulová	Nulová	Nulová
Povlakové materiály	Kovy, keramika	Kovy	Kovy, keramika	Kovy, keramika	Kovy, keramika
Tloušťka povlaku	50 μ m až 2mm	1 až několik mm	50 μ m až několik mm	0.05 μ m až 20 μ m	0.05 μ m až 10 μ m
Opakovatelnost	Střední až vysoká	Střední	Střední	Vysoká	Vysoká
Tepelně ovlivněná zóna (HAZ)	Nízká	Vysoká	Vysoká	Velmi nízká	Velmi nízká
Kontrolovatelnost	Střední až vysoká	Nízká	Střední	Střední až vysoká	Střední až vysoká
Náklady	Vysoké	Střední	Střední	Vysoké	Vysoké

Investiční náklady a náklady na údržbu laserového navařovacího stroje jsou však v současnosti vysoké, což jsou nevýhody tohoto procesu.

Očekává se, že kvůli rychlému růstu nové generace laserů, jako jsou vysoce výkonné diodové a vláknové lasery, které nabízejí vyšší účinnost a nižší náklady na údržbu, bude technologie laserového navařování hrát v blízké budoucnosti důležitou roli na trhu s kovovými povlaky.

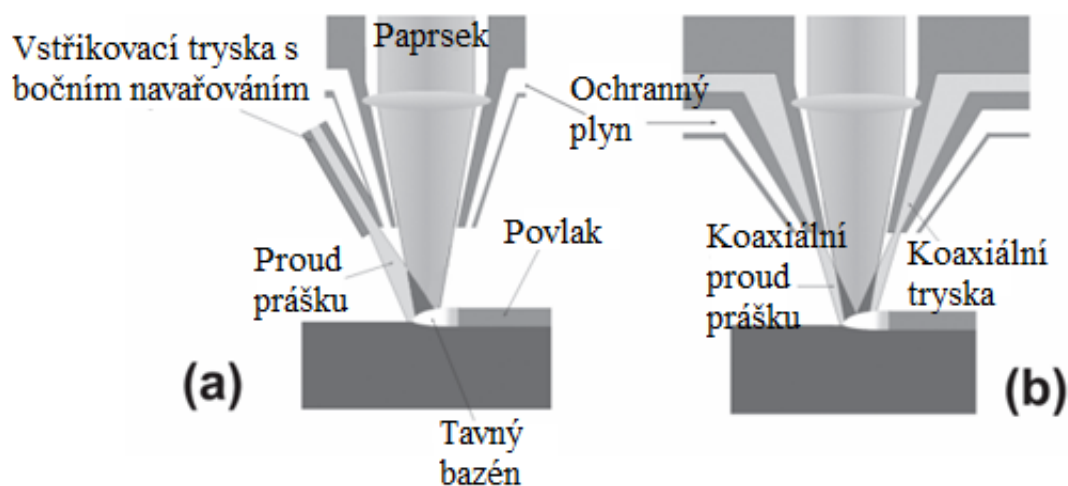
1.2 Technologie přímého laserového navařování

1.2.1 Principy procesu laserového navařování

Při laserovém navařování se používá vysoce výkonný laserový paprsek k roztavení tenké vrstvy substrátu spolu a navařovaného materiálu. Roztavený práškový materiál spojuje taveninu vytvořenou na povrchu substrátu a směs tuhne, když se tavná lázeň a laserový paprsek pohybují vůči sobě navzájem.

1.2.1.1 Přidání materiálu vstříkáváním prášku

Návar může být vyráběn různými způsoby, jako jsou dvoustupňové laserem navařovaná vrstva, pomocí podávání drátu nebo vstříkávání prášku. Přidání materiálu vstříkáváním prášku lze provést pomocí boční nebo koaxiální navařovací trysky, jak je znázorněno na Obr. 5. Vstříkávání prášku pomocí trysky s bočním obložení může mít za následek vysokou účinnost zachycování prášku. Má však tu nevýhodu, že je směrový. V důsledku toho je vstříkovací tryska s bočním obložení vhodnější pro navařování jednoduchých geometrií. U koaxiální vstříkovací trysky toto omezení již neexistuje a navařování lze provádět v libovolném směru a na složitých trojrozměrných geometriích.[3]

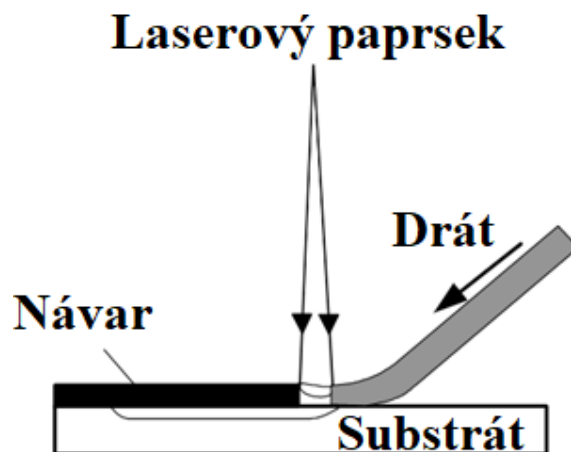


Obr. 5: (a) Boční a (b) koaxiální nastavení pro laserové navařování vstříkáváním prášku[3]

Výhodou práškové injekce je, že složení přídatného materiálu lze na místě měnit nebo lze současně míchat a přidávat různé prášky. V obou způsobech vstříkávání prášku se používá nosný plyn, jako je argon, helium nebo dusík, k dodávání proudu prášku z podavače do vstříkovací trysky. Kromě toho je tavenina chráněna ochranným plynem, obvykle stejného typu jako nosný plyn.

1.2.1.2 Laserové navařování s podáváním drátu

Při laserovém navařování s podáváním drátu je hlavní myšlenkou použití drátu místo prášku, jak je znázorněno na Obr. 6. Drát je obvykle přiváděn z cívky požadovaného materiálu, shodný jako se používá při obloukovém svařování. [1]



Obr. 6: Schéma laserové navařování s podáváním drátu[1]

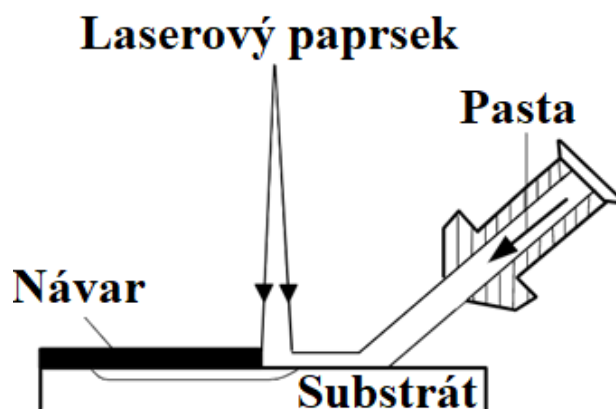
Ve srovnání s laserovým navařováním pomocí prášku lze tvrdit, že laserové navařování s podáváním drátu má některé zvláštní výhody. Jednou z jeho nejdůležitějších výhod je přizpůsobení se poloze navařování. Kovové dráty jsou levnější než kovové prášky a také při podávání drátu jsou menší ztráty než při podávání prášku.

Nízká kvalita povrchu, nízká pevnost spoje, pórovitost, praskliny a přenos kapek jsou problémy při navařování drátu. Roztavená kapalina na konci drátu neteče hladce a nepřetržitě na obrobek, což se nazývá „jev přenosu kapek“. Výběrem správného směru a polohy podávání

drátu lze vyřešit rozstříkáním roztavené kapky pro laserové navařování s podáváním drátu. V tomto případě může být drát ponořen do tavicí lázně a roztaven teplem roztaveného kovu. Úspěšný proces však silně závisí na parametrech procesu a za přítomnosti poruch kvalita navařování dramaticky klesá.

1.2.1.3 Laserové navařování pastou

Při laserovém navařování pastou je proud materiálu vázaného pastou nanesen na bod substrátu, který je obvykle trochu před laserovým paprskem, jak je znázorněno na obrázku 7. Pasta se skládá z tvrdého povlakového prášku s vhodným pojivem. Pojivo však musí být vysušeno v krátkém časovém úseku, zatímco tvrdý krycí materiál je stále zachován v kompaktní formě; jinak jsou částice prášku odfouknuty ochranným plynem. [1]

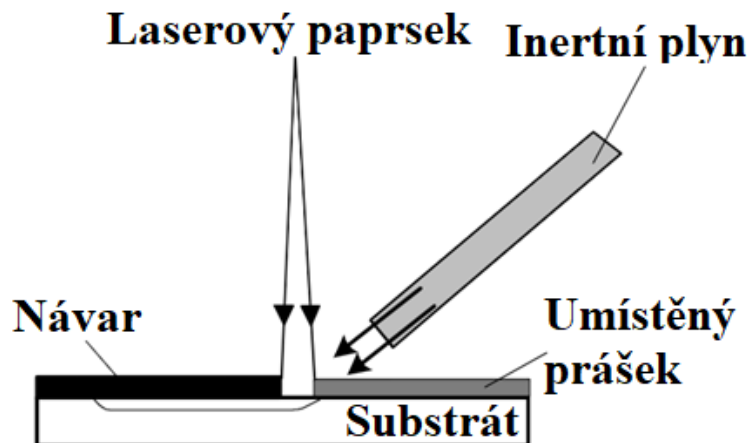


Obr. 7: Schéma laserové navařování pastou [1]

Vliv na výsledek má rychlosti procesu a rychlosti podávání pasty na kvalitu navařování. Pro tento proces by měl být navržen speciální systém podávání pasty. Realizace systému přívodu pasty spolu s chladicím systémem pro ochranu pasty před tepelnými emisemi z procesní oblasti. Tvar pasty na substrátu je řízen rychlostí podávání pasty a rychlostí substrátu. Pro dobrou kvalitu navařování je nezbytné tyto parametry optimalizovat. Špatný přívod pasty nebo příliš vysoká rychlost procesu způsobuje vysoké promíšení a nízkou výšku stopy, pokud je energie laseru udržována konstantní. Nadměrný přísun pasty na substrát zvyšuje tvorbu pórů, protože je inhibováno odpařování pojiva a zvyšuje se ztráta tvrdého návarového materiálu. [1]

1.2.1.4 Dvoustupňové laserové navařování (předem umístěné laserové navařování)

Dvoustupňové laserové navařování je jednoduchá metoda používaná pro navařování a prototypování. Umístěné částice prášku na podkladu musí mít nejen dostatečné spojení se substrátem, ale také dostatečnou soudržnost k sobě navzájem. Je nutné zabránit tomu, aby se částice prášku na substrátu odstranily v důsledku proudění plynu během tavení ve druhém kroku procesu. K překonání tohoto problému je prášek obvykle smíchán s chemickým pojivem, aby byla zajištěna jeho soudržnost se substrátem během procesu. Vedlejším účinkem chemického pojiva je poréznost v návaru v důsledku jeho odpařování během procesu. [1]



Obr. 8: Schéma dvoustupňové laserové navařování [1]

Ve druhém kroku procesu dochází k následujícím jevům:[1]

1. Vytvoření taveniny z umístěného prášku na povrchu substrátu v důsledku záření laserového paprsku
2. Rozšíření taveniny na rozhraní se substrátem v důsledku tepelné vodivosti.
3. Pronikání tepla do substrátu způsobující tavnou vazbu.

Řízení tepla je u této metody velmi důležitou otázkou, aby se zabránilo vysokému promíšení. Promíšení je definováno jako procento míšení substrátu s navařovanou oblastí. Tento problém je jedním z důležitých nedostatků dvoustupňového laserového navařování, které obvykle omezuje proces pouze na navařování.

1.2.2 Výhody a nevýhody laserového navařování

V aplikacích nanášení a opravy existují tři hlavní technologie, které konkurují laserovému navařování: plazmové stříkání, vysokorychlostní kyslíko-palivové (HVOF) a navařování plazmovým obloukem (PTA). Plazmové nástřiky se široce používají k nanášení různorodé škály povlaků odolných proti opotřebení a korozi s omezeným vstupem tepla do podkladu. Navary však trpí pórovitostí, chemickou nehomogenitou a slabou vazbou na substrát. HVOF vyrábí povlaky s vyšší hustotou a lepší přilnavostí ve srovnání s povlaky vyráběnými plazmovým postřikem. Povlaky jsou však stále mechanicky spojeny s podkladem. Na druhé straně PTA produkuje plně husté povlaky metalurgickým spojením s jejich substrátem. Ale příkon tepla je však obvykle vysoký, což má za následek vysoké promíšení substrátu, velkou zónu ovlivněnou teplem (HAZ) a zkreslení substrátu. [3]

Technologie laserového navařování mají zřetelné výhody ve srovnání se všemi výše uvedenými technikami. Vysoce ovladatelná a lokalizovaná energie laserového paprsku má za následek minimální promíšení základního kovu, nižší tepelný příkon a tedy menší zkreslení a menší HAZ v komponentě substrátu. Kromě toho jsou laserem nanášené povlaky plně hutné s metalurgickým spojením se substrátem. Technologie laserového nanášení jsou také přístupné automatizaci a počítačovému ovládání. V důsledku toho lze u laserem nanášených vzorků dosáhnout vynikající kontroly tloušťky a složení vrstvy, lepší kvality povrchu a těsných rozměrových tolerancí s vyšším použitím materiálu a malým nebo žádným dodatečným zpracováním. Laserová depozice je navíc schopnější selektivního a přesného vytváření návaru pro tepelně citlivé díly. [3]

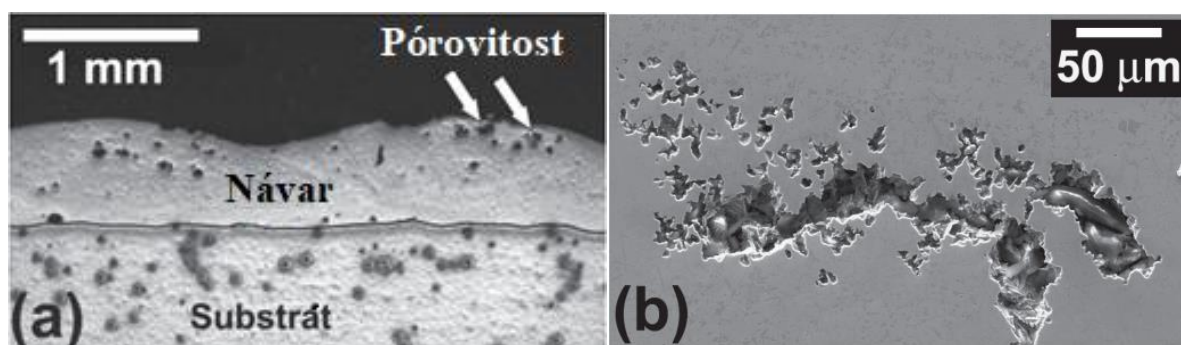
V současné době hlavními nevýhodami technologií laserové depozice jsou vyšší investiční náklady, nižší rychlost depozice a omezená množství kvalifikovaných pracovníků ve srovnání s konkurenčními technologiemi. Nejdůležitějším problémem kvality u laserem

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

nanášených vzorků je praskání, které je v zásadě způsobeno vysokými rychlostmi chlazení. Jiné vady se obvykle vyskytují, protože parametry zpracování nejsou správně upraveny. Nadměrné laserové výkon může například vést k přílišnému promíchání vrstvy s návarem a vzniku velké tepelně ovlivněné zóny, které mění složení návaru a zhoršuje jejich vlastnosti.

Pórovitost se může vyskytnout také ve vzorcích nanesených laserem. Pórovitost je obvykle způsobena zachycenými kapsami plynu. Takové plynové kapsy by mohly být generovány řadou způsobů, včetně kontaminace povrchu substrátu nebo vlhkosti v energii. Duté částice prášků atomizovaných plynem mohou také vést k hrubé pórovitosti v návarech, jak ukazuje obrázek 9. Tento typ pórovitosti se vyskytuje častěji při vyšších rychlostech nanášení. Navařovaná vrstva ukázaná na obrázku 9 byl nanesen z dutých částic prášku slitiny na bázi Ni rozprašovaného plynem při rychlosti 40mm/s.



