

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv parametrů lineární oscilační zkoušky na tribologické charakteristiky
laserem kalené oceli

Autor: **Petr MONHART**

Vedoucí práce: **Ing. Šárka HOUDKOVÁ-ŠIMŮNKOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

Akad. rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Petr Monhart
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Téma bakalářské práce:

**VLIV PARAMETRŮ LINEÁRNÍ OSCILAČNÍ ZKOUŠKY NA
TRIBOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY LASEREM KALENÉ OCELI**

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod - motivace.
2. *Současný stav poznání – literární rešerše z oblasti průmyslových laserových technologií povrchových úprav a jejich srovnání se standardními technologiemi, popis zkoušky dle ASTM G 133 a možnosti jejího využití pro hodnocení povrchových vlastností materiálů.*
3. *Experimentální zhodnocení parametrů zkoušky na sledované charakteristiky - koeficient tření, velikost opotřebení.*
4. *Diskuse výsledků - posouzení vlivu parametrů zkoušky na sledované charakteristiky.*
5. Závěr.

Rozsah bakalářské práce:

a) textová část:

15-20 stran formátu A4

Forma zpracování bakalářské práce :

tištěná a elektronická (CD)

Doporučená literatura:

- [1] G. BUCHFINK: Laser as a tool, Vogel Buchverlag, 2007
- [2] ASTM G133-05(2010) Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear
- [3] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., ŠVANTNER, M: Standard and Scanning Laser Hardening Procedure, Metal 2013, 15-17.května 2013

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Šárka HOUDKOVÁ-ŠIMŮNKOVÁ, Ph.D.
NTC ZČU

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Eva Smazalová
NTC ZČU

Datum zadání bakalářské práce:

20. 9. 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

27. 6. 2014

L.S.

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan

prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne: 27. 6. 2014

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Monhart	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulu) Ing. Houdková-Šimůnková, Ph.D.	Jméno Šárka	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv parametrů lineární oscilační zkoušky na tribologické charakteristiky laserem kalené oceli		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	55	GRAFICKÁ ČÁST	15
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem bakalářské práce je zhodnotit vliv velikosti zatížení na rychlost opotřebení, na objem opotřebení a na koeficient opotřebení laserem kalené oceli a popsat charakter vlivu tvrdosti oceli na hodnocené parametry.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Tribologie, objem opotřebení, rychlost opotřebení, koeficient opotřebení, koeficient tření, zatěžující síla, tvrdost materiálu-HV.</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Monhart	Name Petr	
FIELD OF STUDY	B2301 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Houdková-Šimůnková, Ph.D.	Name Šárka	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Impact of the linearly reciprocating testing parameters on the trigology characteristics of the laser beam quenched steel.		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Materials Engineering	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	-----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	55	GRAPHICAL PART	15
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The goal of this bachelor's work is to assess the impact of a normal force on the a) wear rate, b) volume loss and c) wear coefficient of a laser beam quenched steel and describe the steel hardness impact character on the evaluated parameters.
KEY WORDS	Tribology, volume loss, wear rate, wear coefficient, friction coefficient, normal force, HV.

Poděkování

Tato bakalářská práce vznikla v rámci projektu CENTEM, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpI. a za finančního přispění specifického výzkumu SGS-2013-28: "Podpora studentské vědecké činnosti v oblasti materiálového inženýrství".

Dále bych rád poděkoval pí. Ing. Šárce Houdkové-Šimůnkové, Ph.D., pí. Evě Smazalové a ostatním zaměstnancům NTC ZČU Plzeň za čas, který mi věnovali, cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod - motivace.....	1
2. Současný stav poznání	2
2.1. Tribologie.....	2
2.1.1. Procesy kontaktní.....	2
2.1.1.1. Vnik koule do roviny.....	2
2.1.1.2. Styk dvou koulí s poloměry r_1 , r_2 :.....	3
2.1.1.3. Styk válce a roviny, styk válce a válce.....	3
2.1.2. Procesy třecí	4
2.1.2.1. Suché tření.....	4
2.1.2.2. Mezní tření.....	4
2.1.2.3. Kapalinové tření	5
2.1.2.4. Smíšené tření	5
2.1.3. Tribologické zkoušky	5
2.1.4. Norma ASTM G 133.....	6
2.1.4.1. Úvod.....	6
2.1.4.2. Referenční dokumenty	7
2.1.4.3. Terminologie	7
2.1.4.4. Shrnutí testovací metody.....	7
2.1.4.5. Význam a použití	8
2.1.4.6. Přístrojové vybavení.....	8
2.1.4.7. Kalibrování.....	9
2.1.4.8. Postup.....	10
2.1.4.9. Měření a výpočet opotřebení.....	12
2.1.4.10. Zpráva.....	14
2.1.4.11. Přesnost	15
2.1.4.12. Diskuse.....	16
2.2. Laser.....	16
2.2.1. Historie.....	17
2.2.2. Součásti	17
2.2.2.1. Aktivní prostředí	18
2.2.2.2. Rezonátor	18
2.2.2.3. Zdroj záření	18
2.2.2.4. Laserový paprsek.....	18
2.2.2.5. Ostatní příslušenství	19
2.2.3. Princip	19
2.2.3.1. Úvod.....	19
2.2.3.2. Interakce fotonu a elektronu.....	19

2.2.3.3. Metastabilní hladina	20
2.2.3.4. Inverze populace	20
2.2.3.5. Stimulovaná emise	20
2.2.3.6. Rezonátor	21
2.2.3.7. Polopropustné zrcadlo	21
2.2.3.8. Závěr	21
2.2.4. Typy	21
2.2.4.1. Kapalinové lasery	21
2.2.4.2. Plynové lasery	21
2.2.4.3. Polovodičové lasery	22
2.2.4.4. Pevnolátkové lasery.....	22
2.2.5. Přehled.....	22
2.2.6. Využití.....	23
2.2.6.1. Laser v medicíně	23
2.2.6.2. Laser v průmyslu	23
2.2.6.3. Laser v ostatních odvětvích.....	24
2.2.6.4. PALS - Prague Asterix Laser System	24
2.2.7. Bezpečnost	24
2.2.8. Lasery v průmyslu.....	25
2.2.8.1. Laserové kalení	25
2.2.8.1.1. Kalení	25
2.2.8.1.1.1. Laserové kalení oceli.....	27
2.2.8.1.1.2. Laserové kalení litiny	28
3. Experimentální zhodnocení parametrů zkoušky na sledované charakteristiky – koeficient tření, velikost opotřebení.....	30
3.1. Experimentální materiál	30
3.2. Metody měření	31
3.2.1. Metalografická příprava	31
3.2.1.1. Přístroje	31
3.2.1.2. Postup.....	31
3.2.2. Měření tvrdosti	32
3.2.2.1. Přístroje	32
3.2.2.1. Postup měření.....	33
3.2.3. Tribologická měření	35
3.2.3.1. Přístroje	35
3.2.3.2. Postup měření.....	38
3.2.4. Vztahy pro výpočet hledaných parametrů.....	42
3.3. Výsledky	43

3.3.1. Tvrdost	43
3.3.2. Tribologická měření	46
3.3.2.1. Vliv velikosti zatížení.....	46
3.3.2.2. Vliv překryvu stop kalení.....	48
3.3.2.3. Mechanismus opotřebení.....	50
4. Diskuze výsledků – posouzení vlivu parametrů zkoušky na sledované charakteristiky	51
4.1. Vzorek č.1	51
4.1.1. Závislost COF _koeficientu tření na zatížení	51
4.1.2. Závislost koeficientu opotřebení na zatížení	51
4.2. Vzorek č.2	52
4.2.1. Hlubkový profil měření v kalené oblasti	52
4.2.2. Hlubkový profil měření v oblasti překryvu	52
4.2.3. Podélný profil měření	53
4.3. Vzorek č.3	53
4.3.1. Závislost COF _koeficientu tření na umístění stopy	53
4.3.2. Závislost koeficientu opotřebení na umístění stopy	53
5. Závěr	54
Seznam použité literatury:.....	55
Příloha:	56

1. Úvod - motivace.

Povrchová úprava je speciální ošetření povrchu materiálu nebo dílu a to: opracováním, zpracováním nebo nanesením vrstvy materiálu. Význam povrchových úprav, mezi které patří i povrchové kalení, je především v tom, že díky relativně malým nákladům zvýšíme životnost materiálu, jeho odolnost proti korozi, otěruvzdornost, odolnost proti zvýšené teplotě či zlepšíme vlastnosti povrchu materiálu, jako jsou mechanické vlastnosti, chemické vlastnosti, estetické vlastnosti, třecí vlastnosti atd.

Laserové kalení povrchu je vhodné pro kalení ocelových i litinových součástek pomocí robotizovaných systémů, které jsou vysoce efektivní, výkonné, přesné a spolehlivé. Laserové kalení je vhodné pro kalení se selektivním výběrem složitých tvarů strojních součástek s obtížným přístupem, používá se pro strojní součásti, na které je kladen požadavek vysoké přesnosti a minimálních deformací. Laserové kalení, na rozdíl od klasických metod, zahřívá intenzivně pomocí laserového paprsku pouze povrch součástky, a to pod teplotu tavení materiálu, z kterého je součástka vyrobena. Okolní masa materiálu je udržována na teplotě okolí a tím dochází k samo-ochlazovacímu efektu, kdy je teplo z povrchu součástky odváděno do základní masy materiálu. Tento proces způsobuje v povrchových vrstvách vznik jemnozrnné martenzitické struktury o vysoké tvrdosti při zachování houževnatosti jádra součásti.

Hlavní výhody laserového kalení jsou:

- vysoká procesní rychlost a efektivita,
- lokální povrchové kalení v přesně požadovaných místech při zachování houževnatosti neovlivněného materiálu,
- nízké tepelné deformace,
- on-line řízení procesní teploty,
- žádná nebo minimální potřeba následného opracování,
- vysoká spolehlivost pro výrobní procesy a postupy,
- vysoká reprodukovatelnost pro sériovou výrobu.

Protože je náročné najít správné parametry laseru, je nutné ověřit výsledky pomocí analýz vzniklé mikrostruktury a mechanických vlastností. Kromě tvrdosti je vhodné hodnotit i funkční vlastnosti, v tomto případě odolnost proti opotřebení.

Abychom porozuměli mechanismům a souvislostem mezi technologickými parametry laserového zpracování, mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi a díky tomu dokázali predikovat odolnost proti opotřebení a další tribologické charakteristiky (např. koeficient tření), je nutné znát důkladně vliv jednotlivých proměnných na výsledky vybrané zkoušky.

Cílem této práce je zmapovat vliv zatížení a vzájemné kluzné rychlosti lineární oscilační zkoušky na tribologické charakteristiky (tření a opotřebení) laserem kalené oceli a na základě provedené analýzy doporučit nejvhodnější parametry zkoušky pro další testy umožňující porovnání tribologických vlastností oceli zakalené pomocí různých technologických parametrů laserového zpracování.

2. Současný stav poznání

Tato bakalářská práce je zpracovávána na téma: „Vliv parametrů lineární oscilační zkoušky na tribologické charakteristiky laserem kalené oceli“. Z názvu je zřejmé, že jsou v něm použity výrazy, které je nutno vysvětlit a blíže specifikovat. Bude vysvětleno, co výrazy znamenají, a v souladu se zadanou osnovou této bakalářské práce budou dále zpracovány a rozvinuty. Za slova, slovní spojení či výrazivo, které je nutné tímto způsobem zpracovat a blíže specifikovat, považují toto: 1. Tribologie či tribologické charakteristiky, 2. Laser či laserem kalená ocel a 3. norma ASTM G133 a její aplikace v praxi.

2.1. Tribologie

Tribologie je vědní obor, který se zabývá vzájemnou interakcí dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu, nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být obecně valivý, nárazový, kluzný nebo kmitavý. V praxi se uplatňuje více pohybů najednou.

Tribologický proces je rozdělen na:

- procesy kontaktní,
- procesy tření,
- procesy opotřebení,
- procesy mazání. [1]

2.1.1. Procesy kontaktní

Při kontaktních procesech se zvažuje tvar a rozměr dotýkajících se částí a materiálové vlastnosti dotýkajících se částí, jejich vzájemná vazba a reakce mezi nimi. Toto vzájemné působení může být materiálové, chemické, fyzikální atd. Dále se v procesu zvažují i ostatní vlivy, jako jsou:

- počet těles účastnících se kontaktního procesu,
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu,
- makrogeometrie a mikrogeometrie kontaktních těles,
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy,
- fyzikální, chemické, mechanické vlastnosti těles v kontaktním procesu.

V praxi má velký význam plocha styku, po které se kontaktní proces realizuje, kdy rozhoduje reálná plocha styku, která je obvykle menší než vlastní geometrická plocha. Pakliže máme k dispozici dvě dokonale hladká a pružná tělesa, aplikujeme Hertzovy vztahy, kdy při zatížení normálovou silou F_N dojde k elastické deformaci: [1]

2.1.1.1. Vnik koule do roviny

Pro vnik koule s poloměrem r do roviny aplikujeme Hertzův vztah pro tlak: (platí i pro ostatní případy Hertzových tlaků)

$$P_{\max.} = 1,5 \frac{F_N}{\pi a_H^2} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{a_H}\right)^2},$$

$$a_H = \left(\frac{3r}{2E'} \right)^{\frac{1}{3}} F_N^{\frac{1}{3}},$$

a_H – poloměr vzniklého kruhového vtisku

$$E' = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right],$$

E' - redukovaný modul pružnosti,

E_1, E_2 - Youngovy moduly pružnosti,

ν_1, ν_2 – Poissonovy konstanty jednotlivých materiálů.

$$S_H = \pi a_H^2 = \pi \left(\frac{3r}{2E'} \right)^{\frac{2}{3}} F_N^{\frac{2}{3}}.$$

S_H - plocha kruhového vtisku. [1]

2.1.1.2. Styk dvou koulí s poloměry r_1, r_2 :

Pro styk dvou koulí s poloměry r_1 a r_2 jsou platné ty samé závislosti, ale ekvivalentní poloměr zakřivení r je dán vztahem:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}. \quad [1]$$

2.1.1.3. Styk válce a roviny, styk válce a válce

Platí vztahy uvedené v odstavci 2.1.1.1.

Plocha styku je úměrná $F_N^{2/3}$. U reálných těles je styk umožněn pouze jejich výčnělky, a to z toho důvodu, že jejich povrch není dokonale hladký, ale je drsný. Proto je skutečná plocha styku velmi malá, ale tlaky v místě jsou dosti velké, což způsobuje elastické až plastické deformace.

Archardův vztah: - výpočet skutečné plochy styku

$$S_r = k \left[\frac{F_N}{E} \right]^c, \quad k, c \text{ jsou konstanty, kdy: } 0,98 \geq c \geq 0,87$$

Pro plastickou deformaci platí: $p_m = 1,1 \sigma_e$

p_m – střední kontaktní tlak, σ_e – mez pružnosti v měkčím třecím prvku → musí ale platit: $p_m \geq 1,1\sigma_e$; a to proto, aby nenastala plastická deformace na celé stykové ploše. [1]

2.1.2. Procesy třecí

Třecí proces je realizován pohybem minimálně dvou vzájemně se dotýkajících prvků, kdy rozeznáváme pozorování na úrovni mikromodelu a makromodelu. Mikromodel popisuje tření jako elementární proces. Makromodel je popsán tím, že získáváme údaje z měřících přístrojů a měříme především velikost třecí síly při tangenciálním pohybu, třecí moment při rotačním pohybu eventuálně třecí práci.

Definice tření:

1. Tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitisknutými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. → platí pro vnější tření!

2. Tření je ztráta mechanické energie na začátku, v průběhu nebo na konci relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálů. → platí pro vnitřní tření!

Rozeznáváme tyto druhy tření: - v praxi se tato tření často kombinují. [1]

2.1.2.1. Suché tření

Suché tření, neboli také tření tuhých těles, nastane v té chvíli, když se určující materiálová vrstva nachází v tuhém stavu. Toto tření se dělí na deformační tření a tření v adhezních vrstvách. Suché tření nastává především ve vakuu.

2.1.2.2. Mezné tření

Neboli také mezné mazání, které nastane v té situaci, když už mezi třecími povrchy existuje tenká vrstvička látky vytvořená chemickou reakcí povrchů anebo existuje-li vrstvička absorbovaných molekul kapaliny či plynu. V technické praxi vznikne mezné tření na malých stykových plochách, jejichž povrchy jsou zatíženy velkými tlaky, mezi drsnými povrchy a při malých smykových rychlostech.

$$\alpha = \frac{S_k}{S_r}$$

α – koeficient tření,

S_k – plocha bezprostředního styku povrchu s povrchem,

S_r – plocha reálného styku povrchů.

$$F_t = \alpha S_r \tau_s + (1 - \alpha) S_r \tau_m = S_r [\alpha \tau_s + (1 - \alpha) \tau_m]$$

F_t – třecí síla,

τ_m – smykové napětí mezného filmu,

τ_s – smykové napětí styku povrchu s povrchem.

$$F_N = S_r p_m \doteq 3S_r \sigma_e$$

F_N – normálová síla,

p_m – tlak na skutečnou třecí plochu.

$$\mu_{sm} \frac{F_t}{F_N} = \frac{\alpha \tau_s + (1 - \alpha) \tau_m}{p_m} \doteq \frac{\alpha \tau_s + (1 - \alpha) \tau_m}{3 \sigma_e}$$

μ_{sm} – smykový součinitel tření.

K meznému tření dojde i u povrchů, které nejsou dostatečně mazány, nebo vrstva maziva není dostatečně silná. Mezné tření je spojeno s fyzikální anebo chemickou absorpcí kapalin a plynů na povrchu dvou stykových ploch a je spojeno s chemickými přeměnami třecích povrchů. Pro tloušťku mazacího filmu je rozhodující rychlost absorpce molekul na povrchu a jejich množství, orientace molekul vzhledem k povrchu, vliv tlaku a teploty.

Vrstva maziva nedokáže zcela oddělit třecí povrch dvou o sebe se třoucích ploch a nedokáže zcela eliminovat vliv drsností povrchů. [1]

2.1.2.3. Kapalinové tření

Je charakterizováno stavem, kdy vrstva materiálu, v které probíhá tření, má vlastnosti kapalin. Mezi třecími plochami je tudíž souvislá vrstva maziva, které zcela vyrovná drsnosti povrchů a svým vlastním tlakem tak ruší účinky normálového zatížení na povrchy těles. Třecí síla je závislá jen na velikosti vnitřního tření v mazací vrstvě. Pro přenos zatížení musí být dvě třecí plochy k sobě přitlačovány a vzájemně musí vyvolávat protitlaky. Protitlaků dosáhneme dvěma způsoby: hydrostaticky a hydrodynamicky.

2.1.2.4. Smíšené tření

Smíšené tření nastane v případě, kdy mezi vrstvami existuje současně mezní tření a kapalinové tření. Toto se stane, když jednotlivé drsné plochy nejsou od sebe odděleny dostatečnou vrstvou maziva, to znamená nedochází ke kapalinovému tření, ale zároveň je vrstva maziva větší než tloušťka filmu zabezpečujícího mezní mazání! Smíšené tření vznikne přechodem z kapalinového tření při velkém zatížení a malých smykových rychlostech třecích ploch, kdy významnou roli hraje mikrogeometrie funkčních ploch, a to hlavně v tom případě, kdy je mazivem kapalina s malou viskozitou.

2.1.3. Tribologické zkoušky

V oblastech, kde se vyskytuje tření, opotřebení či mazání, existuje řada zkušebních metod. Pro zvolení vhodné zkušební metody pro danou oblast vyhodnotíme složitost tribosystému a důležitost tribosystému. Pečlivě specifikujeme spektra zatížení, velikosti ztrát a najdeme a aplikujeme optimální zkušební metodu. V praxi je ale velmi obtížné získat informace o skutečném tribosystému a zároveň existují i problémy s aplikací výsledků zkoušek, které budou získány na jednoduchých vzorcích v laboratorních podmínkách. Proto se osvědčuje provádění zkoušek přímo na modelovém zkušebním zařízení a někdy i přímo v provozu. Pakliže se povede v laboratorních

podmínkách nasimulovat reálný provoz, praxi, pak je pravděpodobné, že i výsledky reálného tribosystému budou mít vysokou srovnávací a vypovídající hodnotu.

Velikost třecí síly obvykle závisí na:

- druhu povrchové textury a drsnosti této textury (mikrogeometrie povrchu substrátu),
- druhu použitého substrátu (nepokovený povrch, typ pokovení povrchu, chemické složení povrchu substrátu),
- použití maziva,
- rychlostech posuvů,
- velikosti kontaktních tlaků mezi materiálem a nástrojem,
- použitým mazivu,
- eventuálně druhu materiálu nástroje a stavu povrchu nástroje,
- aj....

Ve sledovaném tribosystému se uvedené veličiny nebudou uplatňovat samostatně, ale bohužel se budou navzájem ovlivňovat. Hodnotit tyto parametry odděleně je obtížné. Posuzovaný tribosystém hodnotíme komplexně i s ohledem na další jiné veličiny, které se v posuzovaném tribosystému mohou vyskytovat. Tribosystém hodnotíme na základě veličin, které jsme schopni získat měřením. Mezi tyto veličiny patří především velikost třecí síly F_t a smykový součinitel tření μ_{sm} . Je třeba znovu zdůraznit, že samostatně prezentované veličiny F_t , μ_{sm} nemají téměř žádnou vypovídající hodnotu bez zohlednění a uvedení i ostatních parametrů, které zkoumaný tribosystém charakterizují. [2]

Některé zkušební metody, kterými zkoumáme tribosystémy:

- modelování tření mezi přidržovačem a raznicí
- modelování tření na tažné hraně
- modelování vypínání přes tažnou hranu
- modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou
- aj. (tyto zkušební metody jsou používány při procesu tváření plechu).
- metoda pro testování opotřebení s využitím zařízení Pin-on-Disk (ASTM G99),
- standardní testovací metoda opotřebení při opakujícím se vzájemném lineárním tření kulového a plochého vzorku (ASTM G133),

aj: (tyto metody zkoumají systém tenká vrstva - substrát). [1]

2.1.4. Norma ASTM G 133

Označení G133 – 05 (znovu upravené 2010)

Standardní testovací metoda opotřebení při opakujícím se lineárním vzájemném třecím posuvu kulovitěho a rovinněho vzorku.

2.1.4.1. Úvod

Metoda definuje postupy, které jsou používány v laboratořích pro zjištění opotřebení tělesa s kulovitou plochou a tělesa rovinněho s rovinnou plochou. Simulace opotřebení se provádí vzájemným periodicky se opakujícím pohybem. Primárními zkoumanými veličinami jsou rozsah opotřebení zkoumaných vzorků a koeficient, součinitel, kinematického tření. Metoda popisuje

testovací postupy s použitím lubrikantů i postupy bez použití lubrikantů. Metoda nezahrnuje testování v korozivním prostředí. Metoda nezahrnuje testování v chemicky agresivním prostředí.

