

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výzkum vlivu technologických parametrů aditivních oprav a následného tepelného zpracování na výsledné mechanické vlastnosti, výslednou mikrostrukturu přechodové oblasti návaru

Autor: Bc. Jiří PROKOP

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Jeníček

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří PROKOP**
Osobní číslo: **S22N0069P**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Výzkum vlivu technologických parametrů aditivních oprav a následného tepelného zpracování na výsledné mechanické vlastnosti, výslednou mikrostrukturu přechodové oblasti návaru**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do řešené problematiky
2. Rešerše na téma aditivních oprav
 - 2.1. Výhody a nevýhody různých technologií, popis limitujících prvků
 - 2.2. Používané materiály forem
 - 2.3. Používané přídavné materiály
3. Rešerše na téma tepelné zpracování po opravě forem – problematika předehřevu
4. Návrh vlastního experimentálního programu
5. Diskuse výsledků
6. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

L. Jiayi, C. Weihua, H. Bin, W. Hui, and L. Xihao, "Research on Additive Manufacturing Technology in the Field of Mold Repair," Materials Science Forum, vol. 990, pp. 61–66, 2020, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.990.61.

Y. Zhang et al., "Novel hybrid laser forging and arc additive repairing process for improving component performances," Int J Heat Mass Transf, vol. 212, p. 124289, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2023.124289.

P. C. Priarone, G. Campatelli, A. R. Catalano, and F. Baffa, "Life-cycle energy and carbon saving potential of Wire Arc Additive Manufacturing for the repair of mold inserts," CIRP J Manuf Sci Technol, vol. 35, pp. 943–958, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2021.10.007.

S. Zhu, W. Du, X. Wang, G. Han, Z. Ren, and K. Zhou, "Advanced Additive Remanufacturing Technology," Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, vol. 2, no. 1, p. 100066, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.CJMEAM.2023.100066.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Štěpán Jeníček**
Regionální technologický institut

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

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.
vedoucí katedry

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

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Prokop	Jméno Jiří		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Jeníček	Jméno Štěpán		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Výzkum vlivu technologických parametrů aditivních oprav a následného tepelného zpracování na výsledné mechanické vlastnosti, výslednou mikrostrukturu přechodové oblasti návaru			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	85	TEXTOVÁ ČÁST	85	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Hlavním cílem této diplomové práce je pojednání o možnostech oprav forem a nástrojů, určených pro práci za tepla vyrobených z nástrojové oceli H13, formou navařování se zaměřením na různé aditivní technologie. Praktická část práce je zaměřena na navařování metodami WAAM a LMD přídavnými materiály Capilla 733, H13 a Capilla 66, tepelným zpracováním částí návarů a následným vyhodnocením kvality zhotovených návarů a vlivu tepelného zpracování formou destruktivního zkoušení s důrazem na odolnost proti opotřebení povrchu zhotovených návarů.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">oprava forem, navařování, aditivní technologie, tepelné zpracování</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Prokop	Name Jiří
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 Materials Engineering and Manufacturing Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Jeníček	Name Štěpán
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Research on the influence of technological parameters of additive repairs and subsequent heat treatment on the resulting mechanical properties, the resulting microstructure of the transition zone of the weld	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	85	TEXT PART	85	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The main objective of this thesis is to discuss the possibilities of repairing moulds and tools intended for usage in high temperature made of H13 tool steel by welding with a focus on various additive technologies. The practical part of the thesis is focused on welding by WAAM and LMD methods with additive materials Capilla 733, H13 and Capilla 66, heat treatment of parts of the patterns and subsequent evaluation of the quality of the fabricated patterns and the effect of heat treatment by destructive testing with emphasis on the resistance to wear of the surface of the fabricated patterns.
KEY WORDS	mould repair, welding, additive technology, heat treatment

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Štěpánu Jeníčkovi, za věcné rady při vypracovávání práce, konzultantu práce doc. Ing. Stanislavu Němečkovi, Ph.D. za pomoc s návrhem experimentální části a její realizací. Dále bych rád poděkoval kolegům z Katedry materiálů a strojírenské metalurgie a kolegům z Regionálního technologického institutu za pomoc s vypracováním praktické části diplomové práce. A také bych rád poděkoval projektu SGS-2022-012 za poskytnutí finančních prostředků na náklady spojené s realizací práce.

Obsah

Zadání DP.....	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
Seznam grafů.....	14
1 Úvod.....	15
1.1 Cíle diplomové práce	15
2 Opravy forem	16
2.1.1 Oprava forem metodou WAAM	18
2.1.2 Oprava forem metodou LMD.....	20
2.1.3 Oprava forem metodou TIG.....	22
2.1.4 Oprava forem metodami mikro-plazma a mikro-TIG.....	22
2.1.5 Oprava forem elektronovým paprskem.....	22
2.2 Používané materiály pro výrobu forem.....	22
2.2.1 Materiály forem pro práci za tepla	23
2.2.2 Materiály forem pro práci za studena.....	23
2.3 Používané přídavné materiály pro opravy forem	23
2.3.1 Nástrojová ocel AISI H13	23
2.3.2 Nástrojová ocel Capilla 66	24
2.3.3 Nástrojová ocel Capilla 733	24
3 Tepelné zpracování forem.....	25
3.1 Tepelné zpracování nástrojové oceli H13	25
3.2 Tepelné zpracování laserem	25
3.3 Chemicko-tepelné zpracování forem	25
3.3.1 Cementování.....	26
3.3.2 Nitridování	26
3.3.3 Sulfonitridování.....	26
4 Experimentální program.....	27
4.1 Navařování nástrojové oceli.....	27
4.2 Tepelné zpracování	31
4.3 Metalografická zkouška	33
4.4 Zkouška tvrdosti.....	47
4.5 Tribologická zkouška	60
4.5.1 Měření hmotnostního úbytku	60

4.5.2	Metoda objemu drážky	61
4.5.3	Koeficient tření.....	65
5	Diskuse výsledků.....	67
6	Závěr.....	72
	Seznam použitých zdrojů	73
	Přílohy	76

Přehled použitých zkratk a symbolů

AISI	Americký institut železa a oceli
AM	Aditivní výroba
ASTM	Americká norma pro testování a materiály
CNC	Počítačové číslicové řízení
CW	Studený drát
ČSN	Česká technická norma
DED	Přímá depozice energie
DIN	Německé normy
EN	Evropská norma
HRC	tvrdost podle Rockwella
HV	tvrdost podle Vickerse
HW	Horký drát
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
JIS	Japonská průmyslová norma
LMD	Laserové nanášení kovů
MAG	Metoda svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG	Metoda svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
ND-YAG	Laserové svařování pomocí moderních laserů
PA	Plazmový oblouk
P	Prášek
PO	Přechodová oblast
SEBM	Selektivního tavení elektronovým svazkem
SLM	Selektivní laserové tavení
TIG (WIG, GTAW)	Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
TZ	Tepelné zpracování
W.Nr.	Německé materiálové komerční označení
WAAM	Aditivní výroba pomocí tavení drátu elektrickým obloukem
ZM	Základní materiál
μ	Mikro

Seznam obrázků

Obr. 1: Povrch poškozené formy [1]	16
Obr. 2: Postup oprav forem [1]	17
Obr. 3: Schématické znázornění navařování metodou WAAM technologií MIG [15]	19
Obr. 4: Schématické znázornění navařování metodou WAAM technologií TIG [16]	20
Obr. 5: Schématické znázornění navařování metodou [21]	21
Obr. 6: Proces tepelného zpracování nástrojových ocelí [33].....	25
Obr. 7: Realizace navařování metodou WAAM, a) svařovací zdroj, b) Cobra, c) a d) proces navařování vzorků	28
Obr. 8: Realizace navařování metodou P-LMD, a) svařovací robot Fanuc, b) navařovací hlava, c) diskový laser Trumpf TruDisk 4006	30
Obr. 9: Zhotovené návary a jejich dělení	31
Obr. 10: a) zvolená pec pro tepelné zpracování, b) návary vyndané z pece během kalení na vzduchu	33
Obr. 11: a) metalografická pila Struers Secotom-50, b) lis pro přípravu vzorků Struers CitoPress-10, c) brusný a leštící stroj Struers Tegramin-30, d) zhotovené vzorky v naleptaném stavu	34
Obr. 12: Světelný mikroskop Olympus OLS50-HSU	36
Obr. 13: Snímky světelného mikroskopu základního materiálu H13P	37
Obr. 14: Snímky světelného mikroskopu základního materiálu H13P	38
Obr. 15: Snímky světelného mikroskopu návaru W1P	39
Obr. 16: Snímky světelného mikroskopu návaru W1T	40
Obr. 17: Snímky světelného mikroskopu návaru W2P	41
Obr. 18: Snímky světelného mikroskopu návaru W2T	42
Obr. 19: Snímky světelného mikroskopu návaru LH13P	43
Obr. 20: Snímky světelného mikroskopu návaru LH13T	44
Obr. 21: Snímky světelného mikroskopu návaru LC66P	45
Obr. 22: Snímky světelného mikroskopu návaru LC66T	46
Obr. 23: Tvrdoměr UHL VMHT	47
Obr. 24: Tribometr Anton Peer TRB ³	60
Obr. 25: a) váha, b) Tribometr, c) mikroskop, d) vzorky po zkoušce	63
Obr. 26: Skládané obrazy drážky	64
Obr. 27: Průběh tepelného zpracování	76
Obr. 28: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W1P	77
Obr. 29: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W1T	78

Obr. 30: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W2P.....	79
Obr. 31: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W2T	80
Obr. 32: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LH13P	81
Obr. 33: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LH13T	82
Obr. 34: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LC66P	83
Obr. 35: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LC66T	84
Obr. 36: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky základního materiálu H13T	85

Seznam tabulek

Tbl. 1: Chemické složení oceli AISI H13 podle normy ASTM A681 [20]	23
Tbl. 2: Mechanické vlastnosti oceli H13 [27]	23
Tbl. 3: Chemické složení oceli Capilla 66 [29].....	24
Tbl. 4: Mechanické vlastnosti oceli Capilla 66 [29]	24
Tbl. 5: Chemické složení oceli Capilla 733 [29].....	24
Tbl. 6: Mechanické vlastnosti oceli Capilla 733 [29]	24
Tbl. 7: Navařovací parametry.....	29
Tbl. 8: Parametry navařování metodou LMD	30
Tbl. 9: Rozdělení tepelného zpracování	32
Tbl. 10: Doba leptání návarů.....	35
Tbl. 11: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W1P	48
Tbl. 12: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W1T.....	49
Tbl. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W2P	50
Tbl. 14: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W2T.....	51
Tbl. 15: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LH13P	52
Tbl. 16: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LH13T	53
Tbl. 17: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LC66P.....	54
Tbl. 18: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LC66T	55
Tbl. 19: Naměřené hodnoty hmotnostního úbytku.....	61
Tbl. 20: Naměřené hodnoty šířky drážky	62
Tbl. 21: Vypočítané hodnoty objemu a míry opotřebení	65
Tbl. 22: Průměrné hodnoty koeficientu tření	66

Seznam grafů

Graf 1: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W1P	56
Graf 2: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W1T	56
Graf 3: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W2P	57
Graf 4: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W2T	57
Graf 5: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LH13P	58
Graf 6: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LH13T	58
Graf 7: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LC66P	59
Graf 8: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LC66T	59
Graf 9: Míra opotřebení vyhodnocená hmotnostním úbytkem	61
Graf 10: Záznam vypočítaných hodnot míry opotřebení	65
Graf 11: Porovnání tvrdostí vzorků měřených od povrchu do základního materiálu	69
Graf 12: Porovnání tvrdostí vzorků měřených napříč návarem	69

1 Úvod

Použití vhodné technologie pro opravu forem má velký vliv na výsledné vlastnosti opravovaných forem. Cílem oprav forem je prodloužit životnost těchto namáhaných dílů, obnovení původních geometrií a mechanických vlastností opotřebovaného povrchu. Opravami forem také snížíme celkové náklady na výrobního procesu. V případě použití novodobých technologií 3D tisku ocelí jsme vytvořili návar s minimálním vneseným teplem do základního materiálu.

V případě nesprávného postupu při opravě razantně snížíme životnost opravené formy, nebo může dojít k úplnému zničení formy. Mechanické vlastnosti mohou být nehomogenní, což může ovlivnit výsledný tvar výrobku z důvodů rozdílné zabíhavosti materiálu. Nesprávná volba přídatného materiálu může naprosto změnit vlastnosti a funkci opravené formy, zejména však může mít vliv na výslednou tvrdost, otěruvzdornost povrchu i odolnost pro práci za tepla opravené formy. V případě nedostatečného promíšení, vedoucímu k nedostatečnému navaření formy, může dojít k odtržení návaru v přechodové oblasti.

Práce se zabývá optimalizací procesu navařování metodami LMD a WAAM nástrojových ocelí vhodných pro práci za tepla, tepelným zpracováním opravované formy, hodnocením kvality vytvořených návarů s ohledem na mechanické opotřebení a tvrdost a dále metalografickým vyhodnocením návarů.

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je určit vhodnou technologii oprav forem a nástrojů pro práci za tepla. Při opravách forem dochází k tepelnému ovlivnění zbytku formy, což vede k degradaci materiálu. Nicméně pro funkci formy je důležitá hloubka promíšení základního materiálu s materiálem přídatným. Tyto hlavní dva aspekty se projevují na výsledné kvalitě a životnosti opravované formy. Volbou dvou různých technologií pro opravu forem bude možné tato dvě kritéria vzájemně porovnat, analyzovat vytvořené vzorky a vyhodnotit kritické mechanické vlastnosti opravovaných forem.

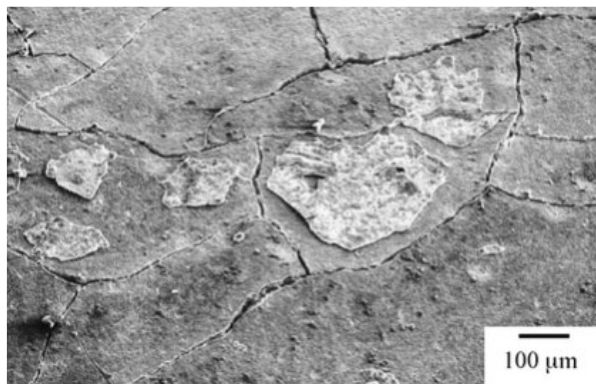
V rámci experimentálního programu byly definovány následující cíle diplomové práce:

- Vytvoření funkčního pracoviště navařování technologií WAAM a následné stanovení limitů zavedené technologie v rámci zhodnocení využitelnosti v rámci výzkumných cílů katedry KMM.
- Vytvoření parametrického programu pro technologii navařování metodou WAAM pro zvýšení efektivity pracoviště bez nutnosti generování CNC kódu pro proces navařování.
- Navaření experimentálních vzorků metodami LMD a WAAM na novém pracovišti.
- Vyhodnocení vytvořených návarů s důrazem na odolnost proti opotřebení.

Pro experimentální program je zvolena nástrojová ocel vhodná pro práci za tepla AISI H13 a nástrojové oceli Capilla 66 a Capilla 733, které jsou také vhodné pro práci za tepla. Úkolem je vytvořit 4 různé návary metodami LMD a WAAM při použití přídatného materiálu v různých formách. Následně bude provedeno tepelné zpracování navařených vzorků, porovnání navařených vzorků před a po tepelném zpracování a následné vyhodnocení dosažených výsledků s ohledem na kvalitu povrchu formy a mechanické vlastnosti návaru a oblasti promíšení. K porovnání rozdílů bude použita také světelná mikroskopie v místě promíšení základního a přídatného materiálu v oblasti základního materiálu H13 a v oblasti návaru.

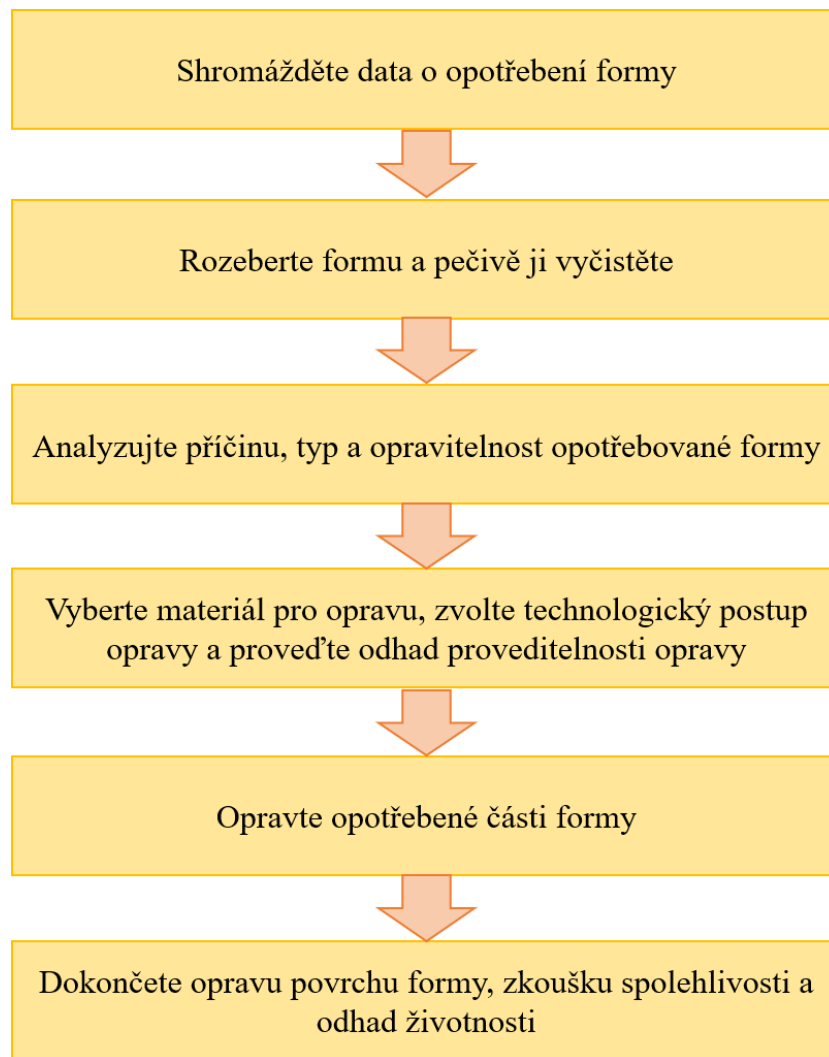
2 Opravy forem

Kvůli svým jedinečným vlastnostem v oblasti velkoobjemové výroby a velké konzistenci výrobků standardizované výroby jsou formy široce používané mechanické díly. Formy hrají důležitou roli v automobilovém, strojním, leteckém, ropném, elektronickém a stavebním průmyslu. V průmyslové výrobě je forma vystavena nepřetržitému lisování, střídavému zatížení, změnám teplotního pole, které vedou k lomům, poruchám, opotřebením, únavovým poruchám, deformačním poruchám a poruchám způsobeným korozi. Na povrchu formy se objevují trhliny a materiál se začne odlupovat, což způsobuje selhání formy. Tyto vady jsou zobrazeny na Obr. 1. Vezmeme-li jako příklad zápustku pro kování za tepla, životnost zápustek pro kování za tepla je přibližně 3000-5000 cyklů. Proto je technologie oprav forem důležitou součástí pro prodloužení jejich životnosti. Zavedením oprav forem do výrobního procesu lze ušetřit 50 % výrobních nákladů, ušetřit energii a materiál o 60 % a snížit emise látek znečišťujících ovzduší o více než 70 %. V posledních letech se velkým rozvojem aditivní výroby tento inovativní proces rozšířil i do oblasti oprav forem. [1,2]



Obr. 1: Povrch poškozené formy [1]

Oprava formy probíhá v několika krocích. Nejprve se zvolí vhodný přídavný materiál stejných vlastností a vhodná technologie opravy. Následně se povrch formy obrobí, a provede se návar s přídavkem 3-5 mm pro následné obrobení. Cílem je opravit původní rozměry a vlastnosti formy. [1] Průběh oprav forem je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2: Postup oprav forem [1]

Při tradičním manuálním svařování a navařování závisí kvalita svarů a návarů na zkušenostech svářečů při sledování svarové lázně, jelikož se spoléhají především na vizuální informace a osobní zkušenosti. Aby bylo možné při automatizaci procesu simulovat svářečovo hodnocení kvality svarové lázně jejím pozorováním, používají se obrazové snímače k pořizování snímků svarové lázně. [3-5]

Kvalita opravného svaru nesouvisí pouze s velikostí svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti, ale je dána také požadovanými funkčními vlastnostmi v závislosti na provozních tlacích v dutině formy. Ocelové formy jsou nezbytnou součástí automobilového, leteckého a kosmického průmyslu. Základní mechanismy poruch a poškození kovu odlévacích forem jsou povrchové trhliny a eroze oceli v důsledku únavy při vysokých teplotách. Mechanická únava vstřikovacích forem je způsobena problémy s přetížením v důsledku vysokých tlakových cyklů při nízkých provozních teplotách. Na stranách povrchu zápustky je materiál namáhán chemicky, kvůli agresivním látkám v případě použití plastových materiálů. Také chyby obrábění a rozměrové chyby vstřikovaného dílu vedou k poruchám a tato situace vyžaduje opravu svařováním. Údržba, opravy a generální opravy technologie byly použity ke snížení celkových nákladů na výrobek. Obsah vysokých obsahů uhlíku a legujících prvků v materiálu forem způsobil nízkou svařitelnost v důsledku metalurgických problémů. Důležitou vlastností pro opravy ocelových forem je také dobrá svařitelnost v obou stavech před a po opravě. [6,7]

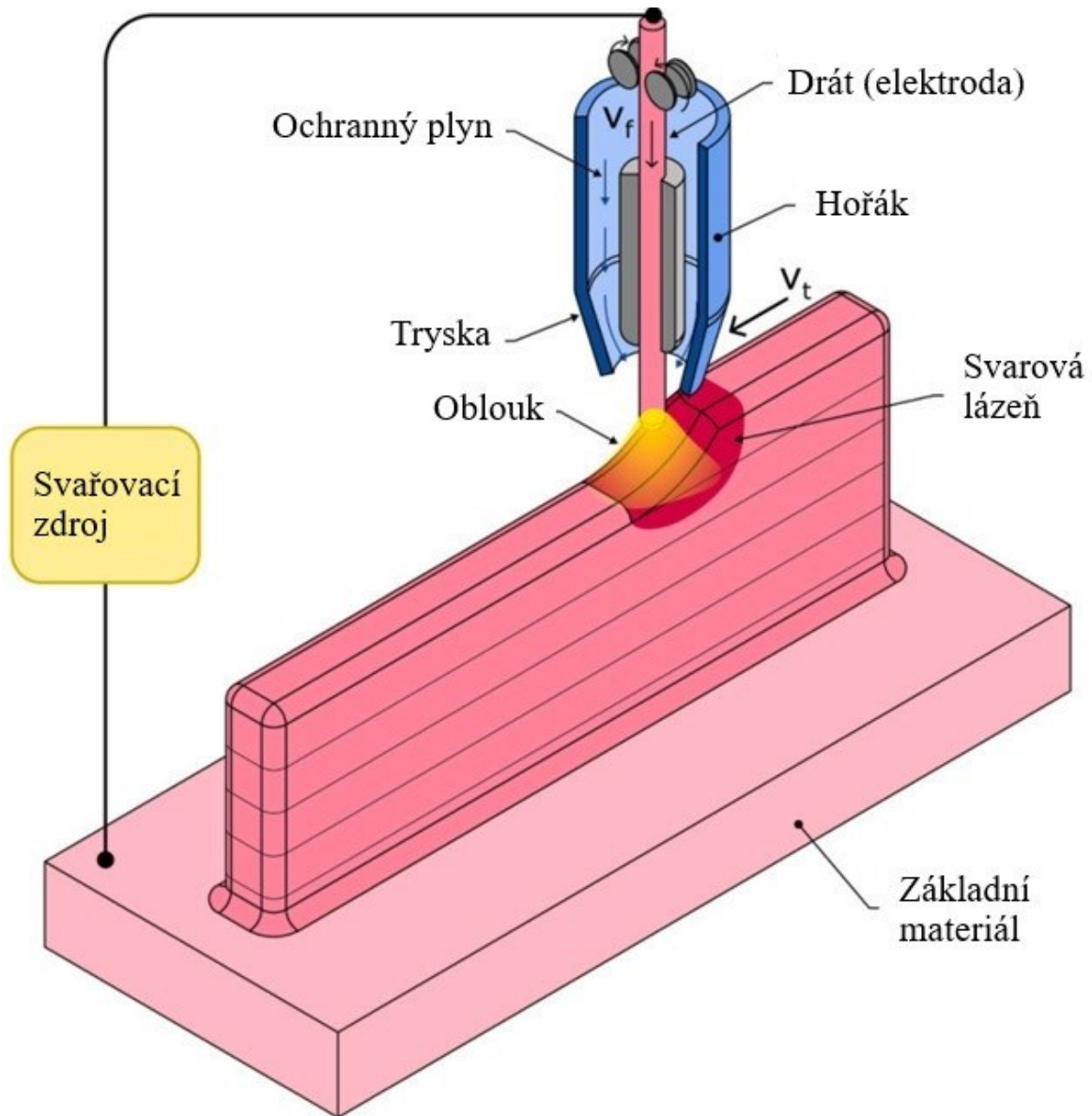
Pro obnovu tvaru povrchu se v současné době odstraňuje přebytečný materiál z předchozího procesu depozičního navařování ručním broušením, frézováním nebo erodováním. U jednoduchých povrchů se dráhy nástrojů programují přímo na CNC stroji. [8]

2.1.1 Oprava forem metodou WAAM

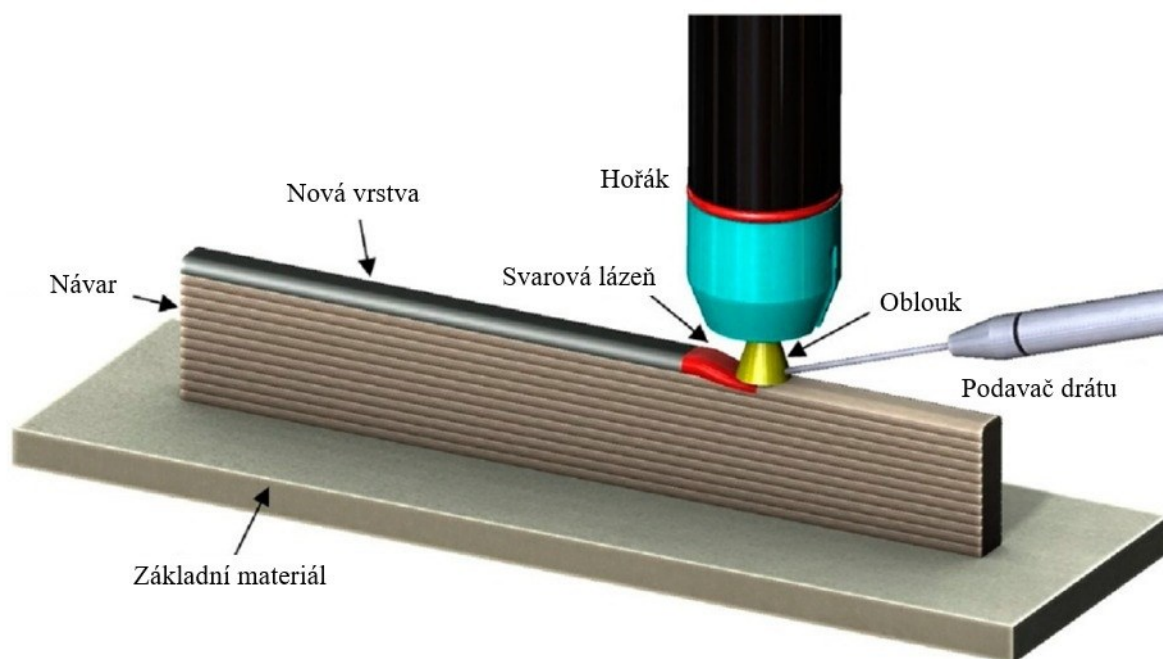
Aditivní výroba a udržitelný rozvoj jsou v této souvislosti označovány Additive Manufacturing ve zkratce AM jako jedním z procesů, které umožňují společně znovu promyslet způsob výroby a opravy dílů. Aditivní výrobní technologie používají práškové materiály, dráty nebo vlákna, která se nanášejí vrstvu po vrstvě podle modelu tištěného dílu. K procesu lze použít různé zdroje tepla, například laser, elektronový paprsek, elektrický nebo plazmový oblouk. [10-13]