Obr. 9: (a) Obrázek pórovitosti při laserovém nanášení povlaku pomocí optické mikroskopie; (b) Skenovací obrázek elektronové mikroskopie ukazující vnitřní póry[3]

1.2.3 Použití laserové navařování

Laserová depozice byla původně vyvinuta jako nástroj pro navařování. Následně vylepšení a využití dalších technologií, jako je robotika, senzory, řízení a počítačově podporované navrhování a výroba (CAD/CAM), přeměnilo původní technologii navařování na flexibilní a nákladově efektivní nástroj pro výrobu povlaků, oprav a tvaru s minimálním přídavkem na obrábění. Až do posledních let byly technologiemi laserového navařování na relativně malých plochách nanášeny nebo renovovány pouze součásti velmi vysoké hodnoty nebo složité geometrie. [3]

V průmyslové praxi je technologie laserového navařování využívána v následujících oblastech výroby:

- povlakování s cílem poskytnout povrchu součásti speciální vlastnosti, popř. zvýšit stávající funkční vlastnosti,
- opravování a repase strojních dílů,
- výroba nových strojních dílů – aditivní výroba tzv. “rapid prototyping”.

V posledních letech vývoj výkonnějších a spolehlivějších laserových zdrojů při nižších nákladech rozšířil použití těchto technologií také na díly s nižší hodnotou a velkoplošné depozice v širším spektru průmyslových odvětví. Některé příklady aplikací jsou uvedeny níže.

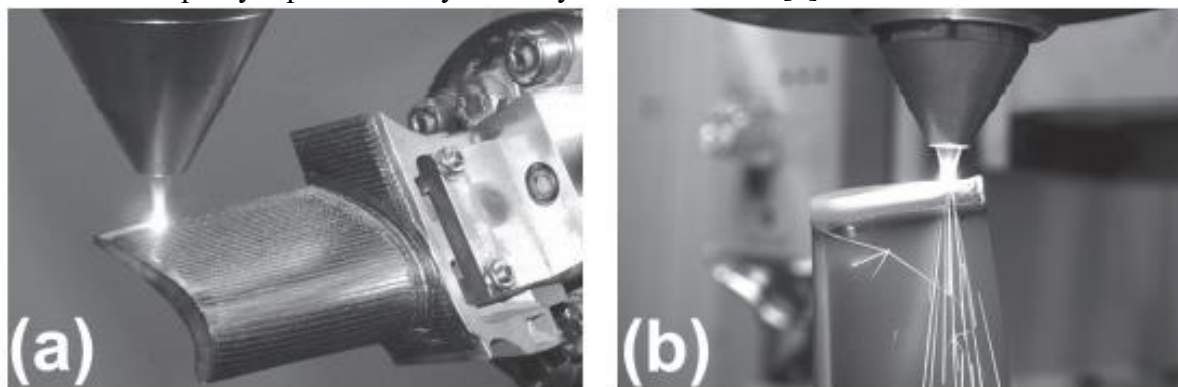
1.2.3.1 Lopatka letecké turbíny

Letecký průmysl je vždy na prvním místě v aplikaci technologií laserového nanášení pro navařování, opravy a v poslední době i trojrozměrnou výrobu lopatek turbín. Prvním uváděným použitím laserového navařování v průmyslu byl tvrdonávar lopatek turbíny Nimonic od Rolls Roys v roce 1981. V současné době několik společností používá laserové navařování pro povlak

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

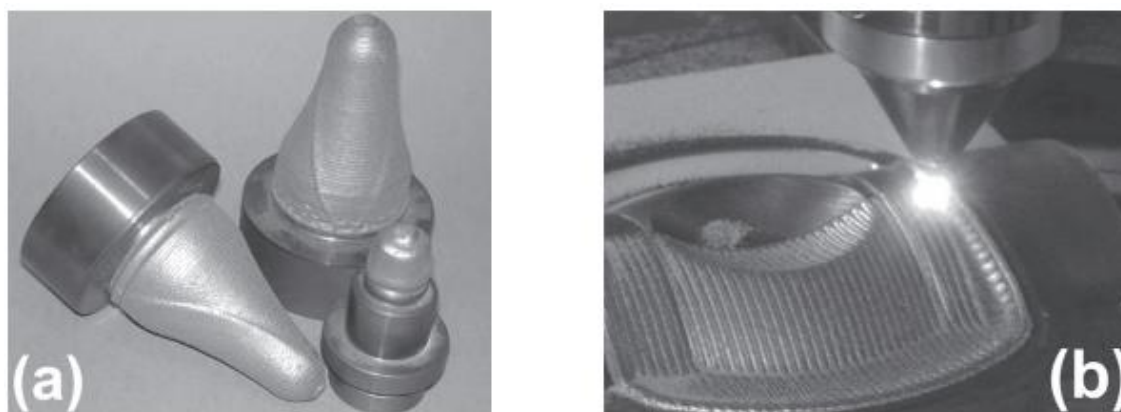
a opravy lopatek turbín a dalších součástí leteckých motorů. Obrázek 10 uvádí příklady navařování a opravy lopatek turbíny laserovým navařováním.[3]



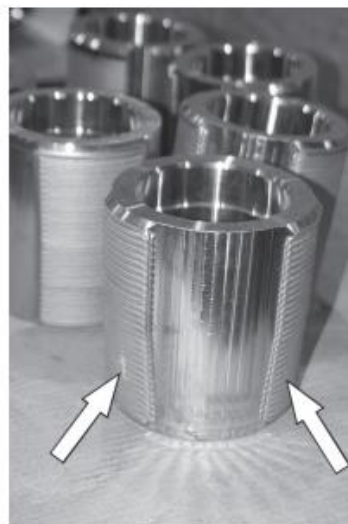
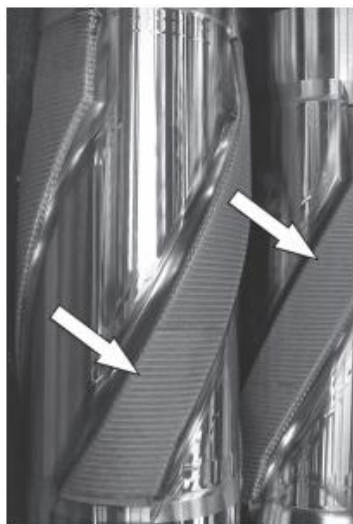
Obr. 10: (a) Povlakování a (b) opravy lopatek turbíny pomocí laseru navařování[3]

1.2.3.2 Nástroje

Laserové navařování se používá k nanášení povrchových ochranných povlaků nebo k úpravě opotřebených povrchů v různých typech matic, forem, čepelí, vrtacích nástrojů atd. K ochraně se používají návarové slitiny na bázi železa (nástrojové oceli, martenzitické návary, austenitické vrstvy) nebo jako niklové prášky typu Ni-Cr-B-Si-C nebo Stellite k ochraně sklářských nebo tvářecích forem proti opotřebení. Příklady jsou na obrázku 11. Laserové navařování lze použít k ochraně široké škály kovových součástí pracujících v drsných prostředích, které jsou vystaveny korozi, otěru, tření, erozi částic atd. Typickými příklady jsou nástroje pro vrtání dolů pro těžební průmysl, ropný a plynárenský průmysl (obrázek 12). V posledních letech byly ke zvýšení životnosti vrtacích nástrojů používané laserem navařované kompozitní povlaky z karbidu wolframu (např. Ni-WC). Opravu opotřebení z provozu lze provést ze stejného materiálu, jako je materiál původní součásti (obvykle legované oceli) nebo podobných slitin.[3]



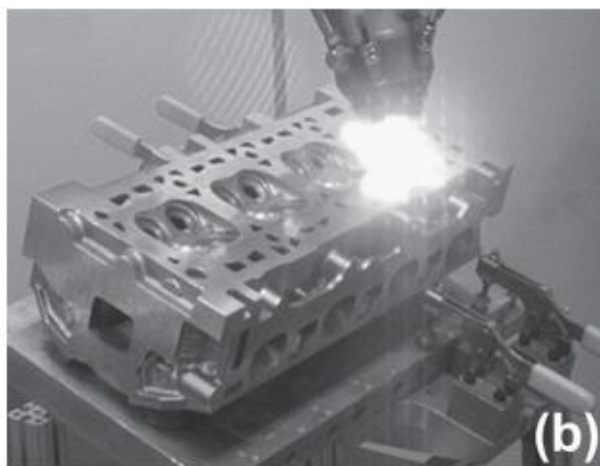
Obr. 11: (a) Laserem navařování skleněné plunžry, (b) laserové navařování formy pro tváření za tepla[3]



Obr. 12: Vrtací nástroje s kompozitními povlaky WC navařováními laserem ve vybraných oblastech. Navařované oblasti jsou zvýrazněny šipkami[3]

1.2.3.3 Sedlo ventilu a navařování vložky

Ventily spalovacích motorů (např. pro lodě nebo automobily) nebo regulační ventily používané v elektrárnách a podobných průmyslových odvětvích musí být schopny odolat velmi vysokému kontaktnímu namáhání při vysoké teplotě a korozivním prostředí. Laserové navařování se již dlouho používá k ochraně čela sedla nebo celého povrchu takových ventilů proti korozi, opotřebení a nárazu. Obrázek 13 ukazuje laserový navar čela sedla vznětového motoru. Návarové slitiny na bázi kobaltu a niklu byly ve většině případů primárními povlakovými materiály.[3]



Obr. 13: (a) Laserové navařování čela sedla ventilu, (b) laserová depozice jako náhrada za vložky ventilových sedel[3]

1.3 Volba přídavného materiálu

1.3.1 AISI H13

Nástrojová ocel pro obrábění za tepla (AISI H13) je jedním z nejběžnějších materiálů používaných v licím průmyslu. Matrice se během své životnosti poškozuje třením a opotřebením. Proto byly vyvinuty různé metody její opravy, aby se ušetřily náklady na výrobu nové. Byla popsána pilotní studie použití laserového navařování nástrojové oceli H13 pro

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

opravu ozubených kol. Byl použit prášek z nástrojové oceli AISI H13, viz tabulka 2, a s průměrným průměrem částic $94 \pm 24 \mu\text{m}$.

Tab. 2: Chemické složení oceli AISI H13 podle normy ASTM A681[13]

Prvek	Fe	Cr	Mo	Si	V	Mn	C
Hmotnostní podíl, %	vyvážený	4,75 až 5,50	1,10 až 1,75	0,80 až 1,25	0,80 až 1,20	0,20 až 0,60	0,32 až 0,45

Mikrostruktura navařované nástrojové oceli H13 se skládá z martenzitu a byl pozorován zbytkový austenit. Mezi martenzitickými lamelami se nacházejí karbidy, pravděpodobně M7C3, kde M jsou různé legující prvky. Bylo zjištěno, že návar obsahuje zbytkový austenit, karbid Mo2C, karbidy Cr23C6 a Cr7C3 [13].

1.3.2 Capilla 66

Prášek určen k povrchové úpravě navařováním tepelně namáhaných lisovacích nástrojů. Navařovaná vrstva je extrémně odolná proti oděru, nárazu a tlaku. Používá se taky pro opravné žárově tvářecích nástrojů, jako jsou zápustky. Je také vhodný pro novou výrobu (změny obrysu) zápustek, jakož i pro navařování střížných nástrojů za studena.

Tab. 3: Chemické složení oceli Capilla 66

Prvek	Fe	C	Ni	W	Cr	Mo	V
Hmotnostní podíl, %	vyvážený	0,4	0,4 až 0,7	6 až 8	6 až 8	1 až 1,5	0,5 až 0,8

1.3.3 Ostatní práškové slitiny

Tyto slitiny zahrnují široce používané návarové slitiny, jako jsou samotavící slitiny na bázi Fe, Ni a Co, a další slitiny, jako jsou slitiny na bázi Ti, Al, Cu a Nb, nerezová ocel, a nástrojové oceli. Normálně jsou materiály s těmito vysoce výkonnými vlastnostmi drahé a obtížně zpracovatelné v hromadné formě.[15]

Stellite 6 (Co 63 procent, Cr 27 procent, W 4 procenta, Fe 5 procent a C 0,1 procenta) je široce používaná komerční slitina na bázi Co pro odolnost proti vysokým teplotám, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi, a odolnost proti oxidaci.[15]

Slitiny pro návary na bázi Ni (NiSiB, NiCrSiB atd.) jsou typické samotavné slitiny s nízkými teplotami tání a dobrou svařitelností. Tyto slitiny mají vynikající houževnatost, tepelné a oxidační vlastnosti a dobrou odolnost proti opotřebení a korozi. Povlak pokrytý laserem vykazuje vynikající odolnost proti korozi ve srovnání s povlaky stříkanými za tepla. Výzkumy ukázali, že povlaky navařované laserem vykazují vynikající vlastnosti při tečení, oxidaci při zvýšené teplotě a odolnost proti korozi ve srovnání s žárově stříkané povlaky.[15]

Slitiny na bázi Fe jsou cenově výhodné a široce používané slitiny. Byla zkoumána mikrostruktura, fáze, distribuce tvrdosti, odolnost proti abrazivnímu opotřebení, houževnatost a odolnost proti korozi. Obecně platí, že výhody laserového navařování komerčních slitinových prášků ve srovnání s konvenčními technologiemi povlakování zahrnují silnou metalurgickou vazbu, nízké promíšení, přesné řízení tepelného příkonu, a co je nejdůležitější, jemnější mikrostruktura a rozšířený pevný roztok díky rychlé tunutí, což vede k lepšímu celkovému výkonu povlaku[15]

1.3.4 Schaefflerův diagram

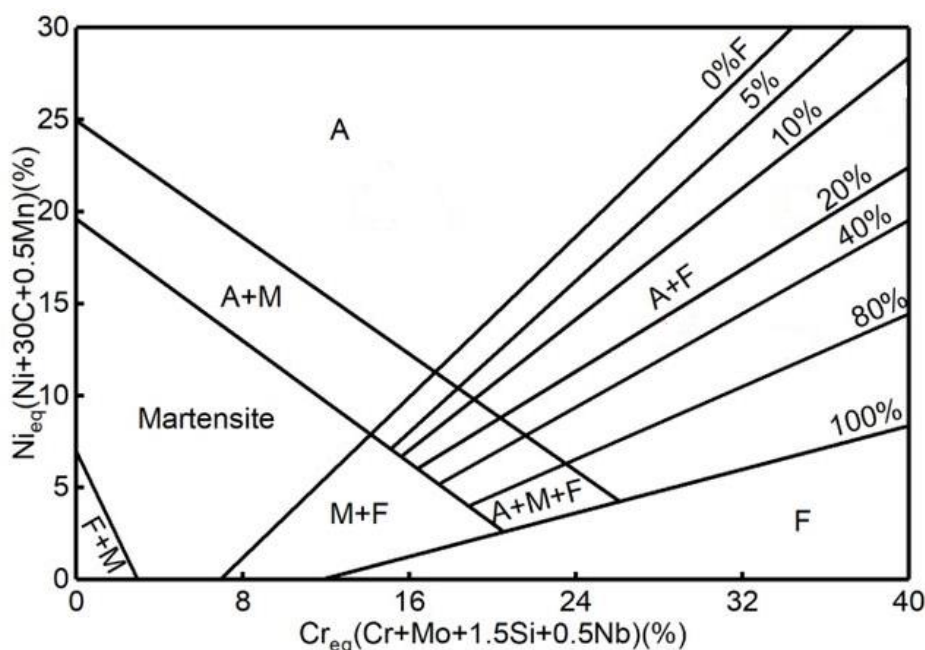
Abychom zjistili fázovou strukturu na rozhraní mezi základním kovem a návarem můžeme použít Schaefflerův diagram. Tavicí zóna se skládá ze směsi dvou typů materiálů.

Schaeffler poprvé navrhl kvantitativní vztah mezi složením a obsahem feritu ve svarovém kovu. Jak ukazuje konstituční diagram na obrázku 14, chromový ekvivalent dané slitiny se určuje z koncentrací feritotvorných látek Cr, Mo, Si a Nb a austenitový ekvivalent se určuje z koncentrací austenitotvorných látek Ni, C a Mn.[16]

Vzorky ekvivalentů:

$$E_{Cr} = \%Cr + \%Mo + 0,5\%W + \%V + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + \%Ti \text{ (hm.\%)}$$

$$E_{Ni} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \text{ (hm.\%)}$$



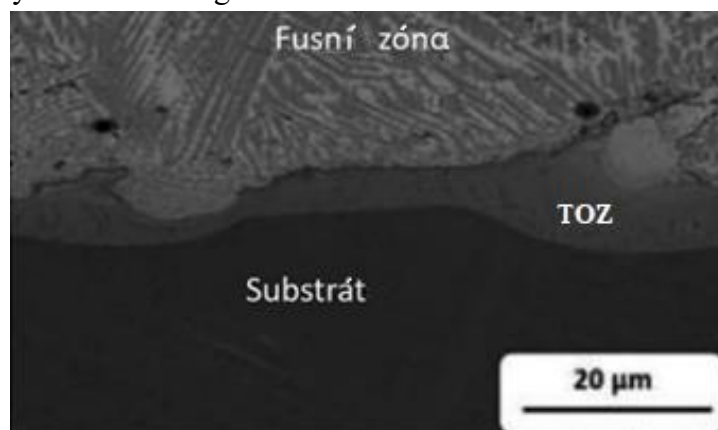
Obr. 14: Schaefflerův diagram[16]

1.4 Metalurgie navařovaných povlaků

Koncentrovaný přívod tepla při laserovém navařování vede k typickému tvaru návaru, který se jeví jako elipsa s hlavní osou ve směru kolmém na hlavní laserový paprsek. [17]

Po laserovém navařování, konečná morfologie se skládá z nataveného povlaku, tepelně ovlivněné zóny (HAZ) a neovlivněného substrátu (obr. 15).