Norma nešetří bezpečnostní opatření spojená s používáním a aplikací této normy v praxi. Bezpečnostní opatření jsou ve výlučné pravomoci a odpovědnosti pověřeného pracovníka. [7]

2.1.4.2. Referenční dokumenty

Norma se odkazuje na tyto doporučené ASTM standarty:

E112 Testovací metoda určení průměrné velikosti zrna,

E1181 Testovací metody pro charakterizování zdvojených velikostí zrn,

G40 Terminologie související s opotřebením a erozí,

G49 Testovací metoda pro testování opotřebením s využitím zařízení Pin-on-disk,

G115 Průvodce měřením a vykazováním koeficientu tření,

G117 Průvodce výpočtem a opatřeními pro exaktní vykazování dat využitých z mezilaboratorních testů zabývajících se opotřebením a erozí,

G118 Průvodce doporučeným formátem dat pro test opotřebením vhodných pro databáze.

2.1.4.3. Terminologie

Definice použité v této testovací metodě jsou uvedené v ASTM standartu G40. Následují definice důležitých výrazů použitých v této testovací metodě:

Třecí síla – odporová síla tangenciální k rozhraní mezi dvěma tělesy, kdy se při působení vnější síly jedno těleso pohybuje nebo má tendenci se začít pohybovat ve vztahu k tělesu druhému.

Hertzův kontaktní tlak – magnituda tlaku v jakékoli specifikovatelné oblasti na Hertzově kontaktní ploše, jak je vypočtena z Hertzovi rovnice týkající se výpočtu elastické deformace.

Opotřebením – poškození pevného povrchu, který obecně vyvolává výrazný úbytek materiálu, a to vzájemným kontaktním pohybem mezi povrchy testovaných předmětů.

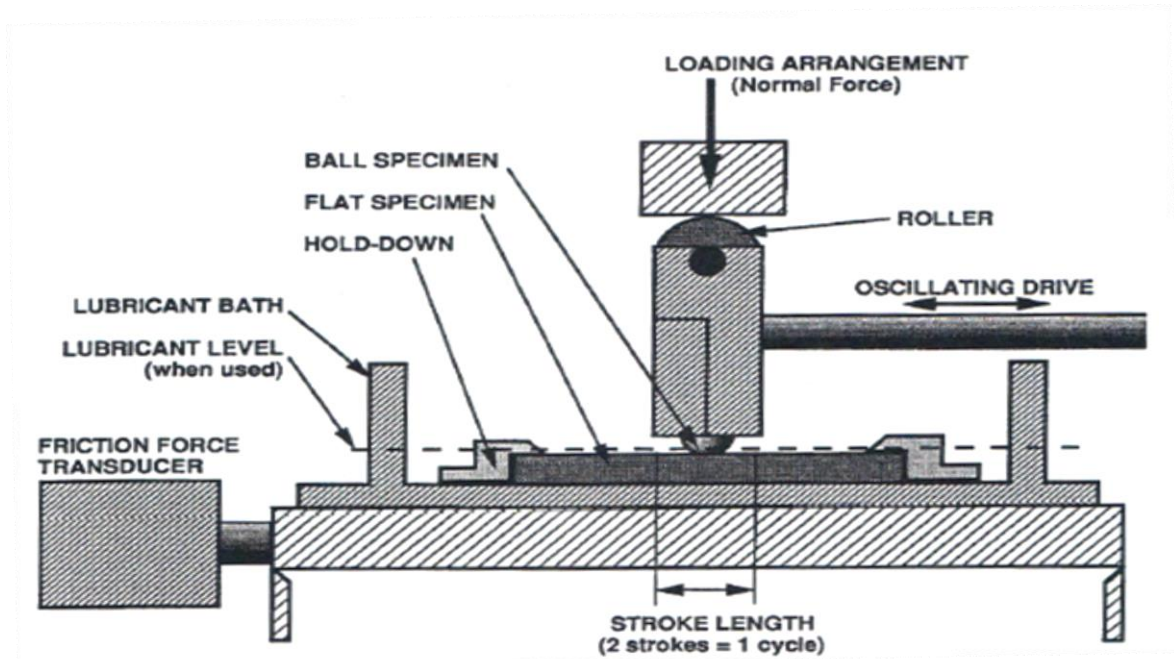
Stupeň opotřebením – rychlost ubývání materiálu nebo změna rozměru v důsledku opotřebením na jednotku exponovaného parametru. Například úbytek (hmoty, objemu, tloušťky) při jednotkové vzdálenosti posuvu. [7]

2.1.4.4. Shrnutí testovací metody

V této testovací metodě používáme dva zkoumané vzorky. Jeden vzorek je kulového tvaru a druhý vzorek je rovinné těleso. Tyto dva vzorky se o sebe periodicky, za předem stanovených podmínek, otírají a tím vzniká opotřebením. Kulovitý vzorek je zatížen svislou silou a otírá se o vodorovně umístěný rovinný vzorek. Zatížení, délka lineárního pohybu, frekvence pohybu, typ oscilace, teplota při testování, mazivo, doba trvání a atmosférické podmínky jsou specifikovány v jednom z postupů uvedených v této normě .

V průběhu testu není dodržována konstantní rychlost lineárního pohybu, a to proto, že změna rychlosti v čase je dána konstrukcí zkušebního zařízení (pohybuje-li se kulička vůči plochému vzorku nebo naopak).

Změny, které vzniknou na vzorcích v průběhu testu, se používají pro výpočet velikosti opotřebení a stupně opotřebení. Dále měříme i třecí síly, které slouží k vyhodnocení toho, jak na sebe navzájem zkušební vzorky působí a také k vyhodnocení koeficientu tření jakožto funkce času.



Obr. 1.: tribometr

2.1.4.5. Význam a použití

Tato testovací metoda je navržena tak, aby simulovala rozsah či rozsahy vzájemných pohybů, které se vyskytují v praxi, v běžném provozu a u součástek, které se o sebe vzájemně otírají. Výsledky, které změříme při použití této testovací metody, mohou být odlišné od výsledků, které bychom očekávali z reálného provozu vzájemně se otírajících součástek, a to i přesto, že zachováme shodné materiály zkušebních vzorků i rozsahy pohybů zkušebních vzorků i dobu vzájemného tření zkušebních vzorků jako v reálném provozu. [7]

2.1.4.6. Přístrojové vybavení

Obrázek č. 1 – zobrazuje běžně dostupné komerční zařízení pro provedení testu opotřebení při vzájemném otěru kulového vzorku a rovinného vzorku. Kulovitý vzorek je pevně uchycen v držáku a svým koncem lineárně osciluje po povrchu vyleštěného rovinného vzorku. Může být použita i alternativní metoda, kdy kulovitý vzorek bude pevně uchycen a lineárně oscilovat bude rovinný vzorek. Kulovitý vzorek je zatížen konstantním zatížením a je řízena teplota rovinného vzorku, který se může nebo nemusí pohybovat v lázni s lubrikantem (podle druhu zvolené testovací metody). Tangenciální síla, která vzniká při vzájemném kontaktním pohybu vzorků, se měří a změřené údaje se využívají k získávání údajů o koeficientu tření.

Pohon vzorku – je navržen tak, aby umožňoval hladký oscilační pohyb kulovitého vzorku po rovinném vzorku a bez problémů tak překonával vzájemné kontaktní třecí odpory, a to při maximálním zatížení.

Kulička a držák kulovitého vzorku – kulovitým vzorkem může být například ložisková kulička, a to za těch podmínek, že kontaktní zatížení s rovinným vzorkem je stejné jako u kulovitého vzorku. Kulička musí být pevně upnuta, aby se při testu neprotáčela v držáku kulovitého vzorku. Držák

kulovitého vzorku musí být dostatečně pevný, aby při lineární oscilaci nedocházelo k naklápění vzorku a nebo k jiným ztrátám kontaktu kuličky s rovinným vzorkem.

Držák plochého vzorku – rovinný vzorek je připevněn k základně, aby se zabránilo prokluzování nebo prohýbání v průběhu testu. Musí mít horizontálně umístěný povrch vůči kulovému vzorku.

Třecí síla: - Třecí sílu, která vzniká během lineárního oscilačního pohybu, můžeme změřit pomocí jednotky využívající střídavé tahové a tlakové zatížení. Třecí síla musí být kalibrována jak v dopředném pohybu kulovitého vzorku, tak ve zpětném pohybu kulovitého vzorku. Zaznamenaná data zpracováváme v počítači. Způsob získávání a zaznamenání dat (třecí síly) během testu musí být uveden ve zprávě o provedení testu.

Trvání testu – doba trvání testu je udávána v sekundách. Vzdálenost skluzu je udávána v metrech a to podle vztahu:

$$s = 0,002 \times t \times f \times L$$

Počet cyklů je udáván vztahem:

$$N = t \times f$$

Kde:

s = celková vzdálenost (délka) skluzu kuličky [m],

N = počet cyklů v testu,

t = doba trvání testu [s],

f = oscilační frekvence [Hz/s],

L = délka cyklu [mm].

Jeden cyklus je definován jako jeden dopředný pohyb + jeden zpětný pohyb.

Vlhkost – opotřebení a tření mnoha druhů materiálů je významně ovlivňováno vlhkostí vzduchu. Vyžaduje se, aby relativní vlhkost vzduchu byla v rozmezí $\pm 3\%$. Vlhkost se měří před započítáním testu a v průběhu testu. Senzor měření vlhkosti musí být co nejbližší k testovanému vzorku, a to jak je to rozumně možné, a tak, aby případné proudění vzduch v laboratoři bylo stejné jak pro senzor měření vlhkosti vzduchu, tak i pro zkoumaný vzorek.

Teplota – teplota okolí se udávána ve stupních Celsia a měření probíhá při pokojové teplotě. Při úplném ponoření zkoumaného vzorku v lubrikační lázni je nutné měřit a udávat i teplotu lázně. [7]

2.1.4.7. Kalibrování

Pro optimální funkci testovacího přístroje je pro správný výsledek zkoušky nutné kalibrovat jeho nejdůležitější části. Jsou to: 1) Zatěžovací systém, 2) pohon oscilačního pohybu a 3) senzor třecí síly.

Zatěžovací systém – zatěžující síla, která působí na testovaný vzorek, se v pravidelných časových intervalech kontroluje. U přístrojů, kde je zatěžující síla vyvozena pružinou a velikost zátěže je indikována na stupnici zátěže, je tuto kalibraci možné nahradit jednotkou využívající střídavé tahové a tlakové zatížení, která byla již dříve kalibrována. Zatěžující síla, která je vyvíjena staticky, je konstantní s max. odchylkou $\pm 2,0\%$ od testované zátěže. To znamená, že povolená statistická

chyba zatěžující síly o 25,0 N je $\pm 0,5$ N. Během oscilačního testu se může zatěžující síla nepatrně lišit od uvedené hodnoty, a to vlivem dynamického pohybu zařízení. S těmito odchylkami je třeba počítat.

Pohon oscilačního pohybu – frekvence oscilace pohybujícího se zkoušeného vzorku se periodicky kontroluje, a to ve srovnání s nastavením pohonu pohybu, a to proto, abychom se ujistili, že známe velikost oscilace. Při zvyšování frekvence oscilace v průběhu testu se musíme vyhnout harmonickým frekvencím vybudovaných zařízení.

Senzor třecí síly – senzor třecí síly kalibrujeme pravidelně, periodicky, v obou směrech pohybu zkušební kulovitého vzorku. Kalibrační zatížení musí působit v jedné linii s kontaktním bodem mezi kulovitým vzorkem a rovinným vzorkem. [7]

2.1.4.8. Postup

Příprava vzorků – kulovitý vzorek i rovinný vzorek se používá ve vyleštěném stavu anebo podle podmínek, které vyhovují pro daný stanovený test. Vzorek ve vyleštěném stavu musí být v maximální míře prost všech známek přípravy vzorku, jako jsou trhliny, oděrky a otlaky po broušení. Drsnost povrchu se u leštěného povrchu běžně pohybuje mezi 0,02 – 0,05 $\mu\text{m Ra}$.

Povrch vzorků se připravuje následujícím způsobem:

- Umyje se nepřilíš koncentrovanou tekutinou na mytí laboratorních zkumavek,
- Vysuší se horkým vzduchem,
- Čistí se ultrazvukem v acetonu (2 minuty),
- Vysuší se horkým vzduchem,
- Čistí se ultrazvukem v metanolu (2 minuty),
- Vysuší se horkým vzduchem.
- Pokud jsou vzorky výrazněji porézní, je třeba je péci nasucho v čisté troubě při teplotě větší než 150 °C po dobu 4 h.

Poznámka: Některé materiály mohou být nepříznivě ovlivněny (poškozeny) čištěním v rozpouštědlech. Odchylky v uvedené proceduře jsou pak povoleny, ale musí být popsány v protokolu zkoušky.

Poté vzorky upevníme do testovacího zařízení a opětovně vyčistíme acetonem. Toto provádíme proto, že při upevňování vzorků do testovacího zařízení mohlo dojít k nechtěnému znečištění či zamaštění zkoušených vzorků. Kulovitý vzorek zkontrolujeme pomocí lupy, abychom se přesvědčili, že není poškozený.

Kulovitý vzorek opatrně přiblížíme k rovinnému vzorku. Zkontrolujeme a zajistíme rovnoběžnost pohonu držáku kulovitého vzorku s povrchem rovinného vzorku. Použijeme předepsané zatížení a zkontrolujeme, před tím než zařízení uvedeme v činnost, stanovenou frekvenci oscilace.

Norma popisuje dva možné způsoby provedení testu zatěžovaných vzorků:

- A) test provedený bez lubrikantu,
- B) test provedený s lubrikantem,

Pakliže ani jeden z těchto testů nevyhovuje podmínkám, které je potřebné otestovat, je možné tyto podmínky upravit, ale takovýto test již nebude v souladu s touto normou. Výjimky z postupů A), B) jsou popsány v kapitole Zpráva.

Postup A – Testování opotřebení při pokojové teplotě bez použití lubrikantu.

- Rádus kulovitého vzorku je 4,76 mm,
- Zatěžovací síla je 25,0 N,
- Délka cyklu je 10,0 mm,
- Oscilační frekvence je 5,0 Hz/s,
- Doba trvání testu je 16 min 40s (vzdálenost kluzu 100 m),
- Teplota okolí je 22 ± 3 °C,
- Relativní vlhkost je 40 až 60%,
- Lubrikant nebyl použit.

Postup B – Testování opotřebení při zvýšené teplotě při použití lubrikantu.

- Rádus kulovitého vzorku je 4,76 mm,
- Normální síla je 200 N,
- Délka cyklu je 10,0 mm,
- Oscilační frekvence je 10,0 Hz/s,
- Doba trvání testu je 33 minut a 20s (vzdálenost kluzu 400 m),
- Teplota je 150 ± 2 °C,
- Relativní vlhkost je 40 až 60 %,
- Lubrikant – úplné ponoření do vybraného lubrikantu (viz. Poznámka 2.).

Poznámka 2 – Tento postup vyžaduje úplné ponoření do lubrikantu. Pokud jsou používány jiné metody, např. systém přikapávání pro simulování jiných způsobů opotřebení, postupuje se podle Alternativních testovacích postupů.

Pokud aplikujeme testovací metodu podle postupu B, musíme stanovenou teplotu 150°C dosáhnout nejméně 5 minut před zahájením testu a stanovená teplota musí být pravidelně kontrolována s maximální odchylkou ± 2 °C. Pro následné testování se použije nepoužitý lubrikant (pokud však není předmětem testování zjištění účinků již použitého lubrikantu na tření a opotřebení).

Nastavíme počítadlo cyklů, je-li k dispozici, na požadovanou délku testování.

Spustíme zařízení záznamu tření (a teploty) a zahájíme testování.

Po uběhnutí předepsané doby trvání zkoušky zastavíme chod zkušebního zařízení.

Vzorky necháme vystydnout, byly-li zahřáty, a vyjmeme je z testovacího zařízení. Pro změření opotřebení je třeba vzorky očistit. V případě postupu A) bez použití lubrikantu ofoukáme příslušný, při testování vzniklý prach stlačeným vzduchem. V případě postupu B) s použitím lubrikantu na vzorek použijeme ultrazvukové čištění ve vhodném rozpouštědle. Vzorky pečlivě osušíme.

Kulovitý vzorek pečlivě zkontrolujeme, zdali v držáku kulovitého vzorku nedošlo k nežádoucímu prokluzu kulovitého vzorku. Rovinný vzorek zkontrolujeme, zdali nedošlo k prokluzu v držáku rovinného vzorku. Jakýkoliv prokluz by zneplatnil provedenou zkoušku.

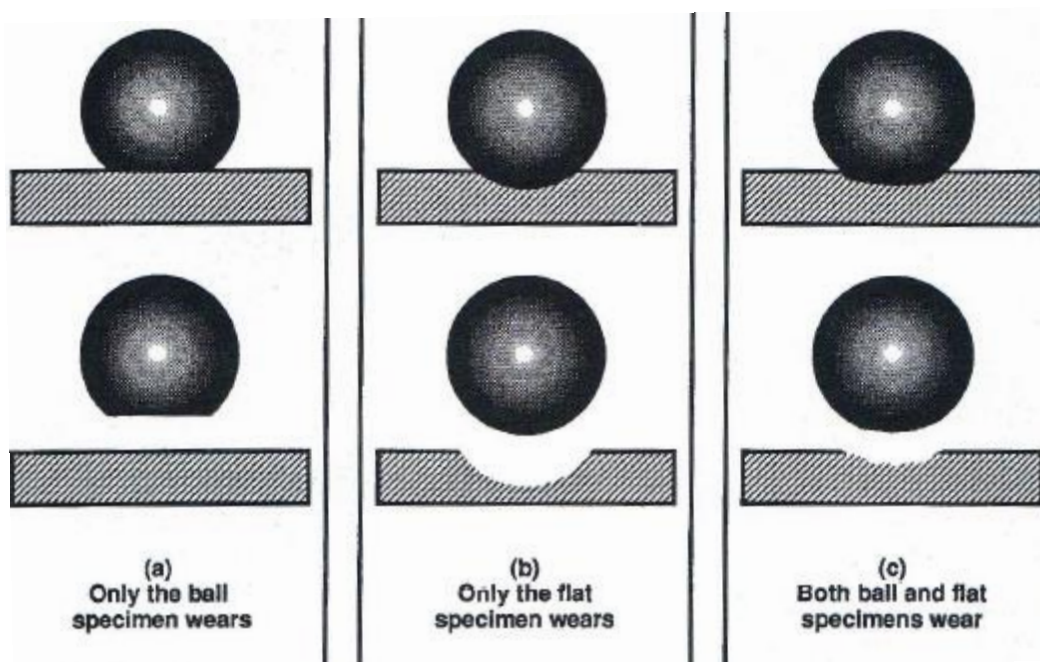
Alternativní testovací postupy – jestliže postupy A) ani B) nejsou vhodné pro dosažení potřebných simulovaných parametrů zkoušek, je možné tyto zkoušky modifikovat. Tyto modifikace testovaných parametrů musí být uvedeny v záznamech o provedení zkoušky spolu s prohlášením například o tomto znění: „*Tento testovací postup není v plném souladu s ustanoveními Testovací metody G133, postupu A), protože zatěžující síla byla 50,0 N namísto 25,0 N, která je předepsána normou a délka rázu byla 5,0 mm namísto 10,0 mm předepsaných normou. Všechny ostatní požadavky vyplývající z normy G 133, postupu A) byly dodrženy*“. [7]

2.1.4.9. Měření a výpočet opotřebení

V závislosti na vzájemném opotřebení kulovitého vzorku a rovinného vzorku můžeme vyslovit různé předpoklady o geometrických nepravidelnostech škrábanců způsobených opotřebením.

Obrázek č. 2 ukazuje několik možných způsobů opotřebení. Na obr. 2 (a) je materiál plochého vzorku mnohem více odolný opotřebení než materiál kulovitého vzorku. Na obr. 2 (b) je materiál kulovitého vzorku mnohem více odolný opotřebení než materiál plochého vzorku. Na obr. 2 (c) se měřitelné opotřebení objevuje jak na materiálu kulovitého vzorku, tak na materiálu rovinného vzorku.

Opotřebení kulového vzorku – jestliže je konec kulovitého vzorku zploštělý, opotřebený a nekulovitý, může být průměrné opotřebení vypočítáno a tato hodnota použita jako střední průměr opotřebení na kulovitém vzorku. Měření můžeme také provádět po vyjmutí kulovitého vzorku z držáku a opotřebované místo na kulovitém vzorku umístíme pod reflexní mikroskop a pomocí kalibrovaného okuláru toto opotřebení změříme.



Velikost opotřebení (V_p) na kulovitém vzorku se středním průměrem D (viz obr. 2 (a)) je možné získat ze vztahu:

$$V_p = (\pi/6)[3D^2/4 + h^2],$$

kde:

h = výška odstraněného materiálu [mm]

Za předpokladu kulatého (sférického) rozsahu opotřebení můžeme výšku odstraněného materiálu vypočítat ze středního průměru D , následujícím vztahem:

$$h = R - [R^2 - (D^2/4)]^{1/2},$$

kde:

R = původní rádius kulovitého vzorku [mm].

Je-li kulový konec vzorku zjevně opotřeben, ale profil stopy po opotřebení na plochém vzorku ukazuje, že kulička není úplně plochá, jako na obr. 2 (c), zaznamenáme tuto skutečnost a buď změříme rozsah opotřebení jinou metodou, kterou detailně popíšeme, anebo rozsah opotřebení nezaznamenáváme.

Poznámka 3 – Pro měření rozsahu opotřebení na ne zcela plochých vzorcích s kulovým koncem již bylo použito mnoho metod. Je tedy možné je využít a o jejich výsledcích pak reportovat, ale ve zprávě musí být uvedeno ustanovení, které je zmíněno v Alternativních testovacích postupech, aby bylo patrné, že výpočtová metoda není v souladu s ustanoveními této testovací metody.

Je-li kulovitý vzorek jen lehce opotřeben, je možné použít výraz: „žádné měřitelné opotřebení“.

Je-li konec kulovitého vzorku potažen lepkavým ložiskem zbytků opotřebení, nemůže být zaznamenáno žádné měřené opotřebení, ale do zprávy o průběhu testu se uvádí, z jakého důvodu nebylo měření provedeno.

Opotřebení rovinného vzorku – rozsah opotřebení plochého vzorku se počítá z délky cyklu a z aritmetického průměru příčných řezů oblastí stopy opotřebení. Ve většině případů bude šířka a hloubka stopy po opotřebení na plochém vzorku v zásadě stejná po celé jeho délce. Pokud se plochy tří prvních profilů liší méně než o 25%, potom budou tři profily postačovat. Je-li opotřebení rozdílné, potřebujeme k vyhodnocení šest příčných řezů.

Příčný řez stopou po opotřebení je oblast, ze které byl odebrán materiál z originálního povrchu rovinného vzorku. Řez je veden kolmo k povrchu rovinného vzorku a kolmo ke směru oscilačního pohybu. Příčné řezy získáváme za použití zařízení s rydlem anebo za použití zařízení s podobnou funkcí. Stopu vzniklou z opotřebení ohraničíme napříč narýsovanými rovnými liniemi. Linie oddělují stopu opotřebení a netknutý materiál rovinného vzorku. Tento netknutý materiál se používá jako referenční k výpočtu objemu rozsahu opotřebení.