Jednou z nově vznikajících technologií používaných k automatizaci a zvýšení produktivity opravárenských operací je aditivní výroba tavící se elektrodou označovaná jako Wire-arc Additive Manufacturing WAAM, což je 3D svařovací proces, při kterém se geometrický prvek vytváří pomocí postupu po vrstvách nebo se povrch plátuje vytvořením souvislé vrstvy na volném povrchu. Mezi hlavní výhody WAAM patří například možnost vytvářet velké díly, až několik metrů, při velmi vysoké rychlosti nanášení, která by mohla dosáhnout vyšší hodnoty než 10 kg za hodinu, a to při použití takových materiálů, jako je ocel, hliník, titan a další. Hlavní nevýhodou WAAM je, že se vytvořené povrchy vyznačují vysokým stupněm zvlnění, většími přírůstky na obrobení a po depozičním kroku je nutné provést obráběcí operace, aby bylo dosaženo požadované kvality povrchu. To nepředstavuje problém pro opravárenské operace, protože obrábění je však vždy nutné k obnovení opotřebovaných funkčních povrchů. WAAM také umožňuje snadnou integraci takové technologie se stávajícími procesy a stroji, čímž vzniká hybridní aditivně-subtraktivní proces, který by mohl výrazně zvýšit produktivitu opravárenského procesu díky zkrácení doby výměny a umožnění racionálního přístupu k opravám složitých dílů. [10]

WAAM je typ přímého nanášení energie v překladu direct energy deposition DED, při kterém se kovový drát přivádí do elektrického oblouku a následně se selektivně nanáší. Skládání jednotlivých housenek se používá, aby ve výsledku vytvořily vyráběný díl. K vytvoření elektrického oblouku lze použít technologii MIG Metal Inert Gas, TIG Tungsten Inert Gas nebo PA Plasma Arc a pohyb 3D tisku lze řídit buďto robotickým systémem, nebo počítačově řízenými CNC portály. CNC portály jsou tužší a přesnější než robotické systémy, ale robotické systémy lze používat paralelně, aby se dosáhlo větší rychlosti nanášení a zároveň jsou manévrovatelné, takže jsou vhodné pro velmi rozsáhlé díly. Velikost dílu vyráběného robotickými systémy není prakticky nijak omezena, takže je možné vyrábět velké konstrukční prvky, což z WAAM činí vhodný výrobní proces nejen pro strojírenství, ale také pro stavebnictví. [14]



Obr. 3: Schématické znázornění navařování metodou WAAM technologií MIG [15]



Obr. 4: Schématické znázornění navařování metodou WAAM technologií TIG [16]

Pro WAAM se používají tři hlavní typy elektrického oblouku: MIG, TIG a PA. Obvykle se volí proces MIG, protože drát je přídatnou elektrodou, což znamená, že je souosý se svařovacím hořákem, což vede k jednodušší dráze nástroje viz Obr. 3. V případě svařování TIG nebo PA není elektroda utavována a do tavné lázně je třeba přivést externí drát viz Obr. 4. Zde musí být hořák schopen otáčení, aby bylo možné drát přivádět vždy ze stejného směru a zajistit tak konzistentní nanášení, což komplikuje programovací aspekt výroby. Při MIG hoří oblouk mezi přídatným materiálem v podobě drátu a je neustále utavován a tvoří tak svarovou lázeň. To má za následek rozstříkování, protože některé kapičky roztavené hmoty jsou z oblouku nebo svařovací lázně vyvrženy, což často tvoří na povrchu dílu kuličky. U TIG a PA je přídatný kov dodáván přímo do svarové lázně, proto tyto procesy nejsou náchylné k rozstříku kovu. [14]

Cold Metal Transfer CMT neboli přenos kovu za studena je modifikovaná varianta u procesu svařování MIG vhodná pro použití s hliníkovými a ocelovými slitinami. Díky tomu, že využívá mechanismus řízeného přenosu, lze při něm vytvářet vysoce kvalitní kuličky téměř bez rozstříku a s nižším příkonem tepla. Nižší tepelný příkon má za následek jemnější zrna, což vede ke zlepšení mechanických vlastností. Od konvenčního MIG se liší tím, že elektrické řízení procesu, které snímá délku oblouku, fázi zkratu a tepelný příkon, je synchronizováno se samotným pohybem drátu. [14]

2.1.2 Oprava forem metodou LMD

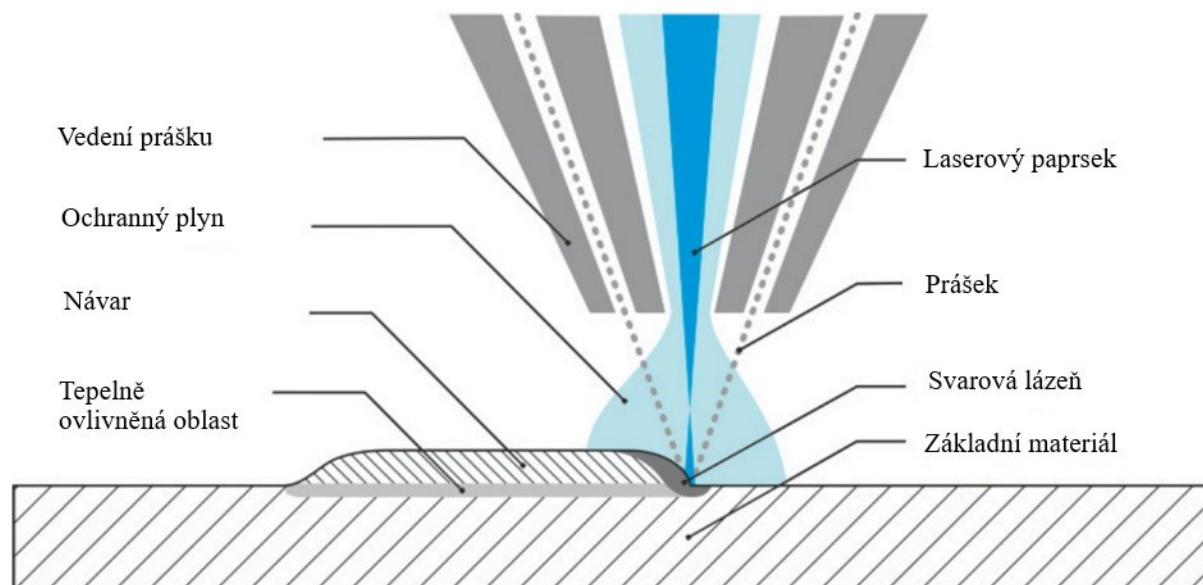
Lasery jako tepelné zdroje se používají při opravách forem. Hlavním důvodem použití tohoto tepelného zdroje jsou příznivé vlastnosti. Laser přesně dodává požadované množství energie do materiálu za požadovaný časový úsek pro laserové svařování a navařování. Pulzní laserové svařování vede k minimálnímu zahřívání oblasti svaru. Tato výhoda zvyšuje energetickou účinnost při svařování. [6]

Laserové svařování má některé výhody, jako například čistota procesu, lokalizované svařování, tepelný příkon. Snižuje počet lidských chyb s přizpůsobením robotických zařízení.

Požadované svařence lze přizpůsobit procesem v čase v řádu několika milisekund. Tato technologie má tedy tendenci nahrazovat konvenční svařování metody. [17-19]

Laserové svařování pomocí moderních laserů ND-YAG je nový, velmi flexibilní proces opravy, který má tyto vlastnosti oproti tradičním metodám mikroplazma a TIG výhodu v tom, že dosahuje menších změn ve složení kovu v okolí opravované oblasti. Kromě toho umožňuje velmi přesné nanášení malého množství materiálu ve zvolené oblasti na povrchu obrobku, aniž by došlo k deformaci, a to i v případě, že se jedná o malé tloušťky 0,2 mm. [7]

Pro aditivní výrobu kovů se používají především prášky, které jsou následně roztaveny laserovým zářením a prostřednictvím vrstvené struktury vytvářejí díly. Existují dva přístupy; první využívá tzv. práškové lože, kdy se materiál nanáší na povrch a laserový paprsek následně přetavuje pouze daný tvar pro každou vrstvu. Tato metoda, známá jako selektivní laserové tavení, v překladu selective laser melting SLM, dosahuje vyšší přesnosti, ale proces je velmi pomalý. Druhý přístup využívá podavač prášku, který je nasměrován do laserového paprsku. Roztavený kov pak tuhne a vytváří novou vrstvu. Tato metoda, označovaná jako laserové plátování nebo někdy laserové nanášení kovů, v překladu laser metal deposition LMD, je méně přesná než metoda SLM, ale rychlost tisku je několikanásobně vyšší než u SLM. Proces tisku metodou LMD je také znázorněn na Obr. 5. [20]



Obr. 5: Schématické znázornění navařování metodou [21]

Obvykle lze LMD rozdělit do tří typů na základě způsobu druhu a způsobu dodávání přídavného materiálu. První variantou LMD je laserové nanášení kovů na bázi prášku, v překladu powder-based laser metal deposition P-LMD a laserové nanášení kovů na bázi studeného drátu, v překladu cold-wire-based laser metal deposition CW-LMD. Poslední variantou je technologie Hot-wire-based Laser Metal Deposition HW-LMD, která kombinuje laserovou energii s odporovým ohřevem. [22]

Další snahou je používat zápustky s chlazením, kde mohou být chladicí kanály blíže k povrchu, a tím urychlit chlazení. Složité chladicí kanály nelze vytvořit běžnými metodami obrábění, například vrtáním. 3D tisk laserem umožňuje výrobu a opravy bez dalších tepelných úprav. Při nanášení více vrstev však dochází k tepelnému ovlivnění předchozích vrstev, což může výrazně změnit jejich mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu

ovlivňuje výslednou mikrostrukturu nejen rychlost ochlazování, ale také teplota dosažená při nanášení dalších vrstev. [20]

2.1.3 Oprava forem metodou TIG

Jedná se o zkratku anglického překladu Tungsten Inert Gas TIG. Jde o metodu obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu. Tato technologie se označuje také zkratkou WIG neboli Wolfram Inert Gas, zatímco v Americe se používá označení GTAW neboli Gas Tungste Arc Welding. Tato metoda svařování lze uplatnit nejlépe pro svařování železných i neželezných kovů a vysokolegovaných ocelí. Také se tato svařovací metoda používá pro svařování nejnáročnějších svarových spojů v jaderné energetice, leteckém i kosmickém odvětví průmyslu. [23,24]

Metoda svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu je aktuálně nejpoužívanější technologií pro opravy forem. Z pravidla se tato ruční svařovací technologie používá kvůli vynikající kontrole nad svarovou lázní, a tedy lze zhotovit velice kvalitní návary. Kontrolu nad svarovou lázní má svařovací personál hlavně kvůli volnému podávání přídavného materiálu do svarové lázně, což jiné metody svařování elektrickým obloukem neumožňují. Produktivita svařovací metody TIG je však velmi malá a také je teplotní pole velmi úzké, proto je teplotní ovlivnění základního materiálu malé. [10,17,18]

Proces TIG může zajistit usazování malého množství materiálu v opravované zóně bez rozstřiku. Vyžaduje však speciální svařovací postupy a přesné tolerance, které zvyšují náklady na renovaci. TIG je používán již několik desetiletí díky své provozní jednoduchosti, přesnosti, vysoké odolnosti oblouku a stability. Přestože tato metoda byla vybavena spolehlivějším konstantním proudem napájení pro mikro-aplikace, její kvalita je stále závislá na elektrických charakteristikách oblouku a pohybech rukou svářeče. [6]

2.1.4 Oprava forem metodami mikro-plazma a mikro-TIG

V obou těchto případech se jedná o pokročilé metody konvekčního svařování. Tyto metody jsou schopny používat menší elektrický oblouk, který je přesně řízený pomocí digitálního napájení. Jejich zdroje jsou zpravidla invertory a řídí svařovací proud s přesností až 0,1 [A] a mohou svařovat plochy nebo tyče s rozsahem průměrů od několika mikronů. Výsledky takto přesného svařování jsou srovnatelné s výsledky svařování s procesy založenými na laseru. [19]

2.1.5 Oprava forem elektronovým paprskem

Selective Electron Beam Melting Technology SEBM neboli Technologie selektivního tavení elektronovým svazkem je výrobní technologie založená na elektronovém svazku jako zdroji tepla. Průběžně nanášený prášek je spékán dle předem nastavené trajektorie elektronového svazku a ve vrstvách vytváří návar. Jeho hlavní výhodou je zmenšení tepelně ovlivněné oblasti svaru pomocí vysokoenergetického procesu s nízkým zahříváním. Elektronový svazek může generovat vysokou špičkovou proudovou hustotu 10⁴ A/cm² s nízkou energií 10-35 keV a krátkým pulzem 1 μs. Avšak vliv parametrů procesu SEBM na kvalitu povrchové vrstvy nebyl dosud kvantitativně zkoumán. [1]

2.2 Používané materiály pro výrobu forem

Pro výrobu forem se používají různé materiály. Volba materiálu závisí na požadovaných vlastnostech a pracovních teplotách formy. [25]

2.2.1 Materiály forem pro práci za tepla

Mezi nejpoužívanější zástupce ocelí forem pro práci za tepla patří W. Nr. 1.2311, 1.2312, 1.2316, 1.2343, 1.2343 ESU, 1.2344, 1.2344 ESU, 1.2738, 1.2738 HH, TQ1 a XPM ESU. [25]

2.2.2 Materiály forem pro práci za studena

Zástupci ocelí pro výrobu forem pro práci za studena jsou W. Nr. 1.2083 ESU, 1.2085, 1.2358, SUPERPLAST 300, SUPERPLAST 350, TOOLOX 33 a TOOLOX 44. [25]

2.3 Používané přídavné materiály pro opravy forem

2.3.1 Nástrojová ocel AISI H13

Nástrojová ocel AISI H13 pro práci za tepla je jedním z nejběžnějších materiálů forem používaných v licím průmyslu. Matrice během své životnosti trpí poškozením v důsledku opotřebení. Proto byly vyvinuty různé metody opravy oceli H13, aby se ušetřily náklady na výrobu nové formy. [20]

Vzhledem k vysoké pevnosti, dobré odolnosti proti tepelnému zatížení a vysoké houževnatosti nástrojové oceli H13 oproti jiným typům nástrojových ocelí, se tato ocel dostala do popředí v oblasti výroby forem. Dalšími výhodami oceli H13 jsou například dobrá obrobitelnost i kalitelnost, kterou takto nástrojová ocel nabízí. [26]

Ocel AISI H13 je nástrojová legovaná ocel, označovaná také jako DIN ISO 1.2344 nebo X40CrMoV5-1, nebo také JIS SKD61. Chemické složení oceli H13 je uvedeno v Tbl. 1 a mechanické vlastnosti jsou zapsány do

Tbl. 2 [27,28]

Tbl. 1: Chemické složení oceli AISI H13 podle normy ASTM A681 [20]

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

Tbl. 2: Mechanické vlastnosti oceli H13 [27]

Mez pevnosti	1670 MPa
Mez kluzu	1470 MPa
Prodloužení	10 %
Zúžení	40 %
Rázová pevnost	390 kJ/m ²
Tvrдость	52 až 55 HRC
Tepelná odolnost	630 °C

2.3.2 Nástrojová ocel Capilla 66

Přídavný materiál Capilla 66 je vhodný pro svařování a navařování žáruvzdorných tvářecích dílů. Svařená nebo navařená vrstva je velice odolná proti otěru a tlaku. Capilla 66 se používá pro opravy a výrobu zápustek a střížných nástrojů. Chemické složení oceli Capilla 66 je uvedeno v Tbl. 3 a tvrdost je uvedena v Tbl. 4. [29]

Tbl. 3: Chemické složení oceli Capilla 66 [29]

Prvek	C	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe
Hmotnostní podíl v %	0,40 max	6,00 až 8,00	0,40 až 0,70	1,00 až D1,50	6,00 až 8,00	0,50 až 0,80	Vyvážený

Tbl. 4: Mechanické vlastnosti oceli Capilla 66 [29]

Stav	Tvrdost v HRC
Po svaření	50 až 55
Žíhání po svaření na teplotě 550 °C po dobu 2 až 8 hodin	53 až 56

2.3.3 Nástrojová ocel Capilla 733

Přídavný materiál Capilla 733 je vhodný pro svařování a navařování žáruvzdorných nástrojových ocelí a překryvů pro které je také nutná žáruvzdornost. Dobrá kombinace vlastností tohoto materiálu jako je houževnatost i tvrdost vykazuje svarový kov dobrou odolnost proti tlaku, oděru i vzniku a šíření trhlin. [29]

Tento přídavný materiál je určen pro překrytí řezných hran střížných nástrojů pro práci za tepla, hlav kleští, řezných hran nástrojů pro odstraňování otřepů, děrovacích nástrojů a kontinuálních litých válců. Tvrdý návar válců pro vyrovnávání plechů. Dále je materiál vhodný pro opravné svařování a výrobu nových nástrojů pro práci za tepla. Maximální provozní teplota je 550°C. Pro zlepšení houževnatosti svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu se doporučuje tepelné zpracování po svařování. Chemické složení je uvedeno v Tbl. 5 a tvrdost je uvedena v Tbl. 6. [29]

Tbl. 5: Chemické složení oceli Capilla 733 [29]

Prvek	C	Cr	Mn	Mo	Ti	Si	Fe
Hmotnostní podíl v %	0,25 max	4,00 až 6,00	0,70 max	3,00 až 4,00	+	1,00 max	Vyvážený

Tbl. 6: Mechanické vlastnosti oceli Capilla 733 [29]

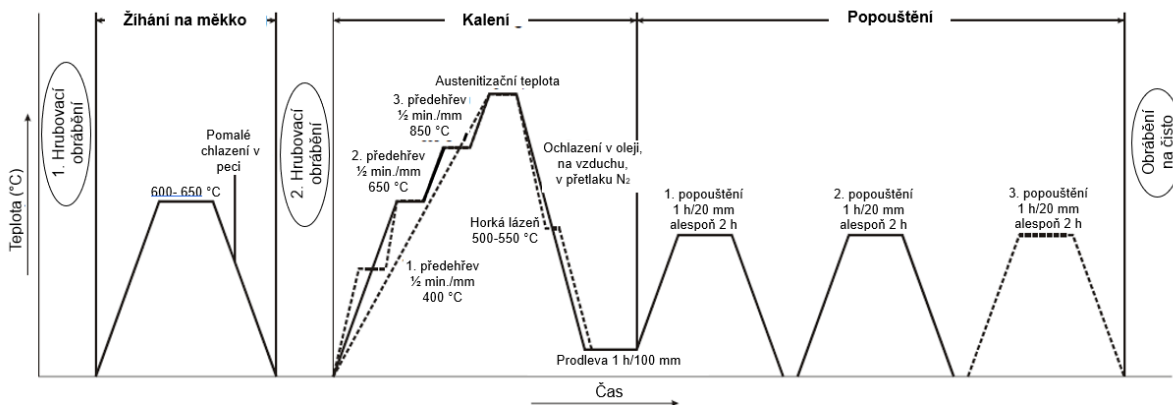
Stav	Tvrdost v HRC
Po svaření	45 až 50
Po tepelném zpracování	Není uvedeno

3 Tepelné zpracování forem

Tepelné zpracování nástrojových ocelí určených pro práci za tepla je jednou z nejnáročnějších částí výroby. Zahnuje sofistikované postupy, které je nutno neustále zdokonalovat. Cíle tepelného zpracování jsou zásadní pro zajištění delší životnosti nástrojů. Jsou vytvořeny obecné zásady, jejichž dodržováním a standardizováním je docíleno zvyšování životnosti nástrojů. [30]

3.1 Tepelné zpracování nástrojové oceli H13

Vlastnosti nástrojových ocelí jsou ve velké míře dány tepelným zpracováním. Pro zajištění požadovaných vlastností se TZ provádí ve třech fázích. Předehřevem oceli nad teplotu A_{c1} dojde k tvorbě austenitu. Ohřevem pod A_{c1} nedocílíme toho, aby došlo k přeměně přechodové struktury na ferit a cementit. Předehřev zajistí, aby nedošlo v průběhu kalení ke tvorbě tepelných trhlin. Při kalení nejprve dojde k ohřevu na austenitizační teplotu, aby došlo k rozpuštění karbidů. V další části je ocel prudce ochlazena. Při procesu prudkého ochlazení dojde k transformaci austenitu na martenzit, a také se vyloučí sekundární karbidy. Ve třetí fázi se ocel popustí, což má za následek eliminaci zbytkového austenitu a tvorbu dalších karbidů. Tuto operaci nazýváme zušlechťování a tento proces je také vyobrazen na Obr. 6. [31-33]



Obr. 6: Proces tepelného zpracování nástrojových ocelí [33]

3.2 Tepelné zpracování laserem

Laserové tepelné zpracování se jako metoda zvyšování pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti opotřebení ocelových dílů široce používá pro různé průmyslové aplikace. Laserové tepelné zpracování je komplexní multifyzikální proces, při němž se optická energie laserového paprsku přeměňuje na teplo na povrchu laserem zpracovávaného dílu a při průchodu tepla dílem vzniká požadované tepelné ovlivnění, což vede k zvýšení tvrdosti. [34]

3.3 Chemicko-tepelné zpracování forem

Chemicko-tepelným zpracováním se na povrchu nástrojů vytvoří vrstvy. Tyto vytvořené vrstvy mají odlišné chemické složení i vlastnosti oproti nástrojové oceli z které byla forma vyrobena. Nejčastěji se jedná o vrstvy, které zvyšují tvrdost na povrchu materiálu a odolnost proti opotřebení. Tyto vrstvy mohou také zlepšit odolnost proti zadírání nebo proti chemickému působení. [35]

3.3.1 Cementování

Pro cementování jsou voleny nástroje s nižším obsahem uhlíků. Dle normy ČSN EN ISO 4957 je vhodným materiálem ocel 21MnCr5. Dle normy DIN je volená legovaná ocel X19NiCrMo4 (1.2764). Vzniká kalená cementovaná vrstva, která dosahuje vysoké tvrdosti 60 HRC a jádro materiálu zůstává houževnaté. Postup cementování je obdobný jako u konstrukčních ocelí vhodných k cementování. [35]

3.3.2 Nitridování

Nitridací lze získat povrch o vysoké tvrdosti bez následného tepelného zpracování. Nástroj je zušlechtěn před nitridací. Popouštěcí teplota však může být větší než samotná teplota nitridace kolem 500 °C. Při této nízké teplotě stálost struktury i rozměrů zůstává. Nitridovaná vrstva také zvyšuje odolnosti proti korozi. [35]

3.3.3 Sulfonitridování

Jedná se o sycení povrchu nástroje dusíkem a sírou zároveň. Vzniklá vrstva disponuje kombinací vlastností. Vznikají tvrdé nitridy a tento proces zvyšuje odolnost proti opotřebení a síra působí jako mazivo. Z tohoto důvodu je povrch méně náchylný na zadírání. [35]

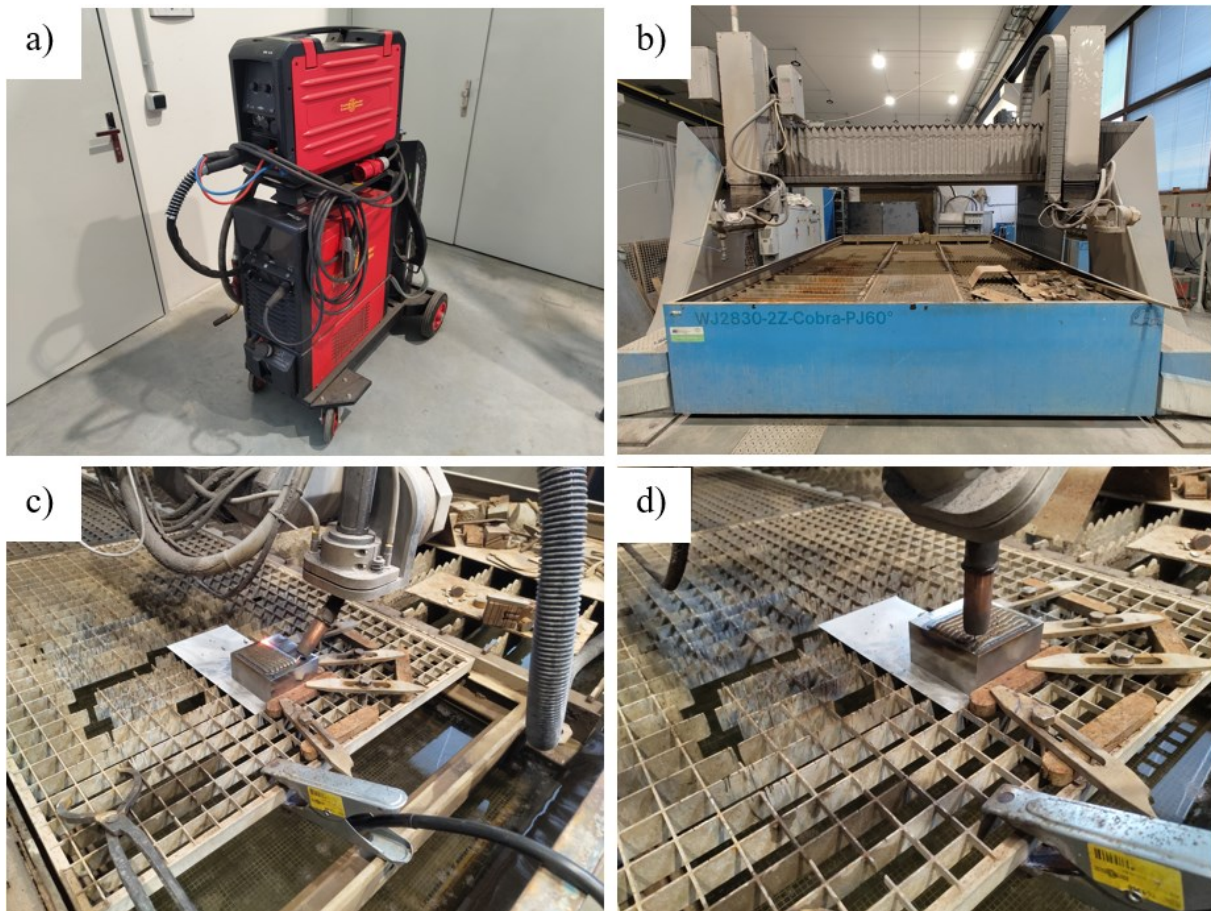
4 Experimentální program

Experimentální program byl proveden v několika částech. V první části byla provedena optimalizace procesu navaření nástrojové oceli. V další části byl návar rozříznut a polovina návaru byla tepelně zpracována. V další části byly návary podrobeny metalografickému vyhodnocení, zkoušce tvrdosti a měření opotřebení povrchu formou tribologické zkoušky.

4.1 Navařování nástrojové oceli

Na základě vyhodnocení teoretické části diplomové práce byl vybrán vhodný materiál pro opravu forem a nástrojů pro práci za tepla. Jedná se o materiály H13, Capilla 66 a Capilla 733, které byly vybrány pro opravu forem na nástroje z nástrojové oceli H13, která byla vybrána jako základní materiál do experimentálního programu. Ocel H13 byla nařezána na kvádry o rozměru 100 x 100 x 50 mm, které simulují dostatečně objemný materiál a nahrazují reálný nástroj pro tváření nebo licí formu, kterou je potřebné opravit. Velikost těchto kvádrů byla zvolena tak, aby bylo zajištěno dostatečné odvedení tepla z návaru do základního materiálu.

Před vytvořením návarů byla provedena optimalizace procesu navařování pro metody WAAM a LMD se všemi přídavnými materiály. Navaření nástrojové oceli bylo provedeno čtyřmi různými způsoby. Navaření metodou WAAM bylo provedeno na víceosém multifunkčním horizontálním stroji určenému primárně k řezání vodním paprskem WJ2830-2Z-Cobra-PJ60°. Dále označován pouze jako Cobra. Víceosý stroj Cobra byl propojen s ručním MIG/MAG svařovacím zdrojem Castolin Eutectic XuperARC 4000 OS. Automatický hořák svařovacího zdroje byl umístěn do druhé osy víceosého stroje Cobra. Následně byl vytvořen program pro automatické generování kódu, který víceosý stroj Cobra čte a provádí veškeré posuvy osy a současně ovládá svařovací zdroj. Program byl pro účely navařování optimalizován v závislosti na kinematické vlastnosti stroje Cobra, jelikož stroj nenabízí konstantní rychlost při rozjezdu a zastavení. Tato optimalizace byla provedena, aby se na začátku a na konci návaru nevytvářely velké nerovnosti. Propojením Víceosého stroje Cobra se svařovacím zdrojem XuperAEX a ovládaným naprogramovaným kódem bylo vytvořeno zcela automatizované pracoviště pro navařování metodou WAAM. Svařovací zdroj XuperAEX bohužel nedisponuje funkcí CMT neboli Cold Metal Transfer, tedy návary vytvořené touto metodou nemohou být vytvořeny studeným přenosem kovu a musel být zvolen jiný přenos kovu. Nami vytvořená navařovací sestava nedisponovala žádnými možnostmi sledování a následné modifikace svařovacích parametrů v reálném čase, tedy parametry pro proces navařování jsou konstantní pro celý proces navařování. Realizace pracoviště a procesu navařování metodou WAAM je zachycena na Obr. 7.