Obvykle není mikrostruktura návaru jednotná v důsledku různých teplotních polí. To ovlivňuje zbytková napětí a následně únavové vlastnosti, zejména rychlost šíření trhlin směrem k různě pevným materiálům.



Obr. 15: Různé zóny laserem navařované struktury[17]

Dalším důležitým aspektem je promíšení. Promíšení se dosahuje při laserovém navařování, které je založeno na difuzním spojování. Hlavními rysy procesu laserového navařování je nízké penetrační pásmo návaru na substrátu a také nízké promíšení se substrátem. Proto studium promíšení navařování přitahuje velkou pozornost výzkumníků. Existence promíšení vede k vytvoření metalurgické vazby mezi návarem a substrátem. Aby se u laserových návarů vytvořila pevná vazba, musí roztavený bazén proniknout do substrátu. Kromě toho vede jev promíšení v materiálech navařování ke zlepšení kvality. Promíšení vzniká prostřednictvím taveninové vazby, která vzniká mezi pevnou a kapalnou látkou tavením. Tavná vazba je obvykle pevná a má vysokou odolnost vůči mechanickým a tepelným rázům. Tavení substrátu i promíšení je nezbytné k dosažení silné vazby, pokud se na rozhraní nevytvoří křehká fáze. Tavení substrátu i promíšení je tedy nezbytné, avšak při vysokých hodnotách promíšení má nepříznivý vliv na kvalitu a geometrii návaru. [17]

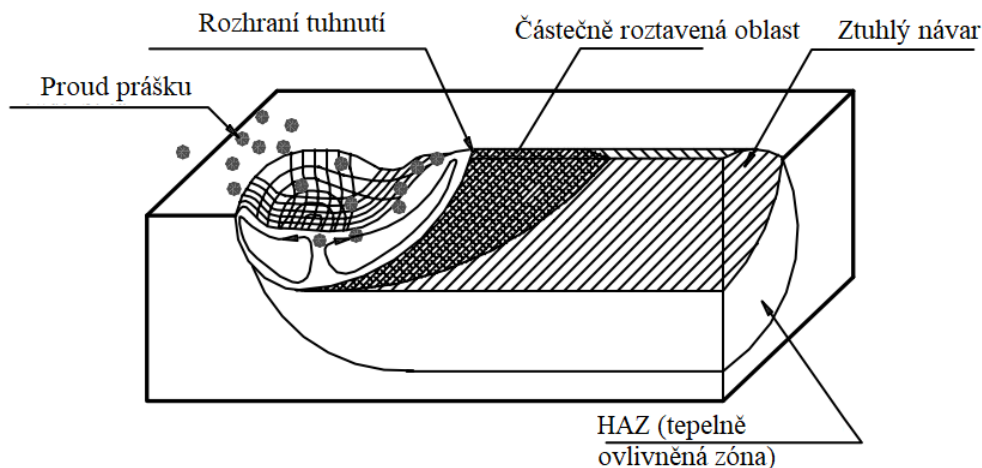
1.4.1 Fyzikální jevy probíhající v laserovém navařování

Proces lze postupně uvést takto:

- Laserový paprsek dosáhne substrátu a značná část jeho energie je přímo absorbována substrátem. Malá část energie laseru je absorbována částicemi prášku. Energie pohlcená substrátem pak vytvoří taveninu. Do bazénu taveniny se současně přidávají roztavené částice (viz obrázek 16). Tento krok procesu je vyjádřen pouze rovnicí vedení tepla. [1]

- Gradient povrchového napětí pohání proudění tekutiny v bazénu taveniny. Jakmile proudové pole pronikne do substrátu, změní se mechanismus přenosu energie na mechanismus konvekce. Během tohoto jevu dochází k rychlému promíchávání roztavených částic prášku v bazénu taveniny (obr. 16).[1]

Tento krok procesu by měl být vyjádřen rovnicemi hybnosti, přenosu tepla a spojitosti. Na základě těchto fyzikálních jevů se vytvoří tři vhodné řídicí rovnice.

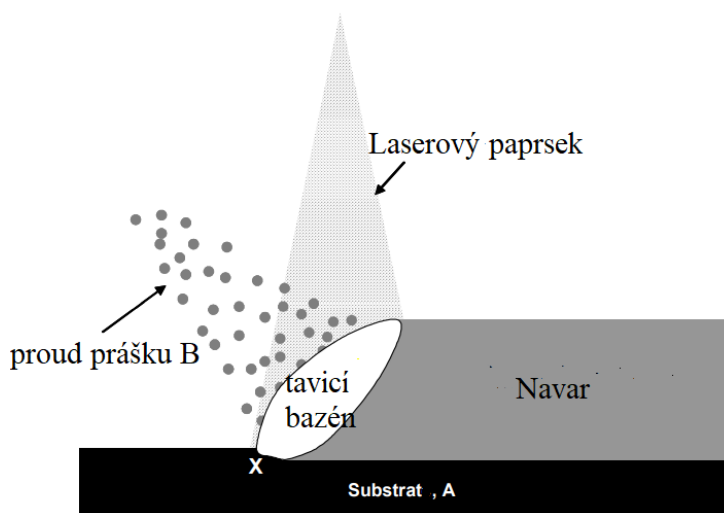


Obr. 16: Schéma vlivu konvekce během procesu laserového navařování[1]

1.4.2 Tavenina

Na obrázku 17 je znázorněno schéma taveniny, která vzniká při laserovém navařování čistého prášku B na čistý substrát A. Na tomto obrázku se předpokládá, že proces navařování dosáhl ustáleného stavu; laserový paprsek a proud prášku se současně dostávají do kontaktu s bazénem taveniny, který byl vytvořen dvojicí roztavený návar/substrát. Část energie laserového paprsku roztaví malý objem substrátu na náběžné hraně. Část energie laserového paprsku se rovněž využívá k ohřevu prášku vstupujícího do procesního objemu. [1]

V závislosti na teplotě tání prášku může být prášek při kontaktu s taveninou ve formě roztavených kapek nebo pevných částic. Za mnoha okolností je pravděpodobné, že do kontaktu s povrchem bazénu taveniny přijdou jak kapalné, tak pevné částice prášku. Proto bude docházet k legování (nebo míchání) mezi kapalinou A a/nebo pevnou látkou B. Je poměrně dobře známo, že vysoké teplotní gradienty přítomné v laserové navařování vytvářejí intenzivní konvekci v důsledku Marangoniho jevu. To vede k rychlé homogenizaci nebo legování v bazénu taveniny. Konvekci v bazénu kapaliny lze charakterizovat povrchovým napětím. [1]



Obr. 17: Schéma bazénu taveniny při laserovém navařování[1]

1.4.3. Promíšení

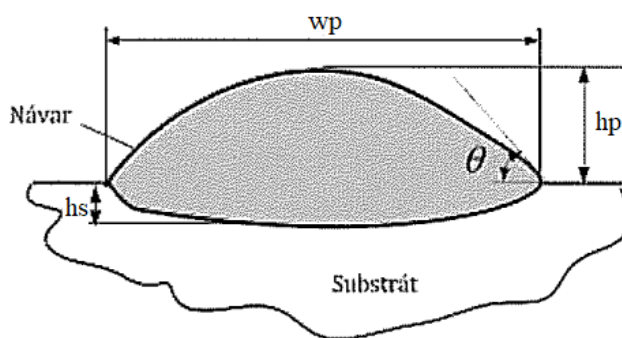
To je definováno jako množství promísení navařovaných a substrátových materiálů. Nízké promísení znamená, že základní materiál je smíchán s návarem velmi málo, takže povrchová vrstva navařování je velmi podobně čistému navařovanému materiálu. Výsledkem jsou vlastnosti materiálu, které nejsou ohroženy, a plného účinku povlaku lze dosáhnout v jediné vrstvě.

Promísení i do základního materiálu je obvykle méně než 2 % při použití laserového navařování, což je minimální ve srovnání s konvenčními metodami navařování nebo svařování. To se děje s minimálním tepelným příkonem, který je řízen krátkou dobou, po kterou je laser je zaostřen na libovolný bod na součásti.

$$\lambda = \frac{A_s}{A_c + A_s} = \frac{\frac{\pi}{4} h_s w_p}{\frac{\pi}{4} h_c w_p + \frac{\pi}{4} h_s w_p} = \frac{h_s}{h_c + h_s}$$

Obr. 18: Vzorec promísení [3]

Základní geometrické charakteristiky spojené s laserovým návarem jsou zobrazené na Obr. 19. Návar je charakteristický svojí: výškou h_p [mm], šířkou w_p [mm], úhlem smáčení θ [°] a hloubkou návaru h_s [mm], která byla roztavena na substrátu během navařování. [3]



Obr. 19: Základní geometrické charakteristiky laserového návaru[3]

1.4.4. Částečně roztavená

Částečně roztavená zóna (*ang.* PMZ) je oblast bezprostředně mimo roztaveného kovu na hranici mezi tavnou a tepelné ovlivněnou zónou, kde může během navařování dojít k silné likvacii. Částečně roztavená zóna (PMZ) může trpět likvačním praskáním, ztrátou tažnosti a vodíkovým praskáním.

Likvační praskání, tj. praskání vyvolané likvační hranic zrn v PMZ během navařování je mezikrystalové. Likvační praskání se může vyskytovat také podél hranice tavení. Přítomnost kapalné fáze na povrchu mezikrystalové trhliny může být zjevná nebo nejasná.

1.4.5. Tepelné ovlivněná oblast

Kovy lze zpevňovat několika způsoby, účinnost zpevnění může být výrazně snížena zahříváním během navařování v oblasti zvané tepelné ovlivněná zóna (HAZ), kde jsou špičkové teploty příliš nízké na to, aby způsobily tavení, ale dostatečně vysoké na to, aby způsobily výrazné změny v mikrostruktuře a vlastnostech materiálů. Kapitola se zaměří na rekrytalizaci a růst zrn v HAZ pracovních zpevněných materiálů, které mohou činit HAZ mnohem slabší než základní kov. [16]

1.4.5.1 Rekrystalizace

Když se mechanicky zpevněný materiál žihá, deformovaná zrna v materiálu mají tendenci rekrystalizovat vytvořením čerstvých zrn bez napětí, která jsou měkká, stejně jako zrna, která nebyla deformována. Uložená deformační energie je hnací silou pro rekrystalizaci mechanicky zpevněného materiálu a energie se uvolňuje, když se tvoří čerstvá zrna bez napětí. [16]

Rozsah rekrystalizace se zvyšuje s rostoucí teplotou a časem žihání. Dá se tedy očekávat, že pevnost nebo tvrdost mechanicky zpevněného materiálu mají tendenci klesat s rostoucí teplotou a časem žihání.

U většiny kovů je teplota rekrystalizace kolem 40–50 % jejich bodu tání ve stupních Kelvinu. Je třeba zdůraznit, že teplota rekrystalizace kovu může být ovlivněna stupněm mechanického zpevnění a úrovní čistoty.

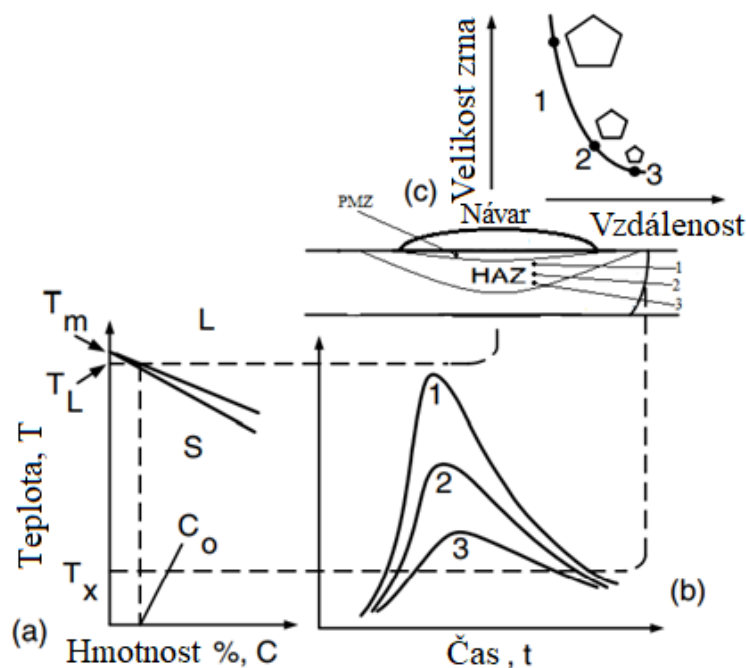
Menší tepelně ovlivněná zóna při laserovém navařování ve srovnání s jinými technologiemi má za následek rychlé ochlazení, které může být výhodné ve výrobě, a také omezuje množství tepelného žihání, které probíhá po konturách povrchu rozhraní mezi kusem a návarem.

1.4.5.2 Růst zrna

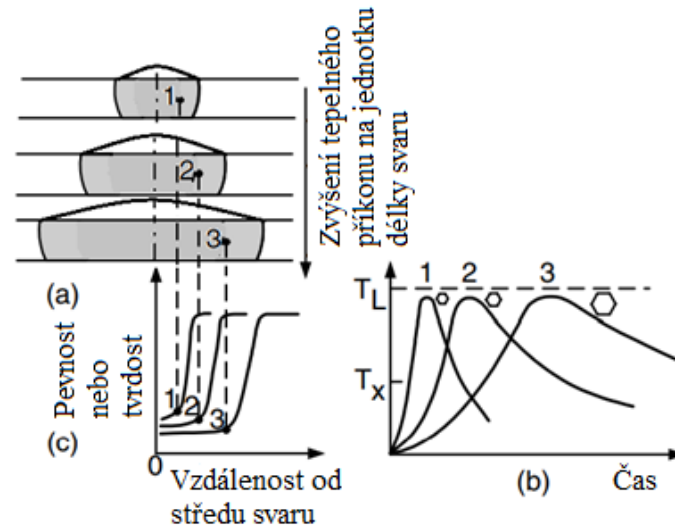
Po dokončení rekrystalizace začnou růst zrna (viz na obrázku 20). Hnací silou růstu zrn je povrchová energie. Celková plocha hranice zrn, a tím i celková povrchová energie systému se může snížit, pokud je přítomno méně hrubších zrn. Je třeba zdůraznit, že vzhledem k tomu, že hnací silou pro růst zrn je povrchová energie, a nikoli energie uložené deformace, není růst zrn omezen na zpevněné materiály.

Stejně jako rekrystalizace se i rozsah růstu zrn zvyšuje se zvyšující se teplotou a dobou žihání (viz na obrázku 21).

Stojí za to poznamenat, že částice karbidu a nitridu mohou bránit růstu zrn v ocelích tím, že brání pohybu hranic zrn. Tyto částice, pokud se nerozpustí během navařování nebo svařování, mají tendenci zabránit růstu zrn v HAZ.



Obr. 20: Růst zrna v HAZ: (a) fázový diagram; b) tepelné cykly; c) variace velikostí zrn [16]



Obr. 21: Vliv tepelného příkonu na jednotku délky návaru na: (a) šířku HAZ (stínované), (b) tepelné cykly blízko tavné hranice a (c) profily pevnosti nebo tvrdosti [16]

2 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývala laserovým navařováním kovových prášků. Byly vybrány dva druhy prášků z nástrojové oceli H13 a Capilla 66, pro které byly nejprve optimalizovány svařovací parametry jako je výkon, rychlost posuvu paprsku a množství podávaného prášku. Jednotlivé návary byly hodnoceny z hlediska jejich výšky a vzhledu.

V hlavní části experimentu byly provedeny lineární návary o délce 100mm a výšce 25 vrstev. Byla hodnocena geometrie návaru a především vliv teplotního pole na ovlivnění tvrdosti během navařování. Cílem experimentů bylo nalézt:

- Rozdíly v geometrii návarů a množství navařeného prášku při použití prášku Capilla 66 resp. oceli H13

- Zjistit citlivost zmíněných přídavných materiálů k popouštění během navařování dalších vrstev, proto byly provedeny měření průběhů tvrdosti

- Posoudit vývoj teplotního pole během navařování pro určení strategie navařování, proto byly porovnány vlastnosti na začátku a konci navařování

- Ověřit vliv popouštění (a tvrdosti) v závislosti na změně množství podávaného prášku.