Objem, rozsah opotřebení rovinného vzorku V_f [mm³] je počítán ze vztahu:

$$V_f = A \times L$$

kde:

A - průmětná oblast příčného řezu [mm²],

L - délka cyklu [mm]. [7]

2.1.4.10. Zpráva

Ve zprávě o průběhu zkoušky zaznamenáme všechny neobvyklé okolnosti, které doprovázely zkoušku, jako například: hluk, chvění, vibrace nebo neobvyklé chování způsobené třením. Testovací parametry, které zaznamenáváme v psané zprávě, musí odpovídat postupu A nebo postupu B. Je-li testování provedeno podle jiného postupu, než je postup A nebo postup B, musí být toto jednoznačně uvedeno v zápisu o testu a musí být uvedeny i odlišnosti od postupu A nebo od postupu B.

Zaznamenáváme tyto skutečnosti:

Specifikujeme materiál, ze kterého je vyroben kulovitý vzorek a materiál, ze kterého je vyroben rovinný vzorek. Určujeme zdroj materiálu, jeho chemické složení, jeho historii zpracování, ošetření jeho povrchu, jeho efektivní tloušťku povrchu, dále udáváme komerční označení materiálu.

Při postupu B), kdy při testu používáme lubrikant, uvádíme komerční název lubrikantu anebo jiné zdroje, které jednoznačně určí původ a vlastnosti použitého lubrikantu.

Testujeme těmito parametry:

- použitá zatěžující síla [N] a rádius konce kulovitého vzorku [mm],
- délka cyklu [mm],
- doba trvání testu [s],
- oscilační frekvence [s⁻¹] a druh pohybu vytvářeného oscilujícím pohonem systému: např. sinusoidní profil rychlosti, trojúhelníkový profil rychlosti atd.,
- relativní vlhkost okolí [%],
- teplota okolí [°C],
- jestli je použit lubrikant nebo ne.

Výsledky:

- ve zprávě uvádíme rozsah opotřebení, ne poměr opotřebení,
- ve zprávě uvádíme rozsah opotřebení kulovitého vzorku, je-li stopa po opotřebení plochá v mm²,
- ve zprávě uvedeme krátký popis výskytu stop z opotřebení včetně přítomnosti pozůstatků pilin nebo povlaků, které se vytvořily během testu. Je-li to možné, měly by být přiloženy i fotky nebo záznamy stop po opotřebení z mikroskopu.

Alternativní možnosti záznamů:

Zaznamenáme vypočtené hodnoty maximálního elastického tlaku při kontaktu (S_C) podle metody vyvinuté Hertzem. Použijeme následující vztah:

$$S_C = 0,918 (P/(D^2 E_0^2))^{1/3},$$

kde:

P - aplikované zatížení [N],

D - průměr koule [m],

E_0 se získá z následujícího vztahu:

$$E_0 = \{[(1-\nu_1^2)/E_1] + [(1-\nu_2^2)/E_2]\},$$

kde:

$E_{1,2}$ - Yangův modul pružnosti [Pa],

$\nu_{1,2}$ - Poissonovy konstanty jednotlivých materiálů.

Pokud vypočtený tlak v místě kontaktu převyší tvrdost kteréhokoliv z materiálů, dojde k trvalé plastické deformaci a není možné použít elastické podmínky.

Uvedeme záznamy z mikroskopu (fotky) anebo údaje pro analýzu opotřebení ze stop po opotřebení na površích kulovitého a rovinného vzorku.

Popíšeme chování při testu vyvolané třením.

Koeficient kinetického tření vypočítáme z následujícího vztahu:

$$u_k = F/P,$$

kde:

u_k - koeficient kinetického tření,

F - nominální měřená třecí síla během oscilace [N],

P - použitá zatěžující síla [N].

U některých přístrojů je možné získat efektivní hodnotu třecí síly jako jejich vlastní výstup. Zpráva z testování musí jasně uvádět, jakým způsobem byla třecí síla získána.

Poznámka 5 – Třecí síla se může v průběhu experimentu měnit v důsledku faktoru záběhu anebo jiných faktorů. Například může třecí síla být na vysokých hodnotách a v průběhu testu se tyto hodnoty sníží. Pro analyzování výsledků je důležité zaznamenat magnitudu a dobu trvání jakékoli pozorovatelné změny tření. Pokud třecí síla zůstává stabilní v průběhu celého testování nebo rychle dosáhne stabilního stavu, může postačit jen jedna nominální hodnota třecí síly. Pokud tření nikdy nedosáhne stabilních hodnot, potom uvedeme s náležitými komentáři celý průběh měření. [7]

2.1.4.11 Přesnost

Přesnost – přesnost při určování opotřebení závisí na charakteru opotřebení materiálu při použitých testovacích podmínkách. Některé materiály se opotřebovávají rovnoměrně, takže se na

nich vytvářejí jasně definovatelné stopy z opotřebení a rozměry opotřebení mohou být měřeny s vyšším stupněm přesnosti než u materiálů, které se opotřebovávají nerovnoměrně a jejich stopy z opotřebení pak nemohou být jasně popsány. [7]

2.1.4.12. Diskuse

Příprava pro testování opotřebení vyžaduje pečlivou přípravu, pečlivě vypracovanou charakteristiku materiálu vzorků a přípravu, očištění, vzorků. Pokud má záznam z testu opotřebení poskytovat smysluplné výsledky, musí být kontaktní geometrie (tvar zkušebních vzorků), zatěžující síla, typ oscilačního pohybu, teplota, příprava povrchu vzorku a podmínky okolního prostředí co nejvíce podobné vybraným postupům.

Během testu se může objevit rozdílný rozsah opotřebení na začátku testu, v průběhu testu a na konci testu. Tento jev může být během testu indikován změnou třecí síly. Testování je možné přerušit, ale vystavujeme se nebezpečí toho, že se nám nepovede znovu nastavit stejné podmínky testování, jaké byli před přerušением testu. Avšak tato testovací metoda popisuje opotřebení jako celkovou ztrátu objemu zkušebních vzorků. Tím se vyhneme závěru, že poměr opotřebení byl konstantní v celém průběhu testu.

Vlhkost vzduchu při zkoušce ovlivňuje průběh samotného tření, ale i opotřebení jak kovů, tak i polymerů a keramiky. Rozsah změny relativní vlhkosti vzduchu může být malý a přesto se mohou zřetelně projevit změny v tribologickém chování zkoušených vzorků. Proto je důležité udržovat hodnotu relativní vlhkosti vzduch v pásmu 50% v rozmezí $\pm 5\%$ nebo i méně. Je-li to možné, může se okolo testovacího zařízení postavit kryt, kde bude možné pohodlněji udržovat relativní vlhkost v rozmezí $\pm 5\%$ nebo i méně. Avšak postavení krytu okolo testovacího zařízení není v souladu s postupem uvedeným v této normě. Doporučuje se proto, aby se testování provádělo v době, kdy je relativní vlhkost vzduch v rozmezích uváděných ve specifikovaných postupech, které jsou v souladu s touto normou.

Jestliže testujeme na opotřebení rozdílné druhy materiálů kulovitého vzorku a rovinného vzorku, nemůžeme očekávat, že vzájemné poměry opotřebení budou stejné. U rovinného vzorku se většinou mění úroveň tlaku v průběhu cyklu a kulovitý vzorek je zatížen konstantní zatěžovací silou. [7]

2.2. Laser

Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu z anglického jazyka znamená: „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Překlad tohoto názvu do českého jazyka blíže vysvětlím a podrobněji popíši, a to podle zvolené osnovy v této kapitole: historie laseru, hlavní součásti laseru, princip činnosti laseru, typy laserů, přehled laserů a dále podle možností využití laserů, podle bezpečné práce s lasery a podle uplatnění laserů v průmyslu.



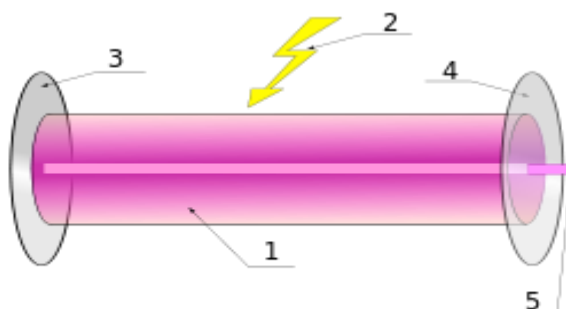
Obr.3: helium-neonový laser 1[3]

2.2.1. Historie

Historie laseru se odvíjí již od doby Alberta Einsteina, který jej jako první fyzikálně popsal v roce 1917. Předchůdcem laseru byl ale tzv. maser, který pracoval na stejném fyzikálním principu, stimulované emise (viz. Princip laseru-stimulovaná emise), ale produkoval mikrovlnné záření. První maser vynalezl v roce 1953 Charles Townes, J. P. Gordon a H. J. Zeiger, ale bohužel jeho funkčnost byla časově omezená. První laser hodný tohoto názvu byl sestaven až v roce 1960 Theodorem H. Maimanem v USA. Laser pracoval pouze v pulzním režimu (mezi jednotlivými výstupními paprsky vznikají prodlevy, které jsou dány časem nutným k nahromadění potřebné energie, a tak vznikají světelné pulsy) a jako aktivní prostředí (*je stav látky obohacené energií, a to např. zahřátím, osvětlením, průchodem elektrického proudu, chemickou reakcí, a to tak, aby převážil počet atomů na některé vybrané vyšší energetické hladině nad počtem atomů na nižší energetické hladině, ... viz. Součásti-Aktivní prostředí*) posloužil krystal rubínu. V roce 1963 byl vynalezen plynový CO₂ laser.

Problém nepřetržitého výstupu záření vyřešili sovětsí vědci Basov a Popov tím, že použili více než dvě energetické hladiny, čímž vznikla tzv. populační inverze (viz. Princip-inverze populace). Za tento objev obdrželi Nobelovu cenu za „zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky“.[3]

2.2.2. Součásti



Obr.4: konstrukce laseru 1[6]

2.2.2.1. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je látka obsahující oddělené kvantové energetické hladiny elektronů. Na těch přeskakují elektrony z nižší energetické hladiny na vyšší, poté na metastabilní a zpět na nižší energetickou hladinu.

Na nižší energetickou hladinu můžou elektrony přeskočit dvěma způsoby.

1. Stimulovaná emise - okopíruje se jiný foton procházející atomem.
2. Spontánní emise - foton se vyzáří samovolně.

Aktivní prostředí lze dělit do čtyř základních skupin:

- Plynové - aktivní prostředí je složeno z jednoho či více plynů.
- Pevnolátkové – prostředí je tvořeno monokrystalem, kde hladiny vznikají dopováním.
- Diodové – tvořeno polovodičem s přechodem typu P-N (*přechod P-N propouští elektrický proud pouze jedním směrem*).
- Kapalinové - tvořeno roztoky různých organických barviv.
- Volné elektrony. [6]

2.2.2.2. Rezonátor

Rezonátor se využívá k zesilování světla. Rezonátory jsou dvě k sobě rovnoběžná zrcadla, která jsou zároveň kolmá na osu laseru. Jedno z nich je nepropustné a druhé je polopropustné. Světlo, které vzniklo v laseru, může uniknout ven a laser tak svítí.

Jako nepropustné zrcadlo se většinou používá dielektrické zrcadlo, nebo lze také použít kvalitně leštěný kov (zlato). Ve výjimečných případech, především u laserové diody, má dostatečnou odrazivost samotné rozhraní aktivního prostředí se vzduchem, protože reflexivita rozhraní závisí na indexu lomu materiálu.

Polopropustné zrcadlo propouští fotony ven až při větší intenzitě, jinak se udržují fotony dále v aktivním prostředí.

Některé lasery, které dokážou vyvinout dostatečně velkou energii při jednom průchodu aktivním prostředím, nepotřebují rezonátor a pracují tzv. "superradiačně" - dokážou získat dostatečnou energii jedním průchodem. Mezi ně patří např. měděný laser nebo dusíkový laser. Rezonátor se taktéž nepoužívá u laserových zesilovačů. To je aktivní prostředí, kterým akorát prochází laserový paprsek z důvodu jeho zesílení a pokračuje dál bez jakéhokoliv odrazu.

Zrcadla jsou většinou rovinná, ale můžou být i zakřivená. V některých případech je lepší použít zrcadla konkávní (*vyduté - směr dovnitř*) a v jiných zase konvexní (*vypuklé - směr ven*). Stabilita záření v rezonátoru závisí především na poloměru zakřivení zrcadla, ale i na délce rezonátoru. [6]

2.2.2.3. Zdroj záření

Zdroj záření dodává energii elektronům v aktivním prostředí tak, aby se mohly přesouvat z nižší energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu. Zdrojem záření může být např. elektrický proud, výbojka, chemická reakce atd.

2.2.2.4. Laserový paprsek

Laserový paprsek vycházející z aktivního prostředí přes polopropustné zrcadlo je koherentní (*světlo tvořené jednou vlnovou délkou a stejnou fází, tzn. vlnění „běží“ současně vedle sebe a téměř vůbec se nerozbíhá*) a monochromatický (*světlo, které tvoří pouze jedna barva, tzn. záření o stejné vlnové délce*). Rychlost laserového paprsku je stejně velká jako rychlost světla, tedy $v = 300\,000$ km/s.

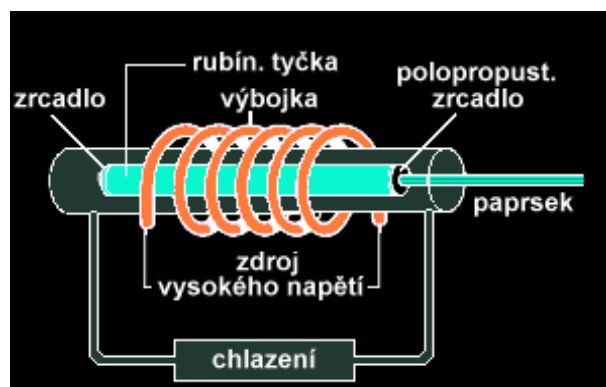
2.2.2.5. Ostatní příslušenství

- Chladič laseru, který je důležitý při vyšších výkonech laseru a také slouží k ochlazení laseru a k ochraně probíhajícího procesu.
- Součásti pro dodávání energie aktivnímu prostředí.
- Měřič výkonu.
- Kalibrační přístroje.
- Nelineární krystal měnící vlnovou délku. [6]

2.2.3. Princip

2.2.3.1. Úvod

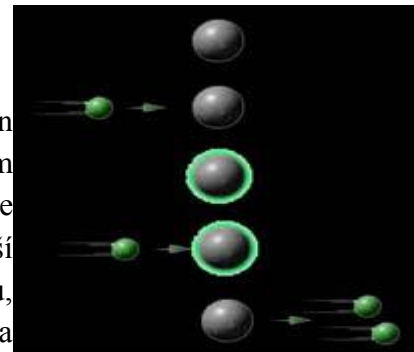
Laser jako takový je složité technické zařízení, složené ze speciálních součástí a fungující na základě fyzikálních principů a zákonů. Pakliže tyto součásti jsou vhodně zkombinovány a pospojovány, vznikne nám laser, který vydává světlo, které se v přírodě běžně nevyskytuje.



Obr.5.: schéma laseru [6]

2.2.3.2. Interakce fotonu a elektronu

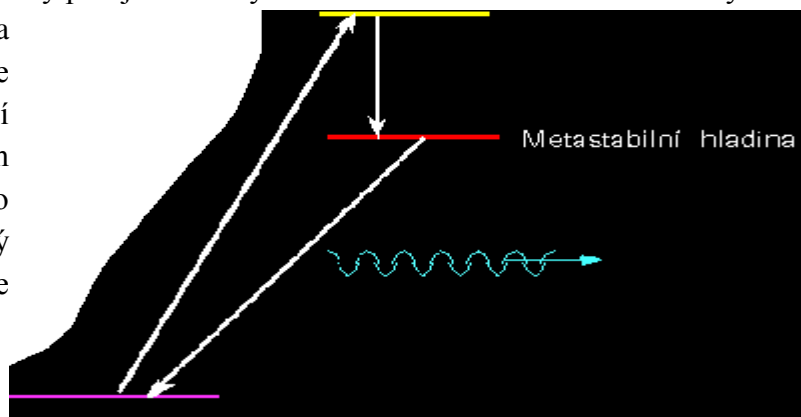
Existuje volný elektron, do něhož vstoupí foton (elementární částice, kterou popisujeme jako kvantum elektromagnetické energie), čímž dojde k pohlcení energie fotonu elektronem a tím se elektron posune, excituje na vyšší energetickou hladinu. Toto je podmíněno velkou energií fotonu, která tuto excitaci elektronu umožní! Po excitaci elektronu na vyšší energetickou hladinu foton zaniká. Elektron se v této excitované hladině udrží cca 10^{-8} s a poté se samovolně opět přesune na svoji původní energetickou hladinu (tzv. *spontánní emise*). Tato spontánní emise uvolní, vyšle, foton o stejné energii náhodným směrem!



Když nastane situace, kdy letí 2 fotony o stejné vlnové délce velmi blízko sebe, tak první foton elektron excituje a tento foton zanikne. Druhý foton, vzhledem k jejich původní velmi malé vzájemné vzdálenosti, narazí také do toho samého elektronu (*nestačil se vrátit ještě na svoji „neexcitovanou“ hladinu*) a o to rychleji tak elektron „srazí“ na jeho původní energetickou hladinu. Elektron na této původní hladině vypustí první foton, který tentokrát letí stejným směrem jako druhý foton. Tyto dva fotony mají stejnou vlnovou délku s nulovým posunutím, a proto se spojí. Dojde ke vzniku jedné vlny s dvojnásobnou amplitudou a s dvojnásobnou energií. [6]

2.2.3.3. Metastabilní hladina

Pro vytvoření paprsku laseru je důležité, aby fungoval v tzv. aktivním prostředí. Aktivní prostředí musí obsahovat prvky či molekuly s tzv. metastabilní hladinou. Narazí-li foton do elektronu, excituje ho na vyšší energetickou hladinu a za určitý krátký čas se vrátí na svoji povodní energetickou hladinu. Uvolní foton, který putuje náhodným směrem. Rozdíl mezi ostatními vyššími energetickými hladinami a metastabilní hladinou je ten, že v metastabilní hladině vydrží elektron až 100000x déle. Tím vznikne větší jistota toho, že tento elektron bude zasažen fotonem, který ho stimuluje a vypustí foton, se kterým se poté opět spojí. [6]



2.2.3.4. Inverze populace

K inverzi populace dochází tehdy, když je více elektronů atomu na metastabilní hladině než na základní hladině. Protože zdroj nám opětovně dodává energii v podobě fotonů, tak každý foton excituje jeden elektron na vyšší energetickou hladinu a následně na metastabilní hladinu. Tím se nahromadí většina elektronů na metastabilní hladině a vyčká na foton, který je stimuluje. Stimulující foton může přiletět z libovolného směru, ale poté se už fotony stimulují navzájem. V obyčejném světle se nachází všechny vlnové délky světla, a proto i potřebný stimulující foton, čímž nám dojde ke spuštění reakce. Stimulující foton donutí všechny elektrony sestoupit na jejich původní základní hladinu a donutí všechny elektrony vypustit jeden foton. Všechny tyto fotony, včetně toho stimulujícího, se spojí v jednu energetickou vlnu s mnohem větší amplitudou. Tím dojde k zesílení světla stimulovanou emisí záření. Tato vlna nemá potřebný směr, směr je totiž stejný jako ten, jakým letěl stimulující foton. Foton může letět v požadovaném směru laserového paprsku, ale i někam jinam. Jakmile se elektron vrátí zpět na svoji základní energetickou hladinu, zdroj nám opětovně pošle další foton a celý děj se opakuje. [6]

2.2.3.5. Stimulovaná emise

Tento děj popsáný v kap. 2.2.3.4. zatím proběhl na jednom atomu. Protože zesílený letící foton nemá zatím potřebný směr, laser nemůže fungovat. Když ale zmnohonásobíme počet atomů, tak nám v každém atomu proběhne ta samá interakce a všechny elektrony jsou v metastabilní hladině a čekají na „svůj“ stimulující foton. Všechny těchto X atomů vypustí zesílené fotony, ale každý libovolným směrem. Tyto letící fotony působí pro ostatní jako stimulující fotony, a proto donutí ostatní elektrony přesunout se zpět a vypustit fotony, které se přidají ke stimulujícím fotonům. Tyto fotony se opět mnohonásobně zesílí a tímto dochází k zesilování světla. Fotony se pořád pohybují všemi směry. [6]

2.2.3.6. Rezonátor

Rezonátor je soustava dvou zrcadel, z nichž je jedno odrazivé až z 99,9%, druhé zrcadlo je polopropustné. Tato dvě zrcadla jsou rovnoběžná vůči sobě navzájem. V rezonátoru mohou nastat dvě situace. první situace je, že fotony letí mimo osu rezonátoru a pak se tyto fotony několikrát odrazí mezi zrcadly a vyletí ven anebo rovnou vyletí ven z rezonátoru, laseru. Druhá situace je ta, že jsou i fotony, které letí rovnoběžně s osou laseru, rezonátoru. Tyto fotony se budou neustále pohybovat mezi zrcadly a tím na sebe navazovat ostatní fotony. Počet těchto „správně“ letících fotonů začne vrůstat, jelikož „špatně“ letící fotony neustále zanikají a „správně“, rovnoběžně letící fotony se pohybují v aktivním prostředí a tím stimulují další fotony. Rovnoběžné fotony stimulují další a další atomy a tím nám exponenciálně vzrůstá množství fotonů v laseru. A proto špatně letících fotonů bude ubývat, protože než se samovolně uvolní z nabitého atomu, strhne ho nějaký rovnoběžně letící foton stejným směrem. Zde vzniká nutnost metastabilní hladiny, aby se fotony tak rychle samovolně neuvolňovaly špatným směrem a počkaly, až je strhne foton letící správným směrem. V této chvíli je již laser funkční. [6]

2.2.3.7. Polopropustné zrcadlo

Polopropustné zrcadlo vypouští foton ven v té chvíli, kdy foton zesílí na určitou úroveň a tím nám vznikne požadovaný paprsek.

2.2.3.8. Závěr

Atomy s metastabilní hladinou jsou důležité proto, aby zadržovaly elektrony a ty tak byly lépe „trefitelné“ pro rovnoběžně letící fotony (dojde k vypuštění fotonu) a tím aby toto exponenciálně vrůstající množství „správně“ letících fotonů strhávalo sebou i ty „špatně“ letící fotony. Laser pak funguje. Vše probíhá v řádu milisekund.

2.2.4. Typy

Typy laserů můžeme rozdělit podle:

- a) aktivního prostředí: kapalina, plyn, polovodič, pevná látka,
- b) vlnové délky: rentgenové, infračervené, ultrafialové, viditelné světlo,
- c) pracovního režimu: kontinuální, pulzní
- d) způsobu vybuzení, excitace: chemickou reakcí, optickým zářením, elektrickým polem,
- e) počtu energetických hladin: 2, 3 nebo více. [6]

2.2.4.1. Kapalinové lasery

Jejich aktivní prostředí je tvořeno barevnými organickými roztoky, kdy jednotlivou kombinací příslušných organických barviv můžeme vytvořit světlo o vlnových délkách 300 nm - 1500 nm. Použití hlavně ve spektroskopii. Nevýhodou je rozklad aktivního prostředí, které je způsobeno působením světla a tepla.