Obr. 7: Realizace navařování metodou WAAM, a) svařovací zdroj, b) Cobra, c) a d) proces navařování vzorků

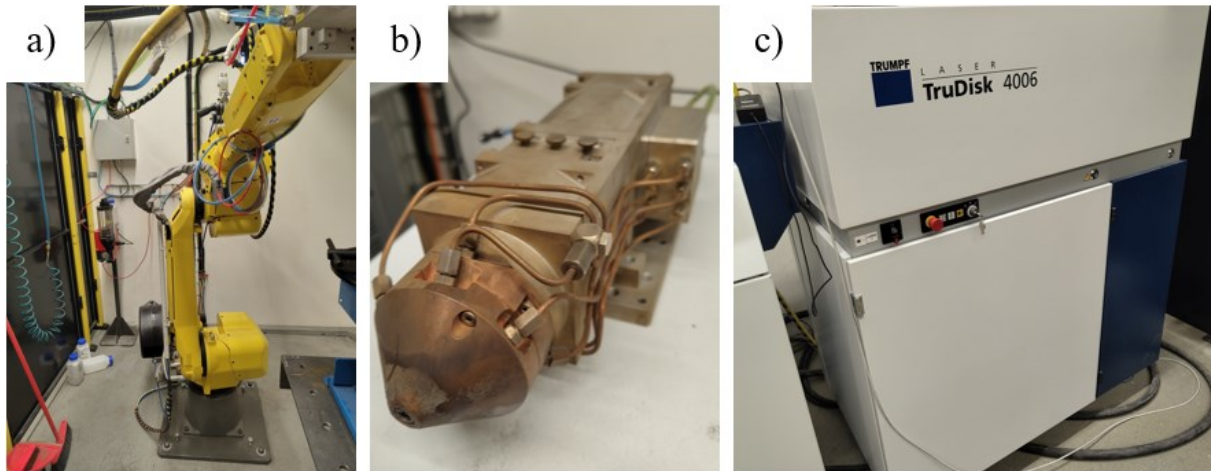
Vzorky vytvořené metodou WAAM byly označeny velkým písmenem W a vzorky vytvořené metodou P-LMD byly označeny velkým písmenem L pro jednodušší identifikaci vzorku. Pro vzorky W nebylo zapotřebí uvádět další písmenné označení, jelikož se vzorky od sebe navzájem liší pouze orientací jednotlivých vrstev vůči sobě. Vzorek W1 byl vytvořen skládáním jednotlivých vrstev návaru ve stejném směru. Směr byl tedy neměnný. Návar označený jako W2 byl vytvořený natáčením jednotlivých vrstev o 90° vůči vrstvě předchozí a následně vrácen o 90° pro vytvoření třetí vrstvy. Návary W byly vytvořeny použitím přídavného materiálu v podobě drátu Capilla 733 o průměru 1,2 mm. Navary označené písmenem L byly vytvořeny z různých přídavných materiálů v podobě prášku, a to z H13 a Capilla 66 dále označována jako C66 pro návar vytvořený touto ocelí. Rozdělení návarů bylo uvedeno také v Tbl. 7. Krychle základního materiálu H13 byly před navařováním broušeny a následně odmaštěny acetonem.

Tbl. 7: Navařovací parametry

Označení návaru	Metoda	Základní materiál	Přídavný materiál	Forma přídavného materiálu	Geometrie navařování
W1	WAAM	H13	Capilla 733	Drát	Stejný směr vrstev
W2	WAAM	H13	Capilla 733	Drát	Křížení vrstev
LH13	P-LMD	H13	H13	Prášek	Stejný směr vrstev
LC66	P-LMD	H13	Capilla 66	Prášek	Stejný směr vrstev

Parametry pro vytvoření návarů W byly nastaveny na navařovací proud 260 A, napětí 22,3 V, rychlost posuvu drátu 7,7m/min, průtok ochranného plynu 13 l/min, rychlost navařování 300 mm/min, délka housenky 90 mm, počet housenek v řadě 10, mezera mezi housenkami 7 mm, výška housenky 5 mm, počet vrstev 4, přenos kovu zkratový, časová prodleva mezi vrstvami 120 s, sklon hořáku vůči ose navařování pro první housenku navařovaných vrstev 0 °, sklon hořáku vůči ose navařování pro další housenky navařovaných vrstev 45 °, ochranný plyn Ar 4,6 v zastoupení 100 %, spuštění ochranného plynu bylo nastaveno s předstihem 2 s, prodleva foukání ochranného plynu po navaření vrstvy byla nastavena na 5 s, vzdálenost svařovacího hořáku od povrchu základního materiálu byla 15 mm. Střed návaru první housenky byl umístěn do vzdálenosti 10 mm od kraje hrany povrchu krychle základního materiálu.

Parametry pro vytvoření návarů L byly rozdílné. Navařovací parametry návaru označeného LH13 byly nastaveny na výkon 1600 W, rychlost navařování 600 mm/min, množství přídavného materiálu v podobě prášku 35,4128 g/min. Parametry pro návar LC66 byly výkon 2000 W, rychlost navařování 500 mm/min, množství přídavného materiálu v podobě prášku 38,9770 g/min. Stejně parametry vzorků LH13 a LC66 byly průtok ochranného plynu 15 l/min, ohraný plyn Ar 4,6 v zastoupení 100 %, počet housenek v řadě 20, výška housenky 1 mm, počet vrstev 4, mezera mezi housenkami 2 mm délka housenky 90 mm, vzdálenost navařovací hlavy od povrchu 13 mm. Pracoviště tisku metodou P-LMD je zobrazeno na Obr. 8.

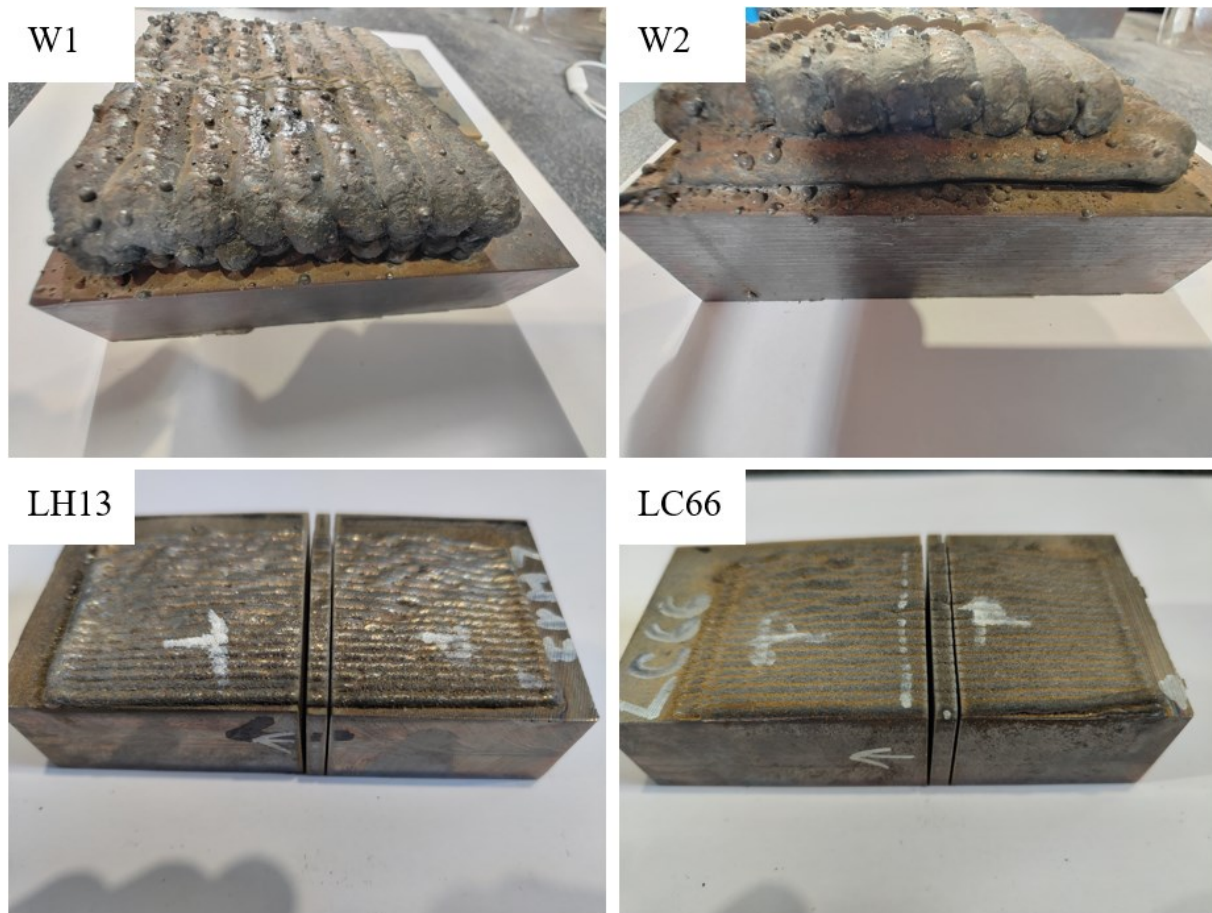


Obr. 8: Realizace navařování metodou P-LMD, a) svařovací robot Fanuc, b) navařovací hlava, c) diskový laser Trumpf TruDisk 4006

Pro přehlednost byly nejdůležitější navařovací parametry návarů označených písmenem L zaznamenány v tabulce Tbl. 8. Zhotovené návary jsou zobrazeny na Obr. 9.

Tbl. 8: Parametry navařování metodou LMD

Označení návaru	Výkon [W]	Rychlost navařování [mm/min]	Množství prášku [g/min]	Průtok ochranného plynu [l/min]	Prodleva mezi vrstvami [s]
LH13	1600	600	35,4128	15	120
LC66	2000	500	38,9770	15	120



Obr. 9: Zhotovené návary a jejich dělení

4.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování bylo provedeno u všech vytvořených návarů. Aby bylo možné porovnat návary bez tepleného zpracování a tepelně zpracované, vytvořené návary byly rozříznuty uprostřed vodním paprskem na dva totožné vzorky. Vzorky dále tepelně nezpracované byly označeny velkým písmenem P od slova anglického slova print, tedy tisknout. Vzorky tepelně zpracované byly označeny velkým písmenem T od anglického slova thermal, v překladu tepelné. Tato písmena byla záměrně zvolena, aby bylo možné jednoznačně oddělit vzorky navařené od vzorků tepelně zpracovaných. Rozdělení vzorků bylo také zaznamenáno v tabulce Tbl. 9.

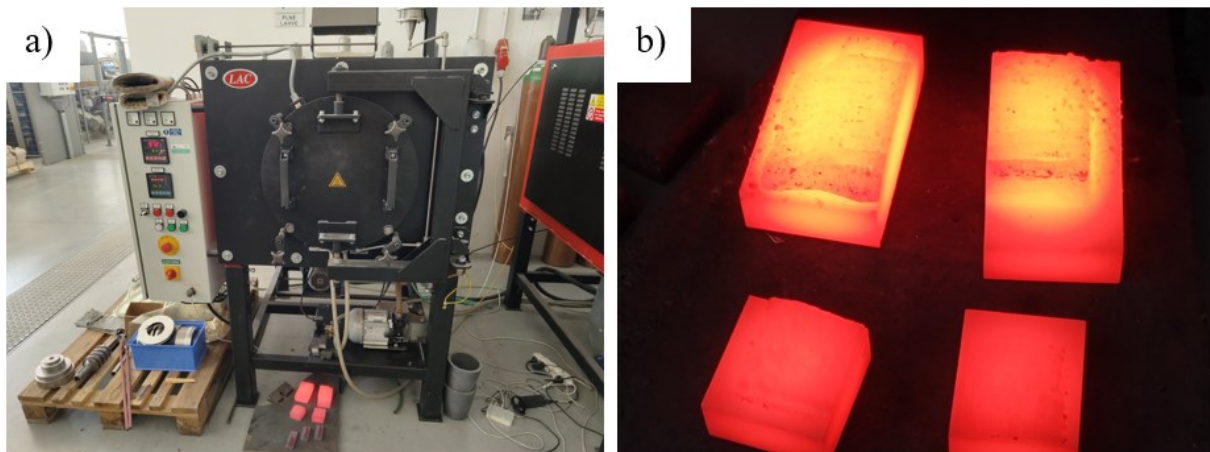
Tbl. 9: Rozdělení tepelného zpracování

Označení vzorku	Tepelné zpracování
W1P	Bez tepelného zpracování
W1T	Tepelně zpracováno
W2P	Bez tepelného zpracování
W2T	Tepelně zpracováno
LH13P	Bez tepelného zpracování
LH13T	Tepelně zpracováno
LC66P	Bez tepelného zpracování
LC66T	Tepelně zpracováno

Návrh tepelného zpracování vycházel z odborné literatury HEAT TREATER'S GUIDE (ISBN-13: 978-0-87170-520-4) a ASM SPECIALTY HANDBOOK Tool Materials (ISBN: 0-87170-545-1). Pro nástrojovou ocel H13 zde doporučují předehřev na teplotu 815 °C, následný ohřev na kalicí teplotu 995 až 1040 °C, následné kalení na vzduchu. Poté doporučují popouštění při teplotách od 540 až 650 °C a to alespoň dvojnásobně. Doba austenitizace při kalicí teplotě se dovíjí od tloušťky materiálu, a to i pro dobu popouštění. [36,37]

Optimalizace procesu tepelného zpracování vycházela z potřeby rozdílných požadavků tepelně zpracovávaných návarů o různých chemických složeních. Tepelné zpracování přídavného materiálu Capilla 733 dosud nebylo uvedeno v žádné odborné literatuře. V materiálovém listě tohoto materiálu bylo pouze tepelné zpracování doporučeno. Z tohoto důvodu bylo navrženo optimální tepelné zpracování dle chemického složení přídavného materiálu Capilla 733.

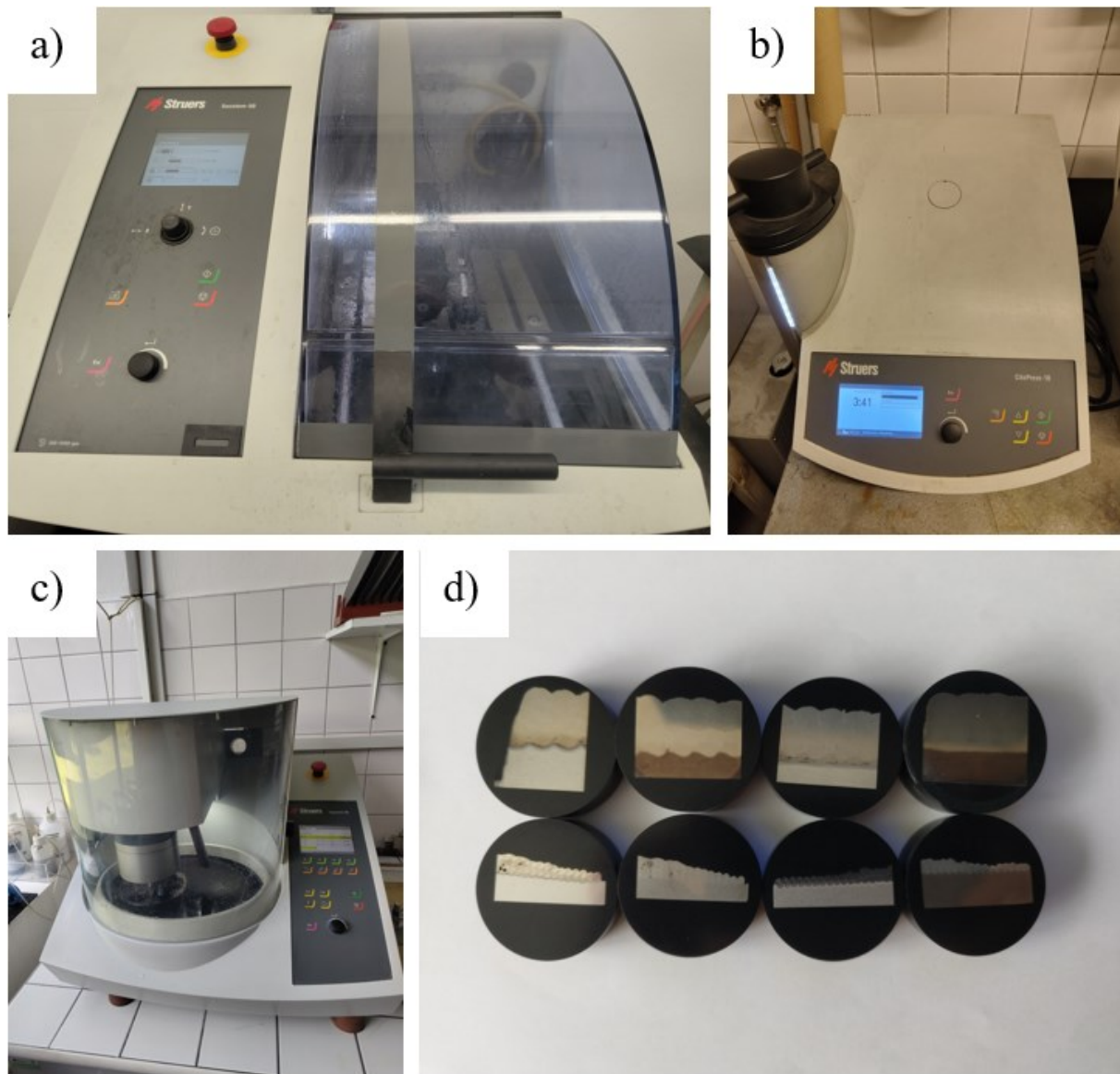
Tepelné zpracování bylo upraveno pro všechny zvolené přídavné materiály a jejich průnikem byl vytvořen finální návrh tepelného zpracování podle kterého byly všechny vzorky zpracovány současně. Důvodem společného tepelného zpracování všech návarů bylo efektivní využití vybavení laboratoře a úspora energií. Tepelné zpracování probíhalo v ochranné atmosféře Ar 4.6 tj. 99,996 % argonu. Vzorky byly vloženy do studené pece o pokojové teplotě, následně byla pec rozehřáta na teplotu 750 °C tedy teplotu předehřevu. Na této teplotě byl vzorek ponechán po dobu 2 hodin. Po dvou hodinách byla teplota zvýšena na teplotu austenitizace 1010 °C, kde byly vzorky ponechány 30 minut. Následně byly vzorky vyndány na vzduch, kde podstoupily proces kalení na vzduchu. Po vychladnutí pece a vzorků na pokojovou teplotu byly vzorky opět umístěny do pece, kde byly vzorky ponechány po dobu celého procesu popouštění. Pec byla následně vyhřáta na teplotu 530 °C s výdrží na teplotě po dobu 2 hodin. Následně byla pec odstavena po dobu, dokud vnitřek pece nedosáhl teploty 60 °C. Následně se tento proces popouštění opakoval, a to celkem 3x. Po dokončení procesu popouštění byly vzorky ochlazeny na pokojovou teplotu. Celý průběh tepelného zpracování byl zaznamenán na Obr. 27 na straně 76. Použitá pec a vzorky kalené na vzduch jsou zaznamenány na Obr. 10.



Obr. 10: a) zvolená pec pro tepelné zpracování, b) návary vyndané z pece během kalení na vzduchu

4.3 Metalografická zkouška

Metalografické vyhodnocení bylo provedeno na všech návarech pro tepelně zpracované i tepelně nezpracované části návareů. Z každé uvedené části byla odříznuta část ve formě tenkého plátku o tloušťce 8 mm z návaru, a to vodním paprskem, aby nedošlo k žádnému tepelnému ovlivnění během odebrání. Tyto plátky byly dále postupně rozřezány na metalografické pyle, aby bylo možné vzorky zalít do metalografického puku o průměru 40 mm. Vzorky byly rozřezány tak, aby byla zachována celá výška návaru a celá tepelně ovlivněná oblast. Zalití vzorků bylo provedeno do směsi MultiFast. Vzorky byly následně broušeny a leštěny na metalografických brusných plochách Piano o hrubosti 500, 1200 a následně leštěny na plátnech Nap se suspenzemi o hrubosti 9, 3 a 1 μm . Zařízení pro přípravu vzorků a samotné vzorky zobrazeny na Obr. 11.



Obr. 11: a) metalografická pila Struers Secotom-50, b) lis pro přípravu vzorků Struers CitoPress-10, c) brusný a leštící stroj Struers Tegramin-30, d) zhotovené vzorky v naleptaném stavu

Následně byl vzorek postupně leptán v 3% roztoku kyseliny dusičné známe jako Nital. V případech, kdy se leptání na požadovanou oblast nebo strukturu nepodařilo, byl vzorek znovu přešetřen a opět leptán. Doba leptání pro jednotlivé vzorky je uvedena v tabulce Tbl. 10. Po naleptání na určitou část vzorku byl vzorek opět přešetřen na leštícím plátně Nap suspenzí 1 μm a následně byl znovu leptán na požadovanou část vzorku nebo struktury. V případech, kdy se leptání na požadovanou oblast nebo strukturu nepodařilo z důvodu chybně zvolené doby leptání, byl vzorek znovu přešetřen a opět leptán.

Tbl. 10: Doba leptání návarů

Označení vzorku	Leptadlo	Doba leptání na základní materiál [s]	Doba leptání na návar [s]	Doba leptání na makro [s]
W1P	Nital 3 [%]	30	60	100
W1T	Nital 3 [%]	40	75	120
W2P	Nital 3 [%]	30	60	100
W2T	Nital 3 [%]	40	75	120
LH13P	Nital 3 [%]	30	90	145
LH13T	Nital 3 [%]	40	120	160
LC66P	Nital 3 [%]	30	90	280
LC66T	Nital 3 [%]	40	250	300

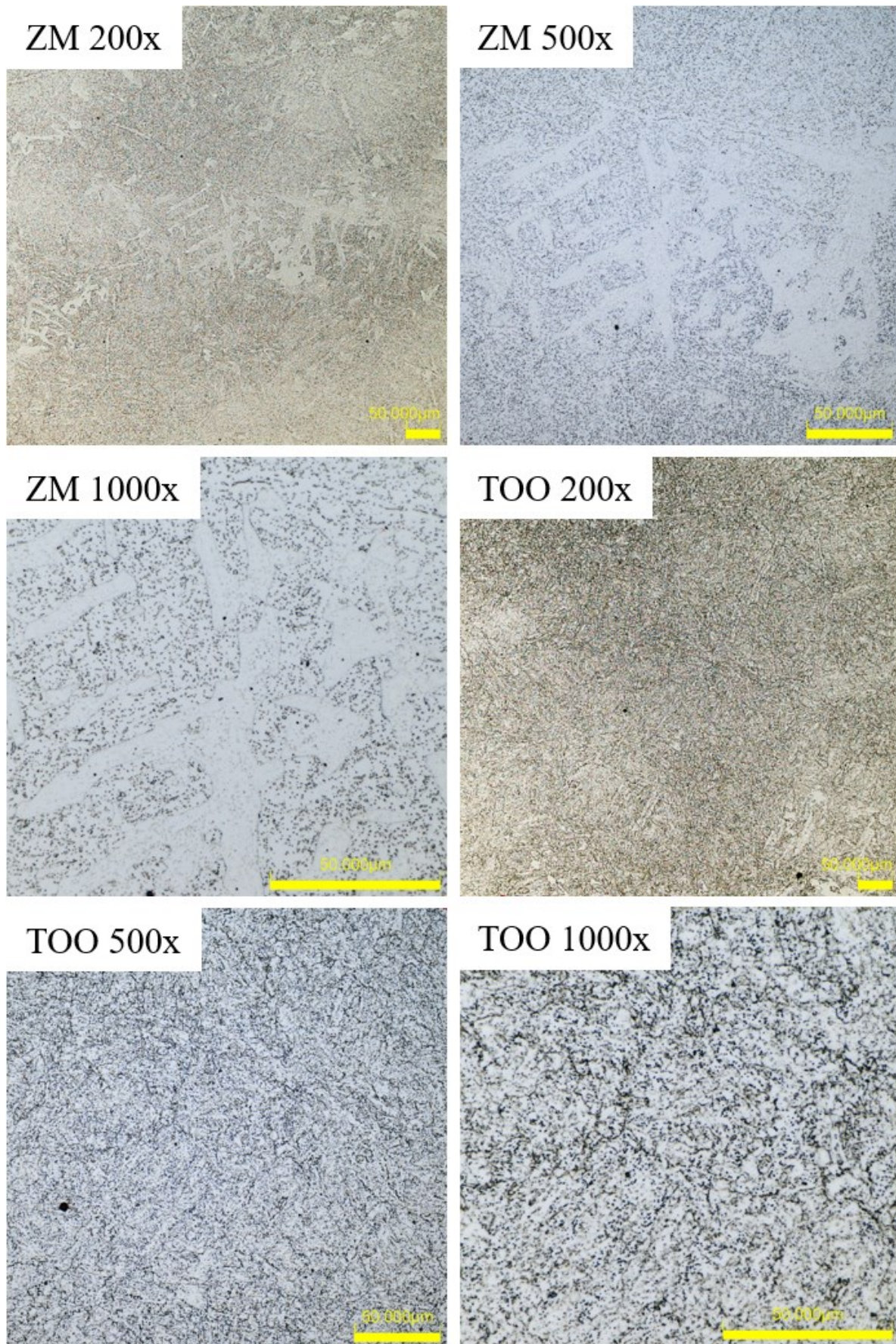
Po naleptání vzorků na požadovanou oblast nebo strukturu byl vzorek pozorován na optickém mikroskopu Olympus znázorněn na Obr. 12. Na Obr. 13a Obr. 14 na straně 37 a 38 byla pozorována a zaznamenána mikrostruktura základního materiálu H13 tepelně ovlivněné oblasti dále označovaná jako TOO a základní materiál v tepelně neovlivněném stavu z procesu navařování dále označovaný jako ZM.