- Navařit kruhový vzorek pro posouzení kontinuálního navaření 25 vrstev a možnost porovnání se simulací teplotního pole při navařování. Ověření simulačního modelu umožní vypočítat teplotní pole při navařování a tím i teplotu podkladu na jaký se navařuje.

- Tepelné zpracování návarů má odpovědět, zda lze homogenizovat tvrdost v návaru.

Na závěr byl vytištěn jednoduchý díl ve tvaru trubky o výšce 25 návarových vrstev a průměru 80 cm. I zde byla provedena analýza průběhů tvrdostí.

2.1 Stroje, přístroje a zařízení používané pro laserové navařování a vyhodnocení vzorků

K provedení experimentálního programu byly použité stroje, zařízení a přístroje uvedené v tabulce 4, která obsahuje: oblast použití, zařízení a podrobnou specifikaci použití.

Tab. 4 Stroje, přístroje a zařízení použité v rámci realizace experimentálního programu

Oblast použití	Druh zařízení	Název zařízení	specifikace – použití
Metalografie	Metalografická pila	Struers DISCO-TOM-6	Řezání metalografických vzorků
	Lis metalografických vzorků	Struers CITOPRESS-10	Lisování metalografických vzorků
	Metalografická bruska/leštička	Struers LABOFORCE-100	Broušení a leštění metalografických vzorků
Světelná mikroskopie	Světelný optický mikroskop	Carl Zeiss Z1M se softwarem AxioVision pro obrazovou analýzu	Makroskopické a mikroskopické pozorování laserových návarů
Tvrdoměr	Stroje pro zkoušení tvrdosti	DuraScan 70 G5 od Emcotestu	Vyrobění vtisků pro měření tvrdosti a výpočet hodnot
Laserem navařování vzorek z Capilly 66	Laser	Trumpf TruDisk 4006	Pevnolátkový laser pro svařování, řezání a povrchovou úpravu kovů
	Navařovací laserová hlava	LaserTherm	Systém pro laserové navařování
	Podavač prášku	-	Zařízení realizující přenos přídavného prášku ze zásobníku do navařovací hlavy
Laserem navařování vzorek z H13	Laser	Trumpf TruDisk 4006	Pevnolátkový laser pro svařování, řezání a povrchovou úpravu kovů
	Navařovací laserová hlava	LaserTherm	Systém pro laserové navařování
	Podavač prášku	-	Zařízení realizující přenos přídavného prášku ze zásobníku do navařovací hlavy



a)



b)



c)



CitoPress 5

d)

Obr. 22: Metalografické stroje a zařízení a) Struers LABOFORCE-100 b) DuraScan 70 G5 od Emcotestu c) Struers DISCO-TOM-6 d) Struers CITOPRESS-10

2.2 Specifikace zařízení pro laserové navařování Trumpf TruDisk 4006

Pro laserové navařování vzorky byl využit diskový laser Trumpf TruDisk 4006, emitující záření o vlnové délce $\lambda = 1030 \text{ nm}$. Jedná se o pevnolátkový laser pro svařování, navařování a povrchové úpravy kovů o výkonu 4 kW. Průměr optického vlákna je 0,6 mm. Navařovací hlavu dodala firma Lasertherm, jedná se o koaxiální provedení s přívodem prášku pomocí 4 trysek. Technologie laserového navařování je využívána na místech s požadavkem na vysoký výkon a kvalitu. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry laseru.

Tabulka 5: Specifikace infračerveného diskového laseru Trumpf TruDisk 4006[20]

PARAMETRY LASERU TruDisk 4006	
Výkon laseru	4000 W
Typ. Výkonová stálost při jmenovitém výkonu	$\pm 1 \%$ při aktivované regulaci výkonu
Plynule nastavitelný rozsah výkonu	80 W - 4000 W při aktivované regulaci výkonu
Kvalita paprsku	25 mm \cdot mrad
Numerická apertura na vyvedení dle laserového optického kabelu	0,1
Vlnová délka	1030 nm
Mín. Průměr optického kabelu	600 μm
El. Krytí	IP54
Okolní teplota	10°C - 50°C



Obr. 23: Diskový laser Trumpf TruDisk 4006 a navařovací hlava

2.3 Specifikace použitých materiálů

Při experimentální části diplomové práce byla jako substrát použita ocel S355, na které byly navařeny návary ze dvou druhů materiálů: H13 a Capilla 66. Bližší specifikace, v rámci experimentálního programu diplomové práce použitých materiálů, včetně jejich charakteristických, fyzikálních a mechanických vlastností, jsou níže uvedeny v podkapitolách 2.3.1 a 2.3.2.

2.3.1 Specifikace substrátu pro laserové navařování

Pro provedení experimentálního programu diplomové práce byla jako základní materiál (substrát) použita ocel S355 (11 503 podle ČSN), na kterou byly navařeny jednotlivé vzorky. Tato ocel je nelegovaná, jakostní, konstrukční ocel se zaručenou svařitelností při zvýšené mezi kluzu. Mez kluzu oceli je 340MPa. Používá se pro výrobu strojních součástí, motorů a celých strojů. Funkce tohoto materiálu je pouze jako základna pro návary, které jsou cílem experimentu.

Tab. 6 Chemické složení S355

C	Mn	Si	S	P
0,20	1,70	0,60	0,035	0,035

2.3.2 Specifikace přídavného prášku pro laserové navařování

Pro porovnání byly vybrány prášky H13 a Capilla 66. Mají podobné chemické složení, ale jiné mechanické vlastnosti. Rozsah velikosti částic je od 53 do 150 μm . Capilla 66 je více legována chromem, navíc obsahuje W a Ni. Návar obou materiálů je mimořádně odolný proti oděru, nárazu a tlaku. Používá se pro opravné navařování nástrojů pro tváření za tepla, jako jsou zápustky. Je také vhodný pro novou výrobu (změny obrysu) zápustek, stejně jako pro tvrdé navařování nástrojů pro stříhání za studena.

Tab. 7: Fyzikální a mechanické vlastnosti H13

Fyzikální a mechanické vlastnosti	
Hustota	7.33 g / cm ³
Tepelná roztažnost při 20-200 ° C	10.6*10 ⁶ m / (m * K)
Tvrdost, Rockwell C	34-55 HRC
Mez kluzu Rp0,2	1000 – 1380 MPa

Tab.8: Fyzikální a mechanické vlastnosti C66

Fyzikální a mechanické vlastnosti	
Hustota	7.33 g / cm ³
Tepelná roztažnost při 20-200 ° C	10.6*10 ⁶ m / (m * K)
Tvrdost, Rockwell C	50-55 HRC

Tab. 9 Porovnání chemického složení H13 a Capilla 66

Porovnání chem.složení, [%]	H13	Capilla 66
C	0,32 až 0,45	0,3 až 0,4
Cr	4,75 až 5,50	6 až 8
Mo	1,10 až 1,75	1 až 1,5
Si	0,80 až 1,25	Do 1
V	0,80 až 1,20	0,5 až 0,8
Mn	0,20 až 0,60	-
W	-	6 až 8
Ni	-	0,4 až 0,7

Optimalizace procesních podmínek a parametry laserového navařování

Prvotní testovací parametry jsou uvedeny v tabulce 10. Jako nejvhodnější byly vybrány parametry: výkon laseru 1500 W, rychlost posuvu laserové hlavy pro navařování 50cm/min a rychlosti podání prášku parametry 700 a 800 (v další kapitole bude tento parametr prášku blíže upřesněn v klasických jednotkách g/min). Při těchto nastaveních bylo dosaženo nejlepších parametrů návarů, jako je výška, kvalita a rovnoměrnost návaru. Návary se skládaly z 25 vrstev. Vrstvy byly nanášeny s minimálními přestávkami kolem 0,1 sekundy, předchozí vrstvy byly rovněž ovlivněny teplem z následujících vrstev.

Při hledání optimálních parametrů bylo navařeno 13 vzorků s různými podmínkami, každý návar se skládal z 5 vrstev, navařovaný v délce 100mm. Výška byla měřena pomocí posuvného měřítka na pěti různých místech po celé délce v každém případě, počínající od začátku v krocích po 2 cm až do konce výplně. Neoptimálnější parametry byly u vzorku 11. Proto jsme zvolili, že při navařování budeme používat tyto parametry.

Tab. 10: Prozkoumání parametry laserového navařování

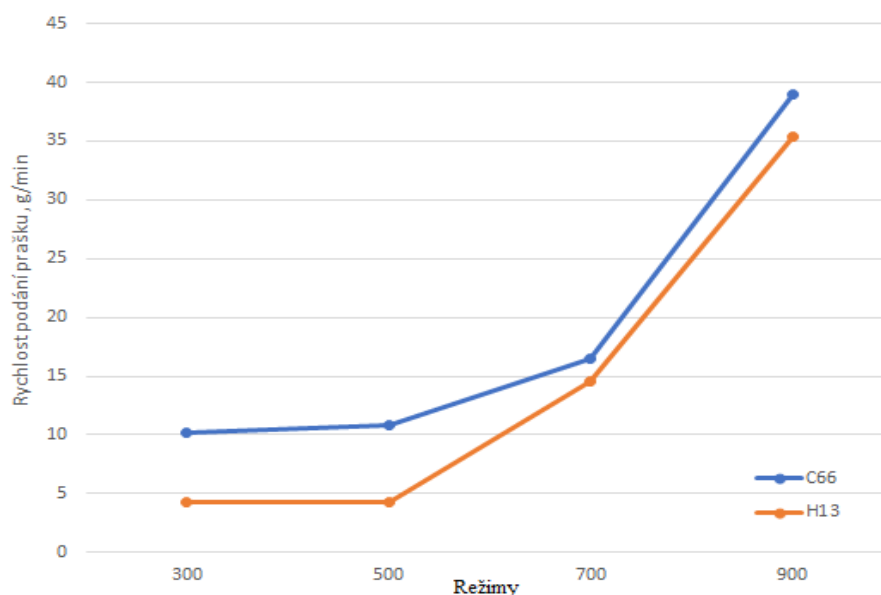
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Použitý výkon, kW	1,5	2	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
Rychlost posuvu, cm/min	50	250	125	50	35	50	40	50	100	50	50	50	50
Režim podavače prášku	500	500	500	500	400	300	300	400	400	300	700	1000	1200

2.4.1 Procesní podmínky množství prášku

Protože podavač prášku nemá stupnici uvedenou v reálných hodnotách, bylo potřeba provést kalibraci a převést množství prášku na standardní jednotky. Je to mimo jiné proto, že je možné podávat řadu různých prášků s rozdílnou měrnou hmotností, zrnitostí, tekutostí apod. Pro předkládanou diplomovou práci byla provedena kalibrace pro prášky H13 a Capilla 66. Výsledky jsou shrnuty v tab. 11 a grafu 1.

Tab. 11: Množství podání prášku (g/min) od zvoleného režimu

Režim podavače	300	500	700	900
Množství prášku	[g/min]	[g/min]	[g/min]	[g/min]
C66	10,2372	10,8676	16,4732	38,977
H13	4,3196	4,2858	14,4944	35,4128



Graf. 1: Závislost rychlosti podání prášku v různých režimech

2.5 Příprava laserových návarů

Značení vzorků bylo zvoleno dle následujícího klíče a skládá se ze tří znaků. První znak (C nebo H) znamená použitý přídatný prášek (Capilla resp. H13). Druhý znak, písmeno Z nebo K, označuje začátek resp. konec navařování u lineárních návarů. Třetí znak udává množství prášku dle stupnice z podavače (znak 7 = 700 dle stupnice podavače = 15g/min resp. 8 = 800 = 25g/min). Takže např. HK8 znamená, že návar je z prášku H13, z konce navařování při množství podávaného prášku 25g/min. V navazujícím experimentu byly navařeny z obou prášků vzorky trubkového tvaru, které jsou značeny H7T, H8T, C7T a C8T dle stejného klíče.

Tab. 12: Seznam vyrobených vzorků

№	Materiál	Rychlost podávání prášku	Pozice	Geometrie vzorku	Množství vrstev	Značení vzorku
1	Capilla66	700	Začátek	Lineární návar délky 10 cm	25	CZ7
2	Capilla66	700	Konec	Lineární návar délky 10 cm	25	CK7
3	Capilla66	800	Začátek	Lineární návar délky 10 cm	25	CZ8
4	Capilla66	800	Konec	Lineární návar délky 10 cm	25	CK8
5	Capilla66	800	-	Trubka	25	C8 T
6	H13	700	Začátek	Lineární návar délky 10 cm	25	HZ7
7	H13	700	Konec	Lineární návar délkou 10 cm	25	HK7
8	H13	800	Začátek	Lineární návar délkou 10 cm	25	HZ8
9	H13	800	Konec	Lineární návar délkou 10 cm	25	HK8
10	H13	800	-	Trubka	15	H8 T

2.5.1 Příprava a metalografické hodnocení vzorků

Metalografické hodnocení laserových návarů pomocí materiálů H13 a Capilla66 bylo provedeno na 10 vzorcích, které jsou uvedeny v tabulce 12. Metalografické výbrusy byly podrobeny mikroskopické analýze na světelném mikroskopu Carl Zeiss Z1M a tvrdoměru pro záznam tvrdostí materiálu. Příprava metalografických vzorků probíhala v laboratořích katedry materiálu a strojírenské metalurgie Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni. Řezy byly orientovány kolmo ve směru navařování, aby byla znázorněna geometrie návaru kolmo ke směru navařování. Potom bylo provedeno zalisování vzorů do lisovací hmoty v metalografickém lisu Struers Citopress 10. Broušení a leštění vzorků bylo provedeno na poloautomatické brusce/leštičce Struers LaboForce-100.

Následovalo měření tvrdosti a příprava pro metalografické pozorování vzorku. Pro naleptání struktury návaru byly použity dva druhy leptadla. Pro zobrazení tepelně ovlivněné zóny a struktury návaru z H13 byl použit 5% roztok Nitalu. Tento roztok nebyl vhodný pro materiál Capilla66 ani pro materiál H13. Pro tyto materiály byl použitý roztok: 40% kyseliny chlorovodíkové, 40% kyseliny dusičné a etanolu. Vzorky byly vyleptány během několika vteřin a z toho důvodu byl roztok vyhodnocen jako příliš agresivní. Proto byla použita kyselina dusičná 3% s vodou. Chemické složení leptadel je uvedeno v tabulce 13. Aplikace leptadla vedla ke zviditelnění struktury u všech zkoumaných laserových návarů.

Tab. 13: Seznam leptadel pro použité materiály

Materiály	HNO ₃	Etc.
Capilla66	5%	Ethanol
H13	3%	Voda

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

Metalograficky bylo provedeno hodnocení jednotlivých návarů, výsledky jsou sumarizovány v tab. 14. Byla hodnocena plocha příčného řezu návarem, která umožnila přepočítat na navařený objem. Dále byla hodnocena výška a šířka návaru a vnesené teplo. K výpočtu byl použit součinitel účinnosti $\eta = 0,5$ pro pevnolátkový laser uváděný v literatuře [21].

Tab. 14: Seznam hodnot geometrie a parametru návaru

Vzorek	plocha	výška	šířka	navarovací rychlost	navařený objem	množství navařeného prášku	hustota prášku	vnesené teplo
	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(mm ³ /min)	(g/min)	(g/cm ³)	(kJ/mm)
Capilla66								
CZ7	17,4	6,5	2,8	500	8700	67,8	7,33	25
CK7	18,5	6,8	2,9	500	9250	72,1		25
CZ8	23,9	9,15	2,7	500	11950	93,1		25
CK8	27,64	10,1	2,8	500	13820	107,8		25
H13								
HZ7	31	11,7	2,8	500	15500	120,8	7,33	25
HK7	27,5	10,5	2,7	500	13750	107,3		25
HZ8	39,2	14,7	2,7	500	19600	152,8		25
HK8	35,1	13,9	2,7	500	17550	136,8		25



Obr. 24: Obrázek vzorků po zalití v příčných řezech

2.5.2 Hodnocení průběhů tvrdosti laserových návarů

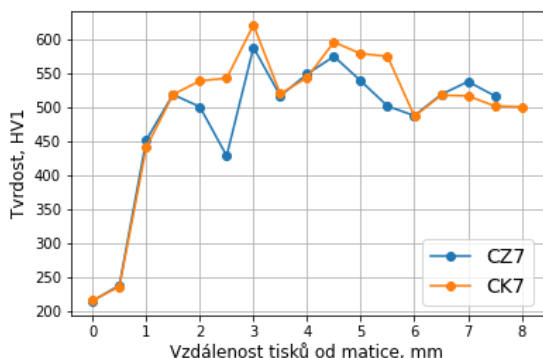
Hodnocení tvrdosti se provedli na přístroji “DuraScan 70 G5 od Emcotestu” podle Vickerse dle normy ČSN EN 65 07-1 zatížením 1 N/mm² (HV1). Průběhy tvrdosti byly provedeny na vzorcích tak, aby linie vtisků vycházely ze substrátu a protínaly tepelně ovlivněnou oblast a pokračovaly přes vrstvy návarů, krok posunu byl zvolen 0,5 mm.