2.2.4.2. Plynové lasery

Jejich aktivní prostředí tvoří: molekuly, ionty nebo atomy. Pracují jak v kontinuálním režimu, tak v pulzním režimu. K excitaci elektronu dochází většinou elektrickým výbojem ve zředěném plynu. Tyto typy laserů se vyznačují stejnorodým (homogenním) aktivním prostředím s velmi dobrými parametry, avšak s malým výkonem. Nejrozšířenějším plynovým laserem je helium-

neonový laser s červeným nebo zeleným paprskem. V medicíně a v průmyslu se nejvíce využívá CO2 laser o vlnové délce na úrovni infračerveného záření a vlnové délce 10,6 μm .

2.2.4.3. Polovodičové lasery

Tyto typy laserů jsou dnes nejpoužívanější a nejrozšířenější. Jejich základem je laserová dioda s velmi malými rozměry s účinností až 50% a s dobrou možností regulace výkonu (změnou elektrického proudu). Laserové diody našly své uplatnění především ve výpočetní technice.

2.2.4.4. Pevnolátkové lasery

Jejich aktivní prostředí je tvořeno většinou krystalickými látkami, kdy je k excitaci použit optický zdroj. Mohou pracovat v různých provozních podmínkách a v různých režimech, kdy se vyznačují lehkou údržbou a stabilitou. Záření jimi vyprodukované je v rozsahu o vlnové délce infračerveného světla až viditelného světla. Nejznámější zástupce tohoto laseru je rubínový laser se syntetickým rubínem. Nejpoužívanější je Nd:YAG laser jehož vlnová délka je 1064 nm, vyzařuje IR světlo a využívá se především v chirurgii, strojírenství nebo spektroskopii.

2.2.5. Přehled

Následující tabulka č.1 shrnuje základní vlastnosti některých běžných typů laserů.

Tabulka č.1: přehled základních vlastností laseru				
Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Pevnolátkové				
Rubínový laser	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho:YAG laser	Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safrírový laser	titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR	žihání, řezání
Barvivové				
Rhodamin 6G laser	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	Kumarin C30	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie
Plynové – Atomární				
He-Ne laser	helium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy, spektroskopie
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR	věda, termojaderná fúze
Xenonový laser	xenon, neon,	140 vlnových	viditelné, IR	

	helium	délek		
Plynové – Iontové				
Argonový laser	argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium-kadmiový laser	helium, kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá	spektroskopie
Plynové – Molekulární				
Vodíkový laser	vodík	100 - 120nm, 140 - 165nm	UV	
CO ₂ laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR	sváření, řezání, stomatologie, gravírování
CO laser	Oxid uhelnatý	5 - 6,5μm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie
Dusíkový laser	dusík	337 nm	UV	
Polovodičové				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserová tiskárna
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

poznámka: UV ~ ultraviolet (ultrafialová), IR ~ infrared (infračervená). [\[3\]](#)

2.2.6. Využití

Využití laserů je obrovské a je rozšířeno v mnoha oborech: viz. níže.

2.2.6.1. Laser v medicíně

- využití v dermatologii,
- využití v oftalmologii,
- využití ve stomatologii,
- využití v laserové terapii.

2.2.6.2. Laser v průmyslu

- laserové řezání,
- laserové vrtání,
- laserové svařování,
- laserové kalení,
- laserová dekorace skla,
- laserové značkování,
- atd.

2.2.6.3. Laser v ostatních odvětvích

- laserové tiskárny,
- laser v ekologii a meteorologii,
- laser a čárový kód,
- laser v astronomii a geodézii,
- laser ve vojenství,
- laserové ukazovátko,
- laserové zaměřování a měření vzdáleností,
- laser - Apache Point - Měření vzdálenosti Měsíce laserem. [\[6\]](#)

2.2.6.4. PALS - Prague Asterix Laser System

- jeden z největších laserových systémů na světě a největší v České Republice.

2.2.7. Bezpečnost

Při práci s lasery je důležité chránit zdraví obsluhy laseru, a proto je nutné dodržovat přiměřené bezpečnostní standardy. Některé lasery pracují na frekvencích, které lidské oko velice dobře vnímá. Jelikož je laser koherentní a rozptyl je tedy velmi malý, může být světlo laseru soustředěno na velmi malou plochu sítnice, čímž způsobí přehřátí daného bodu a může dojít k trvalému poškození zraku. [\[6\]](#)

Lasery se dle bezpečnosti dělí do čtyř základních skupin:

Třída 1

Lasery, které jsou bezpečné za provozních podmínek, jež lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně podmínek sledování svazku pomocí optických přístrojů. V tomto případě není specifikována doba vystavení vlivu záření. Tato třída zahrnuje i vysokovýkonné lasery, které mají záření odstíněno od svého okolí a při otevření tohoto krytu se laserový systém automaticky vypne.

Třída 1M

Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4 000 nm, které jsou bezpečné za provozních podmínek, jež lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, ale mohou být nebezpečné, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje. Lasery klasifikované třídou 1M mají celkový výstupní výkon pod třídou 3B, ale jejich výkon schopný projít skrz oční sítnici spadá do třídy 1.

Třída 2

Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex, který nedovolí vystavit lidský zrak ostrému záření na dobu delší než 0,25 vteřiny, přičemž záměrné potlačení mrkání může vést v tomto případě k poškození zraku. Tato reakce může být považována za dostatečnou pro zajištění adekvátní ochrany za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně použití optických přístrojů pro pozorování uvnitř svazku. Lasery třídy 2 jsou limitovány hodnotou výstupního výkonu 1mW v kontinuálním režimu. Hranice hodnoty výstupního výkonu se může zvýšit, pokud doba záření není delší než 0,25 vteřiny nebo záření není prostorově koherentní. Do této třídy patří například většina laserových ukazovátek.

Třída 2M

Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Sledování výstupu laseru může být nicméně daleko nebezpečnější, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje. Do této třídy patří lasery s velkým průřezem paprsku nebo jeho velkou divergencí (rozbíhavostí). Světlo procházející skrz oční zornici nesmí překročit hodnotu výkonu třídy 2.

Třída 3R

Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 106 nm, u kterých je přímé sledování uvnitř svazku potenciálně nebezpečné, ale riziko je menší než u laserů třídy 3B. Rovněž je v jejich případě požadováno menší množství výrobních požadavků a kontrolních hodnot pro uživatele než u laserů třídy 3B. Přípustná mez záření (AEL) je pětinasobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 2 v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm a pětinasobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 1 pro ostatní vlnové délky. Maximální výkon laserů třídy 3R pracujících ve viditelné vlnové délce a v kontinuálním režimu je 5mw. Pro pulsní režimy a jiné vlnové délky jsou používány jiné limitní hodnoty.

Třída 3B

Lasery, u kterých je za normálních okolností nebezpečné, jestliže dojde k přímému ozáření svazkem (ve jmenovité vzdálenosti s nebezpečím poškození zraku). Sledování difúzních odrazů je za běžných podmínek bezpečné. Pro lasery pracující v kontinuálním režimu a na vlnové délce v rozsahu od 315nm do daleké infračervené (far IR) oblasti je limitní hodnota výkonu do 0,5W. Pro pulsní lasery s vlnovou délkou 400-700nm (viditelné záření) je limitní mez stanovena hodnotou energie pulsu 30mJ.

Třída 4

Vystavení přímým paprskům záření těchto laserů způsobuje silná poranění očí s trvalým a vážným poškozením zraku. Difúzní odraz je také nebezpečný, není-li dodržena minimální bezpečná vzdálenost. Lasery této třídy jsou schopny silně pořezat a popálit kůži. Při interakci s hořlavými materiály hrozí nebezpečí vznícení. Do Třídy 4 jsou zahrnovány všechny lasery s vyšším výkonem nebo vyšší energií pulsu než lasery třídy 3B. [8]

2.2.8. Lasery v průmyslu

Jak vyplývá z kapitoly 2.1.6., využití laserů v průmyslu je velmi široké a jelikož se v této semestrální práci budeme zabývat laserovým kalením konkrétně ocelí, popíši níže tento způsob tepelného zpracování.

2.2.8.1. Laserové kalení

2.2.8.1.1. Kalení

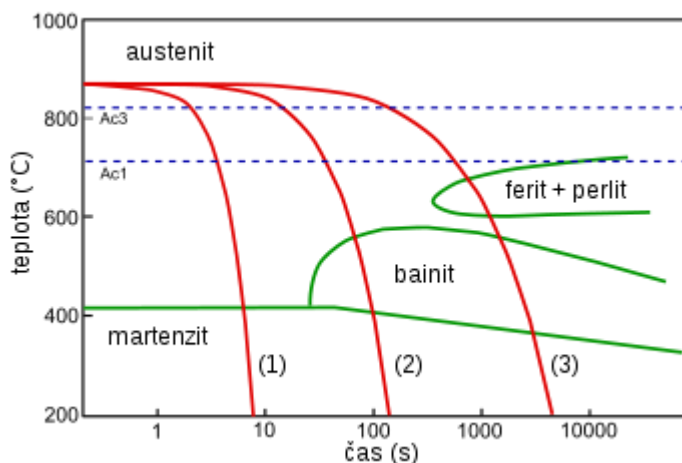
Kalením se označují takové způsoby tepelného zpracování, jejichž cílem je dosažení nerovnovážných stavů ocelí. Podle převažující struktury se kalení rozděluje na martenzitické a bainitické. Většinou je cílem kalení zajistit martenzitickou strukturu materiálu.

Je prováděno jak u nástrojových ocelí, tak u ocelí konstrukčních, a to pro zlepšení určitých mechanických vlastností. Kalením se dosahuje u součástí vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Zakalením oceli se vždy zvýší i její pevnost v tahu. Současně se zvětší i její objem. To

způsobuje problémy hlavně při kalení velkých součástí: deformace, křivost, velké vnitřní pnutí, nebezpečí trhlin, až prasknutí součástí. Kalením se „zvětší“ objem oceli.

U konstrukčních ocelí je martenzit výchozí strukturou pro další tepelné zpracování, například popouštění za vyšších teplot (zušlechťování), jehož výsledkem je jemná popouštěcí struktura sorbit, která má výbornou kombinaci pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Toto zušlechťování je vlastně zvláštní způsob kalení, při kterém nejde o tvrdost, ale o zvýšení pevnosti v tahu na mm^2 . Naopak u nástrojových ocelí je martenzit strukturou konečnou, která právě u těchto ocelí zajišťuje vysoké hodnoty tvrdosti a houževnatosti. Jemnost, resp. zrnitost je závislá na rychlosti ochlazování, ale i na dalších faktorech (nečistoty v kovu atd.). Čím je rychlost vyšší, tím je struktura jemnější. Kalicí teplota je nižší než teplota tavení kovu a je závislá na obsahu uhlíku.

- Druhy kalení:** - martenzitické - *nepřetržitě*,
 - *přetržitě* – lomené,
 - izotermické,
 - se zmrazováním.
- bainitické – *nepřetržitě*,
 - *izotermické*.



Obr.6.: diagram anizotermického rozpadu austenitu: (1) martenzit, (2) bainit, (3) feriticko-perlitická struktura, červené křivky jsou rychlosti ochlazování [1\[3\]](#)

Martenzitické kalení do studené lázně

Nejjednodušší, nejlevnější a nejčastější způsob kalení s malou technologickou náročností. Hlavními nedostatky jsou vysoké úrovně vnitřních pnutí, následných deformací až praskání kalených předmětů.

Přerušované lomené kalení

Spočívá v rychlém ochlazení až na teplotu těsně nad M_s (martenzit start), které zabrání perlitické přeměně, pak se předmět přemístí do mírnějšího ochlazovacího media, kde proběhne martenzitické přeměna. Ochlazovací prostředí: voda-olej, voda-vzduch nebo olej-vzduch. Dosáhneme snížení úrovně strukturních pnutí a používáme hlavně u tvarově složitých a rozměrných výrobků.

Termální kalení

Předmět se ochlazuje v lázni s teplotou ležící těsně nad teplotou M_s kalené oceli. Dostatečná doba setrvání na této teplotě vede k vyrovnání teplot mezi povrchem a středem kaleného předmětu a tím i k potlačení teplotních pnutí před samotným zakalením (zpravidla na vzduchu), kdy dojde k martenzitické přeměně. Vhodné pro výrobky z legovaných ocelí s dostatečnou stabilitou austenitu nad teplotou M_s .

Izotermické zušlechťování

Předmět rychle přeneseme z kalící teploty do termální lázně (soli, slitiny kovů), jejíž teplota je okolo 300-400°C (bainitická přeměna). V lázni po ukončení bainitické přeměny následuje ochlazení na vzduchu. Dosahujeme minimální úrovně teplotních a strukturních pnutí. Deformace a praskání je proto minimální. Použití zpravidla pro nízkolegované oceli.

Izotermické kalení

Teplota lázně leží těsně pod teplotou M_s a výsledná struktura je směsí martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu.

Kalení se zmrazováním

Zakalený předmět je co nejrychleji přenesen do prostředí s teplotou pod bodem mrazu, až -196°C, kdy chceme zmenšit zbytkový podíl austenitu ve struktuře. Zmrazení bezprostředně po kalení, aby nedošlo ke stabilizaci austenitu. Použití u výrobků, kde je důležitá rozměrová stabilita (měřidla, nástroje, valivá ložiska).

Po všech způsobech kalení, kdy ve výsledné struktuře převládá martenzit, následuje ještě popuštění zakalených součástí!

Pojmy:

kalitelnost - je schopnost materiálu dosáhnout kalením určité tvrdosti, a to při dostatečné rychlosti ochlazování z austenizační teploty, kdy získáme martenzitickou strukturu. Je zásadně ovlivněna obsahem uhlíku. Jako kalitelné jsou označovány oceli s obsahem uhlíku nad 0,35 %, kdy lze již zaručit vznik zákalné struktury. U legovaných ocelí se obsah uhlíku potřebný k zakalení mírně snižuje, a to díky přísadám legujících prvků v oceli.

zakalitelnost - je nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli, která je dána především tvrdostí martenzitu (ta je ovlivněna obsahem uhlíku v austenitu, se zvyšujícím se obsahem tvrdost martenzitu stoupá).

Kalitelnost a zakalitelnost jsou materiállová charakteristiky a mimo chemického složení oceli jsou závislé na stavu austenitu před kalením, jako je: velikost zrna, homogenita, přítomnost minoritních fází.

prokalitelnost - je schopnost oceli dosáhnout tvrdosti odpovídající její kalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kalené součásti. [4]

2.2.8.1.1.1. Laserové kalení oceli

Laser umožňuje soustředit do materiálu koncentrovaně velkou výkonovou hustotu a bezkontaktně dodat velmi značné množství energie a s tím pak související rychlosti ohřevu a ochlazení $10^4 - 10^6$ C/s.

Velikosti oblastí tepelného ovlivnění a tvary zpevněné zóny jsou dány časem působení a hustotou dopadajícího laserového paprsku. Hloubka prokalitelnosti se pohybuje od 0,2mm do 0,8mm a šířka kalitelné oblasti je až 5mm, laserová stopa (závisí na podmínkách ozáření a na materiálu). Jestliže zpracováváme větší plochy, kladou se jednotlivé laserové stopy vedle sebe nebo se navzájem kříží, kdy dochází ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých stop.

Metody zpevnění, kalení, laserem můžeme rozdělit do tří skupin:

A) Povrchové kalení:

Teplota v žádném místě nepřesáhne bod tavení, kdy okamžitě následuje samovolné ochlazení povrchové vrstvy. Teplo je pohlcováno masou ostatního teplotně neovlivněného materiálu součásti. Jemnozrnná struktura s vysokou tvrdostí zasahuje do hloubky desetin milimetru a deformace je zanedbatelná. V ocelích toto zpevnění vyvolává martenzitickou přeměnu.

B) Lokální natavení:

Povrch se ve stopě laserového paprsku lokálně nataví a tím umožňuje rozpustit i běžně nerozpustitelné fáze ve zpracovávaném materiálu. Tak dosáhneme značně přesycené vrstvy legujícími prvky a po ochlazení nám vznikne přesycený tuhý roztok s velmi jemnou strukturou (amortizace) a s velmi dobrou odolností proti opotřebení.

C) Nalegování povrchu:

Lokálně měníme chemické složení zpracovávaného materiálu v důsledku přímého legování nebo plátování.

Hlavní přednosti laserového kalení jsou:

- Minimální deformace a vnitřní pnutí,
- Dobrá soudržnost mezi zpevněnou vrstvou a základním materiálem,
- Lokalizace do libovolně požadované oblasti.

Hlavní nevýhody laserového kalení jsou:

- Vysoká cena zařízení,
- Vysoké provozní náklady.

Laserovou technologii je možné použít na všechny běžně kalitelné oceli a dále pak na oceli nízkouhlíkové s 0,2 %C a na všechny druhy litin. [\[4\]](#)

2.2.8.1.1.2. Laserové kalení litiny

Při povrchovém kalení litiny není rozhodující, zdali mluvíme o šedé či tvárné litině, ale o tom, jakou má matici. Jestliže je matrice perlitická s obsahem cca 0,8% C, pak samotné vytvrzení litiny může dosahovat až 65HRC, z čehož vyplývá vysoká otěruvzdornost. Únavová životnost je velmi dobrá, což nám způsobuje jemná martenzitická struktura. Obecně je ale kalení litinových povrchů problematické, a to kvůli heterogenitě a hrubozrnnosti materiálu. Důležitá je volba kalící teploty, která podstatně ovlivňuje strukturu a vlastnosti, kdy hlavně nárůst zbytkového austenitu dokáže snížit výslednou tvrdost zakaleného povrchu výrobku. Avšak dochází také k rozpuštění grafitických lupínků s jejich transformací na martenzit nebo ledeburit a část uhlíku obohacuje okolí a stabilizuje právě austenit. Vznikne tak vlastně kompozitový materiál. Velmi tvrdý díky karbidickému eutektiku, s dobrými kluznými vlastnostmi díky grafitu, pevný díky martenzitické struktuře, houževnatý díky zbytku austenitu.

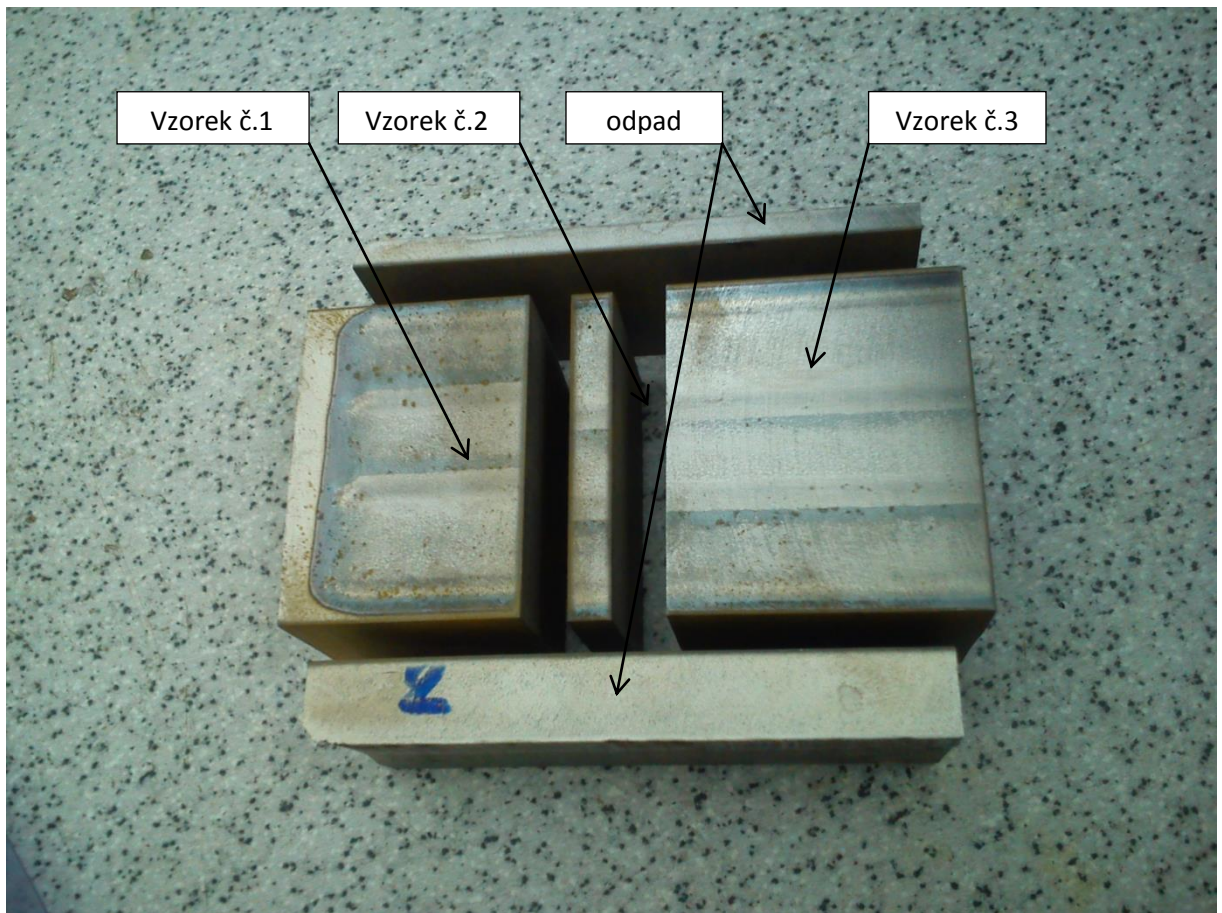
Při laserovém kalení povrchu litiny dosahujeme vysokých rychlostí ohřevu, a to v řádu 1000°C/s a zároveň patně tepelné vodivosti, kdy austenitizace probíhá pomalu a do menších hloubek než u ocelí. Výhodou jsou menší deformace, lepší stav povrchu po kalení při zachování si svých dobrých kluzných vlastností. Přídavky na opracování povrchu jsou minimální, v některých

případech se povrch i nepracovává. Nedochozí ke vzniku povrchových trhlin, a to proto, že proces kalení je robotizovaný, s teplotou řízenou pyrometrem, kdy výsledkem je rovnoměrná hloubka kalení s rovnoměrnou tvrdostí. Po kalení laserem je teplo odváděno do materiálu a teplota klesá postupně od přechodové oblasti k povrchu. Struktura je jemnější, kdy martenzitické struktury jsou prokazatelně méně náchylné ke vzniku trhlin.[\[5\]](#)

3. Experimentální zhodnocení parametrů zkoušky na sledované charakteristiky – koeficient tření, velikost opotřebení

3.1. Experimentální materiál

Experiment je proveden na zkušebním materiálu třídy 12. Tento materiál je laserově kalená ocel 12050. Ocel je kalena diodovým laserem o výkonu $P=3273\text{W}$, vlnové délce $\lambda \approx 808\text{nm}$ a rychlosti kalení $v = 110\text{cm/min}$. Z obr. 7 je patrné, že materiál je kalen ve třech vzájemně se překrývajících stopách. Materiál byl vhodně rozdělen pomocí vodního paprsku (tento způsob dělení byl zvolen z důvodu zamezení rizika tepelného ovlivnění struktury zkoumaného materiálu v místě řezu při mechanickém dělení) na tři zkušební vzorky (viz. obr.7).