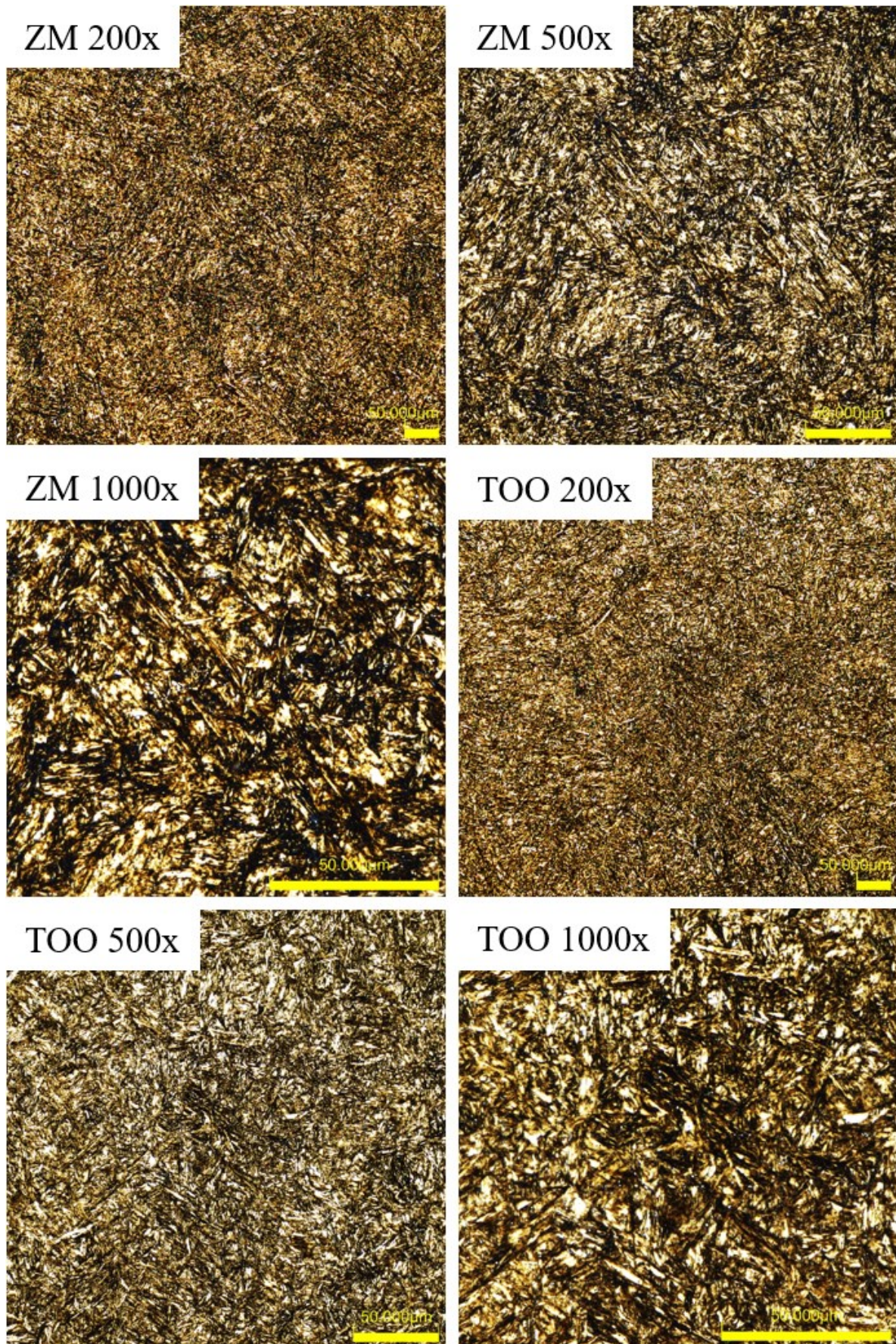
Obr. 12: Světelný mikroskop Olympus OLS50-HSU

Pozorované mikrostruktury návarů byly zaznamenány na obrázky Obr. 15 až Obr. 22 na stranách 39 až 46 včetně zdokumentované makrostruktury, která je vždy umístěna v pravém horním rohu těchto obrázků. Do levého a pravého rohu obrázků byla umístěna přechodová oblast, která je dále označována jako PO. Snímky z oblasti návaru jsou na těchto obrázkách označeny jako Návar.

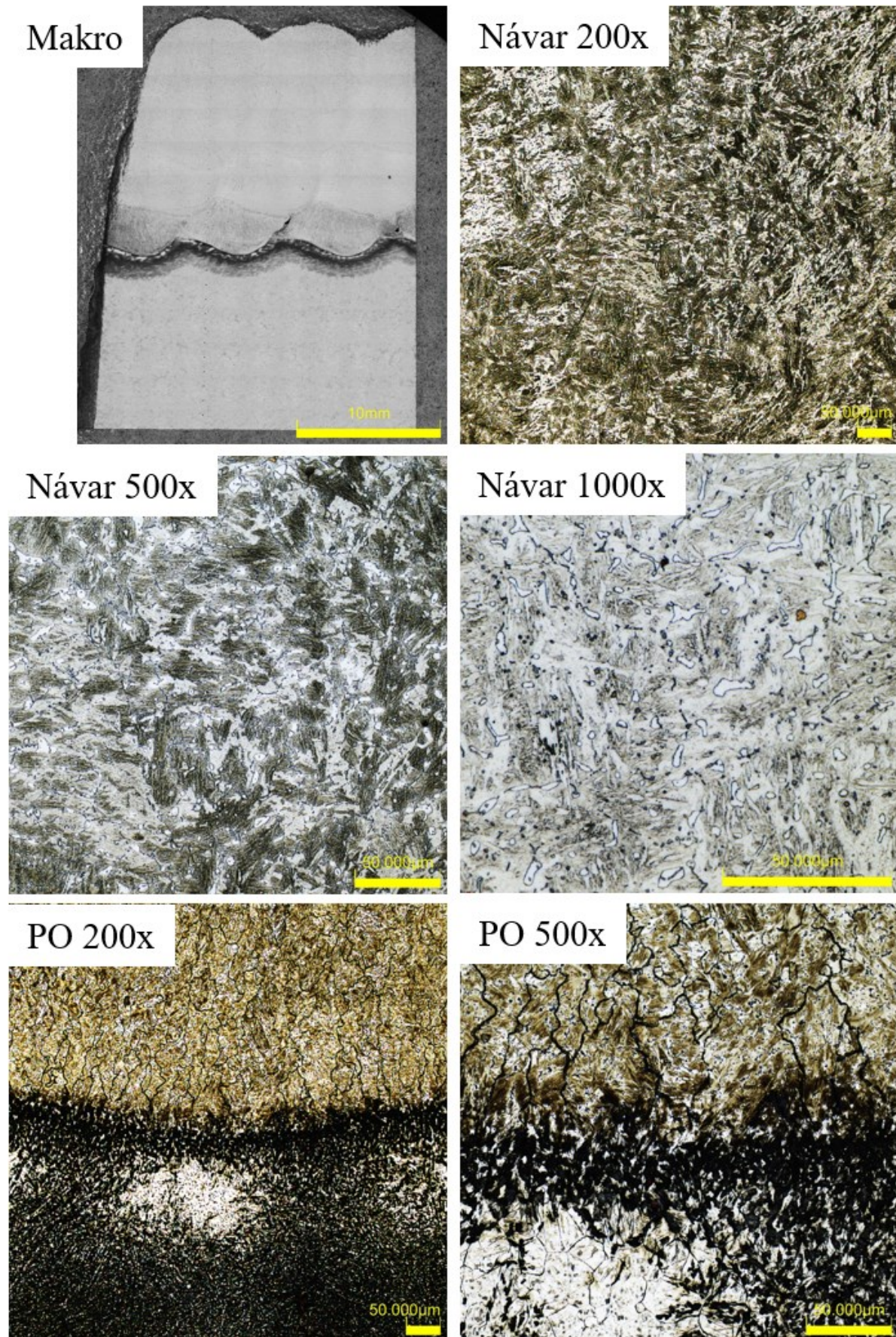
Zvětšení udávané na snímcích z mikroskopu 200x, 500x a 1000x je dáno volbou objektivů 20, 50 a 100 vynásobeného desetinásobkem zvětšení okuláru. Pro jednoznačnost zvětšení bylo na snímky přidáno měřítko o délce 50 μm a na snímky makrostruktury byly umístěny měřítko o délce 10 mm.



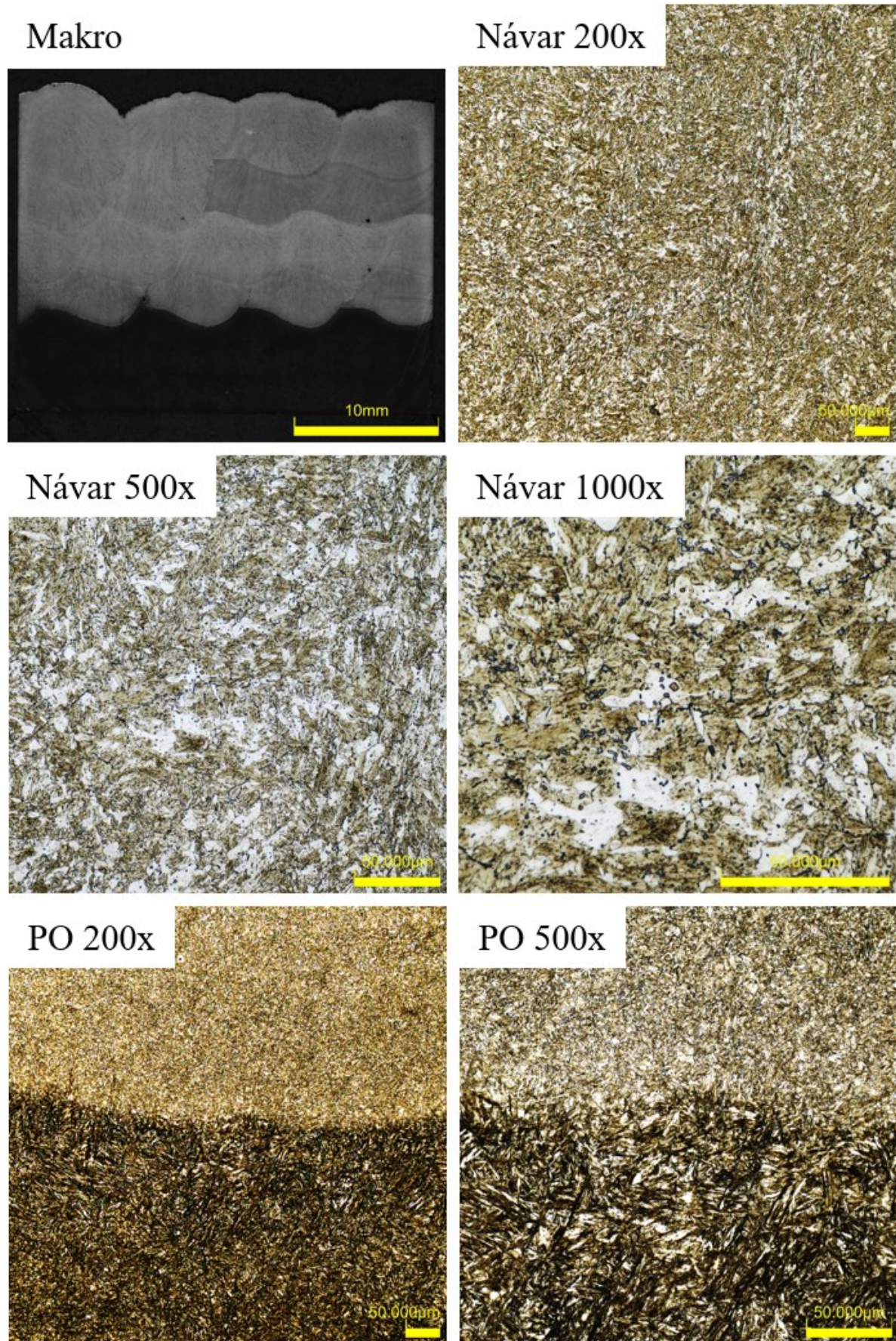
Obr. 13: Snímky světelného mikroskopu základního materiálu H13P



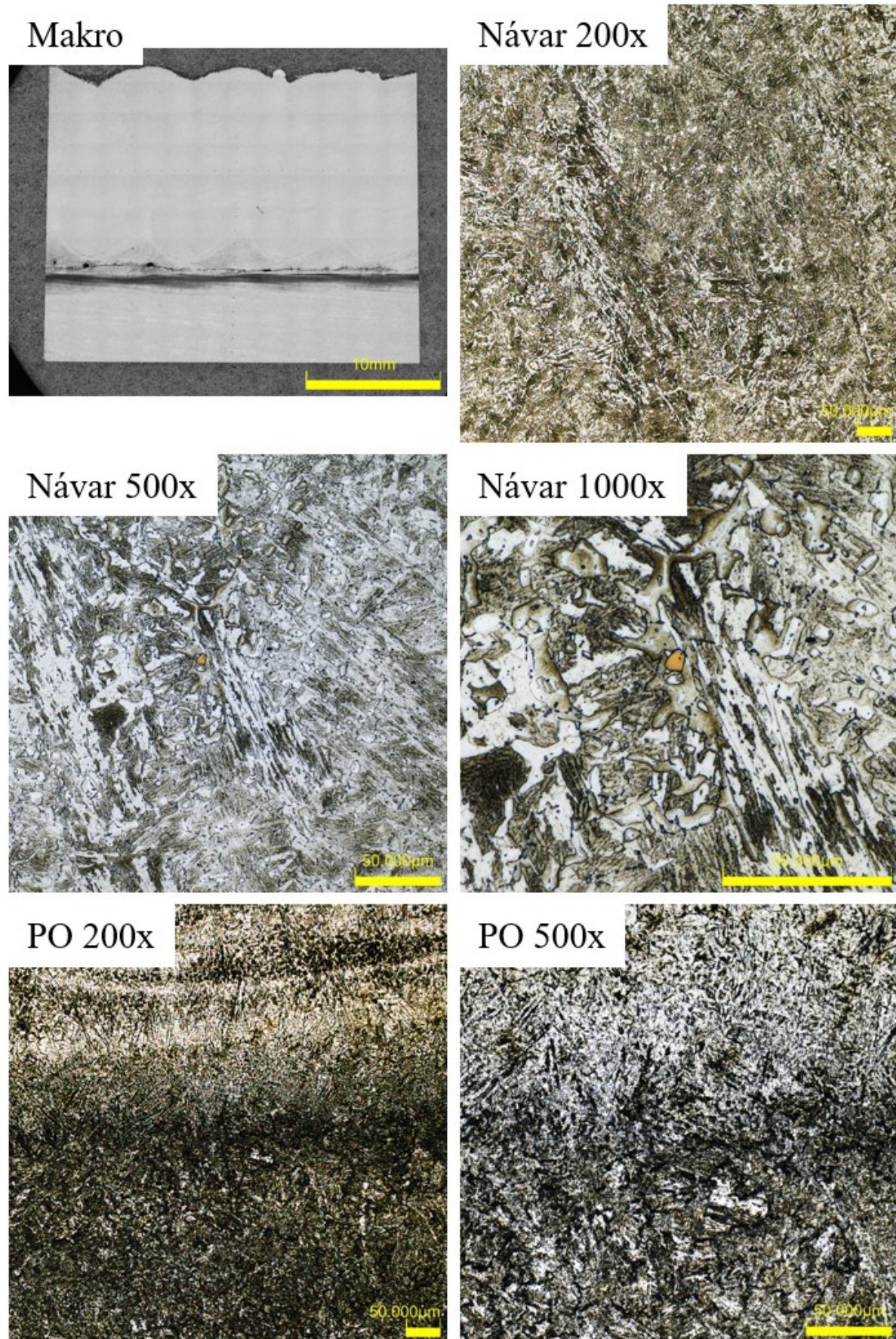
Obr. 14: Snímky světelného mikroskopu základního materiálu H13P



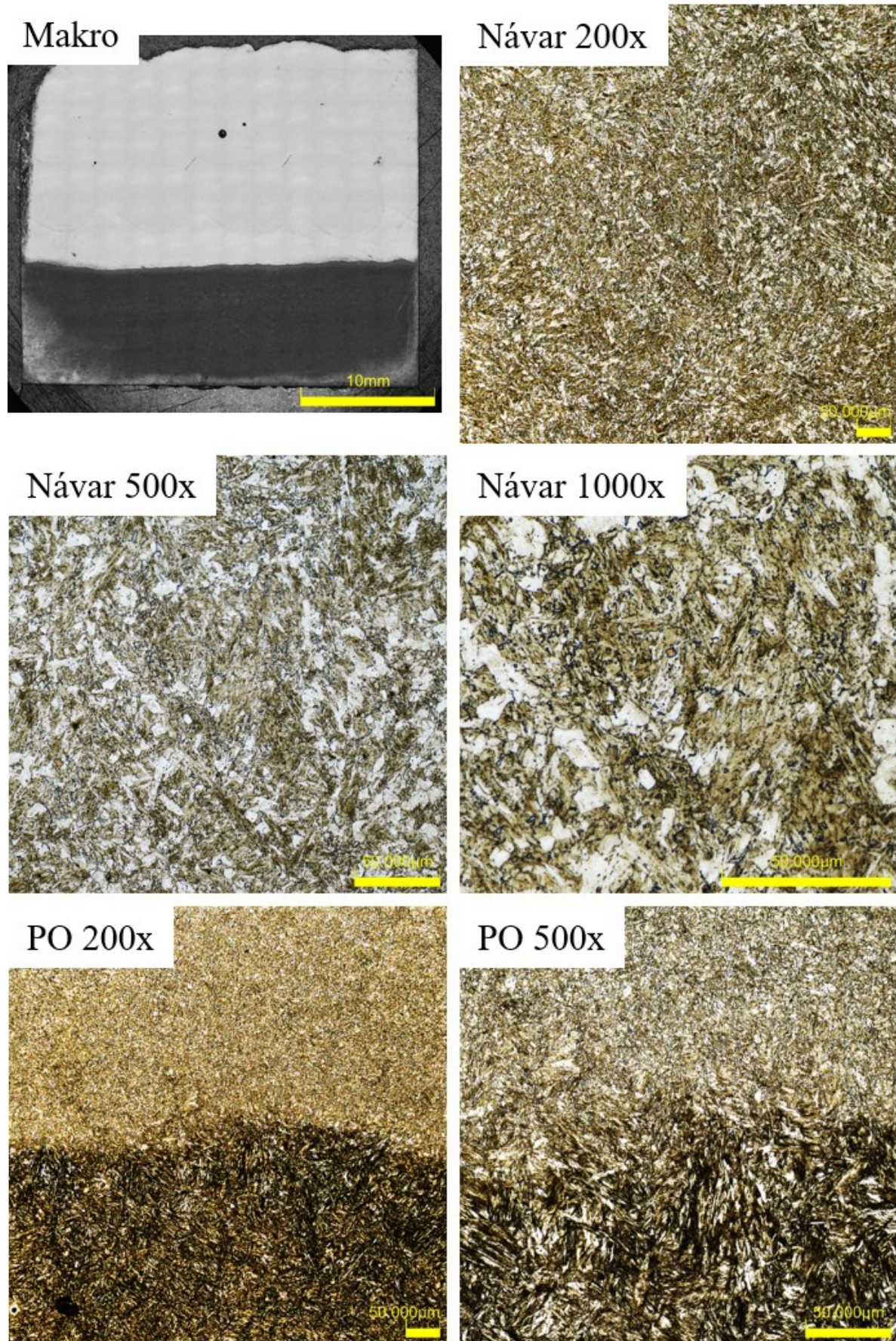
Obr. 15: Snímky světelného mikroskopu návaru WIP



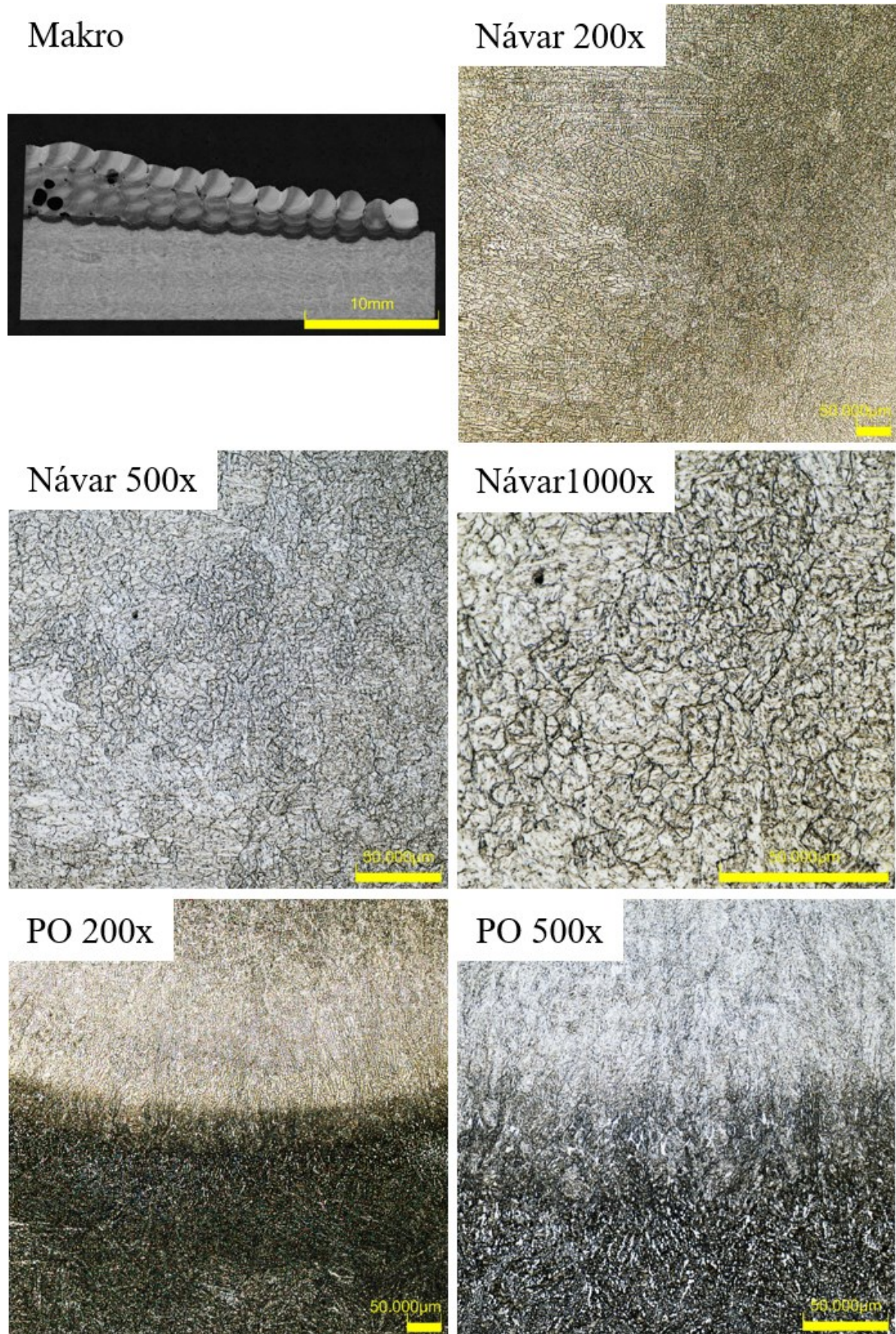
Obr. 16: Snímky světelného mikroskopu návaru WIT



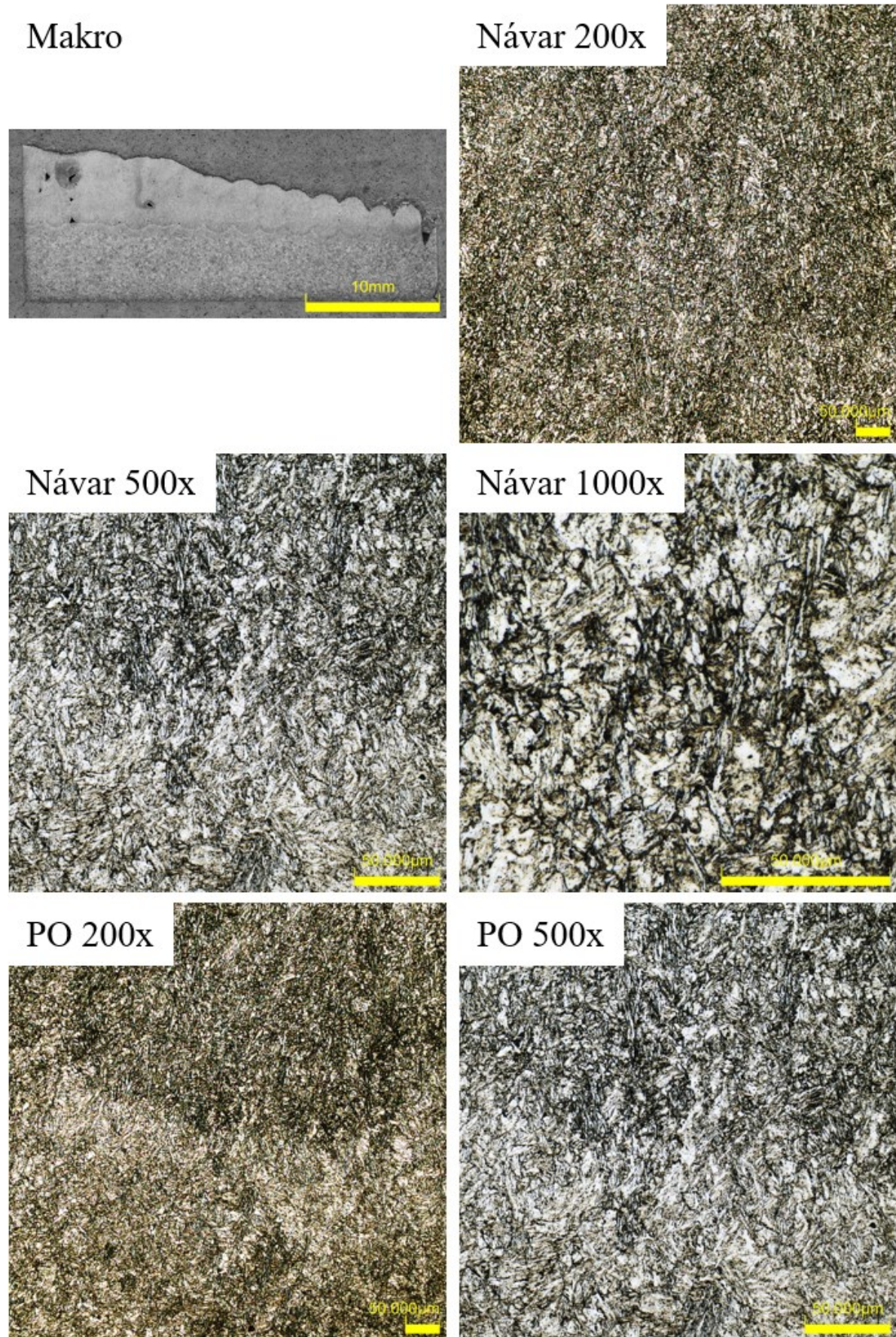
Obr. 17: Snímky světelného mikroskopu návaru W2P



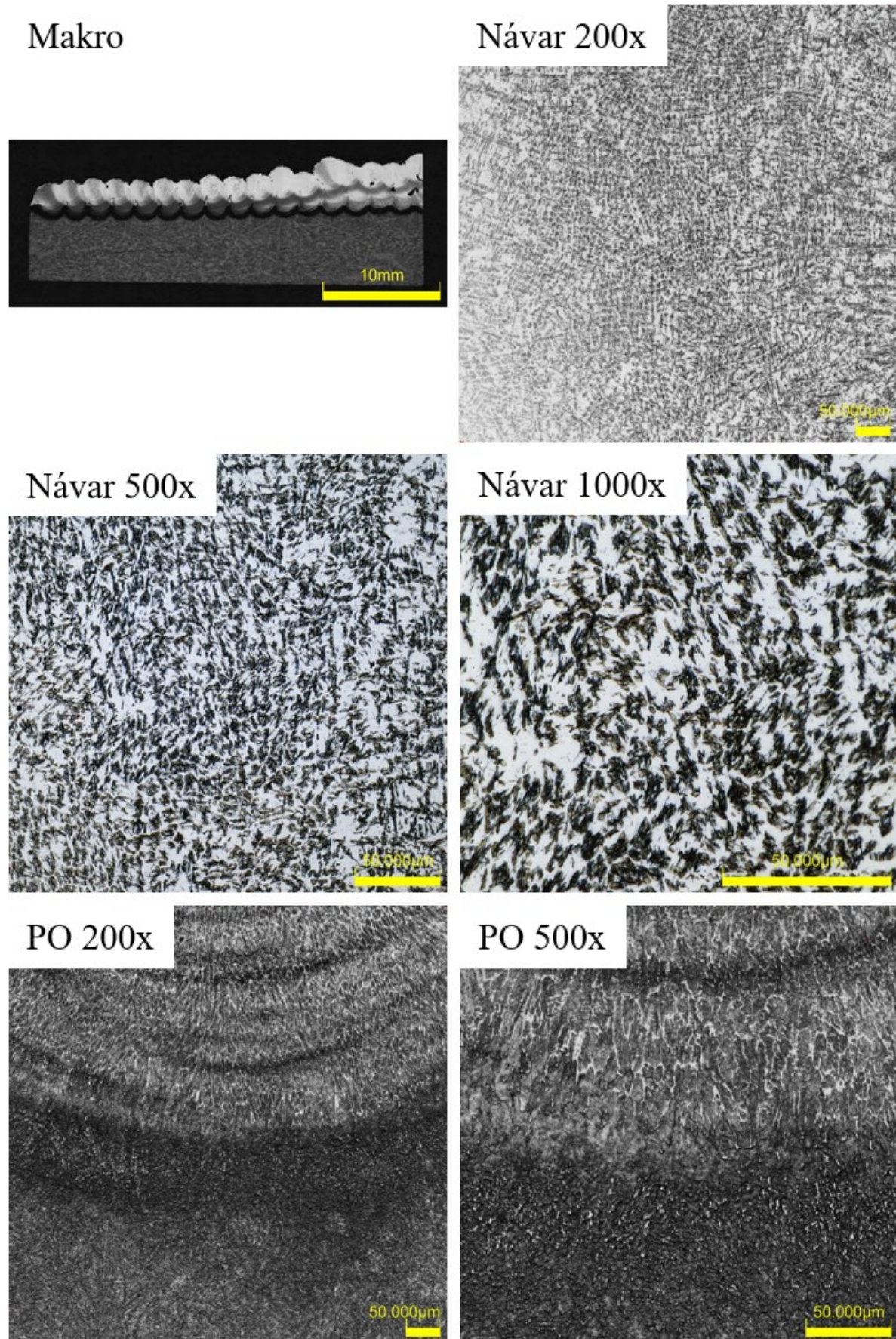
Obr. 18: Snímky světelného mikroskopu návaru W2T