Pro zlepšení rozlišitelnosti a přesnosti byly udělané tisky s menším posunem s krokem 0,1 mm, aby bylo možné vyhodnotit tepelně ovlivněnou oblast.

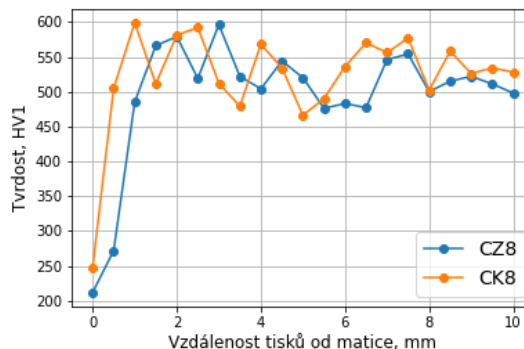
Návary měly délku 10 cm, proto je důležité provést hodnocení tvrdosti na dvou různých částech toho návaru, na začátku a konci.

Z makrostruktury jednotlivých oblastí návarů bylo zjištěno, že laserové návary obsahují tepelně ovlivněné zóny na substrátu, oblasti promíchání a oblasti tepelného vlivu překrývajících se vrstev. Byly pozorovány struktury návarů vzorků.

2.5.2.1 Vzorčky návarů z Capilla 66

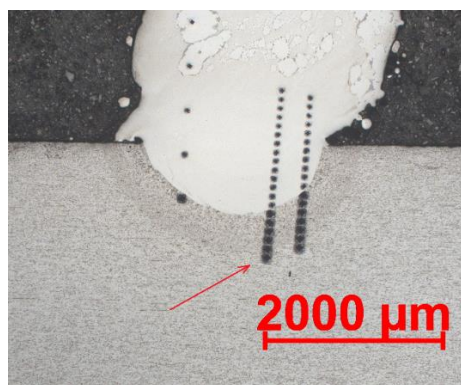


Graf. 2: Porovnání tvrdosti dvou vzorků CZ7 a CK7

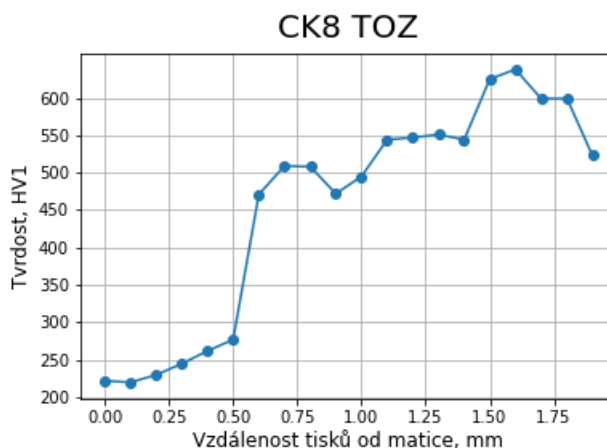


Graf. 3: Porovnání tvrdosti dvou vzorků CZ8 a CK8

V grafu 2 a 3 jsou porovnány průběhy tvrdosti návaru Capilla 66 mezi začátkem a koncem navařování. V grafu 2 je to pro množství prášku 15g/min, u grafu 3 je to 25g/min. Průběhy se příliš neliší, není viditelný rozdíl mezi začátkem a konce navařování. To znamená, že při navařování v délce 10cm nedochází k zásadnější kumulaci tepla, která by ovlivnila tvrdost právě navařené vrstvy. Pro větší množství prášku (vzorky C8) se zdá být průměrná tvrdost malinko vyšší. První tisky vyjadřují tvrdost substrátu – destičky z oceli S355, která odpovídá 250HV1. Následuje tepelně ovlivněná oblast a oblast promíšení základního materiálu s navařovaným práškem s tvrdostmi mezi 450 a 500HV1. Tvrdosti návarech Capilla 66 se pohybují mezi 450 a 630 HV1. Hodnoty značně kolísají. Důvodem je, že byla zvolena konstantní vzdálenost mezi vtisky 1mm, zatímco v návaru se střídají navařené a tepelně ovlivněné vrstvy. Detailní průběhy tvrdosti přes TOO a promíšení jsou uvedeny na obr. 25 a grafu 4.



Obr. 25: Tisky tvrdosti v tepelně ovlivněné zóně CK8, zvětšení x2,5



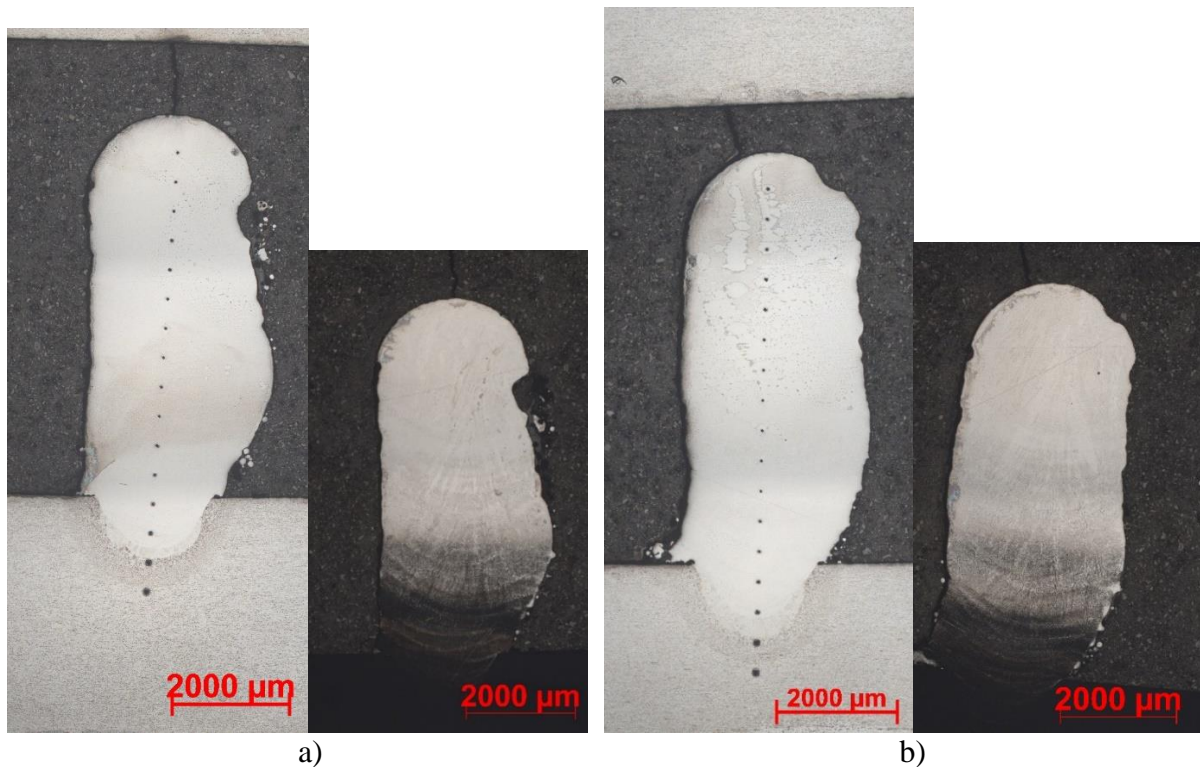
Graf. 4: Závislost tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelně ovlivněné zóně ve vzorku CK8

Tepelně ovlivněná zóna přechází do zóny promíchání. Zvýšení tvrdosti v substrátu je způsobené tepelným vlivem od návaru v důsledku čehož se stal substrát zakalený. Difundování některých legujících prvků z návaru, např. uhlíku, způsobilo zvýšení tvrdosti v oblasti promíchání. Na obr. 26 jsou dokumentovány příčné řezy návarů vzorků CZ7 a CK7

Katedra materiálu a výrobní technologie

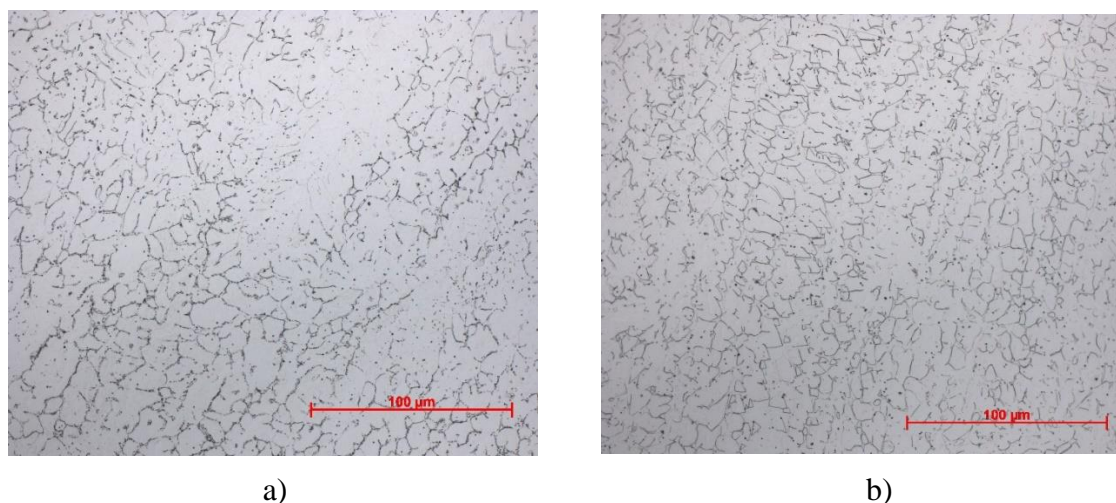
Vladyslav Arseniuk

v neleptaném stavu s průběhy tvrdosti a po naleptání s viditelnou strukturou návarů a jejich tepelným ovlivněním. Podobně je dokumentován vzorek C8 na obr. 28.

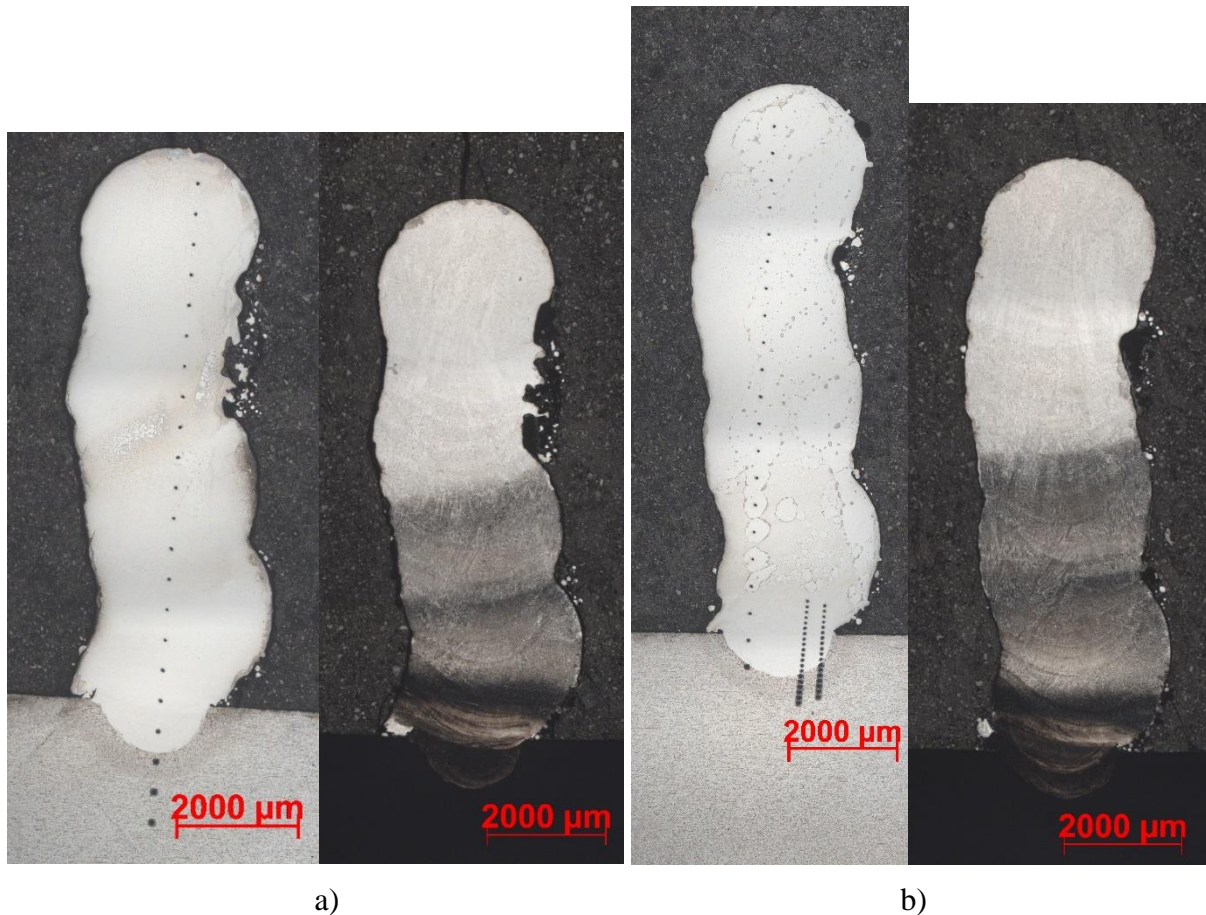


Obr. 26: Makrostruktura návaru vzorku a) CZ7 a b) CK7 při zvětšení x2,5

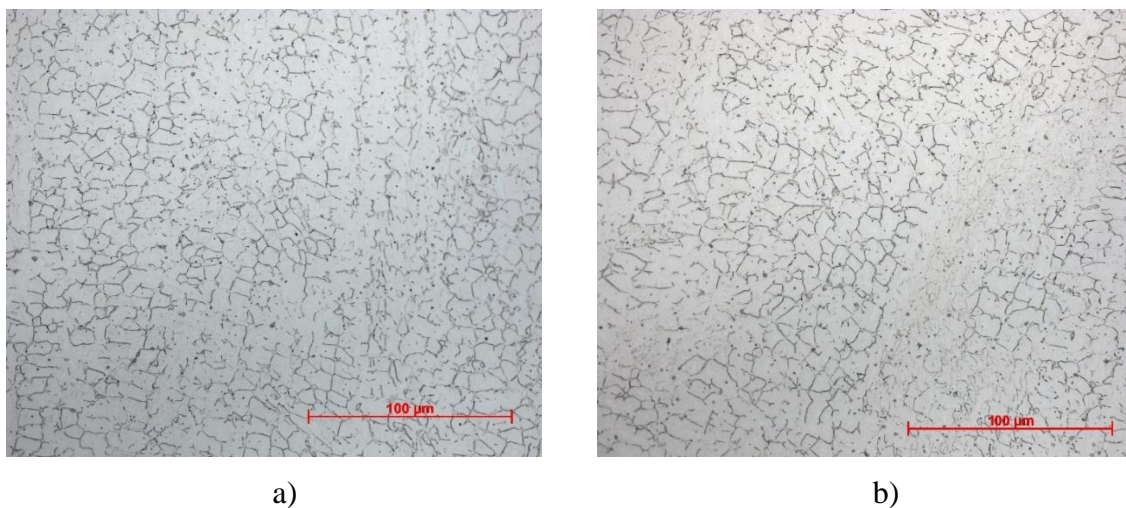
Mikrostruktura oceli Capilla 66 pro oba režimy navařování je dokumentována na obr. 27 a 29. Jedná se o martenzitickou strukturu se zbytkovým austenitem a karbidy. Jemnozrné dendritické celulární uspořádání odpovídá strukturám vznikajícím při rychlém odvodu tepla.