Obr.7: laserově kalená ocel 12050

3.2. Metody měření

3.2.1. Metalografická příprava

Metalografická příprava je provedena na vzorku č. 2 na brousícím zařízení. Tato příprava je prováděna pro následnou zkoušku tvrdosti.

3.2.1.1. Přístroje

BRUSNÉ ZAŘÍZENÍ

Metalografická příprava vzorku č. 2 je provedena na brusném zařízení LaboPol5 s přítlačnou hlavou LaboForce3 fi. Strues s protiběžnými otáčkami přítlačné hlavy a magnetického disku (viz. Obr. 8). Díky přítlačné hlavě je možné vyvozovat různé velikosti přítlačné síly a díky vzájemným protiběžným otáčkám nastává rychlejší úběr materiálu z broušeného vzorku.



Obr.:8 brusné zařízení LaboPol5 1

3.2.1.2. Postup

Broušení, leštění

Účelem broušení je, aby na broušeném povrchu vznikla rovinná plocha a aby byly co nejefektivněji a nejrychleji odstraněny ty nejhrubší stopy po předchozím dělení materiálu.

Hrubé broušení

Provádíme na diamantovém brusném kotouči MD PIANO 120 (MD=magnetický kotouč), přítlačnou silou 30N, při 150 ot/ min¹, doba broušení je individuální, a to podle druhu a tvrdosti materiálu a do odstranění hrubých stop po dělení materiálu vlhčíme brusný kotouč vodou.

Jemné broušení

Provádíme na brusném kotouči MD LARGO 9 μ m, přítlačnou silou 25N, při 150ot/min¹, doba broušení je 5 minut, brusný kotouč vlhčíme monokrystalickou diamantovou suspenzí DiaDuo2 9 μ m.

Hrubé leštění

Provádíme na leštícím kotouči MD DAC 3 μ m, přítlačnou silou 25N, při 150ot/min¹, doba broušení je 4 minuty, leštící kotouč vlhčíme monokrystalickou diamantovou suspenzí DiaDuo2 3 μ m.

Jemné leštění

Provádíme na leštícím kotouči NAP (na magnetický kotouč je nalepeno leštící plátno) 1 μ m, přítlačnou silou 15N, při 150ot/min¹, doba broušení je 2 minuty, leštící kotouč vlhčíme polykrystalickou diamantovou suspenzí 1 μ m.

Mezi každou procedurou a po skončení procedur následuje omytí zařízení i vzorku od prachu vzniklého činností zařízení, a to hlavně proto, aby nedocházelo díky neodstraněným nečistotám k opětovnému poškrábání broušených a leštěných ploch. Na závěr po jemném leštění vzorek opláchneme ethanolem a osušíme vzduchem. Takto je vzorek připravený pro leptání.

Leptání

Vzorek jsme ještě leptali pro zvýraznění struktury materiálu a hloubky prokalení oceli. Leptání jsme provedli 3% roztokem NITALU (1,2ml HNO₃ + 38,8ml líhu) po dobu 5s.

3.2.2. Měření tvrdosti

Měření tvrdosti jsme provedli na vzorku č. 2 na přístroji zvaném mikrotvrdoměr a následně je zdokumentovali na digitálním mikroskopu.

3.2.2.1. Přístroje

TVRDOMĚR

Tvrdoměr je zařízení, jímž se měří tvrdost různých materiálů. V našem případě kalené oceli. Tvrdost jsme měřili podle VICKERSE - vtlačování diamantového jehlanu (indentoru) s vrcholovým úhlem 136° předepsanou silou HV1, měří se velikost úhlopříček. Přístroj na základě změřených úhlopříček automaticky vypočte příslušnou tvrdost v místě působení diamantového indentoru na zkoumaný materiál. Hodnoty tvrdosti jsou buď bez jednotek, nebo mají jednotku MPa.

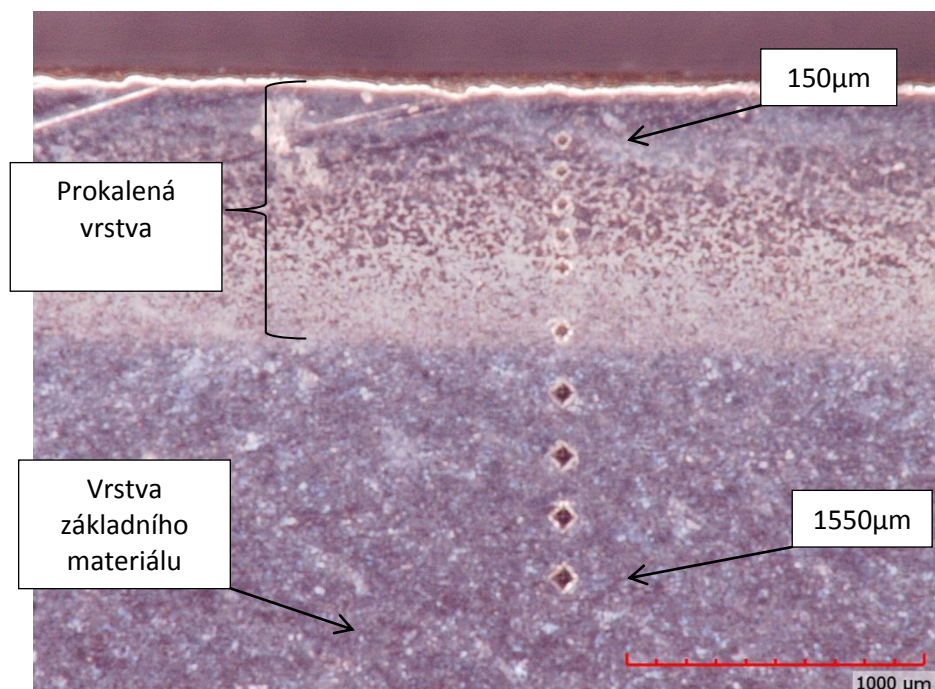


Obr.9: mikrotvrdoměr fi . BUEHLER

3.2.2.1. Postup měření

HLOUBKOVÝ PROFIL MĚŘENÍ V KALENÉ OBLASTI VZORKU

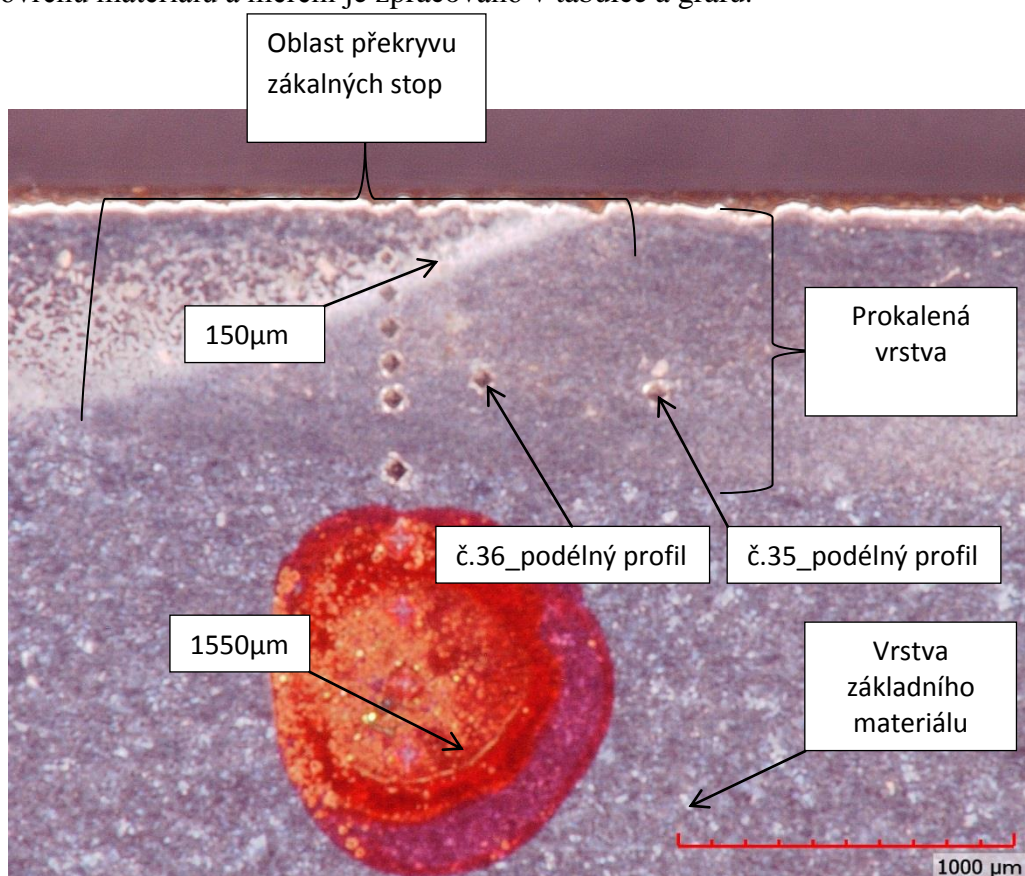
Hlubkové měření je prováděno pro zjištění způsobu, jakým se mění velikost tvrdosti směrem dovnitř do materiálu. První měření tvrdosti je provedeno 150 μ m od povrchu vzorku č. 2 a poslední měření tvrdosti je provedeno 1550 μ m od povrchu téhož vzorku (viz. Obr. 10). Provedeno je celkem deset měření tvrdosti povrchu materiálu a měření je zpracováno v tabulce a grafu. Fotografická dokumentace vzorku č. 2 je provedena pomocí mikroskopu HIROX KH 7700.



Obr. 10: hloubkový profil měření, vzorku. č. 2 v kalené oblasti

HLOUBKOVÝ PROFIL MĚŘENÍ V OBLASTI PŘEKRYVU

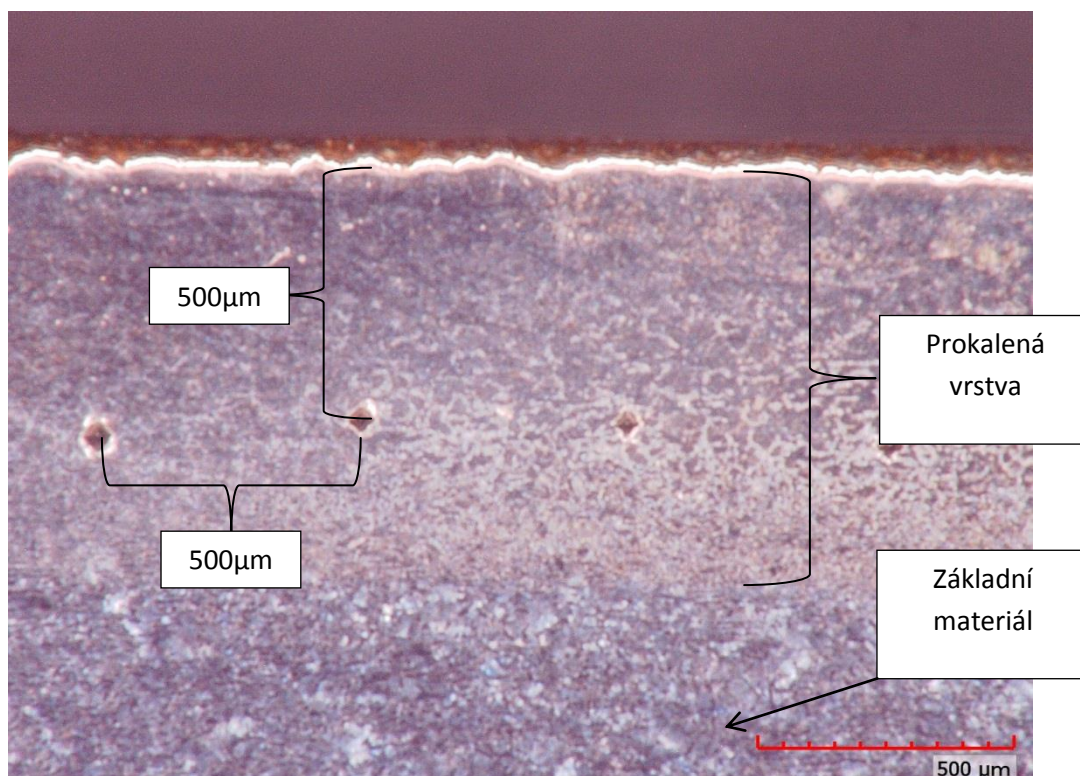
Měření je provedeno v překryvu dvou vzájemně sousedících zákalných laserových stop, fotografická dokumentace vzorku č. 2 je provedena pomocí digitálního mikroskopu HIROX KH 7700. První měření tvrdosti je provedeno 150 μm od povrchu vzorku č. 2 a poslední měření tvrdosti je provedeno 1550 μm od povrchu téhož vzorku (viz. Obr. 11). Provedeno je celkem deset měření tvrdosti povrchu materiálu a měření je zpracováno v tabulce a grafu.



Obr. 11: hloubkový profil měření, vzorku. č. 2 v oblasti překryvu dvou zákalných stop

PODÉLNÝ PROFIL MĚŘENÍ

Měření je provedeno v podélném profilu zakalené oblasti v hloubce 500 μ m. První měření je provedeno 3500 μ m od pravého kraje vzorku č. 2 (z důvodů poškrábání měřeného úseku vzorku) a následující měření je provedeno vždy ve vzdálenosti 500 μ m od sousedního vtisku indentorem (viz. Obr. 12). Celkem je provedeno 36 měření. Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu jsou pro přehlednost zpracovány do tabulky a grafu. Fotografická dokumentace vzorku č. 2 je provedena pomocí mikroskopu HIROX KH 7700.



Obr.12: podélný profil měření, vzorku. č.2

3.2.3. Tribologická měření

Tribologická měření jsou prováděna na vzorcích č.1 a č.3. Měření jsou prováděna na přístroji zvaném tribometr a jsou doplněna měřením na profilometru. U vzorku č.3 je pomocí digitálního mikroskopu fotograficky dokumentováno i opotřebení kulovitého vzorku. Kulovitý vzorek = kulička je vyrobena z materiálu AISI 440C (dle ČSN 17042, dle DIN X90CrMoV18) s tvrdostí RC 62 o průměru kuličky 6,3 mm.

3.2.3.1. Přístroje

TRIBOMETR

Tribometr CETR-UMT-3 firmy Bruker je jednoplatformový tribometr, který lze vícenásobně konfigurovat pomocí počítače a umožňuje měření při vysoké zátěži. Dokáže provést testy podle několika ASTM standardů pomocí jednoho nástroje, a to lineárními rychlostmi od 0,1 μ m/s po 30 m/s a rozsahy úhlových rychlostí od 0,001 do 7000 rpm. Zatěžovací síla je až 1200 N a teplota až 1200 °C. Všechny pohyby jsou nezávisle programovatelné, automaticky generuje charakteristiky koeficientů tření v závislosti na zátěži nebo rychlosti, je kompatibilní s normami ISO, ASTM a DIN.



Obr.13: tribometr CETR-UMT3 fi. Bruke

PROFILOMETR

Hrotový profilometr KLA TENCOR P6 umožňující měření parametru drsnosti povrchu s možností provádění 3D mapy skenované plochy. Princip této techniky spočívá ve zkoumání povrchu pomocí miniaturní jehly, která je vyrobena z velmi tvrdého materiálu, na jehož konci je umístěna diamantová kulička o definovaném poloměru. Celá idea je pak provedena zaznamenáváním vertikálních výchylek jehly v závislosti na horizontálním posouvání. Z takto získaného profilu lze potom dále studovat povrch, parametry drsnosti, tloušťky deponovaných vrstev, vypočítávat vnitřní pnutí materiálu a po tribologických zkouškách opotřebení hodnoceného vzorku. P-6 je vybaven 156 mm měřicím motorizovaným antivibračním stolem, který se pohybuje v xy rovině a rotuje. P-6 provádí skenování ve 3D dimenzi s rozlišením 1 angstromu na výšku kroku, vertikální rozsah až 1mm, zatížení 5 – 50mg, software Apex pro analýzu naměřených dat.



Obr.14: profilometr KLA TENCOR P-6

DIGITÁLNÍ MIKROSKOP

Digitální mikroskop HIROX KH-7700 umožňuje pohodlný přenos sledovaných vzorků materiálů do PC, je vybaven softwarem umožňujícím další práci s uloženými obrázky nebo videi včetně měřících funkcí a jejich následnou analýzu. Živý náhled je možné sledovat na monitoru. Rozsah zvětšení je 5-3500x , s velkou hloubkou ostrosti, s měřením rozměrů a tvarových odchylek, 3D profilů.

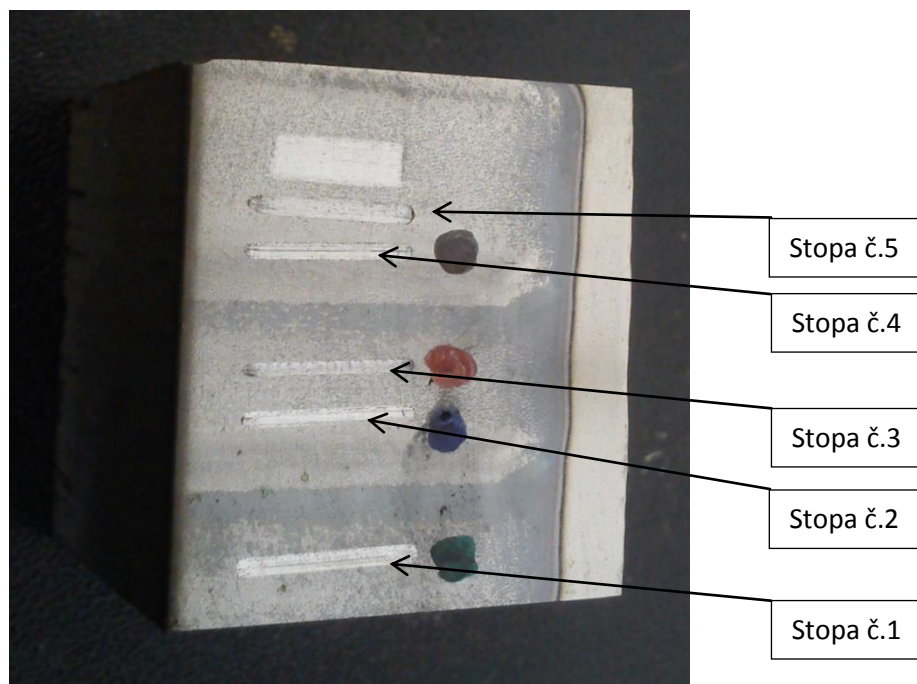


Obr.15: Digitální mikroskop, skenovací 3D mikroskop, HIROX KH-7700

3.2.3.2. Postup měření

Vzorek č.1

Vzorek č.1 je zkoumán na tribometru a profilometru.



Obr.16 : vzorek č.11

Z obr.16 je patrné, že vzorek je zkoumán celkem v 5-ti zkušebních stopách. Shodné parametry pro všechny stopy jsou délka stopy $l = 10\text{mm}$, frekvence oscilace $f = 5\text{Hz}$ a doba trvání testu $t = 1004\text{s}$, zatěžující síla P je postupně 150, 125, 100, 75, 50N. Tento experiment jsme prováděli na tribometru CETR-UMT3.

Pro další jednoznačnou interpretaci výsledků testu byla zpracována pomocná tabulka, která koresponduje s obr. č. 16 vzorku č.1, ve které jsou uvedeny všechny hlavní parametry testu.

Tabulka č.2: parametry testu vzorek č.1						
Stopa č.	Název souboru	Zatěžující síla P [N]	Délka stopy l [mm]	Frekvence oscilace f [Hz]	Doba testu t [s]	Barevná označení stopy na vzorku i označení plošky na kuličce
1	Reciprocing_150N_10mm_5Hz_stopa1	150	10	5	1004	zelené
2	Reciprocing_125N_10mm_5Hz_stopa2	125	10	5	1004	modré
3	Reciprocing_100N_10mm_5Hz_stopa3	100	10	5	1004	červené
4	Reciprocing_75N_10mm_5Hz_stopa4	75	10	5	1004	černé
5	Reciprocing_50N_10mm_5Hz_stopa5	50	10	5	1004	„neoznačené“

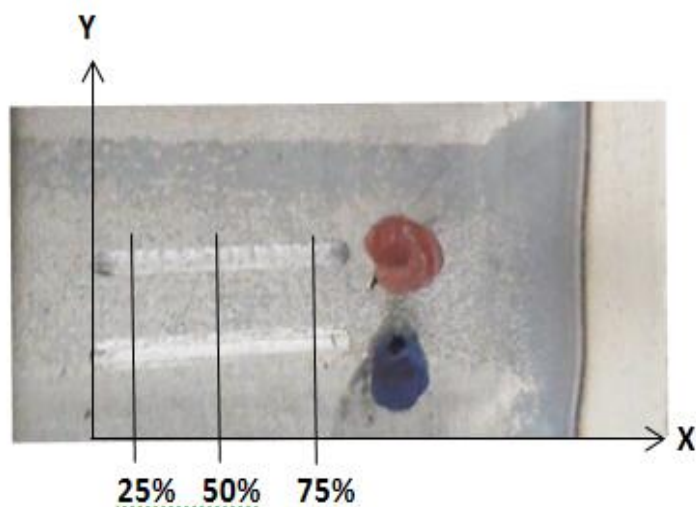
Postup provádění testu na tribometru CETR-UMT3

1. provedeme upnutí rovinného vzorku do držáku,
2. provedeme upnutí kulového vzorku do držáku,
3. v softwaru počítače nastavíme příslušné parametry testu (viz. tabulka),

4. zahájíme test,
- po ukončení testu provedeme:
5. deaktivaci pohonu tribometru,
6. očistíme lihem rovinný vzorek i kulovitý vzorek od mastnoty i od ocelových pilin vzniklých otěrem,
7. stopu na rovinném vzorku označíme barevnou značkou, opotřebení na kulovém vzorku označíme tou samou barevnou značkou,
8. pootočíme kulovitý vzorek v držáku na neopotřebovanou část vzorku a zahájíme test další stopy.

PROFILOMETR

Délku stopy na vzorku č.1 jsme si rozdělili myšleným příčným řezem, a to v délce 25%, 50% a 75% (viz. Obr.17) od kraje vzorku. V těchto místech jsme následně provedli měření plochy příčného řezu stopou profilometrem. Výstupem z profilometru je graf (viz. Příloha) s automaticky generovaným výpočtem plochy řezu stopy [μm^2] a hloubkou drážky stopy [μm].