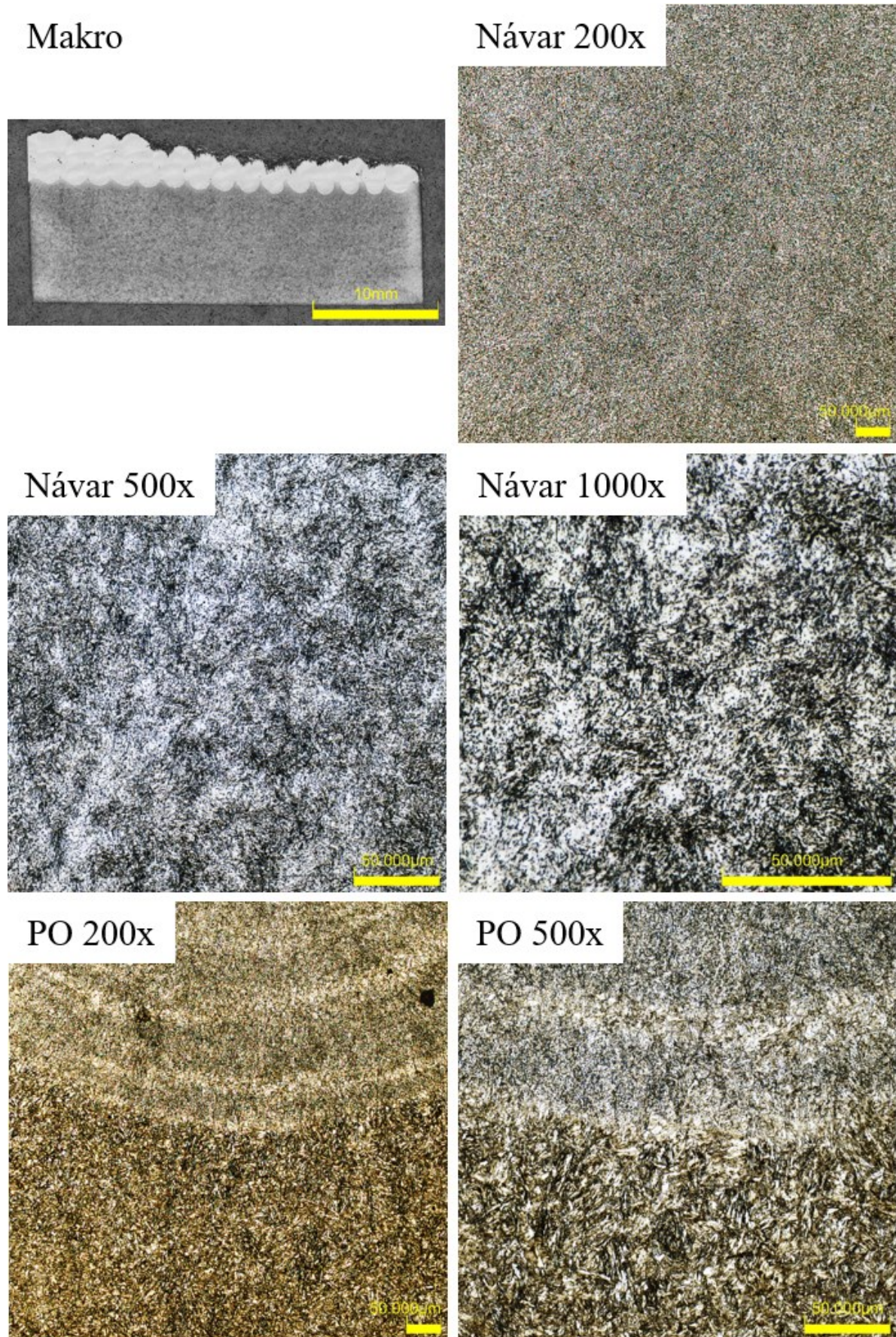
Obr. 19: Snímky světelného mikroskopu návaru LH13P



Obr. 20: Snímky světelného mikroskopu návaru LH13T



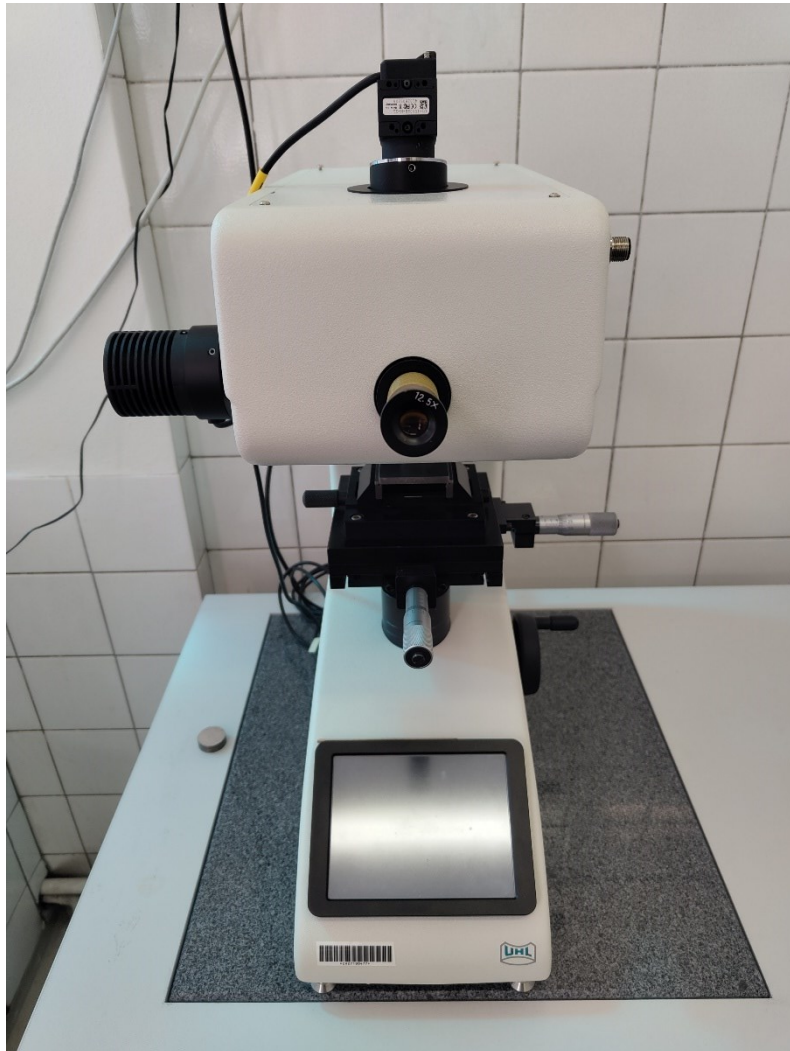
Obr. 21: Snímky světelného mikroskopu návaru LC66P



Obr. 22: Snímky světelného mikroskopu návaru LC66T

4.4 Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno na zkušebním zařízení Obr. 23. Před zahájením měření tvrdosti byla ověřena síla zkušebního stroje na referenční destičce a následně byla vyhodnocena odchylka od požadované tvrdosti ve výši 2 %, což spadá do požadované tolerance 10 % pro měření tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 6507-1 pro měření tvrdosti dle Vickerse, měření tvrdosti při nízkém zatížení HV1.



Obr. 23: Tvrdoměr UHL VMHT

Tvrdot byla měřena na stejných vzorcích, u kterých se provádělo metalografické vyhodnocení. Tvrdot byla měřena pro všechny vzorky stejným způsobem. Od povrchu návaru byla odměřena vzdálenost 1 mm. Následně bylo provedeno pásmo vtisků vzdálených 1 mm od sebe. Směr provádění zkoušky byl zvolen od povrchu návaru kolmo na základní materiál. Pásmo vtisků bylo ukončeno při dosažení konce vzorku. Poslední vtisk byl umístěn v minimální vzdálenosti 1 mm od konce vzorku. Druhé pásmo bylo měřeno v oblasti návaru napříč celým návarem. První tisk byl proveden opět ve vzdálenosti 1 mm od povrchu a poslední vtisk končil nejméně 1 mm od konce vzorku. Následně byla naměřená tvrdost zapsána do tabulek Tbl. 11 až Tbl. 18 na straně 48 až 55. Také byly do těchto tabulek zaznamenané statistické údaje z průběhu měření každého pásma, jako maximální, minimální a průměrná naměřená hodnota tvrdostního pásma. Následně z naměřených údajů byly vytvořeny grafy Graf 1 až Graf 8 na straně X až Y v přílohách. Dále byly vytvořeny grafy

Graf 11 a Graf 12 na straně 69 umístěny v diskuzi výsledků pro znázornění všech naměřených průběhů tvrdost HV1.

Tbl. 11: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W1P

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	290	193
2	367	190
3	602	183
4	418	190
5	436	182
6	465	185
7	446	188
8	467	190
9	382	190
10	668	189
11	404	237
12	410	341
13	435	392
14	415	381
15	602	414
16	484	423
17	468	411
18	390	432
19	403	439
20	422	437
21	423	436
22	-	478
23	-	478
24	-	481
25	-	466
26	-	476
27	-	476
28	-	494
Průměr	447	342
Minimum	290	182
Maximum	668	494

Tbl. 12: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W1T

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	450	425
2	450	418
3	449	438
4	451	440
5	439	438
6	445	422
7	454	433
8	441	427
9	416	448
10	417	459
11	417	424
12	453	439
13	505	425
14	500	437
15	508	406
16	590	435
17	690	426
18	663	443
19	666	441
20	682	441
21	667	431
22	-	410
23	-	420
24	-	425
25	-	432
26	-	433
27	-	435
28	-	435
Průměr	512	432
Minimum	416	406
Maximum	690	459

Tbl. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W2P

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	413	441
2	419	438
3	399	433
4	414	440
5	416	443
6	408	407
7	404	403
8	403	394
9	414	422
10	380	418
11	405	398
12	407	368
13	395	395
14	414	377
15	389	485
16	401	283
17	406	203
18	397	190
19	397	187
20	398	191
21	384	196
22	411	-
23	384	-
24	384	-
25	384	-
26	397	-
27	394	-
Průměr	401	358
Minimum	380	187
Maximum	419	485

Tbl. 14: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru W2T

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	442	446
2	407	437
3	423	413
4	400	414
5	424	426
6	401	401
7	430	421
8	416	436
9	449	423
10	442	438
11	457	423
12	453	408
13	462	405
14	477	396
15	470	414
16	504	439
17	641	409
18	659	416
19	672	426
20	653	416
21	659	407
22	646	409
23	655	428
24	657	413
25	631	421
26	-	410
27	-	409
28	-	428
Průměr	517	419
Minimum	400	396
Maximum	672	446

Tbl. 15: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LH13P

Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	540	550
2	528	478
3	545	564
4	514	518
5	216	576
6	190	514
7	178	584
8	179	521
9	183	525
10	182	574
11	184	575
12	-	598
13	-	531
14	-	538
15	-	517
16	-	526
17	-	585
18	-	582
19	-	587
20	-	571
21	-	581
22	-	522
23	-	463
24	-	427
25	-	445
26	-	357
27	-	410
28	-	392
29	-	215
Průměr	313	511
Minimum	178	215
Maximum	545	598

Tbl. 16: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LH13T

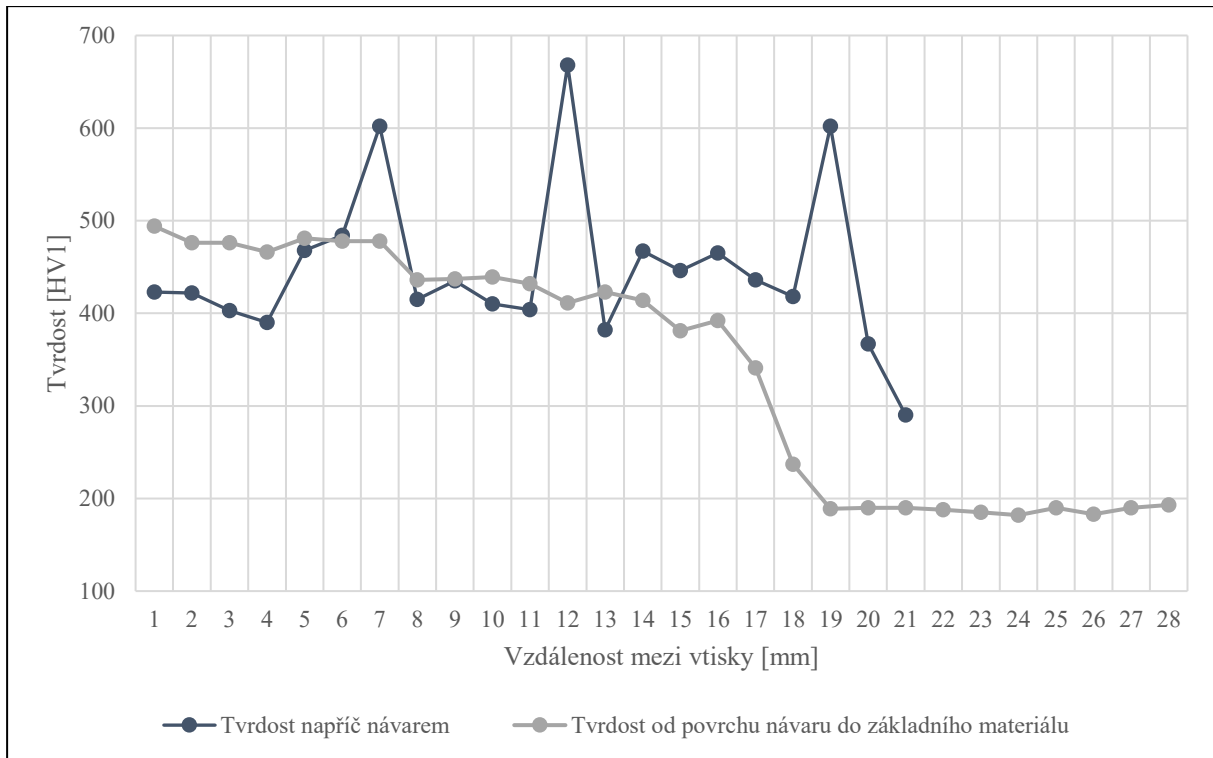
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	541	565
2	568	587
3	561	570
4	635	589
5	643	576
6	644	603
7	644	569
8	640	597
9	-	589
10	-	599
11	-	595
12	-	617
13	-	587
14	-	610
15	-	609
16	-	612
17	-	607
18	-	614
19	-	610
20	-	616
21	-	589
22	-	616
23	-	624
24	-	612
25	-	635
26	-	647
27	-	615
28	-	633
29	-	615
Průměr	609	604
Minimum	541	565
Maximum	644	647

Tbl. 17: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LC66P

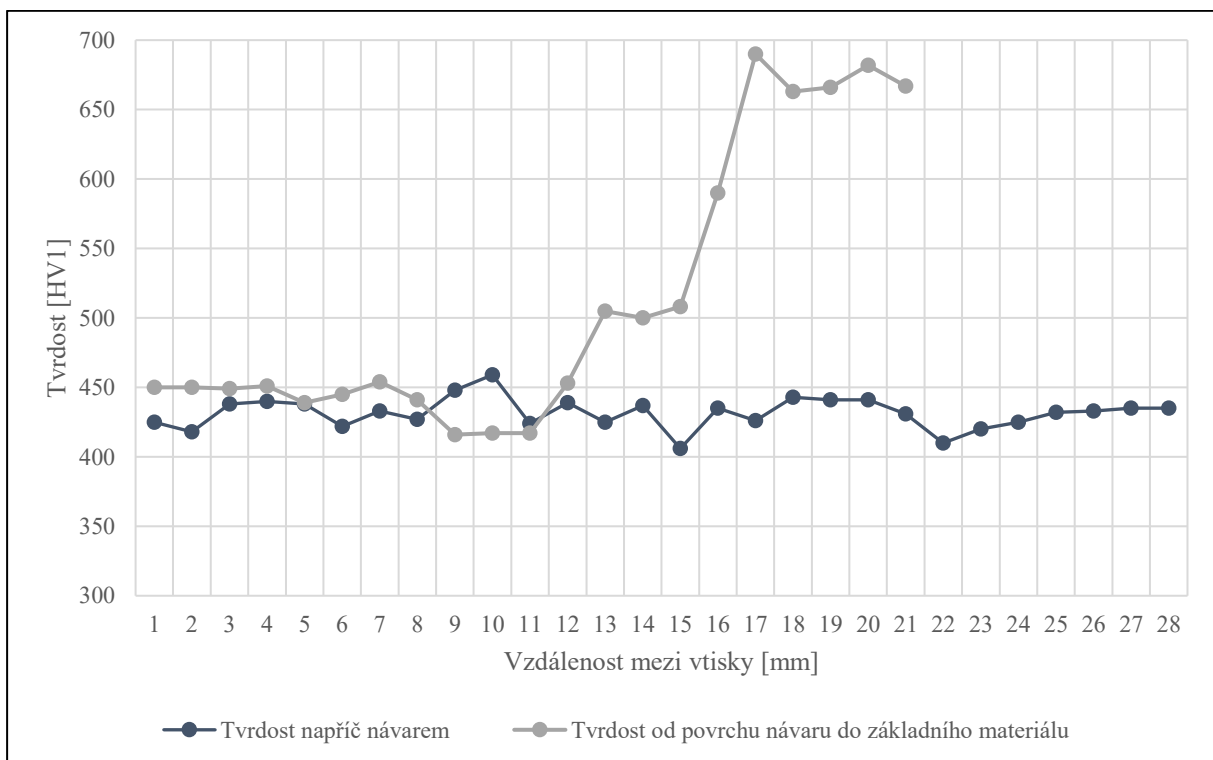
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	653	582
2	612	590
3	574	538
4	212	587
5	190	559
6	179	612
7	190	567
8	182	607
9	-	609
10	-	621
11	-	592
12	-	578
13	-	619
14	-	609
15	-	542
16	-	581
17	-	545
18	-	567
19	-	559
20	-	555
21	-	529
22	-	570
23	-	576
24	-	587
25	-	584
26	-	555
27	-	502
28	-	559
29	-	422
30	-	421
31	-	460
32	-	529
33	-	430
Průměr	349	556
Minimum	179	521
Maximum	653	621

Tbl. 18: Naměřené hodnoty tvrdosti návaru LC66T

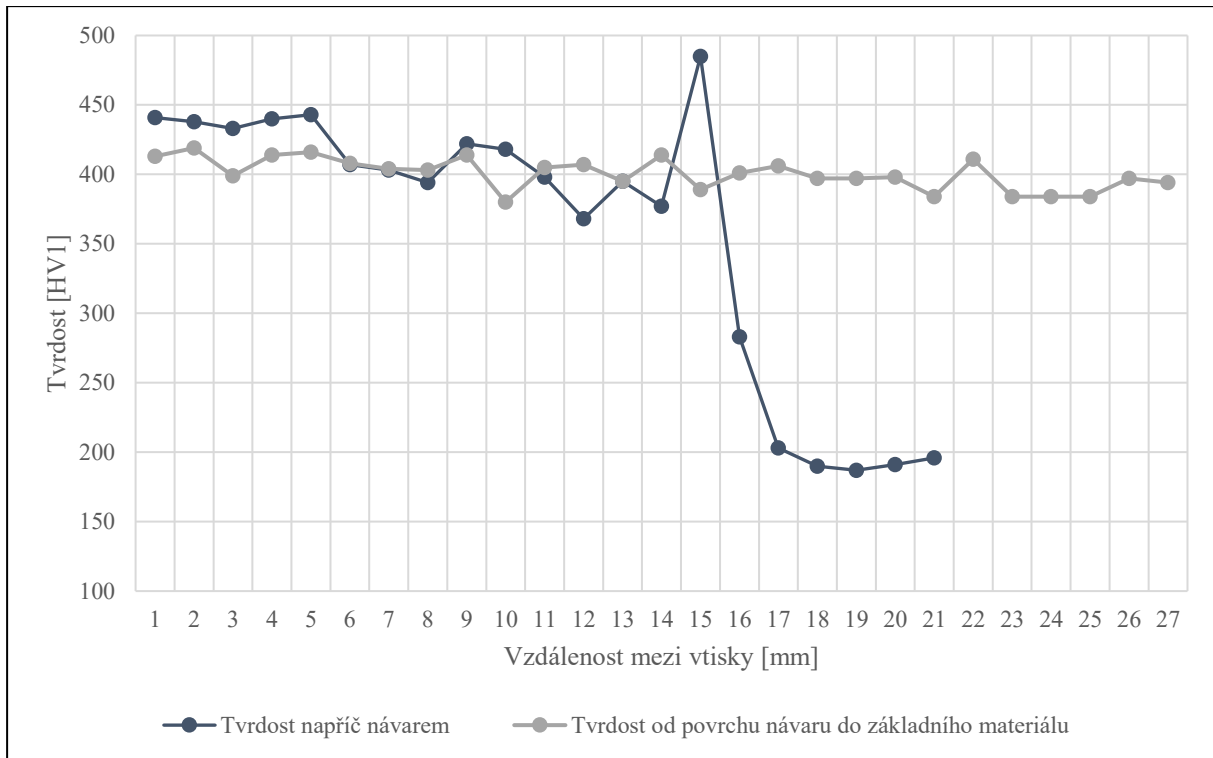
Vzdálenost od povrchu [mm]	Tvrdost od povrchu návaru [HV1]	Tvrdost napříč návarem [HV1]
1	561	536
2	610	552
3	646	575
4	663	571
5	655	576
6	663	570
7	674	579
8	655	578
9	627	581
10	650	595
11	642	587
12	-	586
13	-	584
14	-	576
15	-	585
16	-	590
17	-	595
18	-	582
19	-	602
20	-	592
21	-	594
22	-	587
23	-	597
24	-	592
25	-	597
26	-	595
27	-	590
28	-	598
29	-	594
30	-	595
Průměr	641	584
Minimum	561	536
Maximum	674	602



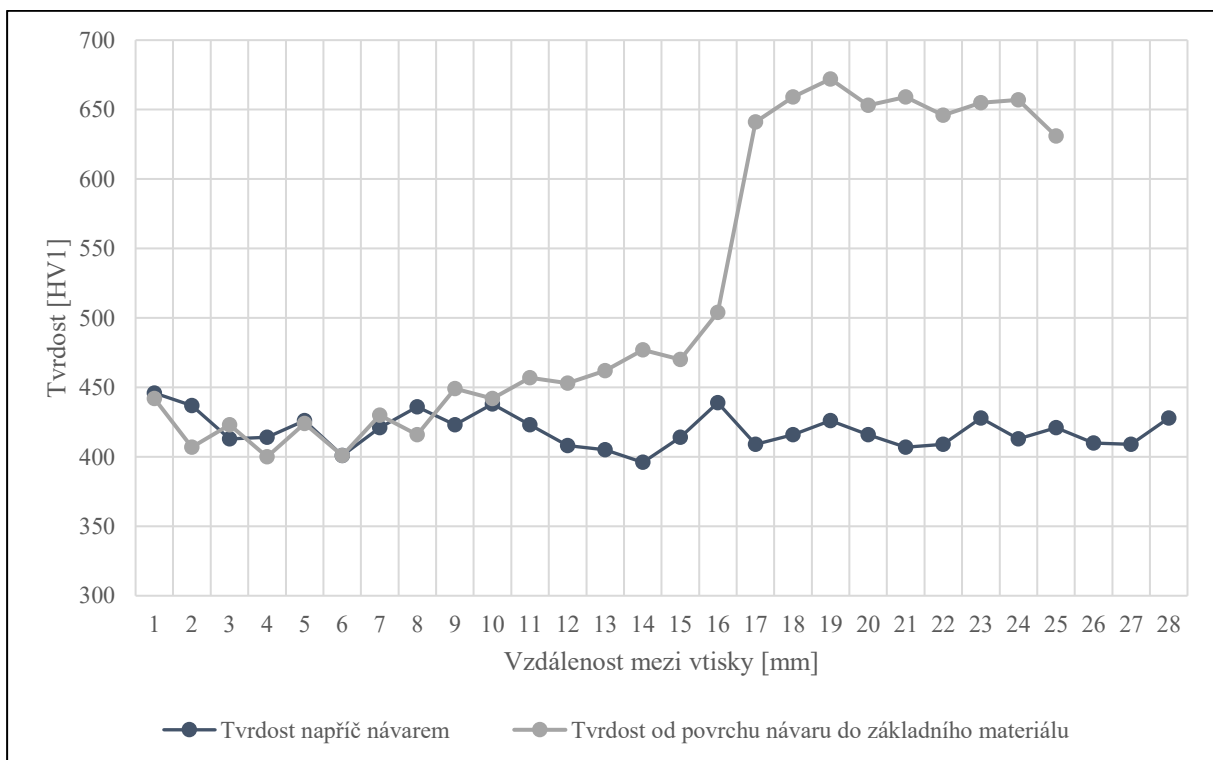
Graf 1: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W1P



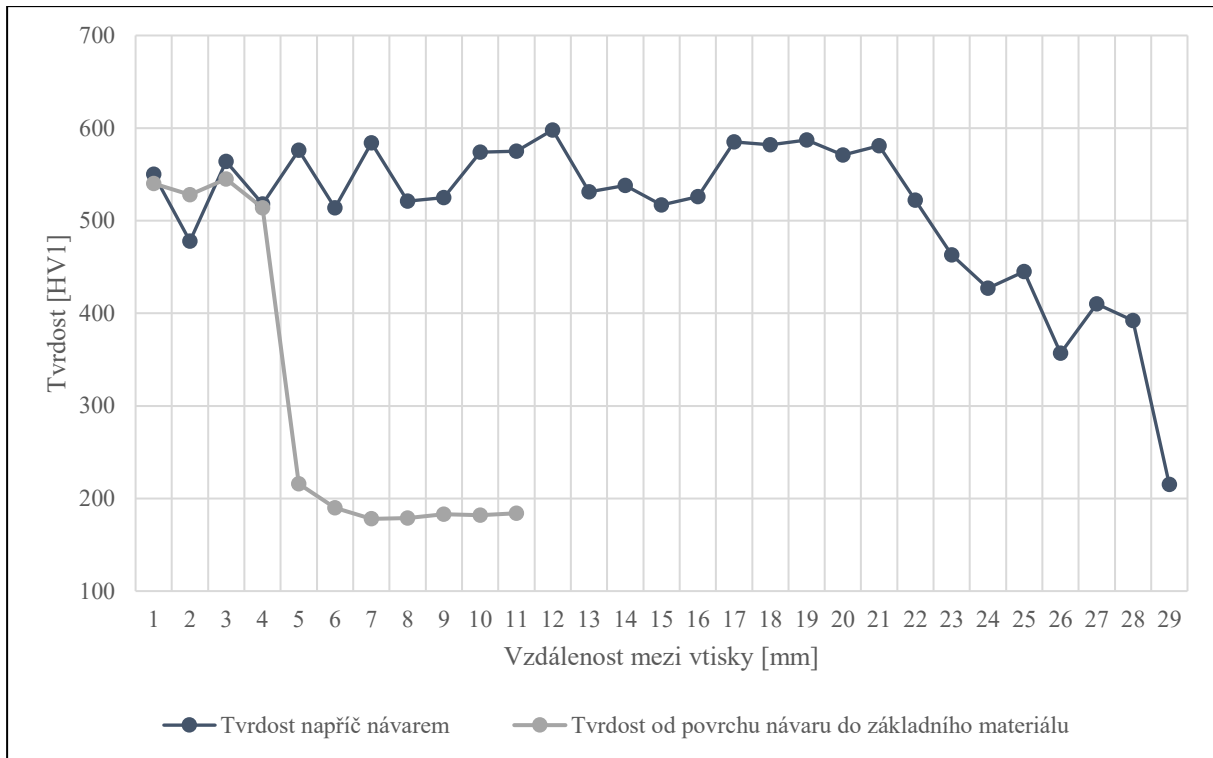
Graf 2: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W1T