Obr. 27: Mikrostruktura návaru vzorku a) CZ7 a b) CK7 při zvětšení x50



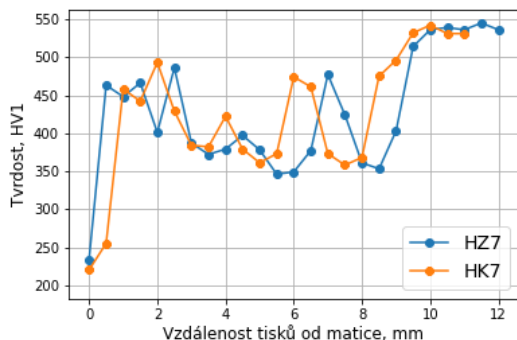
Obr. 28: Makrostruktura návaru vzorku a) CZ8 a b) CK8 při zvětšení x2,5



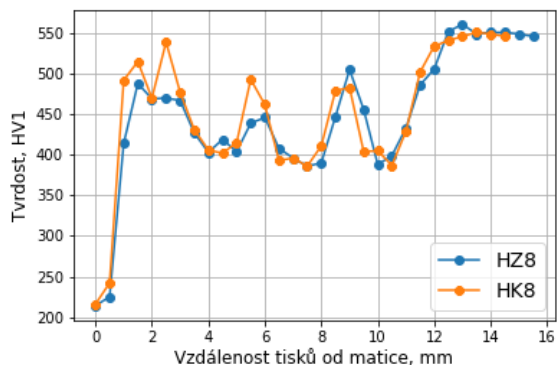
Obr. 29: Mikrostruktura návaru vzorku a) CZ8 a b) CK8 při zvětšení x50

Na obr. 26 a 28 je pozorována geometrie návaru a z čeho se skládá: tepelné ovlivněná zóna, substrát, zóna promíchání. Při silnějším leptání se projeví vrstvy návaru a mezi nimi popouštěcí oblasti. Čím větším rychlost přídavného prášku, tím vyšší byly návary (tab. 14).

2.5.2.2 Vzorčky návarů z H13



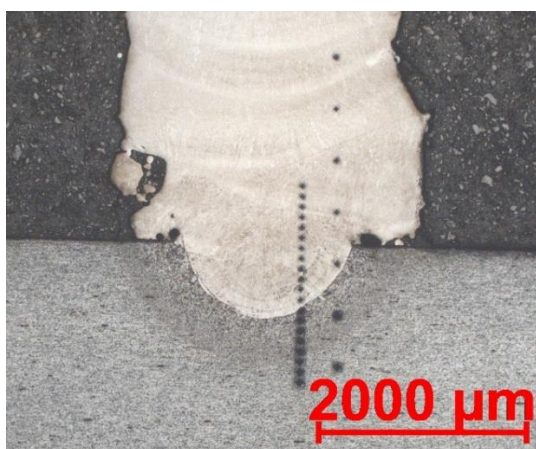
Graf. 5: Porovnání tvrdosti dvou vzorků HZ7 a HK7



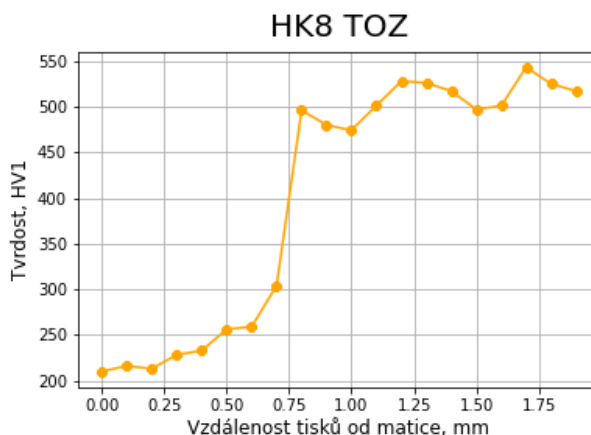
Graf. 6: Porovnání tvrdosti dvou vzorků HZ8 a HK8

Na grafech 5 a 6 jsou zobrazeny změny hodnot průběhu tvrdostí. První tisky byly provedeny na základním materiálu S355, a proto jsou hodnoty výrazně menší okolo 230HV1. Na kalenou vrstvu TOO navazuje promíchání, kde byl základní materiál smíchán s navařovanou nástrojovou ocelí H13. V této oblasti se tvrdosti pohybují kolem 450HV1. V další části návaru klesla tvrdost na 350 až 400HV a hodnoty kolísají v závislosti na tom, zda jsou umístěny do návaru nebo TOO mezi jednotlivými vrstvami. Tvrdosti posledních vrstev návaru již odpovídají předpokládaným tvrdostem 550HV1 a jsou konstantní. Detailnější rozbor je na obr. 30 a 31 a v grafech 7 a 8. Dalším zajímavým výsledkem je, že při použití většího množství prášku (vzorčky s označením 8) vykazují v popuštěné oblasti návaru vyšší relativní tvrdost (mezi 400 až 450 resp. 500HV), zatímco při nižším množství podávaného prášku tvrdosti oscilují až na výjimky mezi 350 až 400HV. Bude to pravděpodobně tím, že je více energie laseru použito na tavení prášku a do dříve navařených vrstev se dostává méně tepla a tím je nižší teplota i velikost popuštění.

Při navařování se vzorky z Capilly je zjevná nižší tvrdost ve spodních částech návaru, pohybující se do max 500HV1. Naopak konec návaru (poslední 3 až 4mm) vykazují konstantní tvrdost s hodnotami okolo 550HV1. Z toho lze soudit, že pomalejší odvod tepla z dolních návarů má velký vliv na konečnou tvrdost, větší než v případě prášku Capilla 66.



Obr. 30: Tisky tvrdosti v tepelné ovlivněné zóně HK8, zvětšení x2,5

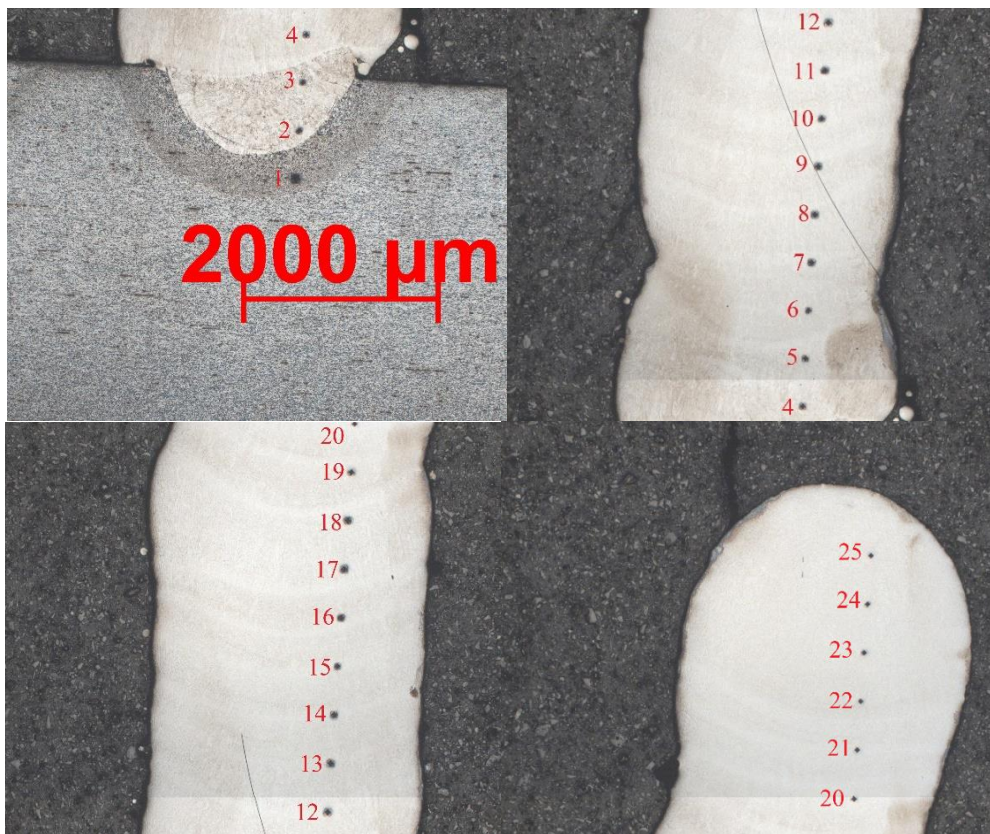


Graf. 7: Závislost tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelné ovlivněné zóně ve vzorků HK8

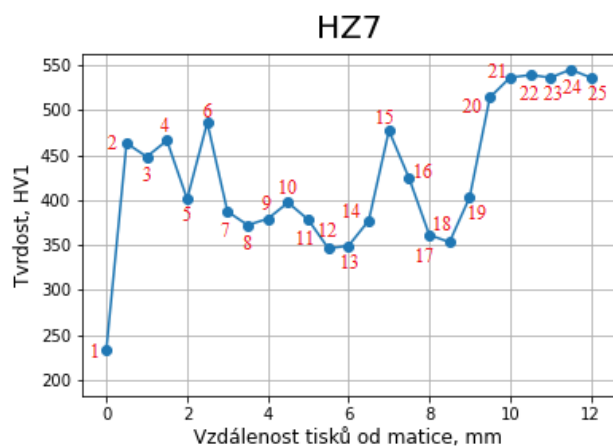
Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

Stejný charakter průběhu tvrdosti z H13 je pozorován ve vzorku z materiálu Capilly66. Detailní analýza pozice jednotlivých vtisků a dopadu na tvrdost je dokumentována na obr. 31 a grafu 8. Nižší hodnoty tvrdosti (např. vtisky č. 7,8,12,13,17) spadají do užších oblastí tepelného ovlivnění. Naopak vyšší hodnoty tvrdosti (např. vtisky 6, 16, 23-25) odpovídají středu navažené vrstvy.



Obr. 31: Průběh tisků tvrdosti ve HZ7

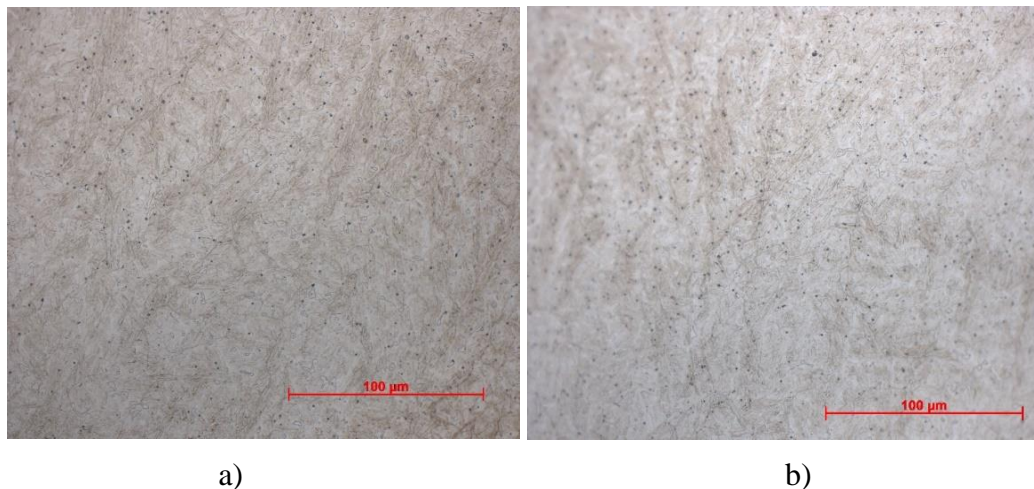


Graf. 8: Průběh tvrdosti ve vzorku HZ7

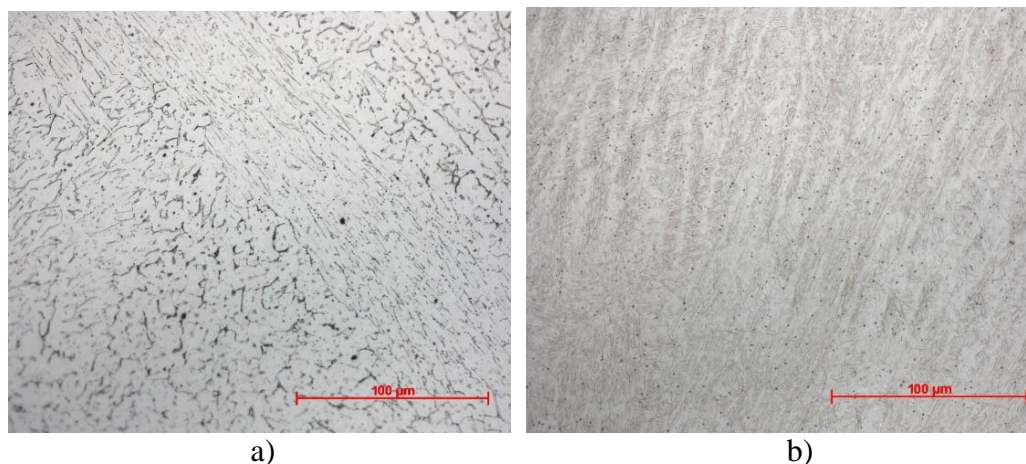
Tab. 15: Seznam hodnot po průběhu tisků na obr. 31

No.	HV1	13	349
1	234	14	377
2	463	15	477
3	448	16	424
4	466	17	361
5	401	18	353
6	486	19	403
7	387	20	514
8	372	21	536
9	379	22	539
10	397	23	536
11	378	24	545
12	346	25	536

Mikrostruktura návaru H13 je dokumentována na obr. 32. Opět se jedná o martenzitickou matici se zbytkovým austenitem a karbidy.



Obr. 32: Mikrostruktura návaru vzorku a) HZ8 a b) HK8 při zvětšení 50x

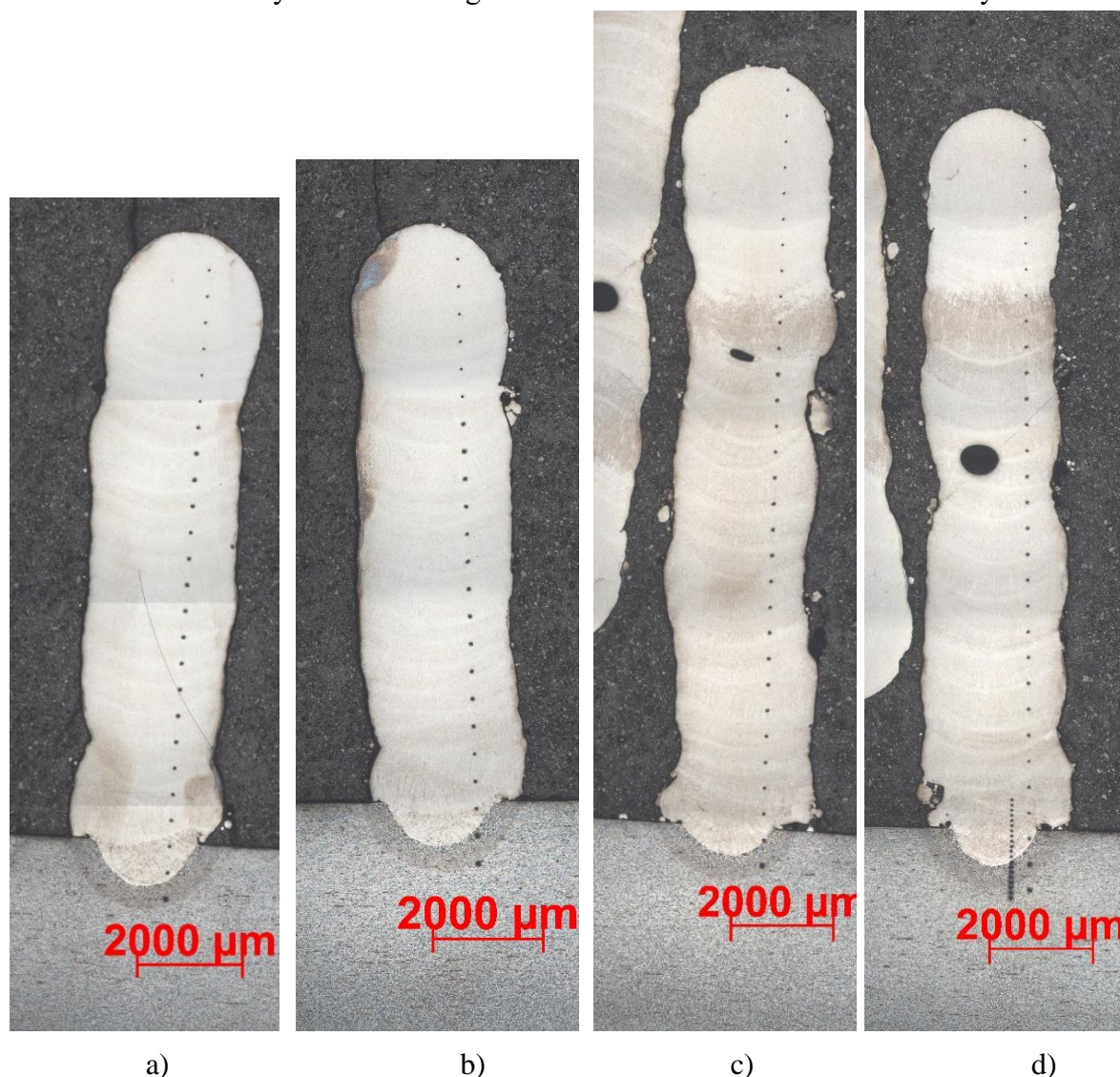


Obr. 33 Porovnání struktury vzorků vyřezaných z trubky z materiálu: a) Capilly 66 a b) H13

Makrostruktura příčných řezů návaru oceli H13 je dokumentována na obr. 34. Návar na začátku je v obou případech nepatrně vyšší než na konci navařování, dle očekávání je také při podávání většího množství prášku návar výrazně vyšší (HZ7 vs. HZ8), lze uvedeno v tab. 1.