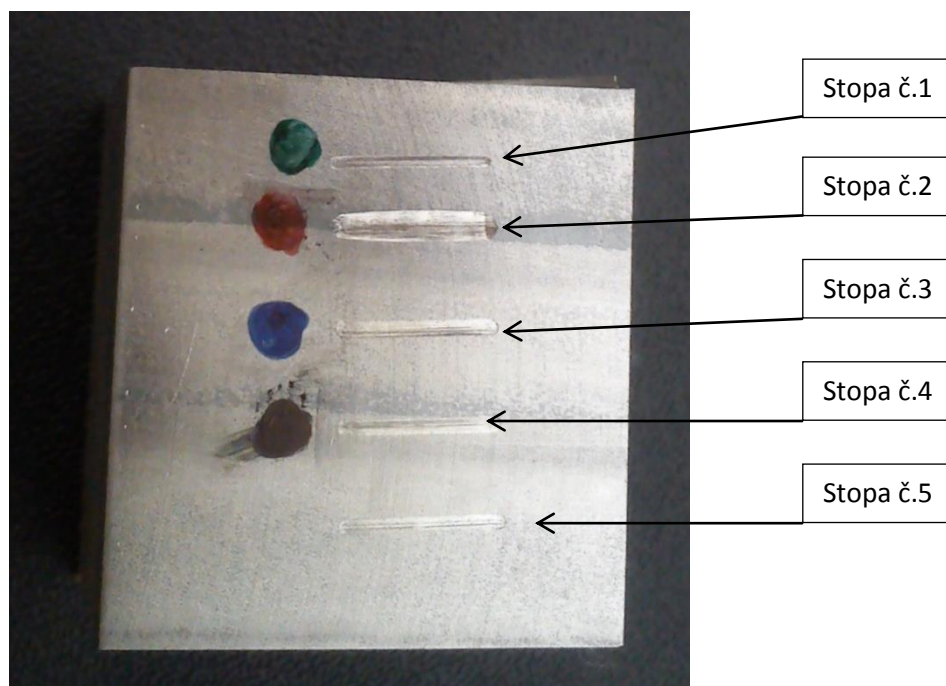


Obr.17: místa měření příčného řezu profilů drážek na profilometru

VZOREK č.3

Vzorek č.3 je zkoumán na tribometru a profilometru. Dále je u tohoto vzorku fotograficky dokumentováno i opotřebení kulovitého vzorku (viz. Příloha).

TRIBOMETR



Obr.18: vzorek č.3

Z obr. 18 je patrné, že vzorek je zkoumán celkem v pěti zkušebních stopách. Shodné parametry pro všechny stopy jsou délka stopy $l = 10\text{mm}$, frekvence oscilace $f = 5\text{Hz}$ a doba trvání testu $t = 1004\text{s}$, zatěžující síla $P = 50\text{N}$. Tento experiment je prováděn na tribometru CETR-UMT3.

Rozdíl oproti experimentu se vzorkem č.1 spočívá především v konstantní zatěžující síle $P = 50\text{N}$ v místě umístění stopy č.2 a stopy č.4, v překryvu stop po kalení.

Pro další jednoznačnou interpretaci výsledků testu je zpracována pomocná tabulka, která koresponduje s obr. č.18 vzorku č.3, ve které jsou uvedeny všechny hlavní parametry testu.

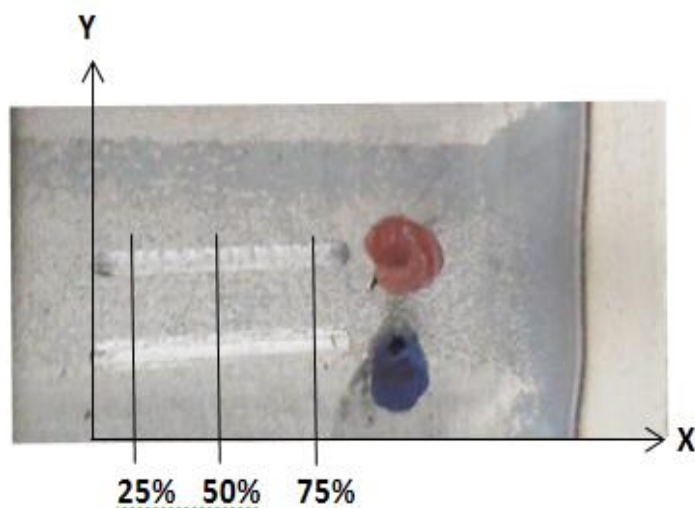
Tabulka č.3: parametry testu vzorek č.3						
Stopa č.	Název souboru	Zatěžující síla P [N]	Délka oscilace l [mm]	Frekvence oscilace f [Hz]	Doba testu t [min]	Barevná označení stopy na vzorku i označení plošky na kuličce
1	Reciprocating_50N_10mm_5Hz_DFH5_1stopa	50	10	5	1004	zelené
2	Reciprocating_50N_10mm_5Hz_DFH5_2stopa	50	10	5	1004	modré
3	Reciprocating_50N_10mm_5Hz_DFH5_3stopa	50	10	5	1004	červené
4	Reciprocating_50N_10mm_5Hz_DFH5_4stopa	50	10	5	1004	černé
5	Reciprocating_50N_10mm_5Hz_DFH5_5stopa	50	10	5	1004	„neoznačené“

Postup provádění testu na tribometru CETR-UMT3

1. provedeme upnutí rovinného vzorku do držáku,
2. provedeme upnutí kulového vzorku do držáku,
3. v softwaru počítače nastavíme příslušné parametry testu (viz. tabulka č.3),
4. zahájíme test,
- po ukončení testu provedeme,
5. deaktivaci pohonu tribometru,
6. očistíme lihem rovinný vzorek i kulovitý vzorek od mastnoty i od ocelových pilin vzniklých otěrem,
7. stopu na rovinném vzorku označíme barevnou značkou, opotřebení na kulovém vzorku označíme tou samou barevnou značkou,
8. pootočíme kulovitý vzorek v držáku na neopotřebovanou část vzorku a zahájíme test další stopy.

PROFILOMETR

Délku stopy na vzorku č.3 jsme si rozdělili myšleným příčným , a to v délce 25%, 50% a 75% (viz. Obr.17) od kraje vzorku. V těchto místech jsme následně provedli měření plochy příčného řezu stopou profilometrem. Výstupem z profilometru je graf (viz. Příloha) s automaticky generovaným výpočtem plochy řezu stopy [μm^2] a hloubkou drážky stopy [μm].



Obr.17: místa měření příčného řezu profilů drážek na profilometru

DIGITÁLNÍ MIKROSKOP

Je identifikována příslušná „ploška“ po opotřebení na kulovitém vzorku, a to tak, že příslušná „ploška“ na kulovitém vzorku je označena barevně, shodně se stopou na rovinném vzorku č.3. Tím je jednoznačně ztotožněna příslušná „ploška“ kulovitého vzorku s příslušnou stopou vzorku č.3. Kulovitý vzorek je umístěn ve stojanu pod okulár digitálního mikroskopu a „ploška“ je zvětšena s rozlišením $500\mu\text{m}$ a ofotografována. Kulovitý vzorek je vyjmut ze stojanu, barevná značka je očištěna lihem, je identifikována další „ploška“ a postup se opakuje. Opotřebení kulovitého vzorku je zdokumentováno fotograficky v Příloze této práce.

3.2.4. Vztahy pro výpočet hledaných parametrů

1. Objemové ztráty materiálu

$$V_f = \varnothing A \times L$$

kde:

V_f – objemové ztráty, opotřebení rovinného vzorku vlivem tření [mm^3]

A - průmětná oblast příčného řezu [mm^2],

L - délka stopy [mm].

2. Rychlost opotřebení materiálu

$$W = V_f / s = V_f / L \times N = V_f / L \times f \times t$$

kde:

W – rychlost opotřebení rovinného vzorku vlivem tření [mm^3/m],

V_f – objemové ztráty, opotřebení rovinného vzorku vlivem tření [mm^3]

s – kluzná dráha [m],

L - délka stopy [m],

N - počet cyklů v testu,

$$N = t \times f$$

kde:

t - doba trvání testu [s],

f - oscilační frekvence [Hz/s].

3. Koeficient opotřebení materiálu

$$k = W / P$$

kde:

k – koeficient opotřebení materiálu [mm^3/Nm],

W – rychlost opotřebení rovinného vzorku vlivem tření [mm^3/m],

P – zatěžující síla [N].

4. Koeficient tření materiálu

kde:

u_k – koeficient tření – je získán jako přímý výstup z tribometru.

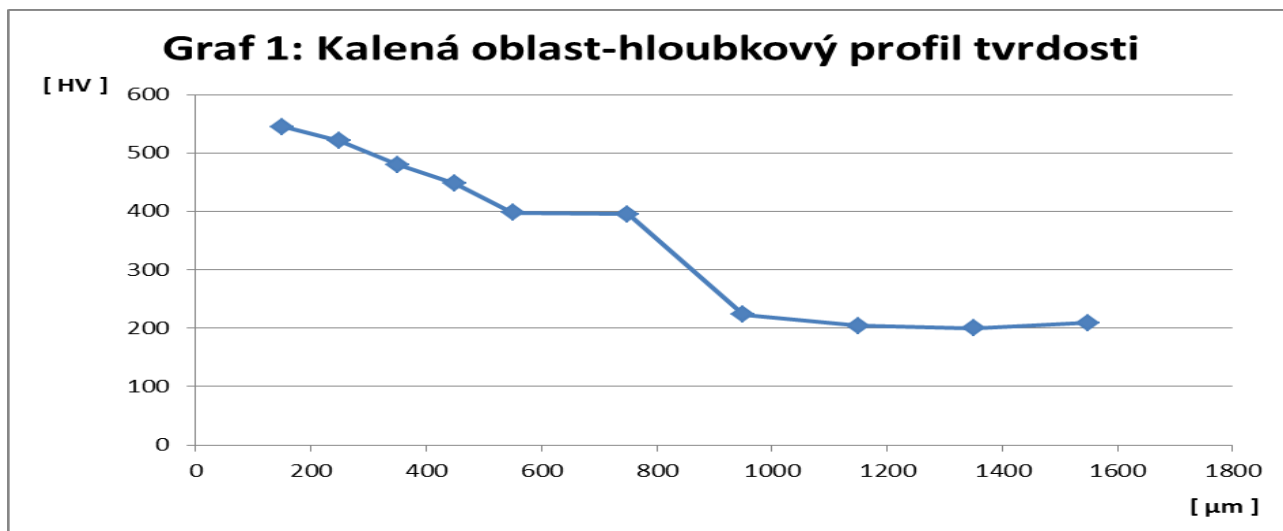
3.3. Výsledky

V tabulce č.4 jsou shrnuty výsledky měření profilu tvrdosti vzorku č.2 v kalené oblasti a tyto výsledky jsou vyneseny v obr.19 - graf 1. V tabulce č.5 jsou shrnuty výsledky měření profilu tvrdosti vzorku č.2 v oblasti překryvu a tyto výsledky jsou vyneseny v obr.20 -graf 2. V tabulce č.6 jsou shrnuty výsledky měření tvrdosti v podélném profilu vzorku č.2 v kalené oblasti i v oblasti překryvu a tyto výsledky jsou vyneseny v obr.22 - graf 4.

3.3.1. Tvrdost

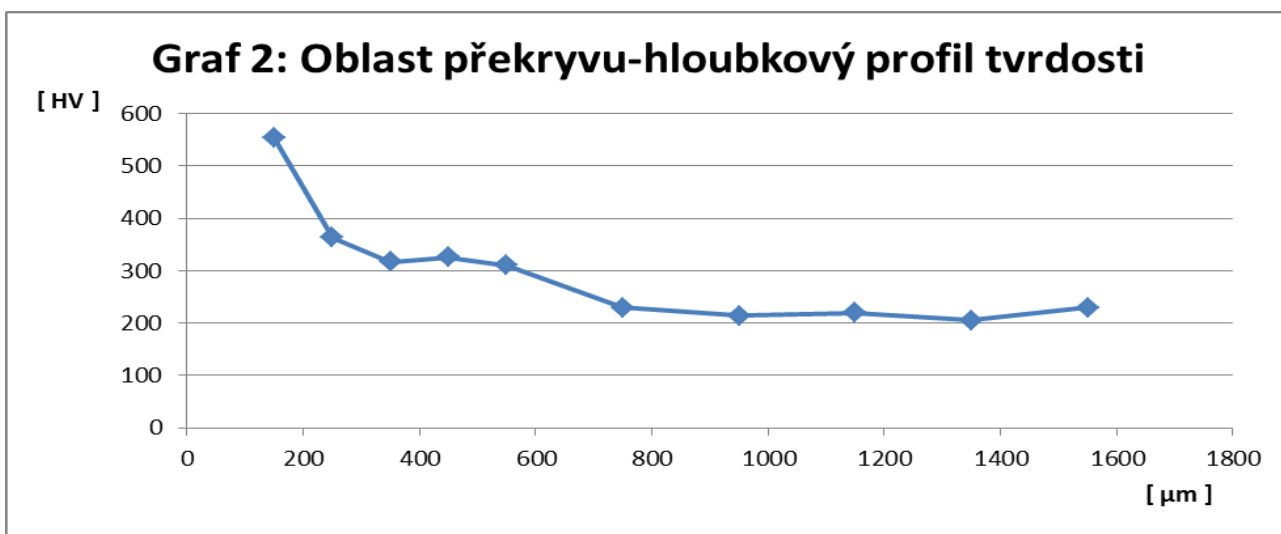
VZOREK č.2

pořadí	vzdálenost od horního okraje vzorku č.2 [μm]	tvrdost HV
1	150	545,5
2	250	522
3	350	480,8
4	450	448,5
5	550	398,1
6	750	396,3
7	950	223,4
8	1150	204,1
9	1350	200,7
10	1550	209,8

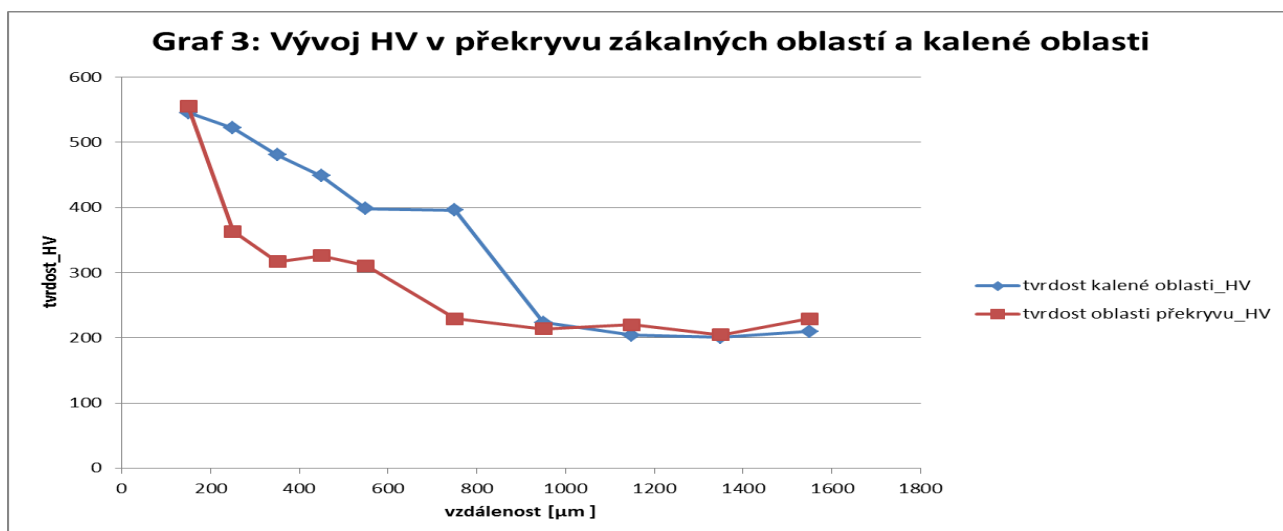


Obr.19: Graf 1_kalená oblast-hloubkový profil tvrdosti

Tabulka č.5: Hloubkový profil měření v oblasti překryvu		
pořadí	vzdálenost od horního okraje vzorku č.2 [μm]	tvrdost HV
1	150	555
2	250	363,2
3	350	316,8
4	450	325,9
5	550	310,7
6	750	229,4
7	950	214
8	1150	220
9	1350	204,8
10	1550	229,6

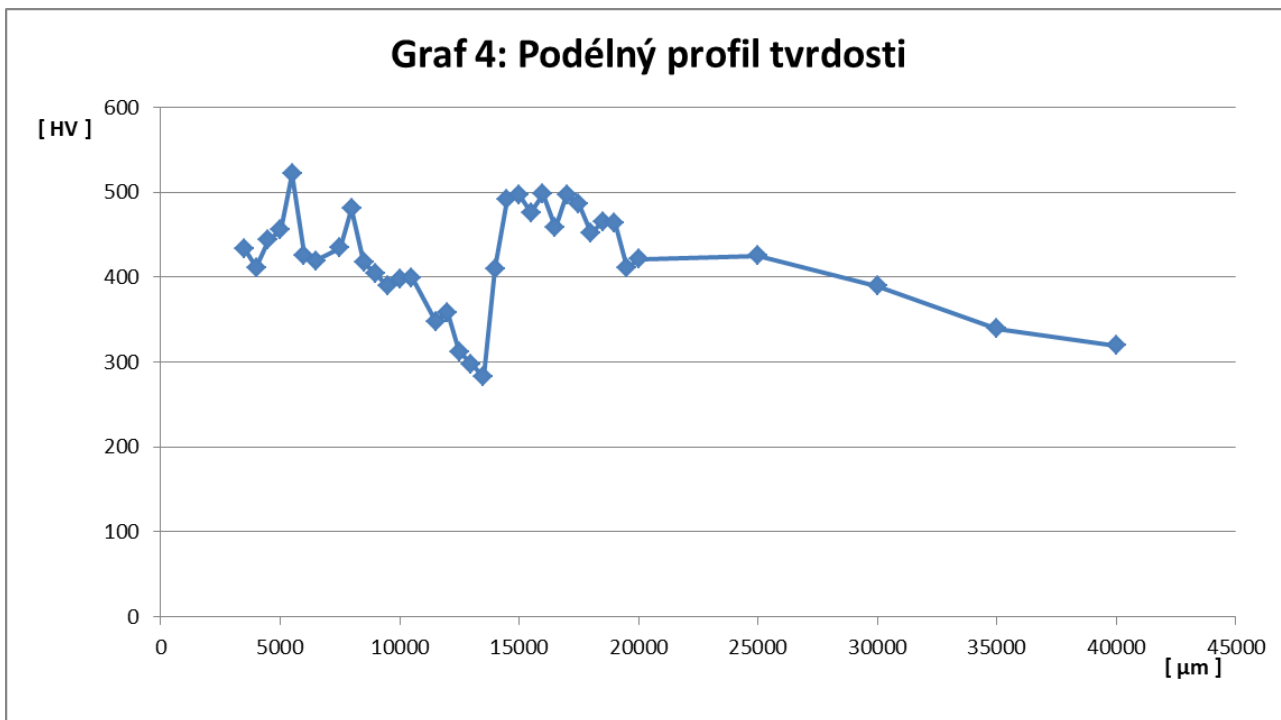


Obr.20: Graf 2_Oblast překryvu-hloubkový profil tvrdosti



Obr.21: Graf 3_Vývoj HV v překryvu zákalných oblastí a kalené oblasti

Tabulka č.6: Podélný profil měření			
pořadí	Vzdálenost od horního okraje vzorku č.2 [μm]	Vzdálenost od pravého okraje vzorku č.2 [μm]	Tvrдост HV
1	500	3500	433,5
2	500	4000	411,6
3	500	4500	443,6
4	500	5000	455,5
5	500	5500	522
6	500	6000	426,3
7	500	6500	419,3
8	500	7500	434,8
9	500	8000	480,8
10	500	8500	417,4
11	500	9000	404
12	500	9500	389,4
13	500	10000	398,6
14	500	10500	399,8
15	500	11500	347,9
16	500	12000	357,7
17	500	12500	312,7
18	500	13000	297,8
19	500	13500	282,6
20	500	14000	410
21	500	14500	492
22	500	15000	496,7
23	500	15500	476,2
24	500	16000	498,3
25	500	16500	458,4
26	500	17000	497,5
27	500	17500	486,3
28	500	18000	452
29	500	18500	465,7
30	500	19000	464,2
31	500	19500	411,2
32	500	20000	421,2
33	500	25000	425,7
34	500	30000	390
35	500	35000	339,5
36	500	40000	319,7
Ø tvrdost vzorku č.2 v hloubce 500 μm			420,553



Obr.22: Graf 4_Podélný profil tvrdosti

3.3.2. Tribologická měření

V tabulce č.7 jsou uvedeny dopočítané hodnoty objemového opotřebení vzorku č.1 a tyto hodnoty jsou vyneseny v obr.24 - graf 6. V tabulce č.8 jsou uvedeny dopočítané hodnoty rychlostního opotřebení vzorku č.1. V tabulce č.9 jsou uvedeny dopočítané hodnoty koeficientu opotřebení a průměrného koeficientu tření vzorku č.1, tyto hodnoty jsou vyneseny v obr.24 - graf 6.