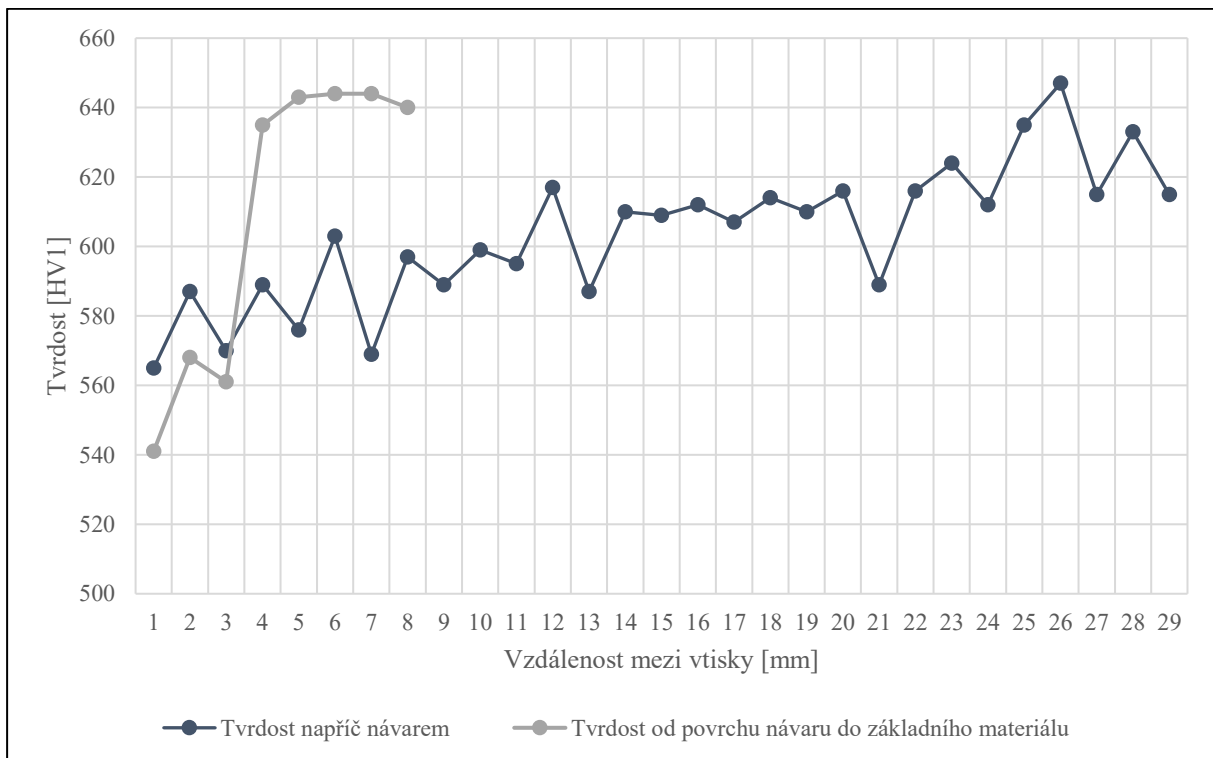
Graf 3: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W2P



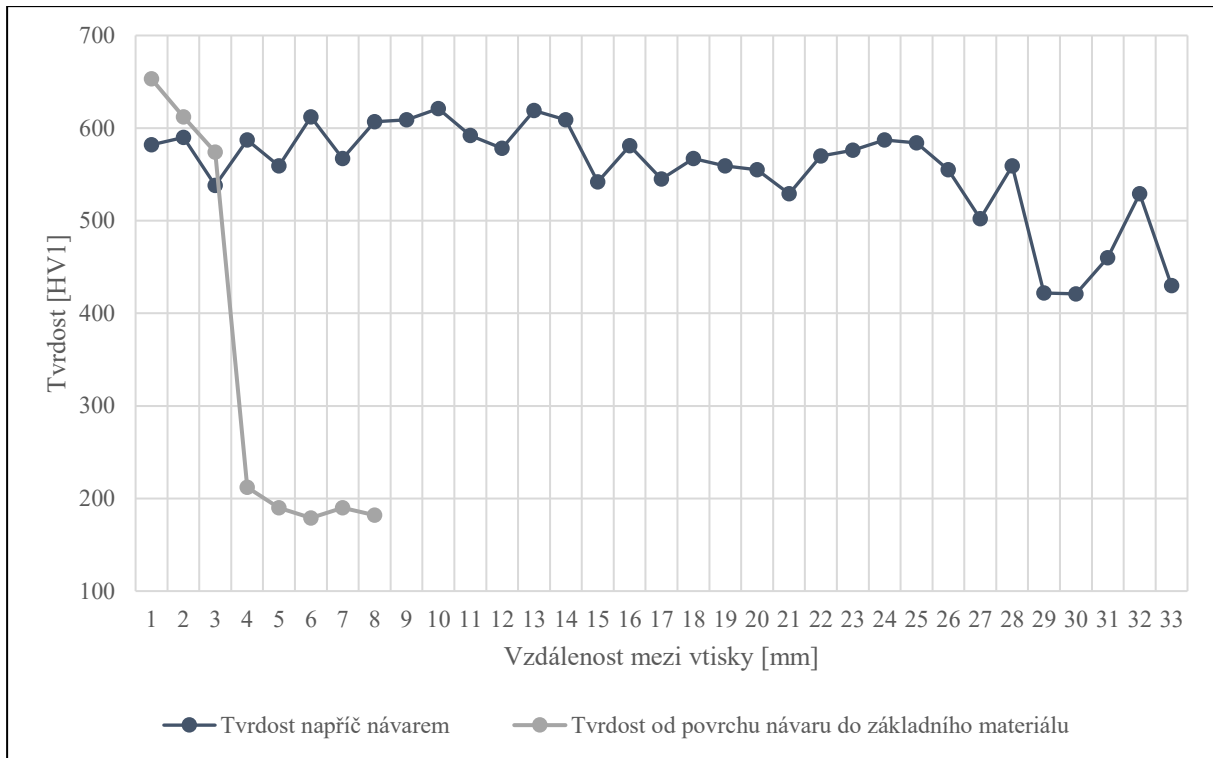
Graf 4: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru W2T



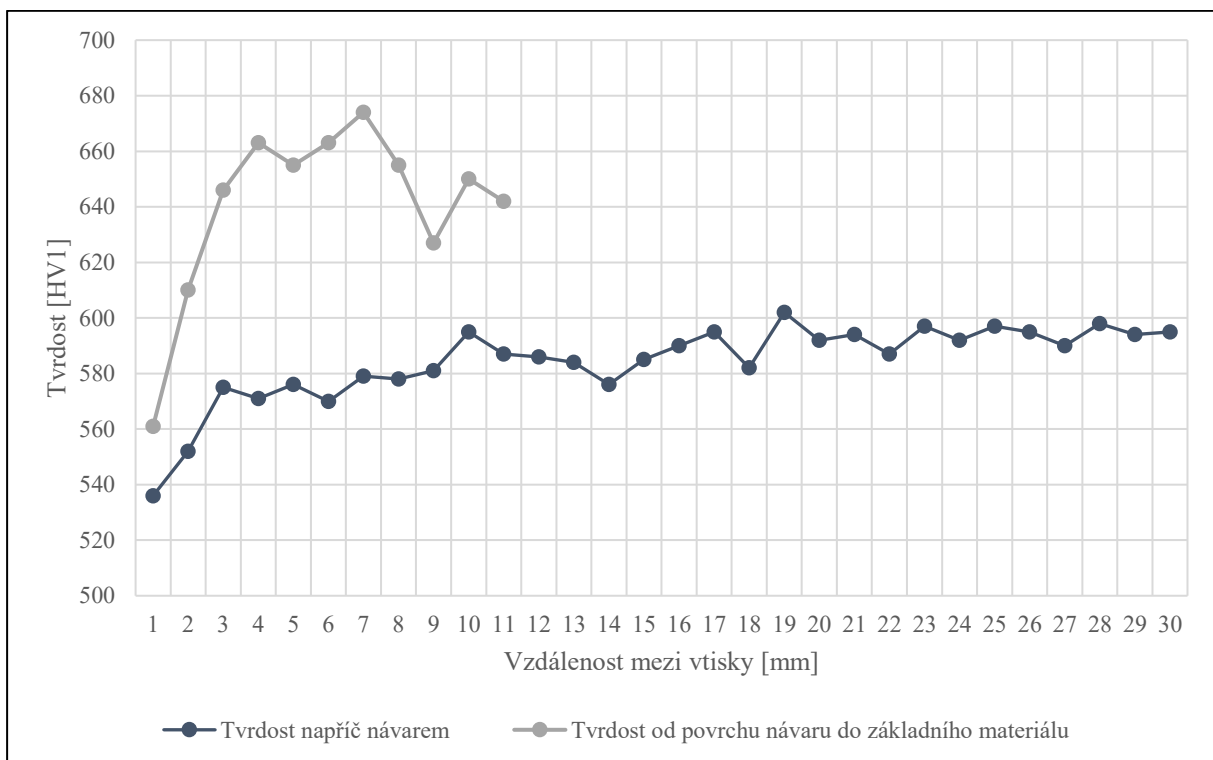
Graf 5: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LH13P



Graf 6: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LH13T



Graf 7: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LC66P



Graf 8: Záznam naměřených hodnot tvrdosti návaru LC66T

4.5 Tribologická zkouška

Zkouška opotřebení návaru byla provedena formou tribologické zkoušky. Zkouška byla provedena na zkušební stroji Tribometr Anton Paar TRB³, který je vyobrazen na obr. Obr. 24: Tribometr Anton Paar TRB³. Test využívá pro opotřebení metodu pin/ball-on-disk s možností měření koeficientu tření. Následné hodnocení dle norem ASTM G99, ASTM G133 a DIN 50324. Pro tento typ zkoušky je možné hodnotit dvěma způsoby. Měřením hmotnostního úbytku nebo měřením objemu odstraněného materiálu, což znamená že je měřena délka stopy a následně vypočítán tvar drážky.



Obr. 24: Tribometr Anton Paar TRB³

Zkouška byla provedena za sucha pro všechny návary i pro tepelně zpracovaný základní materiál H13 označený jako H13T. Pro potřeby tribologické zkoušky byly odebrány nové vzorky ze všech návarů. Vzorky byly vyříznuty z povrchu návaru vodním paprskem, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění návaru během odběru vzorku. Vzorek o rozměru 20 x 20 mm a tloušťce 12 mm byl odebrán z povrchu návaru a následně byl povrch návaru ubroušen na tloušťku 10 mm. Takto připravené vzorky byly zalité do metalografických vzorků a následně broušeny a leštěny stejným způsobem jako připravované vzorky pro metalografické hodnocení v kapitole 4.3. Vzorky byly vyleštěny na 1 μm , aby bylo zajištěno, že naměřená data budou přesná a nedojde k ovlivnění výsledků způsobených vyrovnáváním nerovností na povrchu. Parametry zkoušky byly kulička z materiálu Al_2O_3 o průměru 6 mm, zatížena silou 10 N, počet cyklů 10 000, otáčky motoru 300 rpm, radius 3 mm. Pro vyhodnocení zkoušky byly použity oba uvedené způsoby měření.

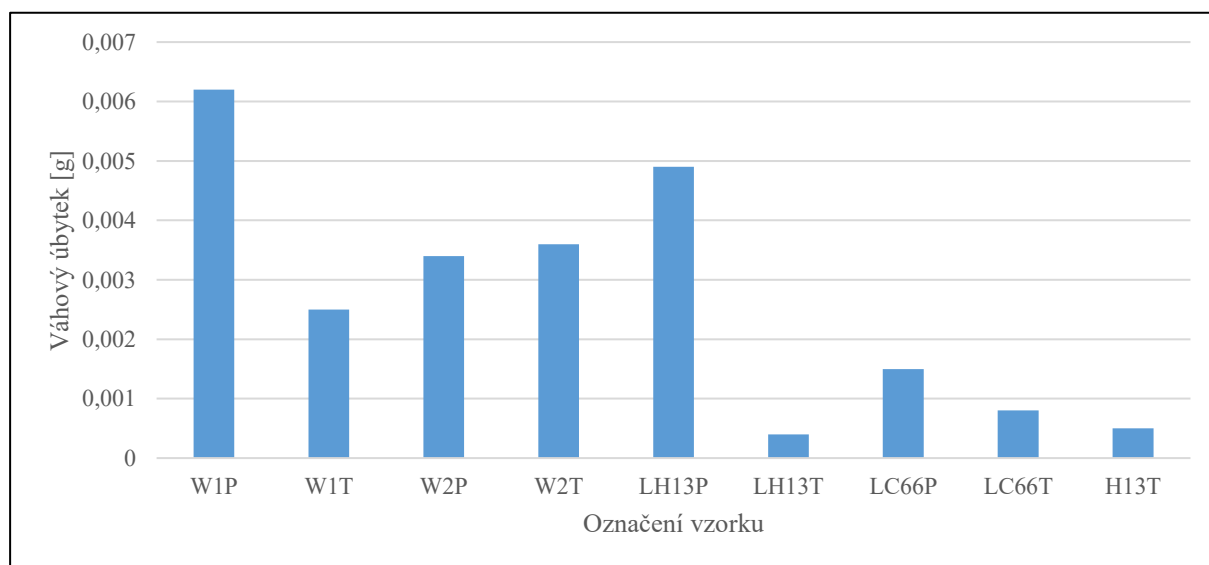
4.5.1 Měření hmotnostního úbytku

Při této metodě bylo provedeno porovnání hmotnosti vzorků před testem a po tribologickém testu. Následně byla odečtena hmotnost po testu od původní hmotnosti vzorku před testem a byl vypočítán hmotnostní úbytek. Aby bylo zajištěno, že vzorek nebude po testu

obsahovat nečistoty, všechny vzorky byly umístěny do ultrazvukové čističky po dobu 5 minut. Naměřené hodnoty a vypočítaný hmotnostní úbytek byl zaznamenán v tabulce Tbl. 19. a Následně byly hmotnostní úbytky porovnány v Graf 9.

Tbl. 19: Naměřené hodnoty hmotnostního úbytku

Označení vzorku	Váha před testem [g]	Váha po testu [g]	Hmotnostní úbytek [g]
W1P	62,5092	62,503	0,0062
W1T	61,1327	61,1302	0,0025
W2P	61,9982	61,9948	0,0034
W2T	59,0262	59,0226	0,0036
LH13P	61,2078	61,2029	0,0049
LH13T	58,7208	58,7204	0,0004
LC66P	60,8306	60,8291	0,0015
LC66T	59,8874	59,8866	0,0008
H13T	55,6296	55,6291	0,0005



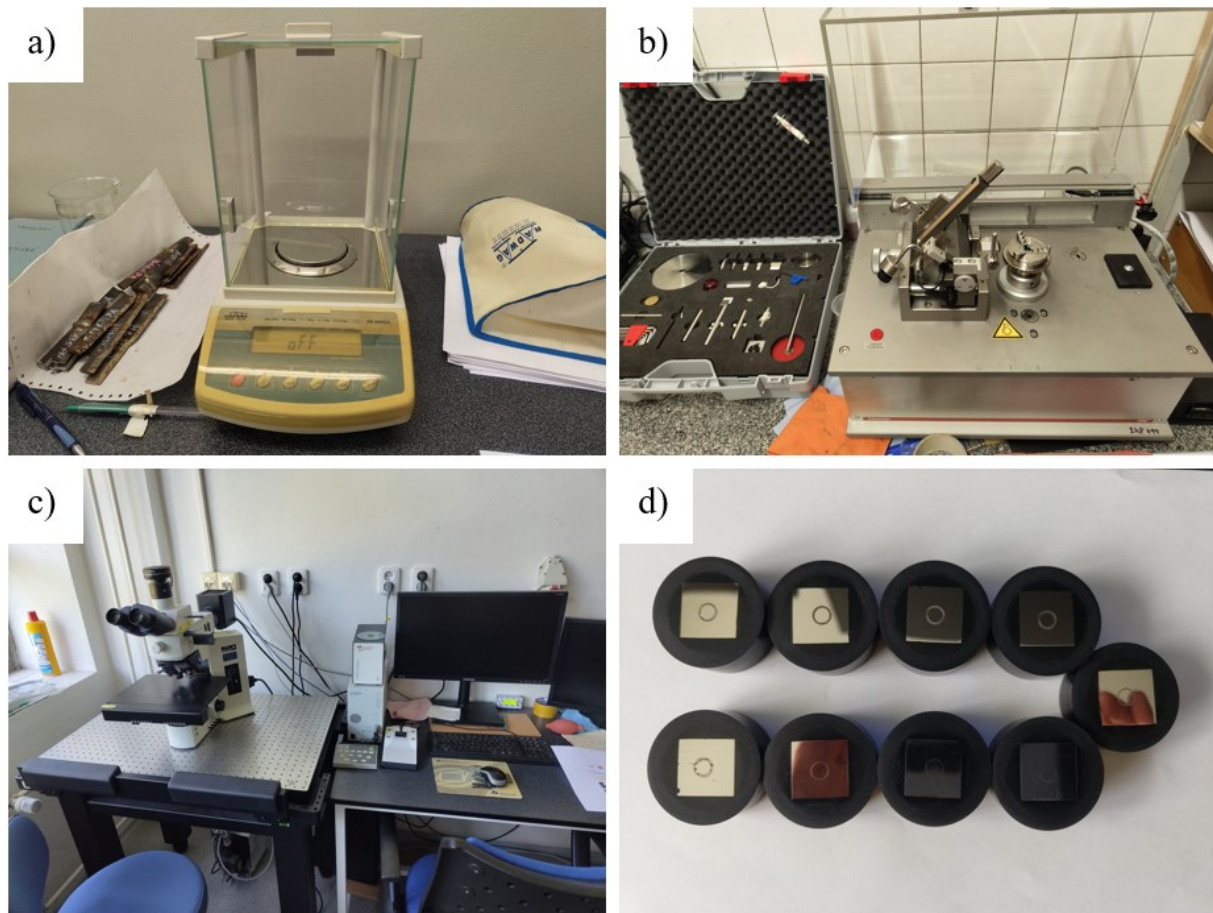
Graf 9: Míra opotřebení vyhodnocená hmotnostním úbytkem

4.5.2 Metoda objemu drážky

Měření šířky drážky probíhalo pod mikroskopem X zobrazeném na obrázku Obr. 25 na straně 63. Měření probíhalo přesným umístěním úsečky do jednotlivých úhlů stopy drážky. Data z měření byly zaznamenány do tabulky Tbl. 20 v μm jako jednotka délky a následně byl vypočítán aritmetický průměr naměřených hodnot a zaznamenán rovněž do tabulky.

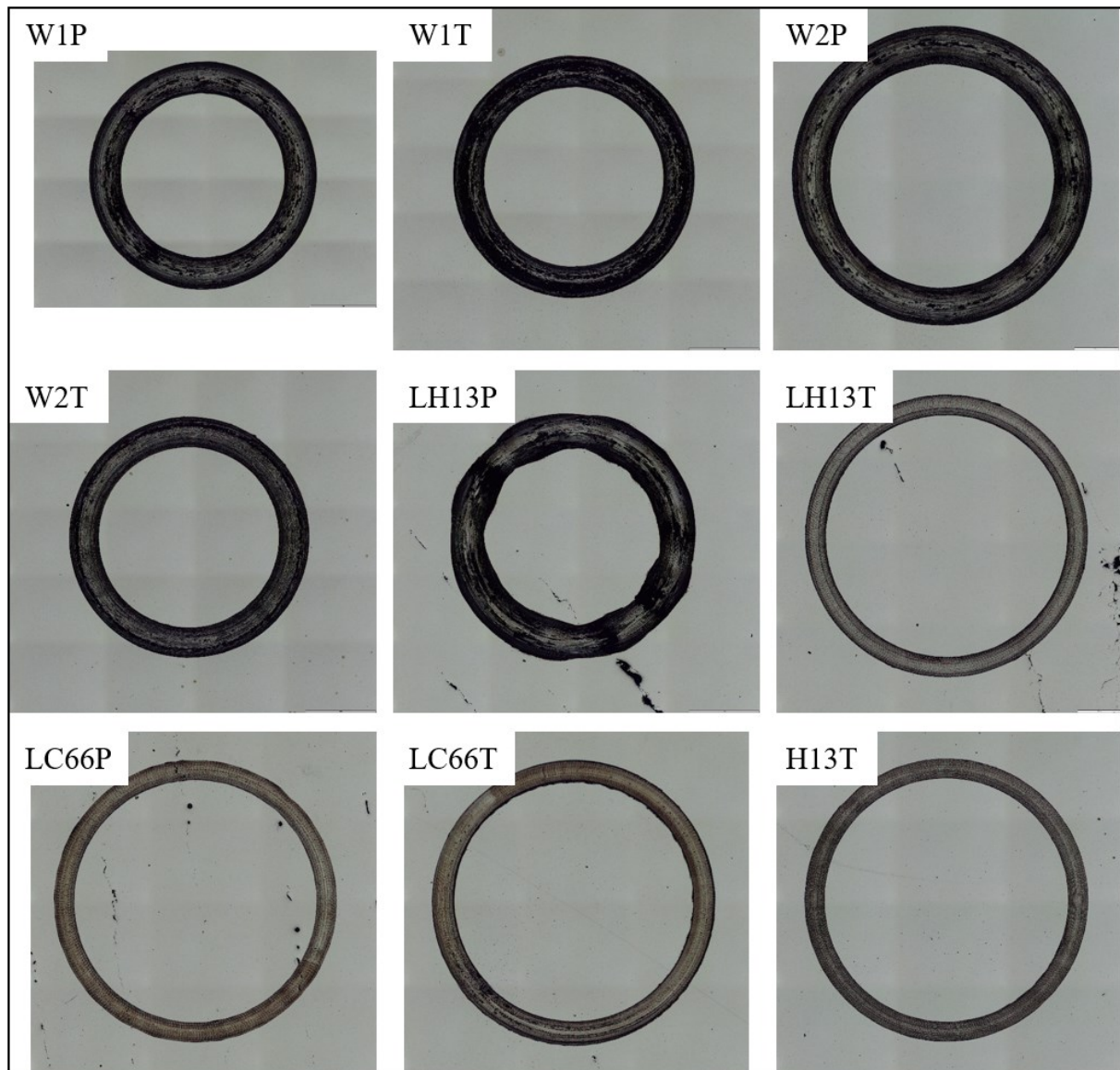
Tbl. 20: Naměřené hodnoty šířky drážky

Označení vzorku	W1P	W1T	W2P	W2T	LH13P	LH13 T	LC66 P	LC66 T	H13T
Úhel měření 45 [°]	980,68	899,43	864,07	859,64	1173,61	465,92	451,25	555,87	454,17
Úhel měření 90 [°]	974,91	891,54	861,87	876,67	1204,78	465,51	454,97	527,63	455,32
Úhel měření 135 [°]	981,27	893,65	861,44	864,02	1090,93	463,48	460,01	496,94	451,17
Úhel měření 180 [°]	971,87	897,87	881,17	871,79	1129,23	467,29	473,35	504,41	458,53
Úhel měření 225 [°]	964,24	907,13	875,79	872,98	1032,66	470,44	448,22	519,03	448,21
Úhel měření 270 [°]	989,43	886,41	893,59	854,1	1137,7	468,74	468,62	503,35	450,55
Úhel měření 315 [°]	977,83	883,55	873,01	850,72	956,13	473,28	463,41	511,64	445,61
Úhel měření 360 [°]	969,14	883,27	871,44	846,77	1133,03	471,3	463,45	546,32	459,84
Průměrná šířka drážky [μm]	976,17	892,86	872,80	862,09	1107,26	468,25	460,41	520,65	452,93



Obr. 25: a) váha, b) Tribometr, c) mikroskop, d) vzorky po zkoušce

Následně bylo provedeno skládání obrazu snímků částí stop jednotlivých vzorků po tesu a tyto složené obrazy byly zobrazeny na obrázku Obr. 26.



Obr. 26: Skládané obrazy drážky

Následně byl vypočítán objem drážky dle vzorce.

$$V = 2 * \pi * (\text{poloměr drážky, mm}) * (\text{obsah drážky, mm}^2)$$

Výsledek byl použit pro další výpočet. Jednalo se o výsledek míry opotřebení známý jako Wear rate, který byl vypočítán dle vzorce a oba výsledky byly zapsány do tabulky Tbl. 21.

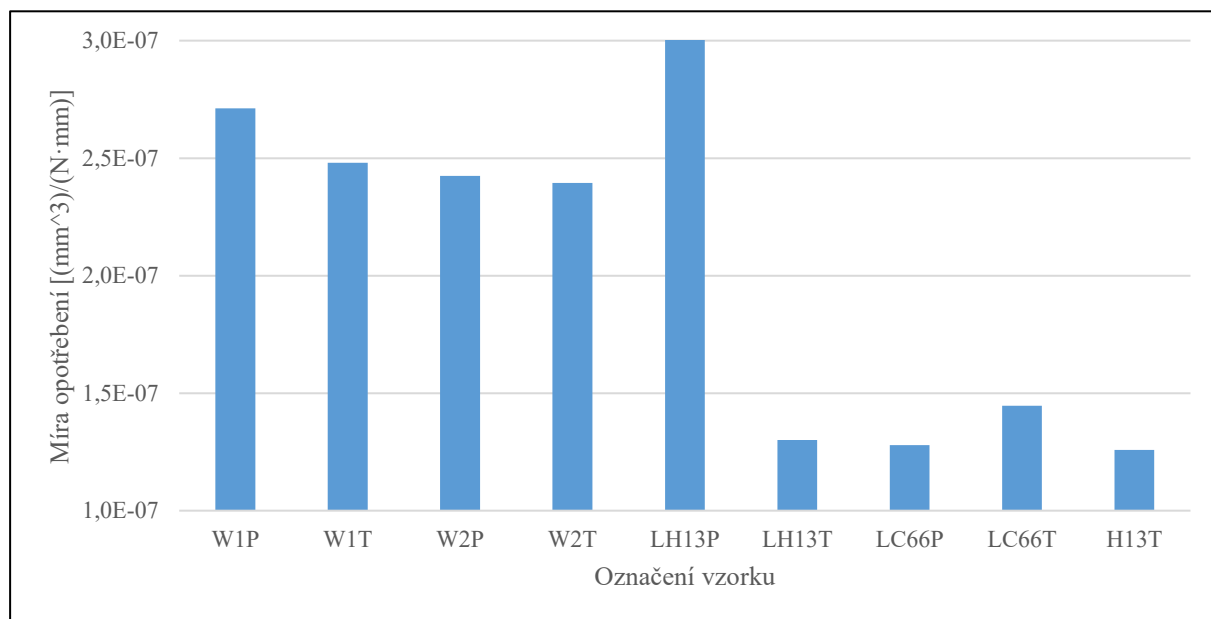
$$W = \text{Wear rate} = \frac{V}{F * (\text{Dráha, mm})}$$

Menší hodnota opotřebení W signalizuje menší míru opotřebení vzorku, a tedy zkoušený materiál lépe odolává vůči opotřebení.

Tbl. 21: Vypočítané hodnoty objemu a míry opotřebení

Označení vzorku	V [mm ³]	W [(mm ³)/(N·mm)]
W1P	0,511122071	2,712E-07
W1T	0,467498439	2,480E-07
W2P	0,456995702	2,424E-07
W2T	0,451387305	2,395E-07
LH13P	0,579759326	3,076E-07
LH13T	0,245172509	1,301E-07
LC66P	0,241070112	1,279E-07
LC66T	0,272611048	1,446E-07
H13T	0,237150975	1,258E-07

Zaznamenané míry opotřebení byly porovnány v Graf 10.



Graf 10: Záznam vypočítaných hodnot míry opotřebení

4.5.3 Koeficient tření

Koeficienty tření byl zaznamenan v grafické části jednotlivých příloh červenou barvou na obrázcích Obr. 28 až Obr. 35 na straně 77 až 85 a jeho průměrná hodnota byla zaznamenaná do tabulky Tbl. 22.

Tbl. 22: Průměrné hodnoty koeficientu tření

Označení vzorku	Průměrná hodnota koeficientu tření μ
W1P	0,407
W1T	0,400
W2P	0,378
W2T	0,354
LH13P	0,429
LH13T	0,494
LC66P	0,316
LC66T	0,416
H13T	0,382

5 Diskuse výsledků

Z teoretické části vyplívá, že formy jsou široce používány pro hromadnou výrobu plastových dílů, součástek odlévaných pod tlakem, plechových dílů, tvarových dílů a dalších kovaných výrobků. Vady forem jsou způsobeny především plastickou deformací, opotřebením a kombinací obojího. Kombinace plastických deformací a opotřebením vede k různým povrchovým vadám, jako jsou trhliny, rýhy, škrábance a nežádoucí tupé hrany.