Tab. 16: Porovnání výšky a objemu návarů z H13

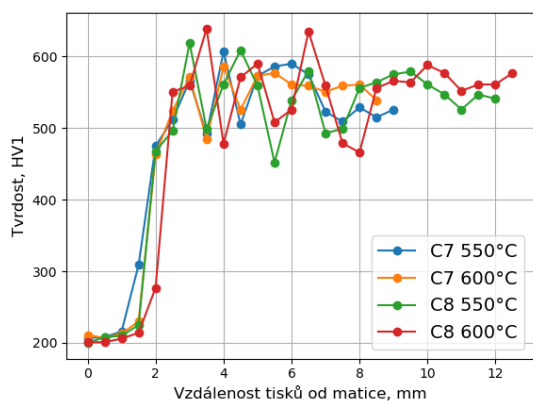
Vzorek	plocha	výška	šířka	navářený objem
H13	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm ³ /min)
HZ7	31	11,7	2,8	15500
HK7	27,5	10,5	2,7	13750
HZ8	39,2	14,7	2,7	19600
HK8	35,1	13,9	2,7	17550



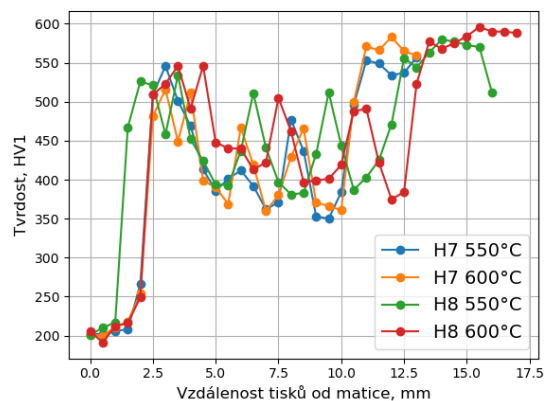
Obr. 34: Makrostruktura návaru vzorku a) HZ7 a b) HK7 c) HZ8 a d) HK8 při zvětšení 2,5x

2.5.2.3 Vzorky po tepelném zpracování

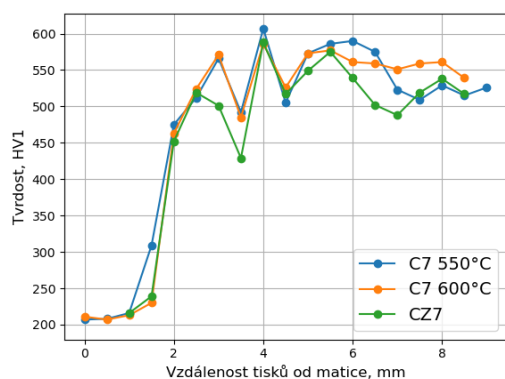
Odebrané vzorky z obou materiálů byly tepelně zpracovány při teplotách 550 a 600 °C po dobu 30 minut s následným ochlazením na vzduchu pro ověření, zda dojde k homogenizaci tvrdosti případně vytvrzení v návaru po tepelném zpracování. Parametry tepelného zpracování jsou podobné, jako žíhání ke snížení pnutí. Uvedené teploty jsou často publikovány v odborné literatuře a byly použity pro možnost srovnání. Výsledky pro ocel Capilla 66, uvedené na grafu 9 ukazují, že se tvrdost nezměnila ani nevyrovnala, stále se pohybuje střední hodnotou mezi 500 a 550HV1. V kontrastu s tím u oceli H13 lze pozorovat celkový nárůst tvrdosti o zhruba 50HV1 ve všech oblastech. Nedošlo sice ke zrovnoměnění průběhu tvrdosti, ale střední partie mají průměrnou tvrdost kolem 400-450HV1 (oproti 350-400HV1 po navaření), poslední návary 550-580HV1 (oproti 540HV1 po navaření), Viz graf 10.



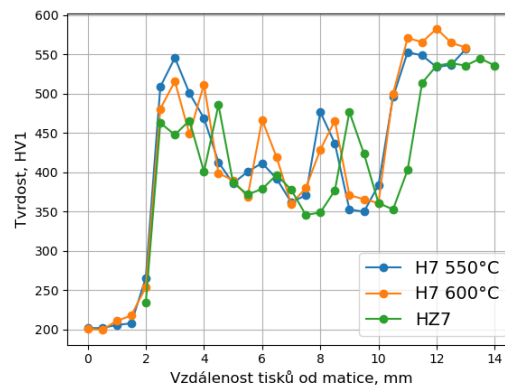
Graf. 9: Porovnání tvrdosti vzorků z Capilly66 TZ



Graf. 10: Porovnání tvrdosti vzorků z H13 TZ



Graf. 11: Porovnání tvrdosti vzorků TZ a bez TZ z Capilly 66



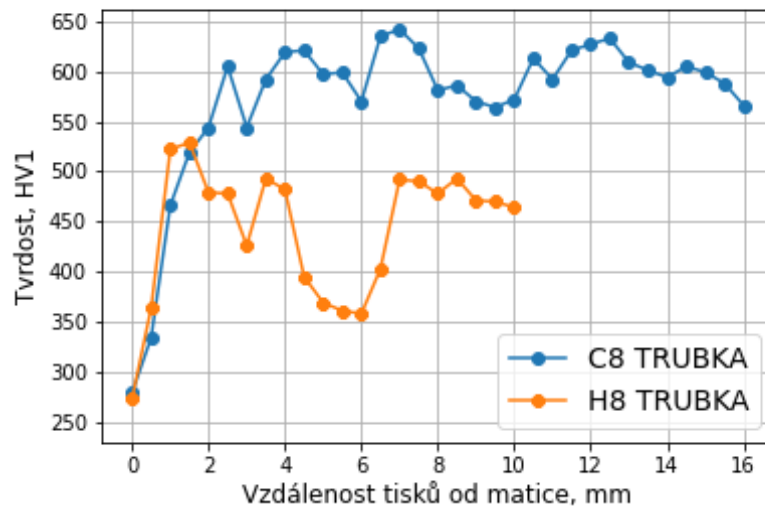
Graf. 12: Porovnání tvrdosti vzorků TZ a bez TZ z H13

2.6 Rotační navaření vzorku trubky

Dále bylo provedeno navaření kruhového vzorku pro posouzení kontinuálního navaření 25 vrstev a možnost porovnání se simulací teplotního pole při navařování. Ověření simulačního modelu umožní vypočítat teplotní pole při navařování a tím i teplotu podkladu na jaký se navařuje.

2.6.1 Tvrdost navařeného příčného průřezu trubky

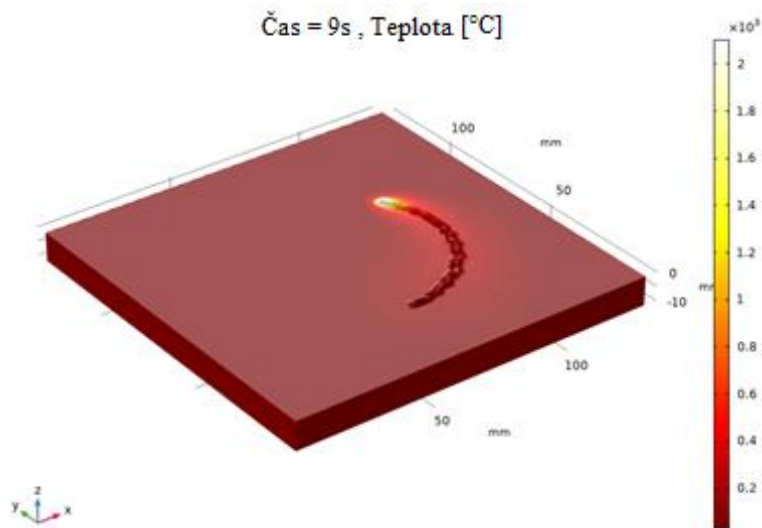
V grafu 13 jsou uvedeny průběhy tvrdosti dvou dílů z různých materiálů. Vzorek z materiálu Capilly66 (C8) je tvrdší při použití laserového navařování. Poklesy a stoupání tvrdosti jsou pozorovány na grafu přes průřezy celých návarů. Při navařování trubky z H13 pozorováno oblast výrazného poklesu tvrdosti, je to popouštěcí zóna. Pomocí simulace bylo potvrzeno působení teploty na předchozí vrstvy a základního materiálu.



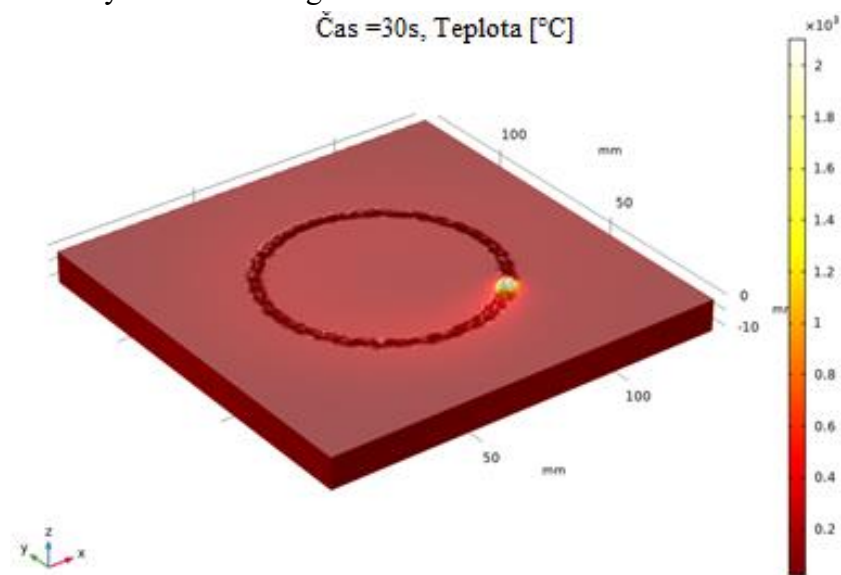
Graf. 13: Porovnání tvrdosti dvou vzorků z Capilly66 a H13 v příčném průřezu trubky

2.6.2 Simulace navaření vzorku trubky

Při simulaci byly použity rychlost posuvu laseru pro navařování trubky 8,33 mm/s, což odpovídá jedné otáčce za 30s. Vypočítaný model se skládá ze 7 navazujících vrstev (z časových důvodů výpočtu nebylo možno provést simulaci na 25 vrstvách jako u experimentu).



Obr. 35: Simulace průběhu navařování po 9s a teplotní stupnice

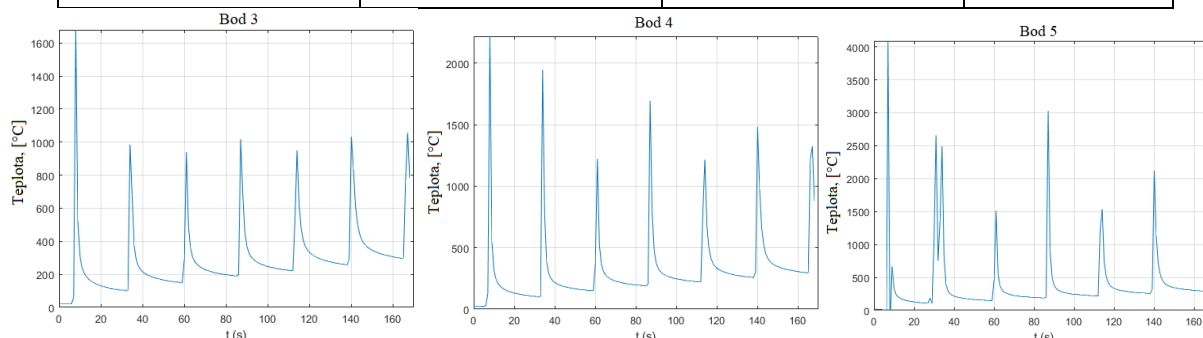


Obr. 36: Simulace průběhu navařování po 30s a teplotní stupnice

Pohyb laserového paprsku při navařování jedné vrstvy kruhového průřezu trvá 30s. V tavné lázni teplota může dosahovat více než 2000 °C, viz. Obr.35 a 36. Teplo z návaru se pak rozptýlí po materiálu pod ním. To vede k popouštěcím zónám. Z průběhu simulace je vidět, že teplota návaru ovlivní substrát pod ním.

Tab. 17: Souřadnice jednotlivých bodů

Souřadnice jednotlivých bodů:	X (šířka), [mm]	Y (délka), [mm]	Z (hloubka), [mm]
Bod 1	100	65	-3
Bod 2	100	65	-2
Bod 3	100	65	-1
Bod 4	100	65	0 (na povrchu podkladu)
Bod 5	100	65	1
Bod 6	100	65	2



Graf.14: Závislost tepla na čase průběhu navařování v různých bodech

Podle grafu 14 každý skok teploty je moment, kdy laserový paprsek prochází ve vrstvách simulovaným měřícím bodem. Návar v bodě 4 odpovídá rovině podkladu. Ze simulace je

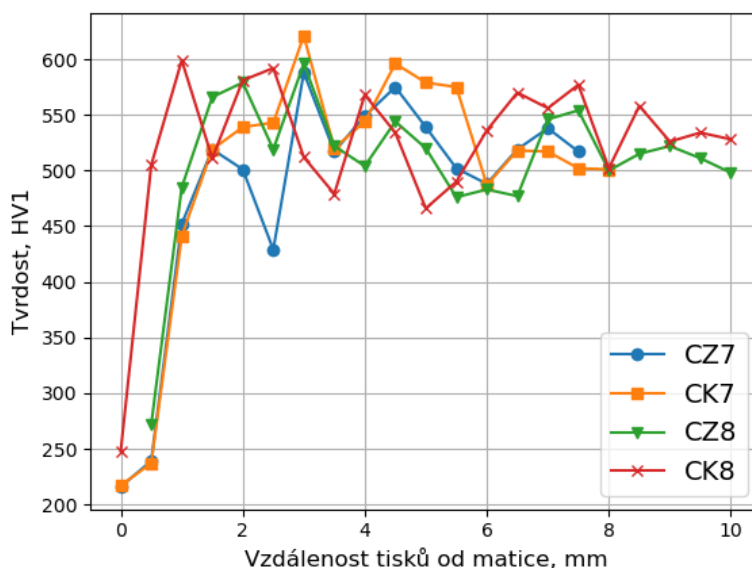
Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

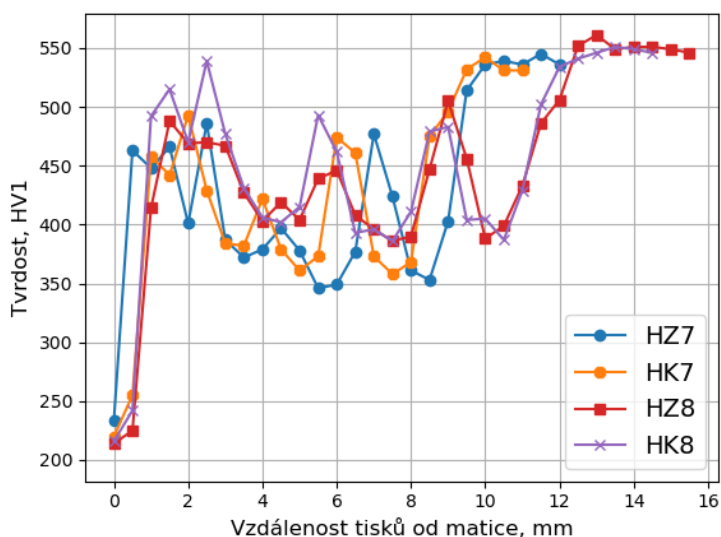
možné určit teplotu povrchu v okamžiku navařování. Čím vyšší je návar, tím menší jsou extrémní maximálních hodnot teploty po každém otáčení. Oproti tomu teploty mezi extrémní jsou vyšší po každé vrstvě. Je to z toho důvodu, že od následujících navařovaných vrstev teplota narůstá kvůli zbytkové teplotě, která se zůstala od navařování předchozích vrstev.