3.3.2.1. Vliv velikosti zatížení

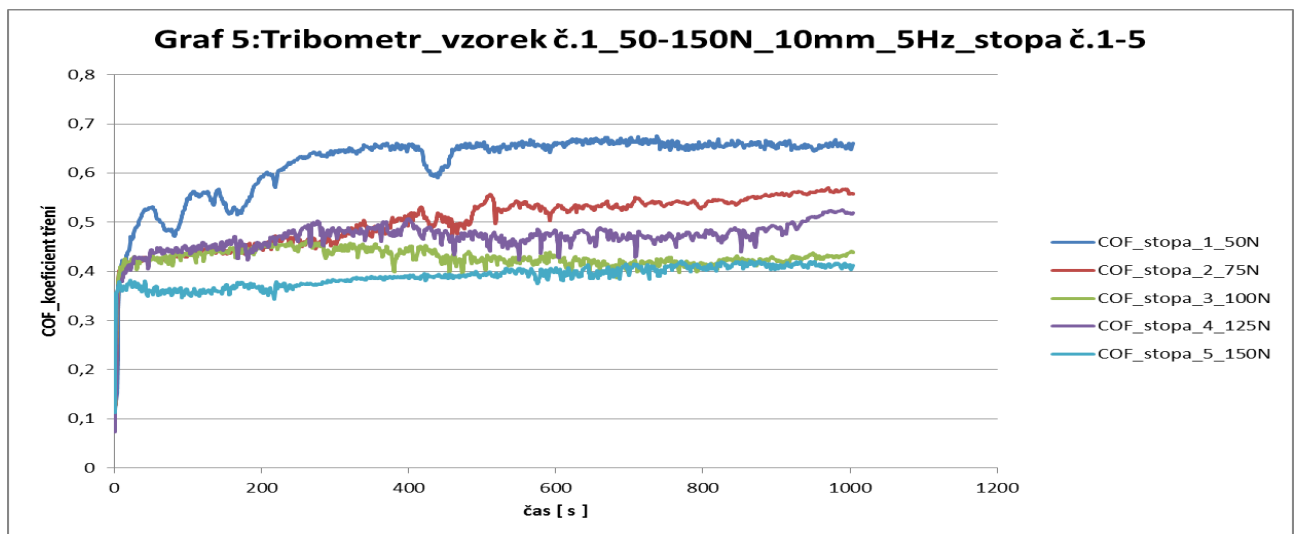
VZOREK č.1

Tabulka č.7: Objemové ztráty laserem kalené oceli materiál 12050 vzorek č.1						
Vzorek č.1_stopa č..	Průměrná plocha příčného řezu drážkou ØA [μm ²]				Délka stopy L [mm]	Objemové opotřebení Vf : Vf = ØA x L x 10 ⁻⁶ [mm ³]
	A ₂₅	A ₅₀	A ₇₅	ØA		
1	15011	14325	15205	14847±462,4	10	0,148470
2	7431	8463	10413	8769±1514,4	10	0,08769
3	5877	6769	7279	6641,67±709,6	10	0,06642
4	6066	6186	6943	6398,3±475,5	10	0,063983
5	6214	5520	7271	6335±881,7	10	0,06335

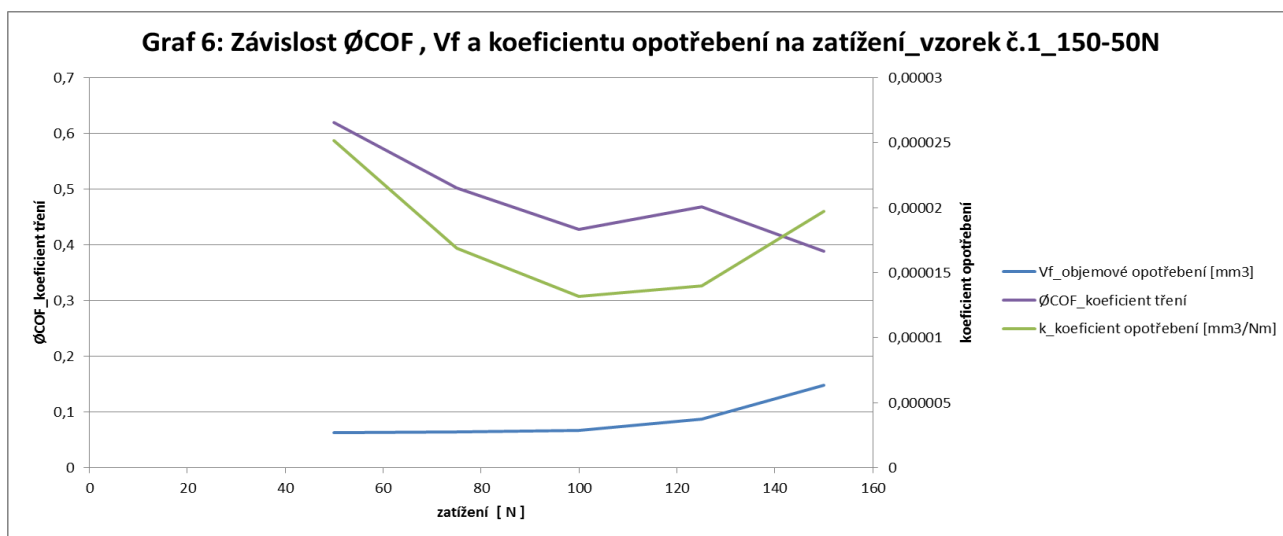
Tabulka č.8: Rychlostní opotřebení laserem kalené oceli materiál 12050 vzorek č.1					
Vzorek č.1_stopa č..	Objemové opotřebení Vf: [mm ³]	Délka stopy L [m]	Kluzná dráha s: s = L x N = L x f x t [m]		Rychlostní opotřebení W: W = Vf / s = Vf / L x N = Vf / L x f x t [mm ³ /m]
			Frekvence f [Hz/s]	Čas trvání testu t [s]	
1	0,148470	0,01	5	1004,043579	0,00296
2	0,08769	0,01	5	1004,043579	0,00175
3	0,06642	0,01	5	1004,043579	0,00132
4	0,063983	0,01	5	1004,043579	0,00127
5	0,06335	0,01	5	1004,043579	0,00126

Tabulka č.9: Koeficient opotřebení laserem kalené oceli materiál 12050 vzorek č.1				
Vzorek č.1_stopa č..	Rychlostní opotřebení W [mm ³ /m]	Zatěžující síla P [N]	Koeficient opotřebení k: k = W / P [mm ³ /Nm]	ØCOF_koeficient tření u _k :
1	0,00296	150	0,0000197	0,3885
2	0,00175	125	0,0000140	0,469
3	0,00132	100	0,0000132	0,4279
4	0,00127	75	0,0000169	0,5018
5	0,00126	50	0,0000252	0,6202

V tabulce č.7, 8 a 9 můžeme sledovat postupný pokles u hodnot parametrů ΔA , Vf, W u hodnot parametru k tomu tak není. Hodnoty ΔCOF rostou s výjimkou stopy č.2 (viz kapitola 4.).



Obr.23: Graf 5_Tribometr_vzorek č.1_50-150N_10mm_5Hz_stopa č.1-5



Obr.24: Graf 6_Závislost ϕ COF, Vf a koeficientu opotřebení na zatížení_vzorek č.150-50N

3.3.2.2. Vliv překryvu stop kalení

V tabulce č.10 jsou uvedeny dopočítané hodnoty objemového opotřebení vzorku č.3 a tyto hodnoty jsou vyneseny v obr.26 - graf 8. V tabulce č.11 jsou uvedeny dopočítané hodnoty rychlostního opotřebení vzorku č.3. V tabulce č.10 jsou uvedeny dopočítané hodnoty koeficientu opotřebení a průměrného koeficientu tření vzorku č.3, tyto hodnoty jsou vyneseny v obr.26 - graf 8.

VZOREK č.3 – stopa č.2, stopa č.4 – vzájemný překryv dvou sousedních zákalných oblastí

Tabulka č.10: Objemové ztráty laserem kalené oceli materiál 12050 vzorek č.3

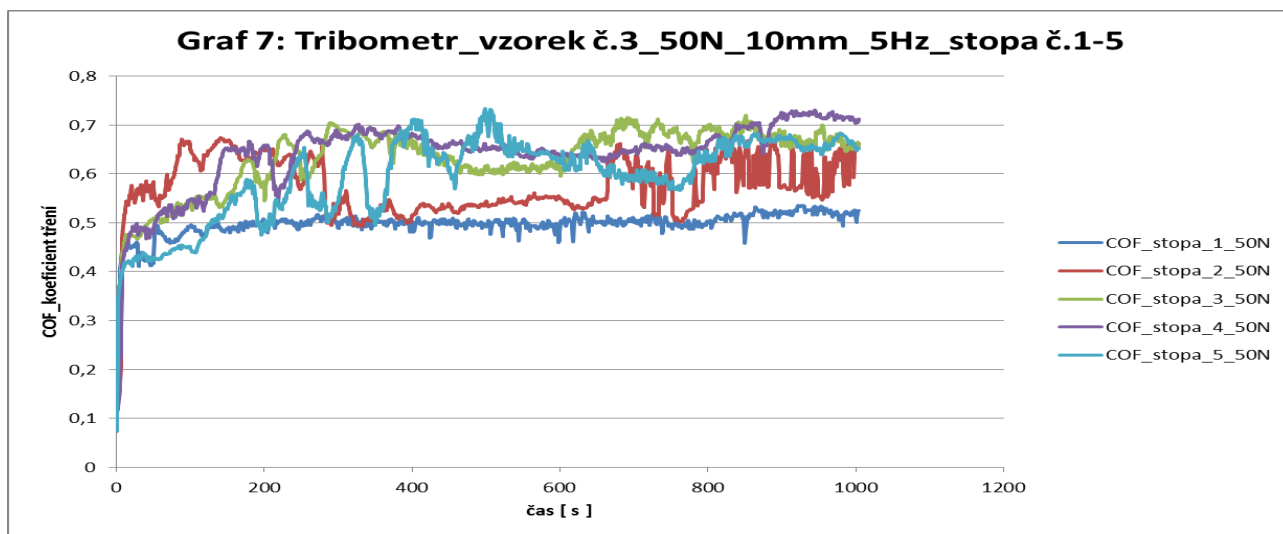
Vzorek č.3_stopa č..	Průměrná plocha příčného řezu drážkou ϕA [μm^2]				Délka stopy L [mm]	Objemové opotřebení Vf: $Vf = \phi A \times L \times 10^{-6}$ [mm ³]
	A ₂₅	A ₅₀	A ₇₅	ϕA		
1	4749	4089	4323	4387±334,6	10	0,04387
2	116021	126098	104425	115481,3±1084,54	10	1,154813
3	4117	3983	4257	4119±137	10	0,04119
4	2521	1793	1992	2105±376,2	10	0,02105
5	4175	4410	4620	4401,667±222,6	10	0,04401667

Tabulka č.11: Rychlostní opotřebení laserem kalené oceli materiál 12050 vzorek č.3

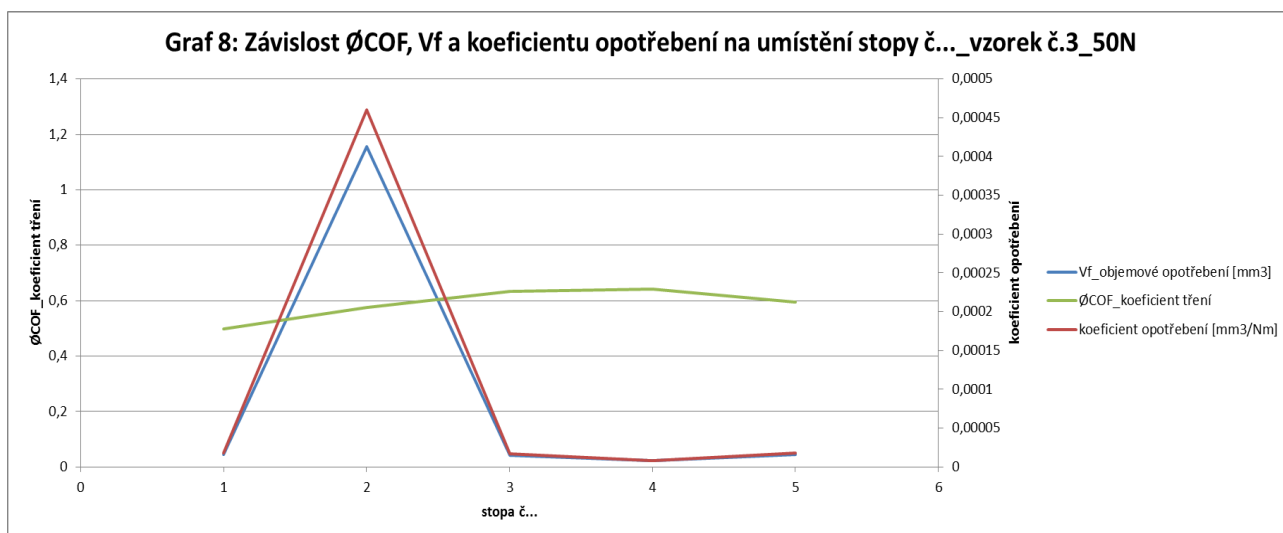
Vzorek č.3_stopa č..	Objemové opotřebení Vf: [mm ³]	Délka stopy L [m]	Kluzná dráha s: $s = L \times N = L \times f \times t$ [m]		Rychlostní opotřebení W: $W = Vf / s = Vf / L \times N = Vf / L \times f \times t$ [mm ³ /m]
			Frekvence f [Hz/s]	Čas trvání testu t [s]	
1	0,04387	0,01	5	1004,043579	0,0008738695669
2	1,154813	0,01	5	1004,043579	0,023003326
3	0,04119	0,01	5	1004,043579	0,0008204852396
4	0,02105	0,01	5	1004,043579	0,0004193060037
5	0,04401667	0,01	5	1004,043579	0,0008767911637

Tabulka č.12: Koeficient opotřebení laserem kalené oceli materiál 12050_vzorek č.3				
Vzorek č.3_stopa č..	Rychlostní opotřebení W [mm ³ /m]	Zatěžující síla P [N]	Koeficient opotřebení k: k = W / P [mm ³ /Nm]	ØCOF_koeficient tření u _k :
	0,0008738695669	50	0,00001748	0,4974
1	0,023003326	50	0,0004601	0,5746
2	0,0008204852396	50	0,00001641	0,6321
3	0,0004193060037	50	0,000008386	0,6411
4	0,0008767911637	50	0,00001754	0,5959

V tabulce č. 10,11 a12 jsou ve stopách č.2 a č.4 (stopy překryvu) spatřovány řádově odlišné výsledky od výsledků ostatních (viz. kapitola 4.).



Obr.25: Graf 7_Tribometr_vzorek č.3_50N_10mm_5Hz_stopač.1-5

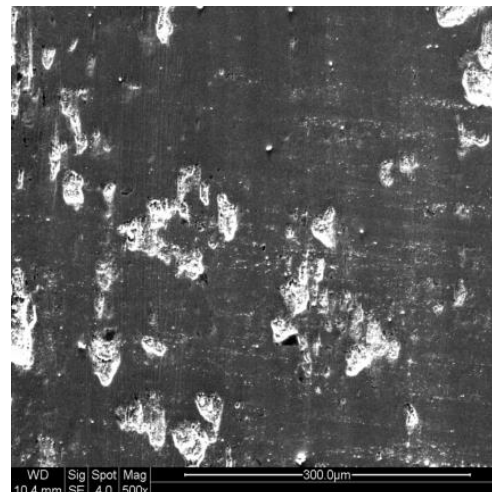


Obr.26: Graf 8_ Závislost ØCOF, Vf a koeficientu opotřebení na umístění stopy č..._vzorek č.150-50N

3.3.2.3. Mechanismus opotřebení

Mechanismus opotřebení rovinného vzorku je znázorněn na obr. č. 27, mechanismus opotřebení kulovitého vzorku je znázorněn v Příloze této práce (opotřebení kulovitého vzorku není v rozsahu zadání této práce). *Poškození rovinného vzorku bylo rovnoměrné po celé délce stop, s malou plastickou deformací. Velikost plastické deformace – nárůstu na okrajích stop – byla vyšší pro malá zatížení. Analýza stop po opotřebení poukazuje na vytváření pevných adhezních spojů. Dalším faktorem v tomto případě je ulpívání materiálu kuličky ve stopě (transferový film). Tloušťka vytvořeného filmu závisí nejvíce na zvolených zatíženích testu.*

Nejsilnější film bude vytvořen za pokojové teploty a při nejvyšším možném zatížení, naopak nejtenčí je při zatížení nejnižším. [9]



Obr. č.27: rovinný vzorek_stopa č...

4. Diskuze výsledků – posouzení vlivu parametrů zkoušky na sledované charakteristiky

4.1. Vzorek č.1

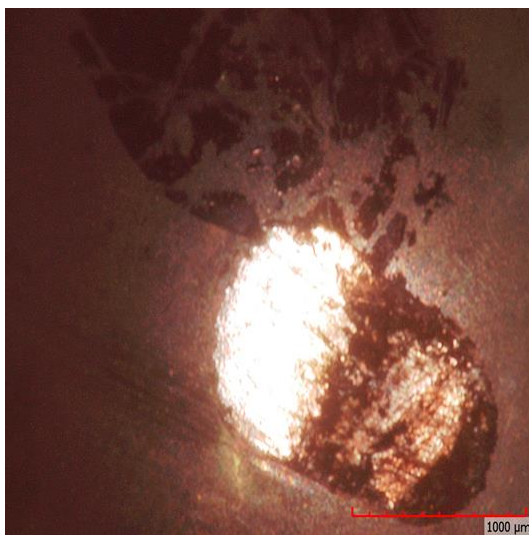
Vzorek č. 1 byl zkoumán v závislosti na postupně se snižujícím (či zvyšujícím se) normálovém zatížení a vyhodnocuje se, jakým způsobem se vyvíjí koeficient tření a koeficient opotřebení. Tato zkouška byla provedena na základě stanovených parametrů pouze v kalené oblasti vzorku č.1 (viz. 3.2.3.2.). Naměřené hodnoty a vypočtené parametry experimentu jsou zaznamenány v tabulce č.7, č.8, č.9 a jsou vyneseny v příslušných grafech obr.č.23 - graf 5, obr.č.24 - graf 6.

4.1.1. Závislost \emptyset COF koeficientu tření na zatížení

Na základě tribometrem automaticky generovaných průměrných koeficientů tření zaznamenaných v tabulce č.9 vyplývá, že se zvyšujícím se normálovým zatížením klesá koeficient tření. Tato skutečnost je velmi dobře znázorněna v příslušném obr. č.24 - graf 6. Tento průběh je očekávaný až na diskontinuitu ve stopě č.2 při zatížení 125N. Z obr. č.24 - graf 6 je patrné, že: stopa č.5_50N až stopa č.3_100N \emptyset COF klesá, stopa č.3_100N až stopa č.2_125N \emptyset COF roste a stopa č.2_125N až stopa č.1_150N \emptyset COF klesá. Celkový trend je tedy klesající! Pro objasnění klesajícího trendu \emptyset COF v závislosti na normálovém zatížení použijeme výpočtový vztah pro koeficient tření, který je: $COF = F_t / P$. F_t je třecí síla, kterou je možno ještě dále dělit na třecí sílu statickou a třecí sílu kinematickou. V našem případě u zvoleného a kalením upraveného materiálu je zřejmé, že nárůst třecí síly F_t byl nižší než nárůst normálové síly P . Diskontinuita ve stopě č.2 je způsobena opačným trendem, kdy v této stopě experimentu byla $F_t > P$. Domnívám se, že Nárůst síly F_t je způsoben zvýšeným ulpíváním částic z materiálu vzorku č.1 na kuličce, následkem čehož plocha opotřebování kuličky nemá plně kruhový tvar, ale tvar jinak zdeformovaný (elipsa, obdélník). Vztah pro výpočet F_t je: $F_t = p * S$, kdy p je tlak a S je plocha, je zřejmé, že velikost F_t v tomto případě silně závisí na velikosti plochy, která vznikla opotřebováním kuličky. Tlak je konstantní vyvozený normálovým zatížením P .

4.1.2. Závislost koeficientu opotřebení na zatížení

Z tabulky č.7, č.8, č.9 a z příslušného obr. č.24 - graf 6 je patrné, že vývoj koeficientu opotřebení je nejednoznačný. Z obr. č.24 - graf 6 vidíme, že stopa č.5_50N až stopa č.3_100N koeficientu opotřebení klesá a stopa č.3_125N až stopa č.1_150N koeficientu opotřebení roste. [9] Předpokladem je, že se zvyšujícím se normálovým zatížením P roste i koeficient opotřebení. Tento trend je v případě stopy č.5 a stopy č.4 opačný. V tabulce č.7 jsou údaje o $\emptyset A$ (\emptyset plocha příčného řezu). Stopa č.5 a stopa č.4, má při zatíženích 50N a 75N nezvykle velkou plochu příčného řezu. Tento jev nastal z důvodu toho, že nastalo ulpívání částic materiálu z drážky na přední hraně kuličky, čímž došlo k nadzvednutí kulovitého vzorku a tím vznikla i nepravidelná plocha opotřebení na kuličce – elipsa (viz. obr.28: obr.28 je možno ztotožnit s tabulkou č.2). Na základě tohoto jevu došlo k většímu „vydření“ stopy č.5 a č.4, které se projevilo při nižším normálovém zatížení P . Následkem toho je silně ovlivněna i konečná hodnota výpočtu koeficientu opotřebení v těchto stopách, a proto je průběh grafu v tomto případě nejednoznačný. [10]



Obr.28: opotřebení kuličky - Vzorek č.1_stopa č.4_75N_černá

4.2. Vzorek č.2

4.2.1. Hloubkový profil měření v kalené oblasti

Kalenou oblastí vzorku je myšlena ta část vzorku materiálu, kde se nachází pouze samotná stopa po kalení laserem. V této části vzorku byla po předchozí metalografické přípravě vzorku č.2 provedena měření tvrdosti pomocí mikrotvrdoměru. Zatížení indentoru bylo nastaveno na 1000g (HV1) a postup byl stanoven tak, že první vtisk měření je proveden v hloubce 150 μ m a poslední vtisk měření je v hloubce 1550 μ m. Výsledky jsou mikroskopem generovány automaticky a jsou zaznamenány do tabulky č.4 a vyneseny v přehledném obr. č.19 - graf 1.

V hloubce 150 μ m až 450 μ m je vidět kalením silně tvrzená vrstva materiálu, v hloubce 550 μ m až 750 μ m je vidět kalením ovlivněná vrstva materiálu a v hloubce 950 μ m až 1550 μ m je vidět kalením neovlivněná vrstva materiálu, tedy základní materiál. Z naměřených hodnot vyplývá, že hloubka kalení je do maximální tloušťky kalené vrstvy 750 μ m.

4.2.2. Hloubkový profil měření v oblasti překryvu

Oblastí překryvu je myšlena ta část vzorku materiálu, kde se vzájemně částečně překrývají dvě sousedící stopy po laserovém kalení. Způsob provedení zkoušky a nastavení parametrů zkoušky je totožný jako v bodě 4.2.1.. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce č.5 a vyneseny jsou v přehledném obr. č.20 - graf 2.

V hloubce měření 150 μ m je vidět kalením silně tvrzená vrstva materiálu, v hloubce 250 μ m až 550 μ m je vidět relativně značný pokles tvrdosti materiálu oproti tvrdosti materiálu v kalené oblasti vzorku. Tento vývoj je předpokládán a je způsoben tím, že prvotní stopa po kalení byla v určité své šíři opět vystavena značné tepelné energii pocházející ze sousední kalící stopy, čím došlo k popuštění materiálu, původně zakalenému, v jehož důsledku se snížila tvrdost materiálu v oblasti překryvu stop po kalení. Oblasti překryvu kalících stop jsou z tohoto důvodu slabinou kalení laserem, ale i ostatních druhů kalení, kde se tento jev vyskytuje. V hloubce 750 μ m až 1550 μ m je vidět kalením neovlivněná vrstva materiálu, základní materiál. Z naměřených hodnot vyplývá, že hloubka kalení v oblasti překryvu je do maximální tloušťky kalené vrstvy 550 μ m.

4.2.3. Podélný profil měření

Hloubka měření tvrdosti materiálu je stanovena na 500 μm a byla dodržována s přesností $\pm 20\mu\text{m}$. Zatížení indentoru je 1000g (HV1). Celkem bylo provedeno 36 vtisků, kdy první vtisk byl zvolen ve vzdálenosti 3500 μm , a to z důvodu poškrábání okraje vzorku č.2. Těchto 36 vtisků délkově obsáhlo více než polovinu šířky zkoumaného vzorku.

V tabulce č.6, kde jsou zaznamenány výsledky změřených tvrdostí vzorku a z vynesných hodnot v obr. č.22 - graf 4, vidíme relativně značnou rozkolísanost naměřených hodnot tvrdostí materiálu. Tento jev je způsoben nestejnou hloubkou prokalené vrstvy materiálu. Zvláště patrné je to v bodech měření vtisku č.15 až č.19 a v bodech č.34 až č.36 tabulky č.6.. Tyto body se nacházejí v oblasti překryvu kalících stop, kdy se hodnoty tvrdosti pohybují na hranici kalením ovlivněného materiálu a základního materiálu. Pro demonstraci tohoto tvrzení si povšimne obr. č.11 a porovnáme hodnoty naměřených tvrdostí z tabulky č.5, měření č.5, hloubka vtisku 550 μm a z tabulky č.6, měření č.35, č.36, hloubka vtisku 500 μm . Z tohoto porovnání je zřejmé, že naměřené hodnoty jsou si velmi podobné.