Souhrnně lze také uvést, že minimální tepelně ovlivněné zóny a nízké deformace lze zajistit nejlépe pomocí metod založených na laseru. Navařování laserem je nejšetrnější způsob opravy forem. Pomocí laseru můžeme vytvořit hluboký a úzký svar. Jelikož je velké množství materiálů pro výrobu i opravy forem, podrobný rozbor všech materiálů nebyl vytvořen, protože by přesahoval rozsah diplomové práce.

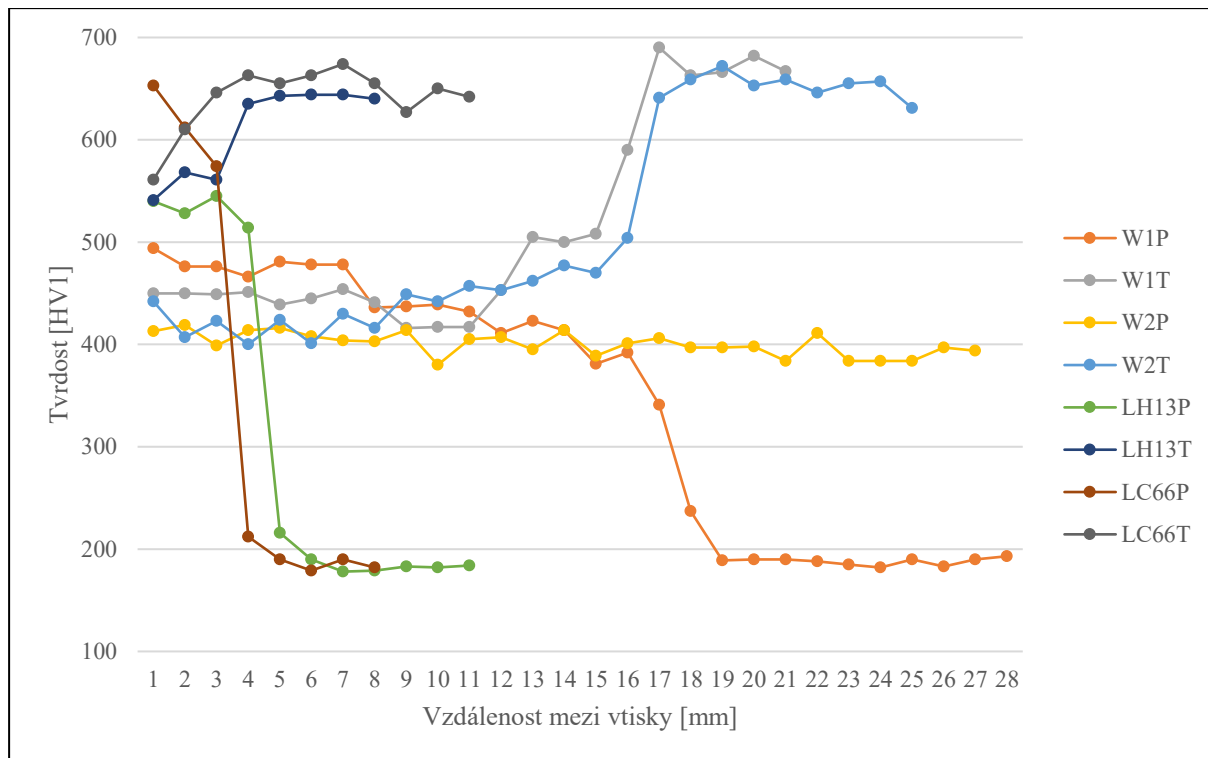
V experimentálním programu bylo provedeno navaření 4 různých návarů na povrch základního materiálu z nástrojové oceli AISI H13 o rozměru 100 x 100 x 50 mm dodané ve stavu vyžítaném naměkko, který plně nahrazoval opravovanou formu z tohoto materiálu. Návary byly provedeny různými přídavnými materiály a různými moderními technologiemi, které byly vybrány jako náhrada za ruční technologii TIG, která se dříve nejčastěji používala k opravám forem a nástrojů pro práci za tepla. Jako přídavný materiál byly zvoleny vhodné zástupci z oblasti nástrojových materiálů vhodných pro práci za tepla. Byl vybrán drát v materiálu Capilla 733 a tímto materiálem byly zhotoveny oba vytvořené návary metodou WAAM. Pro vytvoření návarů touto metodou byly optimalizovány parametry navařování a následně vytvořeny dva návary za použití stejných parametrů. Návar W1 a W2 se od sebe navzájem liší pouze v orientaci skládání jednotlivých vrstev návaru na sebe. Dále byly zvoleny další přídavné materiály v podobě prášku pro laserové navařování metodou LMD. Prvním zástupcem byl prášek stejného materiálu jako byla vytvořená forma tedy z materiálu H13. Dalším zvoleným zástupcem byla náhrada materiálu H13 pro práci za tepla, kterou byla zvolena Capilla 66. Parametry procesu navařování metodou LMD vycházely z již dříve použitých parametrů v diplomových pracích Ing. Vladyslava Arseniuka Laserové navařování nástrojových ocelí a Ing. Pavla Kubovce Porovnání vlastností kovových dílů vyrobených různými aditivními technologiemi. Následně byla provedena odlišná optimalizace parametrů procesu navařování za použití přídavných materiálů H13 a Capilla 66. Následně byly vytvořeny návary LH13 a LC66. Po navaření vrstev návarů metodou LMD bylo zjištěno, že optimalizace procesu navařování neproběhla dostatečně. Během navařování dalších housenek v každé vrstvě zůstávaly zbytky prášku na základním materiálu a při navařování dalších vrstev zůstávaly zbytky prášku také na již navařeném materiálu. Z tohoto důvodu se měnila výška návaru v průběhu navařování. Tento fakt je viditelný na makrosnímkách návarů vytvořených metodou LMD.

Vytvořené návary byly rozděleny na polovinu a následně bylo provedeno tepelné zpracování všech návarů označených velkým písmenem T. Tepelné zpracování bylo navrženo a následně provedeno tak, aby vyhovovalo všem použitým materiálům současně. Tento návrh byl proveden z důvodu dlouhé doby kalení a popouštění v peci, čím byla zajištěna úspora energií a vytíženosti pece během tepelného zpracování. Zušlechtění proběhlo v peci v ochranné atmosféře Argonu. Při návrhu tepelného zpracování nástrojové oceli H13 se zohlednily parametry tepelného zpracování Ing. Ondřeje Kácy, které uvedl do své diplomové práce Tepelné zpracování aditivně vyrobených dílů z nástrojové oceli AISI H13, jelikož zde autor práce docílil nejvyšší tvrdosti při popouštěcí teplotě 500 °C a teplotu předehřevu a výdrže stanovil 750 °C pro ocel H13, které byla také použita.

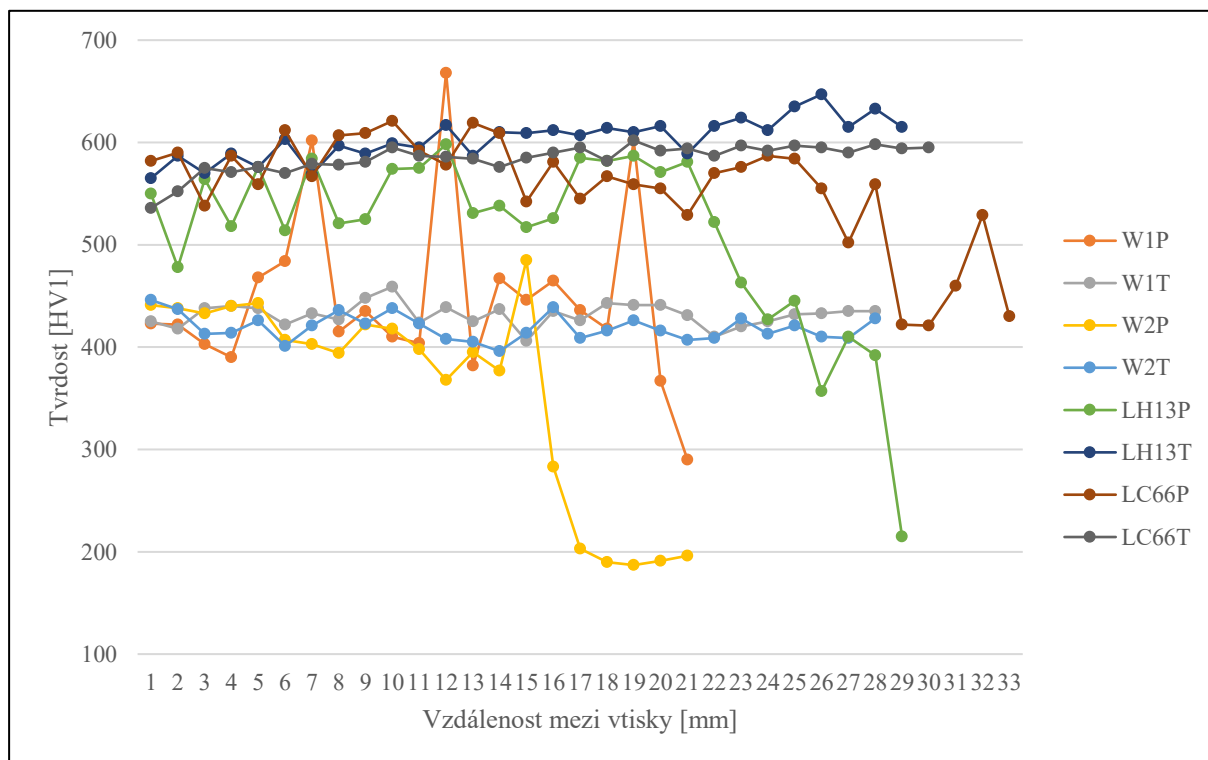
Metalografické vyhodnocení bylo na světelném mikroskopu a bylo provedeno na všech navařených vzorcích v zušlechťeném a nezušlechťeném stavu. Nejprve byl zkoumán základní materiál H13P v oblastech bez tepelného ovlivnění. Jelikož byl materiál dodán vyžhán naměkko, snímky byly vyhodnoceny jako feriticko perlitická struktura. V místě tepelného ovlivnění byla struktura vyhodnocena opět jako feriticko perlitická, nicméně zde nastala změna. Základní materiál se homogenizoval a nastalo hrubnutí zrna. Vzorek H13T, což byl vzorek základního materiálu po tepelném zpracování, disponoval martenzitickou strukturou. Rozdíl na snímcích udává rozdílnou míru popuštění mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí. Vzorky W1 a W2 vytvořeny metodou WAAM byly vyhodnoceny jako minimálně porézní, což bylo patrné z makrosnímků návarů. Přechodová oblast je u těchto návarů spálená leptadlem, nicméně v přechodových oblastech návarů a základních materiálů nebyly nalezeny žádné zjevné nečistosti. Struktura těchto návarů byla vyhodnocena jako martenziticko karbidická s velkým zastoupením viditelných karbidů, které na snímcích mají bílou barvu a drobné tmavé ohraničení pozorované ve zvětšení 500x a 1000x. Ve struktuře se vyskytovaly žluto oranžové částice, které byly vyhodnoceny jako nitridy titanu. Odlišnost mezi orientací zrna způsobená směrem chlazení na snímcích návarů W1P a W2P byla způsobena volbou vrstvy foceně struktury návaru W2P. Při pozorování mikroskopu vrstev stejně orientovaných byla pozorována stejná orientace zrn jako u návaru W1P. Na makrosnímcích W1P a W2P je viditelná více zakalená první vrstva návaru, jelikož byl návar prováděn na studený základní materiál o pokojové teplotě. Tepelně zpracované návary W1T a W2T byly vyhodnoceny také jako martenziticko karbidické. U těchto návarů se po tepelném zpracování rozpustily karbidy na hranicích zrn a bylo vytvořeno velké množství malých karbidů a také došlo k homogenizaci návaru, což bylo vyhodnoceno jako příznivější změna z hlediska struktury. Nitridy titanu se v těchto tepelně zpracovaných návarech také hojně vyskytují. Větší karbidy se při tepelném zpracování nestihly rozpustit a nadále se ve struktuře vyskytují. Makrosnímky LMD návarů byly vyhodnoceny jako nadměrně porézní. Ze snímků je patrné že nárůst množství přídavného materiálu v podobě prášku byl negativní. Také se zde vyskytují neprůvary mezi housenkami jednotlivých vrstev způsobené velkým rozestupem mezi navařovanými housenkami, ale je zde patrná menší tepelně ovlivněná oblast způsobená menším vneseným teplem do základního materiálu. Návar LH13P měl jemnozrnnou strukturu i po navaření a v martenziticko karbidické struktuře vyskytují jen malé karbidy. Po tepelném zpracování návar LH13T zůstala struktura návaru jemnozrnná. Mikrostruktury LC66 mají nezvyklou podobu po naleptání. Struktura byla vyhodnocena také jako velmi jemná martenziticko karbidická až sorbitická s velmi jemnou morfologií. Tmavé i bílé segmenty byly vyhodnoceny jako martenzit s drobnými bílými karbidy s tenkým černým ohraničením. Rozdíl mezi vzorky LC66P a LC66T je v jemnosti struktury pozorované ve všech zdokumentovaných zvětšeních. Po tepelném zpracování došlo ze zjemnění zrna.

Pro potvrzení tohoto vyhodnocení struktury LC66 by bylo dobré další pozorování této struktury pod větším zvětšením za pomoci elektronového mikroskopu, popřípadě vyzkoušet reakci tohoto materiálu na jinou formu leptadel a následného dalšího pozorování pod světelnou mikroskopií.

Tvrdoost základního materiálu a návarů byla měřena pásmy tvrdosti od povrchu návaru do materiálu základního. Druhé pásmo bylo provedeno napříč návarem a tvrdosti byla měřena dle Vickrese HV1. Všechny naměřené hodnoty byly znovu zaznamenány do Graf 11 a Graf 12.



Graf 11: Porovnání tvrdostí vzorků měřených od povrchu do základního materiálu



Graf 12: Porovnání tvrdostí vzorků měřených napříč návarem

U všech tepelně zpracovaných vzorků došlo ke ustálení tvrdosti. Tvrdost po tepelném zpracování je stálá a nenastávají velké výkmity odchylovících se hodnot. Porovnáním výsledků tvrdost návarů W1P a W2P se dokázalo, že správnou volbou strategie navařování můžeme zlepšit mechanické vlastnosti návaru a tím omezit nutnost tepelného zpracování.

Z naměřených hodnot je patrné, že návary H13 je nutné tepelně zpracovávat, jelikož v tepelně nezpracovaném stavu je tvrdost nestálá a zároveň nižší. Tepelné zpracování výrazně pomohlo zlepšit mechanické vlastnosti návaru oceli H13. Capilla 66 má vynikající tvrdost i bez zušlechťení a zároveň je tvrdost konstantní po celé délce návaru. Výkyvy v tvrdosti návaru LC66P byly způsobeny nadměrnou pórovitostí ve vyšší části návaru. Capilla 66 se tepelným zpracováním minimálně popustí a dobře snáší tepelné ovlivnění při návaru více vrstev, což je patrné z průběhu tvrdosti návaru LC66P od povrchu návaru do základního materiálu. Capilla 66 má vynikající tvrdost i bez tepelného zpracování, tedy návar z materiálu není zapotřebí tepelně zpracovávat. Pokles tvrdosti LMD návarů v průběhu tvrdosti napříč návarem byl způsoben navýšením tloušťky návaru. Pro vyšší část návaru byla tvrdost nižší a nastávali větší výkyvy v tvrdosti. Nejvyšší průměrné hodnoty tvrdosti 604 HV1 dosáhl napříč návarem vzorek LH13T. Pro návar LC66P byla naměřena průměrná tvrdost 556 HV1, což odpovídá předepsané tvrdosti po navaření 50 až 55 HRC z materiálového listu této oceli a pro návar LC66T byla naměřena průměrná tvrdost 584 HV1. Naměřená hodnota opět odpovídá uvedeným hodnotám 53 až 56 HRC z materiálového listu. Průměrné hodnoty návarů vytvořených metodou WAAM neodpovídají předepsané tvrdosti z materiálového listu 45 až 50 HRC. Naměřené průměrné hodnoty 342 HV1 a 358 HV1 odpovídají rozmezí 34 až 38 HRC, zatímco po tepelném zpracování se průměrná hodnota naměřené tvrdosti vyšplhala na 432 HV1 a 419 HV1, což téměř splňuje uvedený rozsah a odpovídá 42 až 44 HRC. Výsledné hodnoty tvrdosti potvrzují předchozí naměřené hodnoty Ing. Vladyslava Arseniuka z jeho diplomové práce a naměřené hodnoty se shodují.

Z tribobogické zkoušky bylo zjištěno, že největší odolnost proti opotřebení má vzorek H13T, který dosáhl opotřebení $1,258 \cdot 10^{-7}$, dále LC66P, který dosáhl opotřebení $1,279 \cdot 10^{-7}$ a LH13T, který dosáhl opotřebení $1,301 \cdot 10^{-7}$. Nejhorší výsledky odolnosti proti opotřebení byl naměřen pro vzorek LH13P, který dosáhl opotřebení $3,076 \cdot 10^{-7}$. Za přesnější hodnoty lze považovat výsledky z vyhodnocení pomocí odebraného objemu při měření šířky drážky, jelikož u metody měření váhového úbytku může být váha ovlivněná zatečením lihu do pórů materiálu při čištění a omývání vzorků. Vzorek H13T byl do testu přidán pro porovnání základního materiálu H13 v tepelně zpracovaném stavu pro porovnání s vytvořenými návary. I přesto že mají návary vytvořené metodou LMD zpravidla menší tvrdost než vzorek základního materiálu H13T, bylo dosaženo podobné odolnosti na otěr pro vzorky vytvořené metodou LMD kromě vzorku LH13P, který měl výrazně horší odolnost na otěr. Návarům vytvořených metodou WAAM pomohlo tepelné zpracování zvýšit odolnost na otěr. Strategie navařování měla také pozitivní dopad na odolnosti proti otěru. Nejlepší naměřený koeficient tření μ docílil vzorek LC66P, který byl 0,316, zatímco největší koeficient tření byl naměřen pro vzorek LH13T, který byl 0,494.

Návary z oceli Capilla 66 byly vyhodnoceny jako lepší a odolnější materiál pro práci za tepla. Navíc bylo ověřeno, že není nutné tento materiál dále tepelně zpracovávat.

Vliv chybné optimalizace procesu navařování metodou LDM měl dopad na kvalitu návaru. V oblasti nárůstu návaru bylo zjištěno nadměrné množství vad způsobené nedostatečným výkonem na jednotku plochy s nadměrným množstvím prášku v dané oblasti. V této oblasti se také projevil větší výkyvy tvrdosti a tvrdost v těchto oblastech byla menší z důvodu většího odběru tepla do okolního materiálu. Doporučením pro odstranění problému se zbytkovým práškem je zavedení další trysky s ochranným plynem argon, která pomůže s odfukem přebytečného prášku před navařováním další housenky, jelikož samotný odfuk navařovací hlavy nebyl dostatečný.

Naměřená a vyhodnocená data získaná z praktické části diplomové práce jsou zcela v souladu s naměřenými daty předchůdců Ing. Arseniuka, Ing. Kácý a Ing. Kubovce.

Předchůdce se ve svých pracích zabývali návary a tištěnými díly ze stejných materiálů Capilla 66 a H13 a následným vyhodnocením prostřednictvím materiálových zkoušek nebo tepelným zpracováním.

Definované cíle diplomové práce jako vytvoření navařovacího pracoviště a následné zhodnocení využitelnosti v rámci výzkumných cílů katedry byly splněny. Parametrický program pro zvýšení efektivity práce byl vytvořen a následně jeho pomocí byly vytvořeny návary na tomto pracovišti. Zároveň byly vytvořeny návary metodou LMD. Následně byly všechny vytvořené návary zkoušeny na tvrdost, otěruvzdornost a metalograficky vyhodnoceny a tyto zhotovené návary vzájemně mezi sebou porovnány. Všechny definované cíle práce byly splněny v plném rozsahu.

Přínosy této diplomové práce vyplývají přímo z definovaných cílů práce. Bylo vytvořeno a následně otestováno pracoviště pro navařování metodou WAAM. Byly ověřeny vlastnosti návarů a stanoveny další možnosti bádání v oblasti materiálu Capilla 66.

6 Závěr

Problematiku optimalizace procesů navařování a 3D tisku v souvislosti se životností forem je vhodné dále zkoumat, jelikož z ekonomického hlediska jsou opravy forem zásadní a pro průmysl jsou tyto nástroje pro údržbu a opravy nepostradatelné. Formy jsou široce využívány v hromadné výrobě různých dílů. Vady forem jsou způsobeny plastickou deformací, opotřebením nebo kombinací obojího, což vede k povrchovým vadám, jako jsou trhliny, rýhy a škrábance.

Metody založené na laseru, zejména laserové navařování, jsou nejšetrnějším způsobem opravy forem díky malému vnesenému teplu do základního materiálu, což minimalizuje deformace, vnitřní pnutí a velikost tepelně ovlivněné oblasti.

V experimentálním programu byly testovány různé navařovací materiály a technologie. Návary W1 a W2 metodou WAAM vykazovaly minimální poréznost a martenziticko-karbidickou strukturu s velkým zastoupením karbidů a nitridů titanu. Tepelné zpracování vedlo k homogenizaci návarů a rozpouštění karbidů, což zlepšilo jejich strukturu. Návary LH13 a LC66 metodou LMD vykazovaly problémy s porézností a neprůvary mezi housenkami. Tepelné zpracování zajistilo jemnozrnnou strukturu návarů.

Tepelné zpracování vedlo ke sjednocení tvrdosti návarů. Návar Capilla 66 vykazoval vynikající tvrdost i bez tepelného zpracování, zatímco návary H13 potřebovaly tepelné zpracování pro dosažení požadované tvrdosti.

Vzorky H13T, LC66P a LH13T vykazovaly nejlepší odolnost proti opotřebení. Nejhorší odolnost byla zaznamenána u vzorku LH13P. Optimální strategie navařování a tepelné zpracování pozitivně ovlivnily odolnost proti opotřebení.

Chybná optimalizace procesu navařování metodou LMD negativně ovlivnila tvrdost a kvalitu návarů. Bylo doporučeno zavedení další trysky ochranným plynem argonem pro odstranění přebytečného prášku před navařováním další housenky.

Materiál Capilla 66 se ukázal jako lepší volba pro práci za tepla díky své vysoké tvrdosti a odolnosti bez potřeby dalšího tepelného zpracování. Laserové navařování metodou LMD bylo vyhodnoceno jako vhodná metoda opravy forem, ačkoli optimalizace procesních parametrů je klíčová pro dosažení kvalitních výsledků. Navařování metodou WAAM vylo vyhodnoceno jako efektivnější metoda oprav, kvůli své produktivitě.

Definované cíle diplomové práce byly splněny v plném rozsahu.

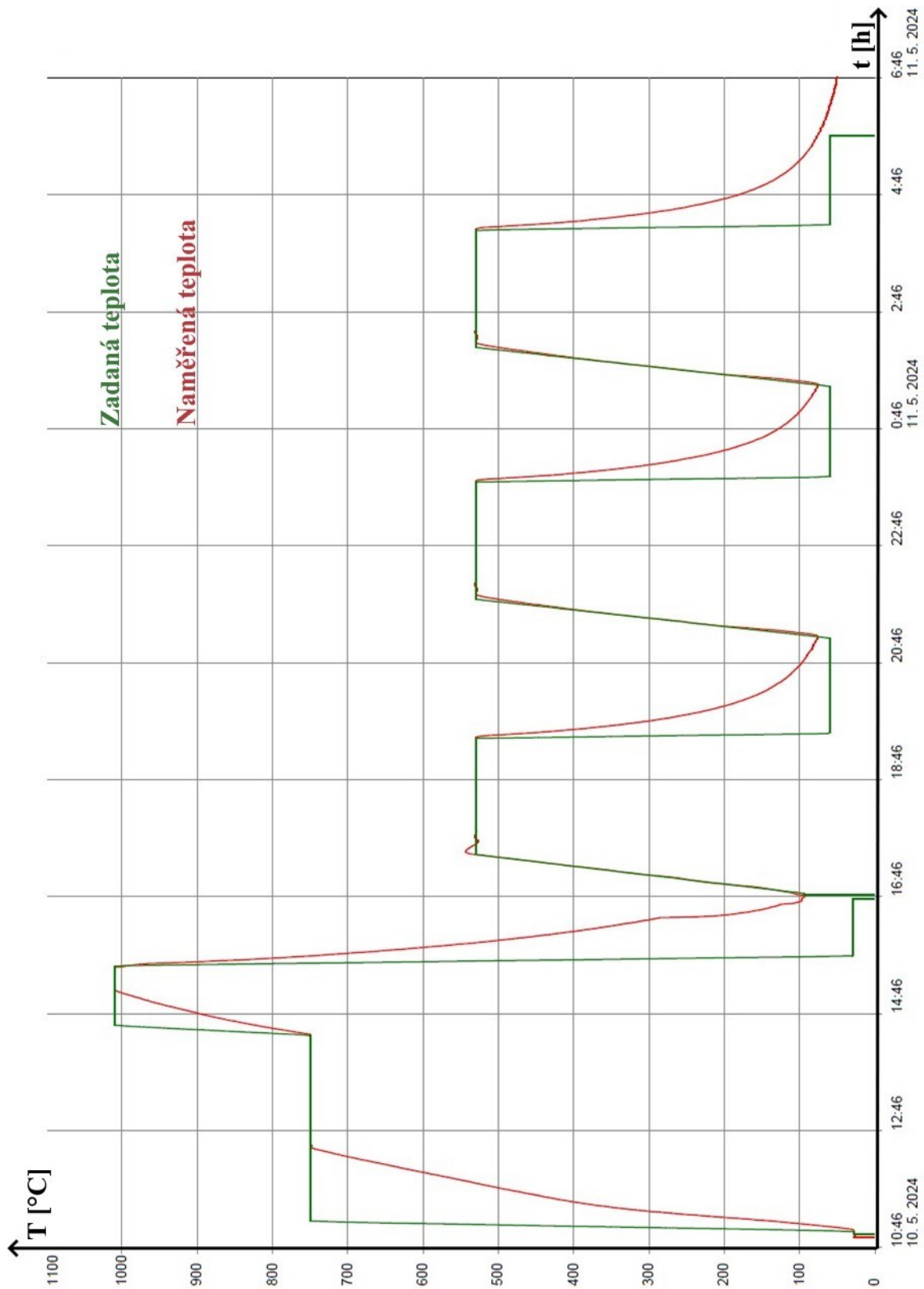
Seznam použitých zdrojů

- [1] Lin, Jia Yi, et al. "Research on Additive Manufacturing Technology in the Field of Mold Repair." *Materials Science Forum*, vol. 990, Trans Tech Publications, Ltd., May 2020, pp. 61–66. Crossref, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.990.61>.
- [2] Yongkang Zhang, Dongsheng Wu, Dihui Xie, Hebin Wu, Chaohui Lin, Qi Zhang, Jinlong Ke, Guibin Tan, Ninshu Ma, Yanbing Guo, Novel hybrid laser forging and arc additive repairing process for improving component performances, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 212, 2023, 124289, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124289>
- [3] Liu, Y. K., Zhang, Y. M., and Kvidahl, L. 2014. Skilled human welder intelligence modeling and control: part 1 – modeling. *Welding Journal*, 93(5).
- [4] Kovacevic, R., and Zhang, Y. M. 1995. Machine vision recognition of weld pool in gas tungsten arc welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 209(22), 141-152.
- [5] Guo, B., Shi, Y., Yu, G., Liang, B., and Wang, K. 2016. Weld deviation detection based on wide dynamic range vision sensor in mag welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9-12), 3397-3410.
- [6] Çelen, Serap. "Laser repair welding of an extrusion mold" *Materials Testing*, vol. 58, no. 4, 2016, pp. 371-373. <https://doi.org/10.3139/120.110859>
- [7] L.P. Borrego, J.T.B. Pires, J.M. Costa, J.M. Ferreira, Mould steels repaired by laser welding, *Engineering Failure Analysis*, Volume 16, Issue 2, 2009, Pages 596-607, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.02.010>.
- [8] Berend Denkena, Marc-Andre Dittrich, Klaas Maximilian Heide, Automatic re-contouring of repair-welded tool moulds, *Procedia Manufacturing*, Volume 40, 2019, Pages 45-50, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.009>.
- [9] KOVAŘÍK, R. *Technologie svařování*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
- [10] Paolo C. Priarone, Gianni Campatelli, Angioletta R. Catalano, Francesco Baffa, Life-cycle energy and carbon saving potential of Wire Arc Additive Manufacturing for the repair of mold inserts, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 35, 2021, Pages 943-958, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.007>.
- [11] F42 Committee, *Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals*, ASTM International, Sep. 2016, <https://doi.org/10.1520/F3187-16>.
- [12] Suraj Panicker, Hari P.N. Nagarajan, Jari Tuominen, Madan Patnamsetty, Eric Coatanéa, Karl R. Haapala, Investigation of thermal influence on weld microstructure and mechanical properties in wire and arc additive manufacturing of steels, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 853, 2022, 143690, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143690>.
- [13] Sheng Zhu, Wenbo Du, Xiaoming Wang, Guofeng Han, Zhiqiang Ren, Kebin Zhou, Advanced Additive Remanufacturing Technology, *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, Volume 2, Issue 1, 2023, 100066, ISSN 2772-6657, <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2023.100066>.