2.7 Diskuze

Při porovnání tvrdostí materiálů bylo zjištěno, že průběhy hodnoty tvrdosti na grafů mají různé fáze nárůstu a poklesu. Za tento jev jsou zodpovědné tepelně popouštěné zóny mezi návary. Materiál Capilla66 je tvrdší (Graf 15), než návar z oceli H13 (Graf 16) přibližně o 80 jednotek HV1. V tepelně ovlivněné zóně základního materiálu S355 se hodnota tvrdosti rovnoměrně narůstala, v zóně promíchání byl pozorován výrazný skok zvýšení hodnot tvrdosti.

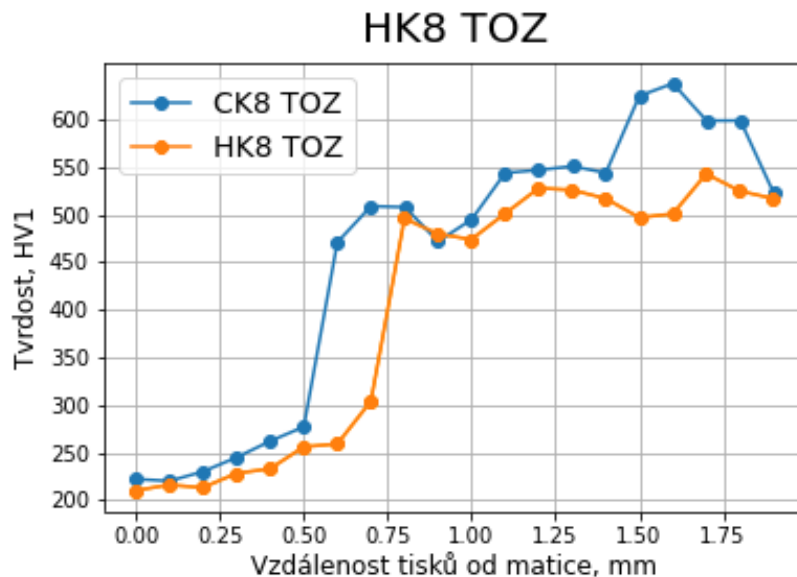


Graf. 15: Porovnání tvrdosti vzorků z Capilla66



Graf. 16: Porovnání tvrdosti vzorků z H13

Průběhy tvrdosti přes tepelně ovlivněnou zónu a oblast promíšení byly podrobně zdokumentovány v grafu 17. Tvrdosti do 300HV1 odpovídají zakalení substrátu z oceli S355, což je tepelně ovlivněná zóna. Tvrdost v oblasti promíšení se zvětšovala kvůli promíchání chemického složení návaru se substrátem. Z dříve uvedených výsledků na obrázcích 25 a 30 bylo pozorováno, že tloušťky tepelně ovlivněné zóny jsou kolem 0,5 mm v obou případech při výkonu laseru v 1,5kW. V oblasti promíšení roste tvrdost v obou případech kvůli legování základního materiálu přídavným práškem.



Graf. 17: Porovnání tvrdosti dvou vzorků v tepelně ovlivněné zóně základního materiálu

Při porovnání návarů z dvou různých materiálů H13 a Capilla66 byly zjištěny následující vztahy:

- výška 100mm návarů je na začátku a konci navařování stejná, při průběhu navařování tedy nedochází k podstatné kumulaci tepla, které by ovlivňovalo geometrii housenky

- dle očekávání je při podávání většího množství prášku (15g/mm vs. 25g/mm) návar výrazně vyšší. Výška návaru při stejných parametrech navařování byla vyšší ve vzorcích z H13 a měla pravidelnější tvar. Může to být způsobeno rozdílnou teplotou tavení, případně granulometrií prášku (v závislosti na tvaru a velikosti jednotlivých částic).

- Oba materiály návaru jsou citlivé k popuštění během navařování dalších vrstev. U Capilly 66 není popuštění tak výrazné, ve vzorcích z H13 jsou větší poklesy tvrdosti v popouštěcích zónách, materiál H13 je více náchylný k popouštění.

- Čím větší je množství přídavného prášku při stejných podmínkách navařování, tím vyšší je střední hodnota tvrdosti. Je to tím, že pro natavení většího množství prášku je více energie laserového paprsku spotřebováno na tavení prášku a méně energie je předáno do předchozího návaru. Proto dochází k rychlejšímu chladnutí.

- Při TZ se tvrdost oceli Capilla66 nezměnila ani nehomogenizovala, stále se pohybuje střední hodnotou okolo 600HV1. Ani u oceli H13 sice nedošlo ke zrovnověnění průběhu tvrdosti, lze ale pozorovat celkový nárůst tvrdosti o zhruba 50HV1 ve všech oblastech.

2.8 Závěr

Byla optimalizována technologie navařování kovových prášků ocelí H13 a Capilla 66. Bylo potvrzeno, že kromě výkonu laseru a rychlosti navařování (míněna rychlost pohybu paprsku) hraje velkou roli také množství a druh navařovaného prášku. Dle očekávání při podávání většího množství prášku (za jinak shodných parametrů) je méně tepla předáno do již navařených předchozích vrstev. Výsledkem je nejen vyšší celková výška návaru i výška jednotlivých návarů, ale překvapivý je také dopad na tvrdost. Dojde k menšímu popuštění a dosažení vyšší tvrdosti návaru. Z porovnání dvou použitých prášků plynou další podstatné rozdíly. Prášek z oceli H13 je často používaný materiál, hojně používaný v praxi a velmi často používaný ve vědeckých publikacích o laserovém navařování i 3D tisku v aditivní výrobě. Srovnáním lze konstatovat, že pravděpodobně díky vyššímu legování je prášek Capilla 66 méně náchylný na popuštění a po navaření dosahuje vyšší tvrdosti než ocel H13. Pokud nebude prováděno další tepelné zpracování, jeví se jako vhodnější. Naopak při aplikaci tepelného zpracování návaru dochází u návaru H13 k vytvrzení a tvrdostí se prášku Capilla 66 vyrovná. Zároveň jsou návary z H13 rovnoměrnější co do geometrie, a také množství navařeného materiálu za jednotku času je vyšší (zhruba o 40%). Detailně zpracované průběhy tvrdosti napříč TOO a promíšenou oblastí ukazují, že zde není rozdíl mezi použitými prášky.

Použití tepelného zpracování vedlo ke zvýšení tvrdosti o 50HV1 u oceli H13, ke zrovnoměrnění tvrdosti ale nedošlo. U návarů Capilla 66 nedošlo ani ke zrovnoměrnění, ani zvýšení tvrdosti. Při opakovaném navařování 25 návarů lineárně v délce 100mm ve vertikálním směru nelze pozorovat rozdíly mezi začátkem a koncem navařování. V případě kontinuálního navařování trubky jsou rozdíly mezi H13 a Capilla 66 ještě výraznější. Kolísání tvrdosti u návaru Capilla 66 je minimální a dosahuje střední hodnoty kolem 600HV1. Tvrdosti v popuštěných oblastech mezi jednotlivými vrstvami neklesají pod 550HV1. Oproti tomu u prášku H13 dochází ve středových partiích ke kumulaci tepla a následnému popuštění, tvrdosti klesají až ke 350HV1. Také maximální dosažená tvrdost na konci navařování, kdy je teplo odvedeno sáláním do okolního prostředí, dosahuje tvrdost maximálně 500HV1.

Seznam použité literatury:

- [1] TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A., CORBIN, S. Laser cladding. CRC Press LLC: 2005. ISBN 0-8493-2172-7.
- [2] GNANAMUTHU D. S., "Laser surface treatment," Optical Engineering, vol. 19, no. 5, pp. 783—792, 1980.
- [3] HEMMATI, I. Laser-deposited metallic coatings. Ph.D. Thesis. Zernike Institute: 2013- 17. ISBN 978-90-77172-94-0.
- [4] Advances in Laser Materials Processing Technology, Research and Application Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies 2010, Pages 492-534
- [5] ZHU, LIDA, XUE, PENGSHENG , LAN, QING , MENG, GUIRU , REN, YUAN, YANG, ZHICHAO , XU, PEIHUA , LIU, ZHE. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. Optics & Laser Technology. 138. 106915. 10.1016/j.optlastec.2021.106915.
- [6] KLUFOVÁ, P., Degradace laserem navařených austenitických vrstev, Plzeň: Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní., 2018.
- [7] WEGŁOWSKI, MAREK, BŁACHA, SYLWESTER. (2017). Napawanie wiązką elektronów przy użyciu drutu. Przegląd Spawalnictwa - Welding Technology Review. 89. 10.26628/ps.v89i10.817.
- [8] ADAMIEC, J. DZIUBIŃSKI. Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
- [9] DWORAK J., BANASIK M., STANO S.. Napawanie laserowe – możliwości technologiczne procesu, Seminarium Instytutu Spawalnictwa pt. Nowoczesne technologie spajania – praktyczne zastosowania przemysłowe, Gliwice, 2013.
- [10] Hornetlasercladding, EHLA [online] [cit: 25.11] Dostupné z: <https://www.hornetlasercladding.com/ehla>
- [11] LI, ZHANG, BULTEL, SCHOPPHOVEN, GASSER, SCHLEIFENBAUM, POPRAWA., (2019). Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA) of AISI 4340 Steel. Coatings. 9. 778. 10.3390/coatings9120778.
- [12] ZHAO J., ZHANG B., LI A., et al.: Effects of metal-vapor jet force on the physical behavior of melting wire transfer in electron beam additive manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, vol. 220, pp. 243-250, 2015.
- [13] TROJAN, K.; OCELÍK, V.; ČAPEK, J.; ČECH, J.; CANELO-YUBERO, D.; GANEV, N.; KOLAŘÍK, K.; DE HOSSON, J.T.M. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured H13 Tool Steel. Metals 2022, 12, 243. <https://doi.org/10.3390/met12020243>
- [14] WANG PING , WANG, XIANG. (2020). Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni-300 steel obtained by powder bed based selective laser melting process. Rapid Prototyping Journal. ahead-of-print. 10.1108/RPJ-08-2018-0189.
- [15] MINLIN ZHONG, Laser surface cladding: the state of the art and challenges. Proc Inst Mech Eng Part C: J Mech Eng Sci May 2010 ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210) 224(5):1041-1060 DOI:10.1243/09544062JMES1782.

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

[16] SINDO KOU, Welding metallurgy –2nd ed. p. cm. “A Wiley-Interscience publication.” ISBN 0-471-43491-4 1.

[17] PASQUALE CAVALIERE, Laser Cladding of Metals 1st ed. 2021 Edition, Kindle Edition ISBN-13: 978-3030531942 ISBN-10: 3030531945.

[18] MAJUMDAR, J., MANNA, INDRANIL. (2003). Laser processing of materials. Sadhana. 28. 495-562. 10.1007/BF02706446.

[19] XU, GUOJIAN , KUTSUNA, MUNE HARU , LIU, ZHONGJIE , YAMADA, KATSUSIGE. (2006). Comparison between diode laser and TIG cladding of Co-based alloys on the SUS403 stainless steel. Surface & Coatings Technology - SURF COAT TECH. 201. 1138-1144. 10.1016/j.surfcoat.2006.01.040.

[20] TruDisk Technické údaje [cit. 15.4.2022]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/

[21] OCHODEK, Vladislav. Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I. VŠB TU Ostrava: Katedra mechanické technologie - ústav svařování [online]. 2011, 2011(1), 42 [cit.2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv tepl rezimu a1.pdf>

PŘÍLOHA č. 1**Tabulky:****Tab. 18: Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu ve vzorcích z Capilly66**

Vzdálenost, mm	CZ7	CK7	CZ8	CK8
0	216	217	212	248
0,5	239	237	272	505
1	452	441	485	599
1,5	519	519	566	511
2	501	539	579	581
2,5	429	543	519	592
3	588	621	596	512
3,5	517	520	522	479
4	549	544	504	568
4,5	575	596	544	534
5	539	579	520	466
5,5	502	575	476	490
6	488	487	483	536
6,5	519	518	477	570
7	538	517	546	556
7,5	517	502	554	577
8		501	500	502
8,5			515	558
9			522	526
9,5			511	534
10			498	528

Tab. 19: Seznam tvrdostí na vzdálenosti od substrátu ve vzorkách z H13

Vzdálenost, mm	HZ7	HK7	HZ8	HK8
0	234	220	214	216
0,5	463	255	225	242
1	448	458	414	492
1,5	466	442	488	515
2	401	493	469	470
2,5	486	429	470	539
3	387	384	467	477
3,5	372	382	427	431
4	379	422	403	406
4,5	397	379	419	402
5	378	361	404	415
5,5	346	373	439	493
6	349	474	446	462
6,5	377	461	408	393
7	477	373	396	396
7,5	424	358	386	386
8	361	368	390	411
8,5	353	475	447	479
9	403	496	505	483
9,5	514	532	456	404
10	536	542	388	405
10,5	539	531	399	387
11	536	531	433	429
11,5	545		486	502
12	536		506	534
12,5			552	541
13			561	546
13,5			549	551
14			551	549
14,5			551	546
15			549	
15,5			546	

Tab. 20: Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v tepelné ovlivněné zóně ve vzorkách

Vzdálenost, mm	CK8	HK8
0	222	210
0,1	220	216
0,2	230	213
0,3	245	228
0,4	262	233
0,5	277	256
0,6	471	259
0,7	509	304
0,8	508	496
0,9	472	480
1	495	474
1,1	544	501
1,2	547	528
1,3	551	526
1,4	544	517
1,5	625	497
1,6	638	501
1,7	599	543
1,8	599	525
1,9	523	517

Tab. 21: Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách CK8 TOZ a HK8 TOZ

Vzdálenost, mm	C8 T	H8 T
0	279	273
0,5	334	364
1	466	522
1,5	519	529
2	544	479
2,5	605	478
3	544	426
3,5	592	493
4	619	482
4,5	621	395
5	597	369
5,5	599	361
6	570	358
6,5	635	403
7	642	492
7,5	623	490
8	581	478
8,5	586	493
9	570	471
9,5	564	470
10	572	464
10,5	613	
11	592	
11,5	621	
12	627	
12,5	633	
13	609	
13,5	601	
14	594	
14,5	605	
15	599	
15,5	588	
16	566	

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

Tab. 22 Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách z Capilly66 tepelné zpracování

C7 550°C	C7 600°C	C8 550°C	C8 600°C	Vzdálenost, mm
207	211	200	201	0
208	207	208	201	0,5
216	213	210	206	1
309	230	225	214	1,5
475	463	468	277	2
512	524	496	551	2,5
566	571	619	559	3
492	485	499	639	3,5
607	586	561	478	4
505	526	609	571	4,5
573	573	559	590	5
586	577	452	508	5,5
590	561	539	526	6
575	559	580	635	6,5
523	551	493	559	7
509	559	499	479	7,5
529	561	556	466	8
515	539	564	556	8,5
526		575	566	9
		579	564	9,5
		561	588	10
		547	577	10,5
		526	552	11
		547	561	11,5
		541	561	12
			577	12,5

Katedra materiálu a výrobní technologie

Vladyslav Arseniuk

Tab. 23: Seznam tvrdosti na vzdálenosti od substrátu v příčném průřezu ve vzorkách z H13 tepelné zpracování

H7 550°C	H7 600°C	H8 550°C	H8 600°C	Vzdálenost, mm
202	201	201	206	0
202	200	210	191	0,5
206	211	217	212	1
208	218	467	216	1,5
266	254	526	249	2
509	481	521	509	2,5
546	516	458	523	3
501	449	534	546	3,5
469	512	452	491	4
413	399	424	546	4,5
386	390	394	448	5
401	369	393	440	5,5
412	467	437	440	6
392	419	511	413	6,5
362	360	441	422	7
371	380	397	505	7,5
477	429	381	462	8
437	466	383	397	8,5
353	371	433	399	9
350	366	512	401	9,5
384	361	444	419	10
496	500	387	488	10,5
553	571	403	491	11
549	566	425	422	11,5
534	583	471	375	12
537	565	556	384	12,5
557	559	544	523	13
		563	577	13,5
		580	568	14
		577	575	14,5
		573	584	15
		570	596	15,5
		512	590	16
			590	16,5
			588	17