- [14] Sian I. Evans, Jie Wang, Jian Qin, Yongpeng He, Paul Shepherd, Jialuo Ding, A review of WAAM for steel construction – Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions, Structures, Volume 44, 2022, Pages 1506-1522, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.084>.
- [15] R.F.V. Sampaio, J.P.M. Pragana, I.M.F. Bragança, C.M.A. Silva, C.V. Nielsen, P.A.F. Martins, Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review, Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, Volume 6, 2023, 100121, ISSN 2666-9129, <https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100121>.
- [16] Jin, Wanwan, Chaoqun Zhang, Shuoya Jin, Yingtao Tian, Daniel Wellmann, and Wen Liu. 2020. "Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review" Applied Sciences 10, no. 5: 1563. <https://doi.org/10.3390/app10051563>
- [17] ASM handbook: Welding, brazing and soldering. Vol. 6. 10 edition. USA: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-382-3.
- [18] Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů., Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-857-7163-2.
- [19] S. Jhavar, C.P. Paul, N.K. Jain, Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review, Engineering Failure Analysis, Volume 34, 2013, Pages 519-535, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>.
- [20] 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>
- [21] Benjamin Graf, Stefan Ammer, Andrey Gumenyuk, Michael Rethmeier, Design of Experiments for Laser Metal Deposition in Maintenance, Repair and Overhaul Applications, Procedia CIRP, Volume 11, 2013, Pages 245-248, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.031>.
- [21] Guoxing Su, Yu Shi, Guang Li, Gang Zhang, Youwei Xu, Improving the deposition efficiency and mechanical properties of additive manufactured Inconel 625 through hot wire laser metal deposition, Journal of Materials Processing Technology, Volume 322, 2023, 118175, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118175>.
- [23] KOVAŘÍK, R. Technologie svařování. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
- [24] BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN isbn80-85771-97-7.
- [25] Na výrobu forem [online]. JKZ [cit. 2024-05-05] Dostupné z: <https://www.jkz.cz/prodej-oceli/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem>
- [26] Haitham Hadidi, Rajasekaran Saminathan, Nasser Zouli, Enhancement of diffusive oxidation resistance and topographical corrosion resistance of hot work tool steels by nickel multifunctional coatings, Journal of Materials Research and Technology,

- Volume 28, 2024, Pages 1227-1232, ISSN 2238-7854,
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.052>.
- [27] List, pás 4x5mf1s – X40CrMoV5-1 – 1,2344 [online]. Evek GmbH [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://eveks.cz/list-polosa-4h5mf1s.html>
- [28] H13 Nástrojová ocel pro práci za tepla [online]. LINKUN [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://cz.lksteelpipe.com/h13-hot-work-tool-steel>
- [29] Part catalogue [online]. capilla [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: https://www.capilla-gmbh.com/wp-content/uploads/Katalog_04_en.pdf
- [30] STANISLAV, Jiří. Optimální postupy tepelného zpracování materiálů pro práci za tepla. Hradec nad Moravicí, 2009. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/28198934-Optimalni-postupy-tepelneho-zpracovani-materialu-pro-praci-za-tepla-jiri-stanislav.html>.
- [31] TOTTEN, George E. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. Steel heat treatment handbook. ISBN 978-0-8493-8452-3. DESKOP METAL. 316L v.2. Stainless Steel [online]. Deskop Metal, 2022 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/uploads/BMD-MDS-316L-v2-221129.pdf>.
- [32] MEDUNA VAUKOVÁ KALÍRNA S.R.O. Zušlechtování [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, 2020 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/75-zuslechtovani.html>.
- [33] TOOLSTEEL. 1.2344 / X40CRMV5-1 / 19554 / H13 / TLH. [online]. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2344-x40rmov5-1-19554-h13-tlh/>.
- [35] Minglang Zhang, Cong Li, Qiong Gao, Jimi Fang, Tong Li Wu, Ke Hong Wang, The effect of heat treatment on microstructure and properties of laser-deposited TiC reinforced H13 steel matrix composites, Optik, Volume 206, 2020, 164286, ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164286>.
- [34] Zpracování nástrojových ocelí Tváření a teplené zpracování [online]. Bolzano [cit. 2024-05-05] Dostupné z: https://bbolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_Zpracovani%20nastrojovych_%20oceli.pdf
- [36] CHANDLER, Harry (ed.). Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 1995. ISBN 978-0-87170-520-4.
- [37] DAVIS, J. R. (ed.). Tool materials. ASM specialty handbook. Materials Park: ASM International, 1995. ISBN 0-87170-545-1.

Přílohy



Obr. 27: Průběh tepelného zpracování

W1P

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 08:55:27

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: W1P
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

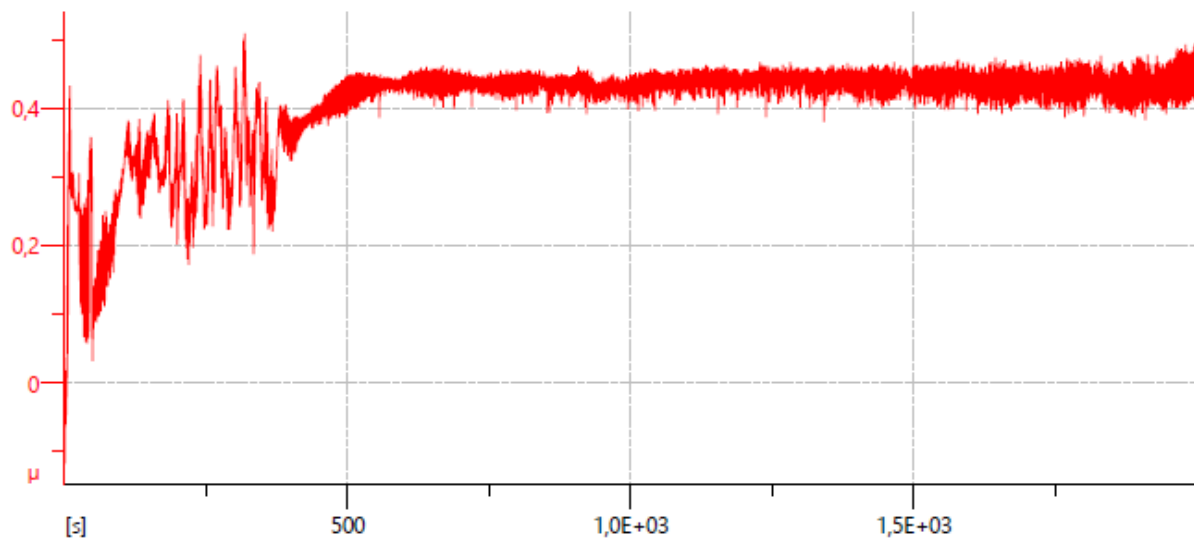
- Lab temperature: 23,23 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 42,59 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,117 min : -0,117 max : 0,509 mean : 0,407 std. dev. : 0,070



Friction Coef.

Obr. 28: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W1P

W1T

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 09:39:52

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: W1T
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

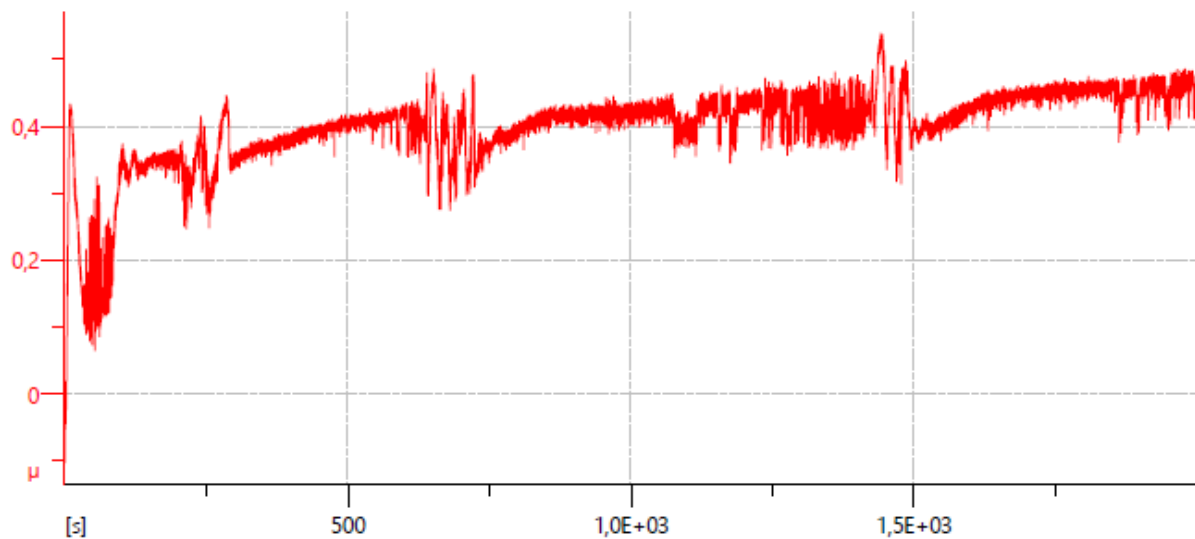
- Lab temperature: 24,10 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 41,26 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Herzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,102 min : -0,102 max : 0,539 mean : 0,400 std. dev. : 0,062



Obr. 29: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W1T

W2P

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 10:29:53

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: W2P
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

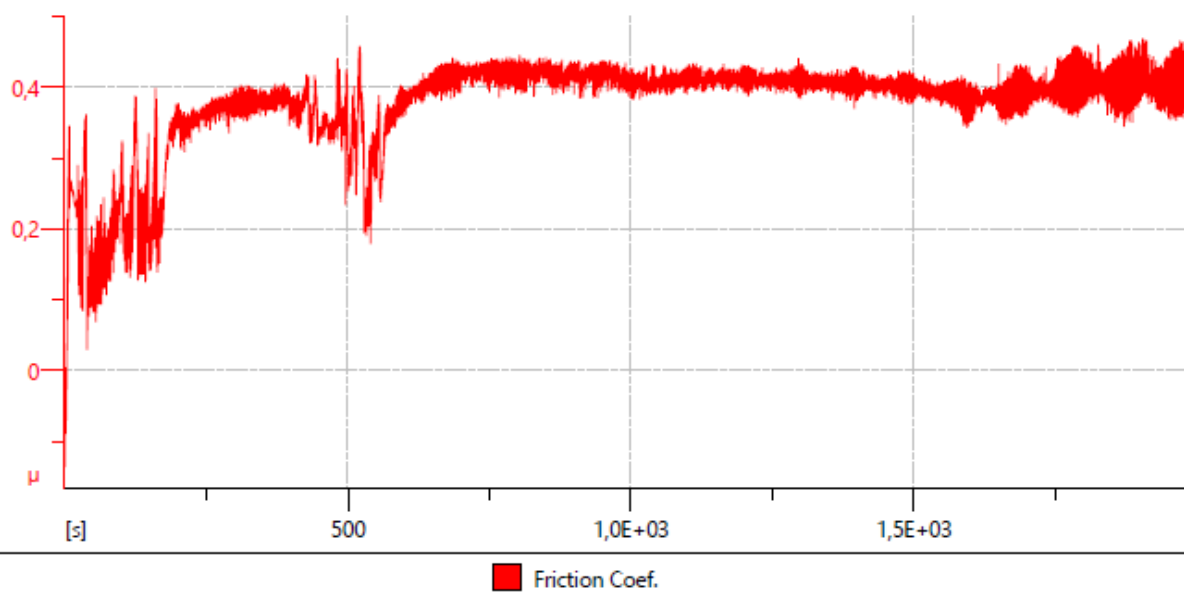
- Lab temperature: 25,43 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 38,92 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max. Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,135 min : -0,135 max : 0,471 mean : 0,378 std. dev. : 0,067



Obr. 30: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W2P

W2T

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 11:09:37

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: W2T
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

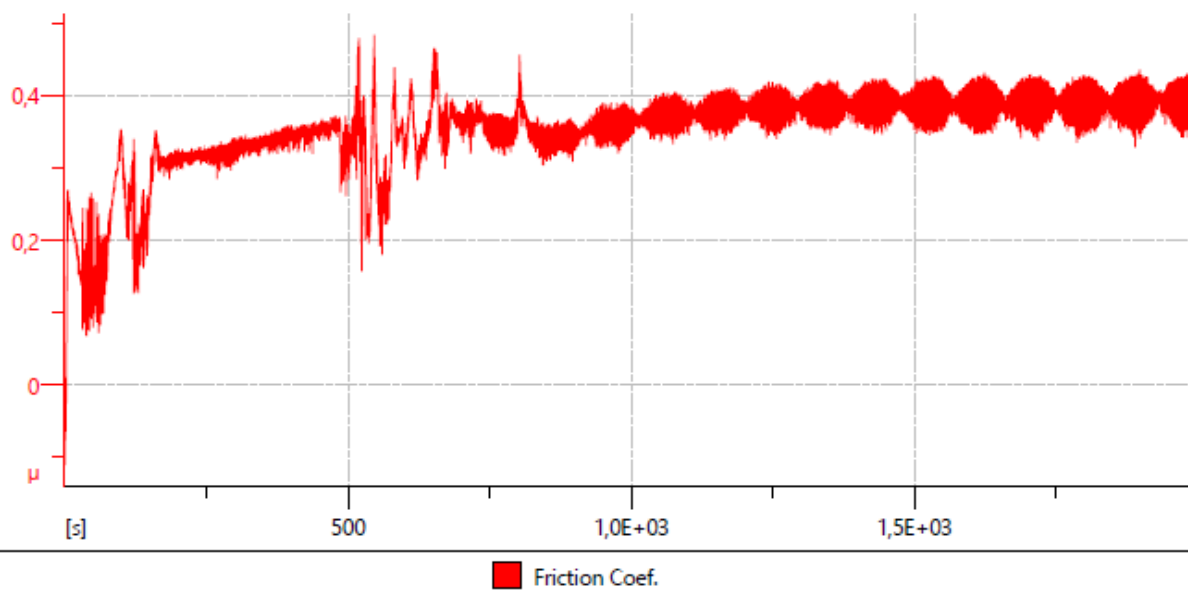
- Lab temperature: 26,28 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 37,14 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,110 min : -0,110 max : 0,484 mean : 0,354 std. dev. : 0,058



Obr. 31: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru W2T

LH13P

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 11:46:32

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: LH13P
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

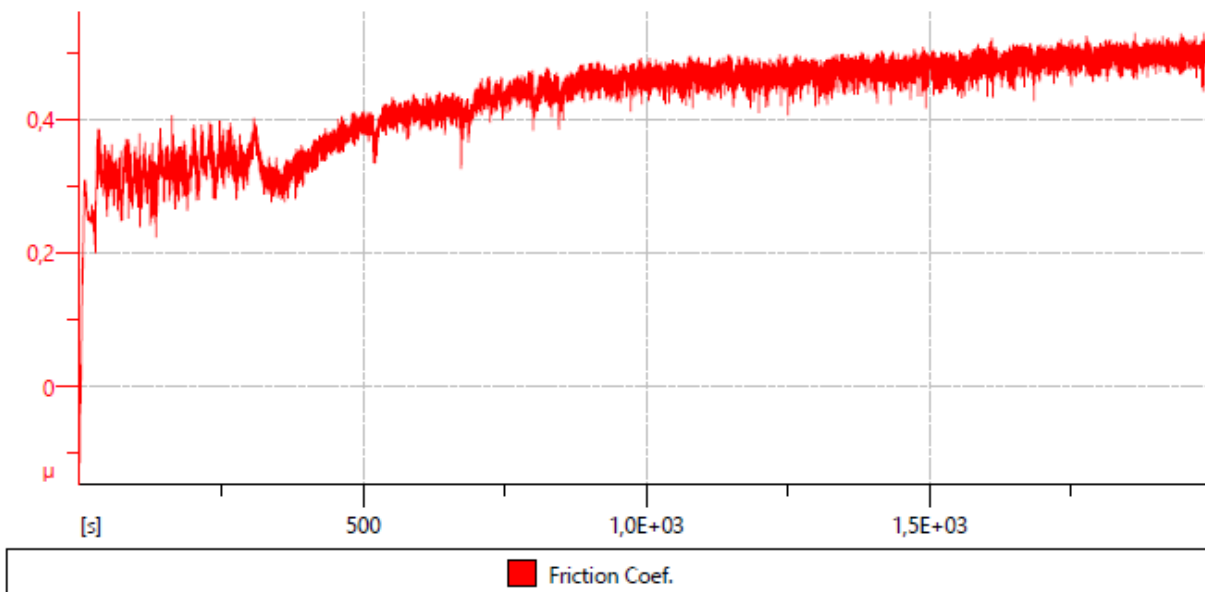
- Lab temperature: 27,04 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 36,27 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Herzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,113 min : -0,113 max : 0,529 mean : 0,429 std. dev. : 0,068



Obr. 32: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LH13P

LH13T

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 12:28:22

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: LH13T
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

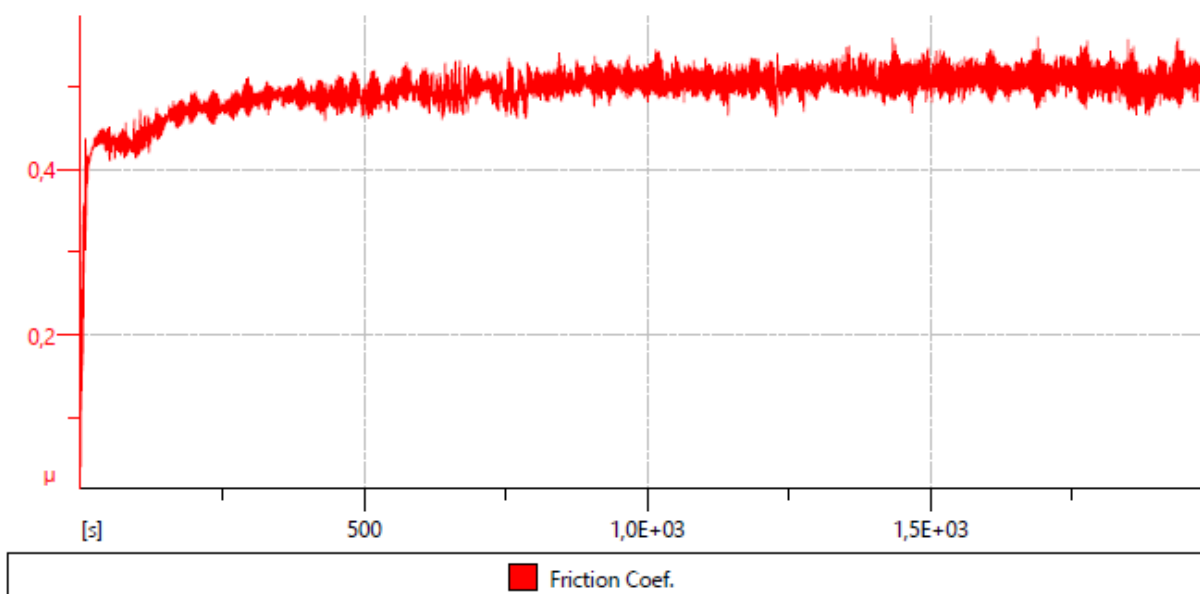
- Lab temperature: 27,61 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 35,79 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max. Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : 0,042 min : 0,042 max : 0,559 mean : 0,494 std. dev. : 0,028



Obr. 33: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LH13T

LC66P

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 13:07:26

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: LC66P
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

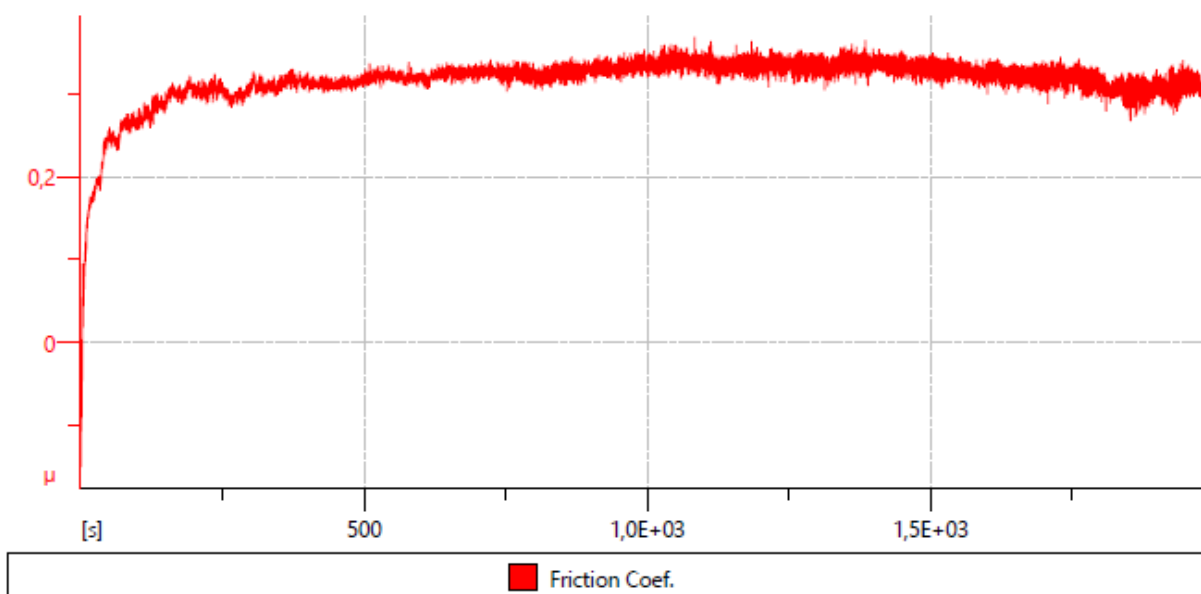
- Lab temperature: 28,10 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 35,58 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max. Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,150 min : -0,150 max : 0,368 mean : 0,316 std. dev. : 0,032



Obr. 34: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LC66P

LC66T

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 13:47:25

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: LC66T
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

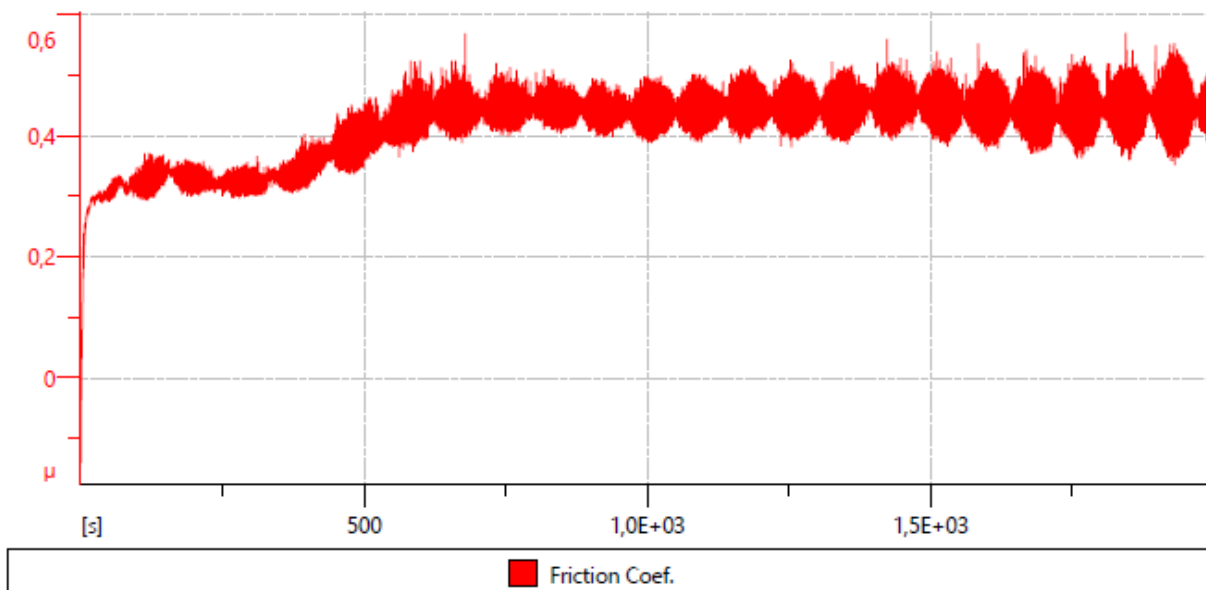
- Lab temperature: 28,41 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 33,41 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,140 min : -0,140 max : 0,570 mean : 0,416 std. dev. : 0,062



Obr. 35: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky návaru LC66T

H13T

Standard parameters

Instrument

- TRB3
- Serial number: 1000103043
- Tribometer / Version 8.1.10
- Date of measurement: 15/05/2024 15:23:52

Static partner

- Substrate: Al2O3
- Cleaning: -
- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

Sample

- Coating: H13T
- Substrate: B4
- Cleaning: -

Environment

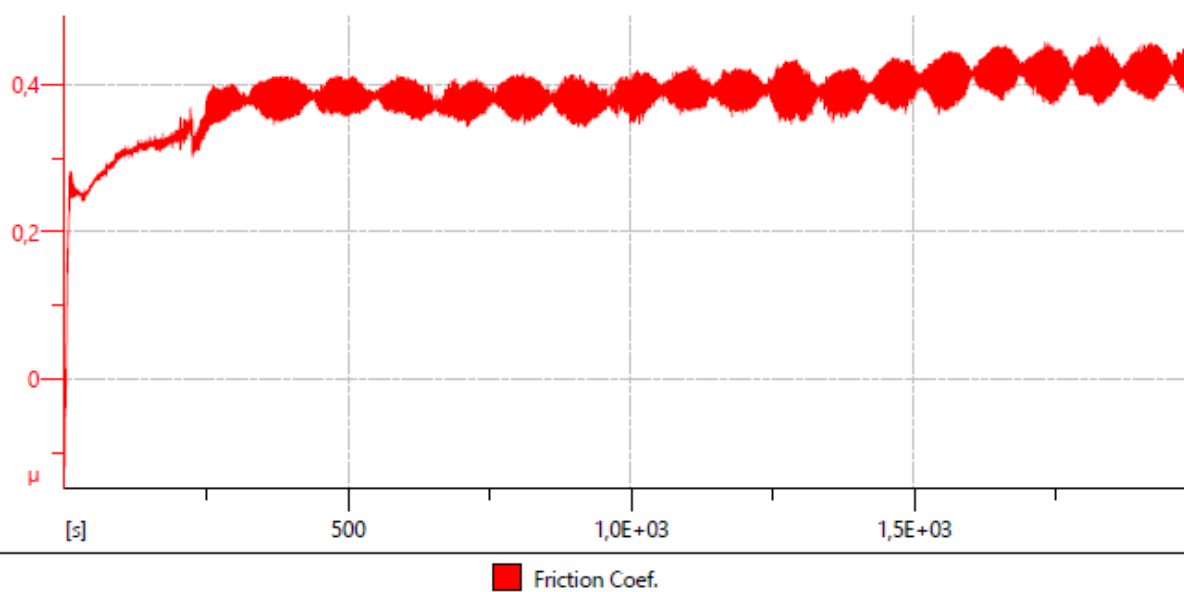
- Lab temperature: 28,42 [°C]
- Target temperature: 26,22 [°C]
- Humidity: 33,58 [%]

Sequence

- Repetitions: 1
- Single-way mode
- Radius: 3,00 [mm]
- Lin. Speed: 9,42 [cm/s]
- Acquisition rate: 10,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 10,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 10000,0 [lap]
- Effective Stop: Laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn Track Section: 0,0 [μm ²]	Worn Cap Diameter: 0,0 [μm]	Sample Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm ³ /N/m]
Poisson Ratio: 0,000	Poisson Ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : -0,119 min : -0,119 max : 0,464 mean : 0,382 std. dev. : 0,043



Obr. 36: Záznam průběhu koeficientu tření tribologické zkoušky základního materiálu H13T