4.3. Vzorek č.3

Vzorek č. 3 byl zkoumán při konstantním normálovém zatížení v oblasti překryvu vzorku a v kalené oblasti vzorku. Vyhodnocovalo se, jakým způsobem se vyvíjí koeficient tření a koeficient opotřebení v závislosti na umístění zkušebních stop na vzorku. Tato zkouška byla provedena na základě stanovených parametrů (viz. 3.2.3.2.). Naměřené hodnoty a vypočtené parametry experimentu jsou zaznamenány v tabulce č.10, č.11, č.12 a jsou vyneseny v příslušných obr.č. 25 - graf 7, obr.č. 26 - graf 8.

4.3.1. Závislost COF koeficientu tření na umístění stopy

Z tabulky č.12 a z příslušného obr.č. 26 - graf 8 je patrné, že COF má celkově tendenci růst. Pozorujeme, že ve stopě č.1 až stopě č.4 COF roste a ve stopě č.4 až stopě č.5 COF klesá. Tento trend lze zdůvodnit tak, že třecí síla F_t roste vzhledem ke konstantnímu normálovému zatížení P . Důvod nárůstu třecí síly bude kombinací vícero faktorů, jako jsou: rozdílná tvrdost materiálu v oblastech umístění stop, ulpívání částic materiálu na zkušebním vzorku, což vede ke zvětšování plochy opotřebení na kuličky a tím k nárůstu třecí síly (viz.4.1.1.).

4.1.2. Závislost koeficientu opotřebení na umístění stopy

Z tabulky č.10, č.11, č.12 a z příslušného obr.č. 26 - graf 8 je patrné, že koeficient opotřebení spolu s objemovým opotřebení je závislý na tvrdosti jednotlivých oblastí, kde je stopa umístěna. Ve stopě č.1 až stopě č.2 koeficient opotřebení roste, ve stopě č.2 až stopě č.3 koeficient opotřebení klesá, ve stopě č.3 až stopě č.4 koeficient opotřebení klesá, ve stopě č.4 až stopě č.5 koeficient opotřebení roste. Ve stopě č.2 koeficient opotřebení roste z důvodu překryvu kalících stop, kdy materiál je měkčí z důvodu popuštění (viz.4.2.2.). Ve stopě č.4 koeficient opotřebení klesá z důvodu nepřesného umístění stopy do oblasti překryvu kalících stop, kdy se pravděpodobně projeví v tomto místě větší tvrdost materiálu.

5. Závěr

Cílem této práce je vyhodnocení vlivu zatížení a umístění zkušebních stop na vzorku laserem kalené oceli na hledané parametry koeficient tření, koeficient opotřebení, objemové opotřebení a rychlost opotřebení. Bylo zjištěno, že zvyšující se zatížení má vliv na hodnotu koeficientu tření, se zvyšujícím se zatížením se tření snižuje. Nebyl prokázán jednoznačný vliv na opotřebení materiálu. Bylo zjištěno, že koeficient opotřebení je proměnlivý, a to v závislosti na tvrdosti vzorku zkoumaného materiálu, a že koeficient opotřebení i při konstantním zatížení vzrůstá, a to úměrně se vzrůstající třecí silou.

Experiment je proveden v souladu s normou ASTM G133 pro tribologické lineární oscilační zkoušky.

Z průběhu zkoušky je možno doporučit toto: *Domnívám se, že plné ověření relevantnosti naměřených hodnot je možné až pro minimálně 3 měřené vzorky, a to proto, abychom mohli statisticky vyloučit chybná měření! Tento experiment je vhodné doplnit měřením mikrostruktury materiálu a přímým měřením tvrdosti materiálu v oblasti zkušebních stop (tato další měření nejsou v této bakalářské práci realizována, a to z důvodu překročení rozsahu a zadání prováděného experimentu).*

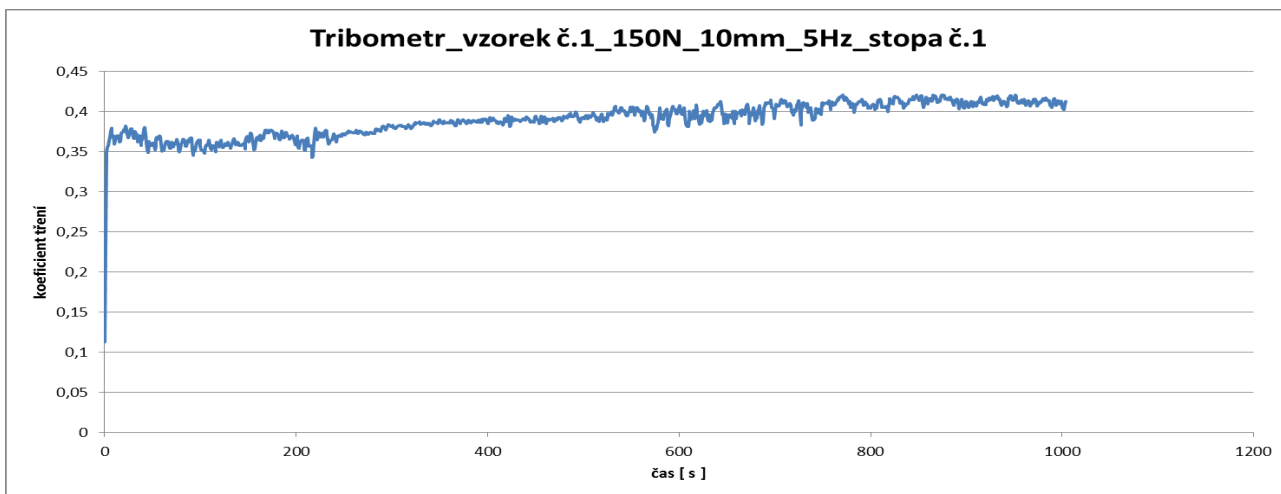
Seznam použité literatury:

- [1] [Katedra strojírenské technologie TU Liberec;
www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf),
- [2] [ANTONÍN KRÍŽ: Tribologická analýza Pin-on-Disc, Metal 2004](#),
- [3] www.wikipedie.cz/laser,
- [4] [LUDĚK PTÁČEK a kolektiv : Nauka o materiálu II](#),
- [5] časopis: [Tribotechnika r.5/2012](#),
- [6] lasery.wz.cz,
- [7] [Designation: G133; Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear](#),
- [8] www.bozpinfo.cz
- [9] [Eva SMAZALOVÁ, Šárka HOUDKOVÁ, Jaromíra SUDOVÁ, Lucie PRUŠÁKOVÁ: EVALUATION OF MATERIALS TRIBOLOGICAL CHARACTERISTIC DEVELOPMENT IN DEPENDANCE ON INCREASING LOAD, Vrstvy a povlaky 2013, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic 2013, s.129-134, ISBN 978-80-970824-2-0](#)
- [10] [JIRÍ HÁJEK, ANTONÍN KRÍŽ: Tribologická analýza PIN-ON-DISC_metal 2005
www.metal2014.com/files/proceedings/metal_05/papers/70.pdf](#)

Příloha:

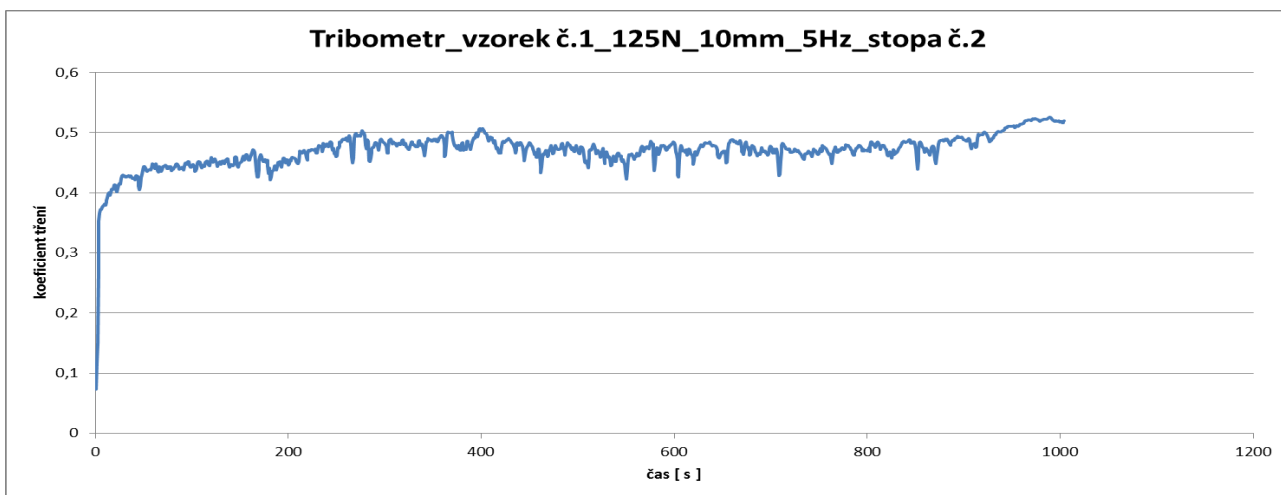
Tribometrické grafy – vzorek č.1

Stopa č.1



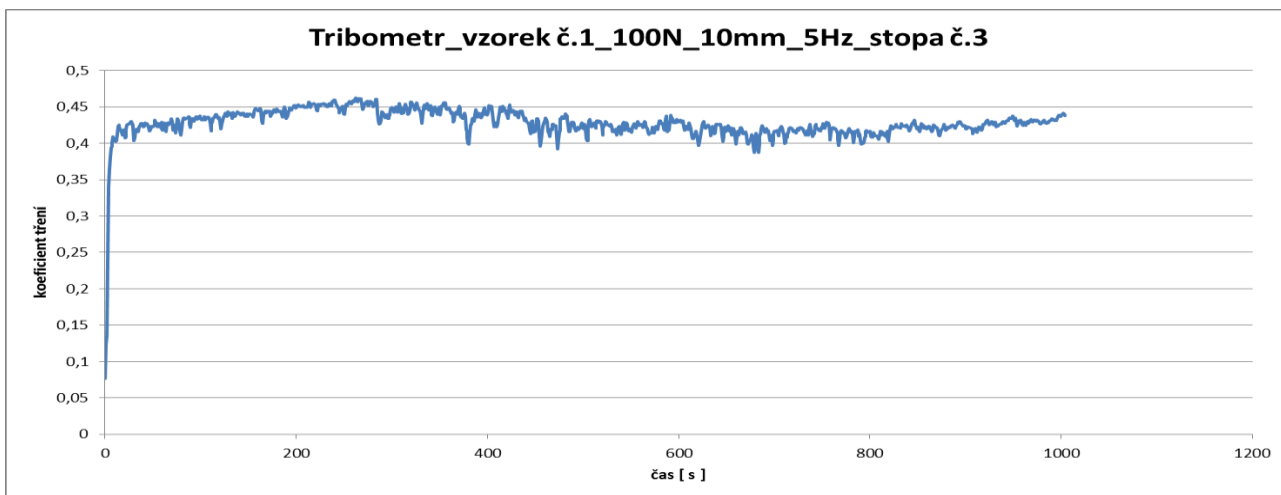
Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,3885$

Stopa č.2



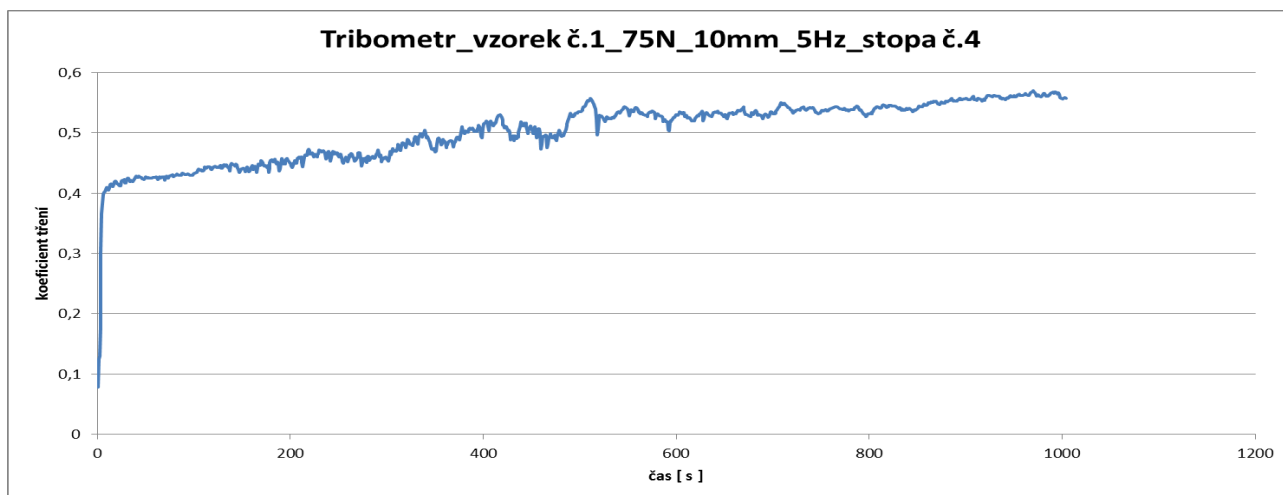
Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,4695$

Stopa č.3



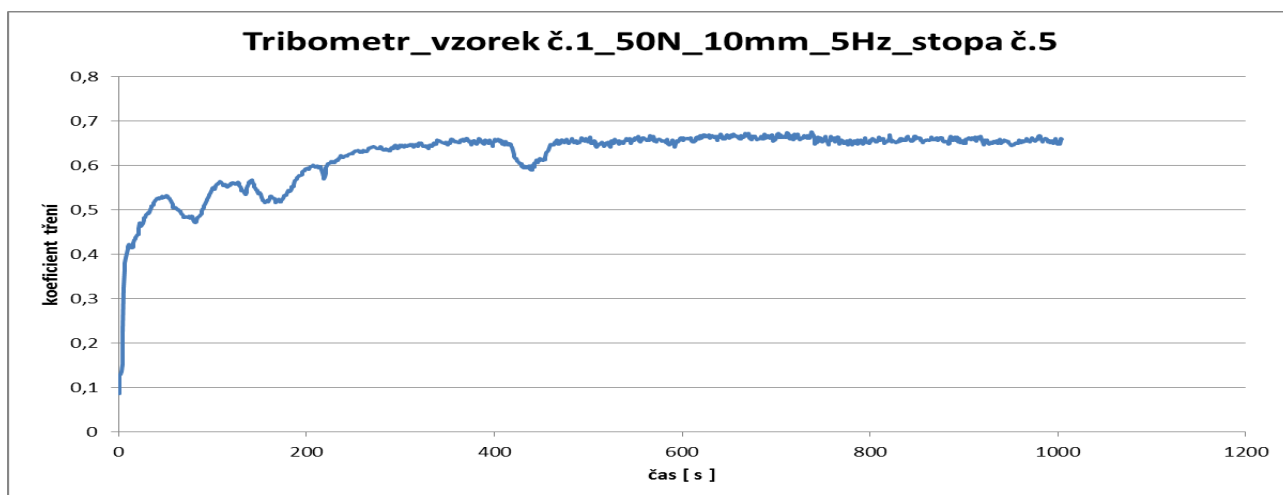
Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,4279$

Stopa č.4



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,5018$

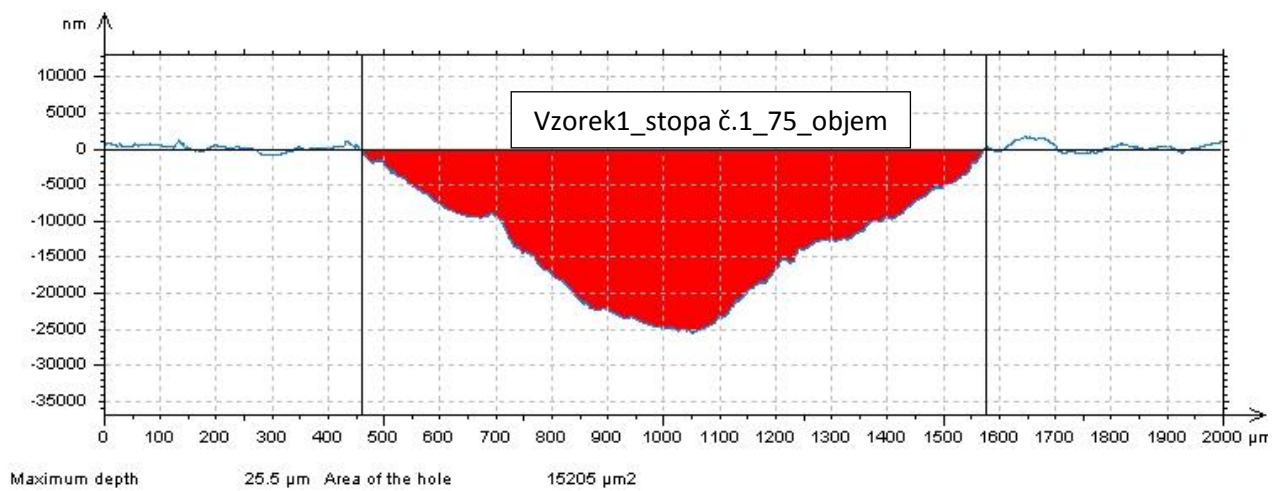
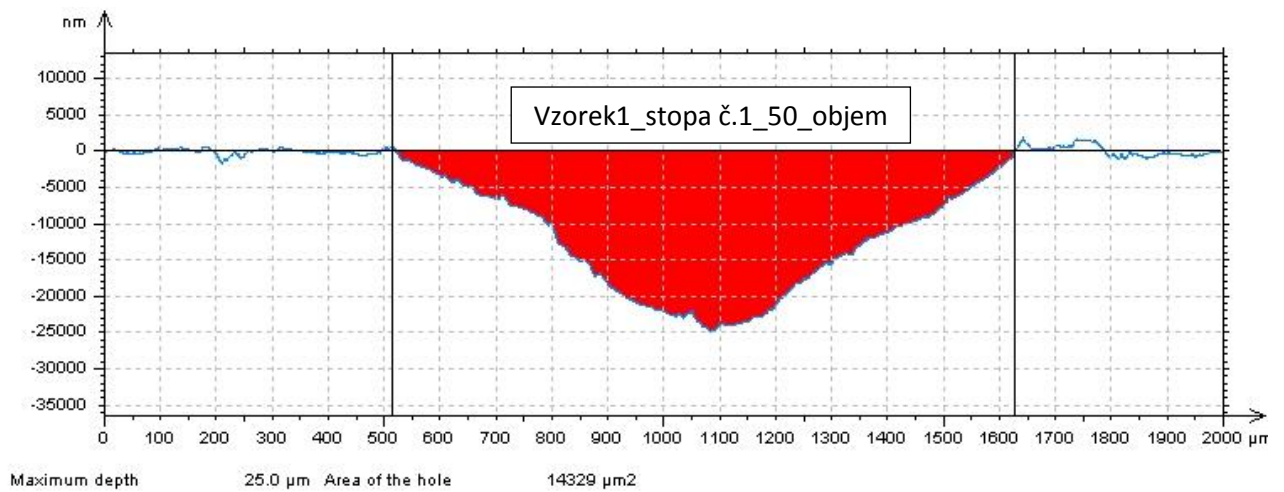
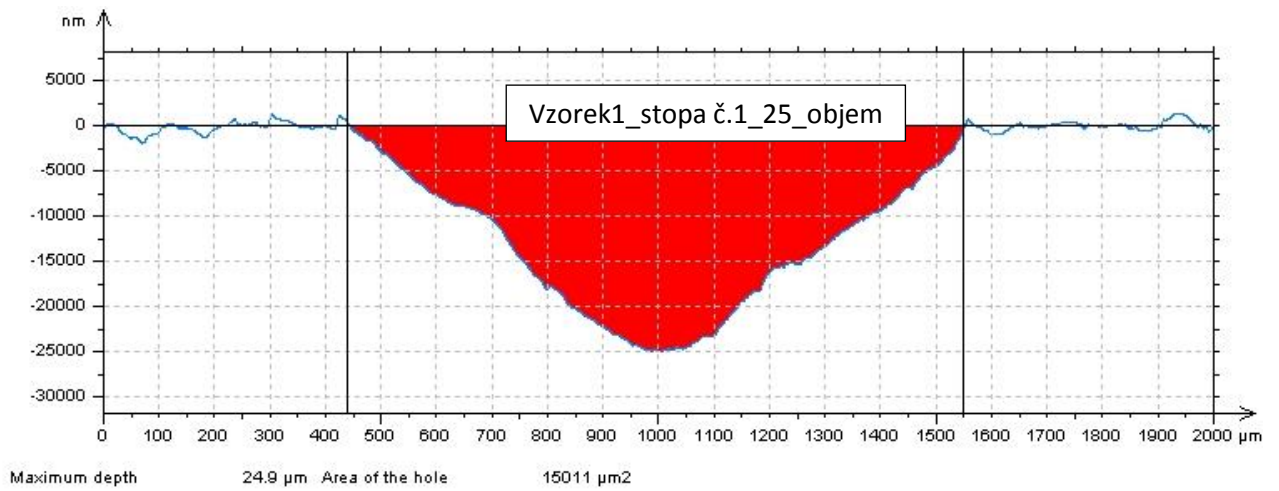
Stopa č.5



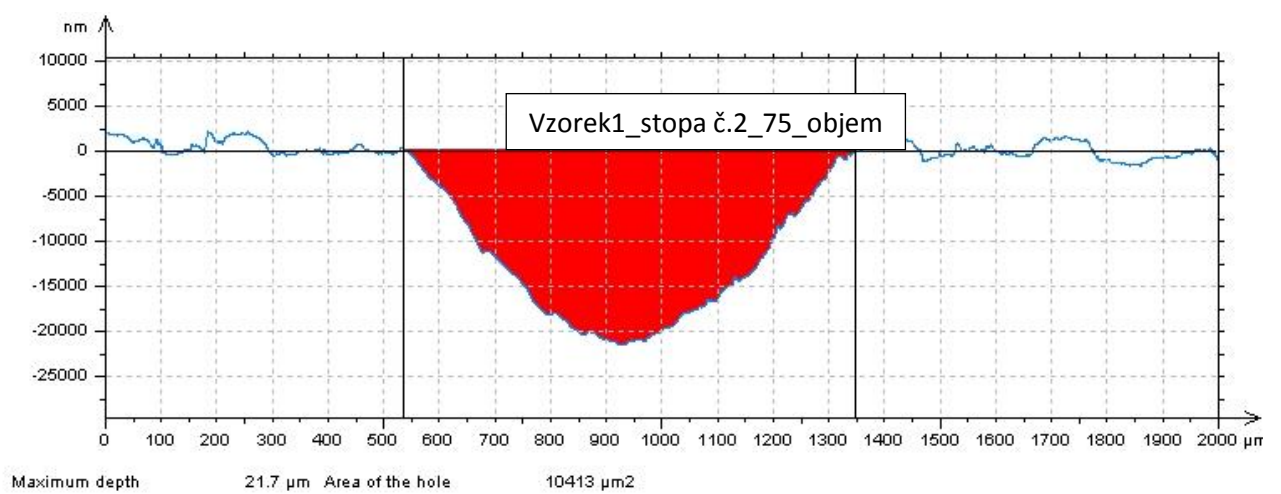
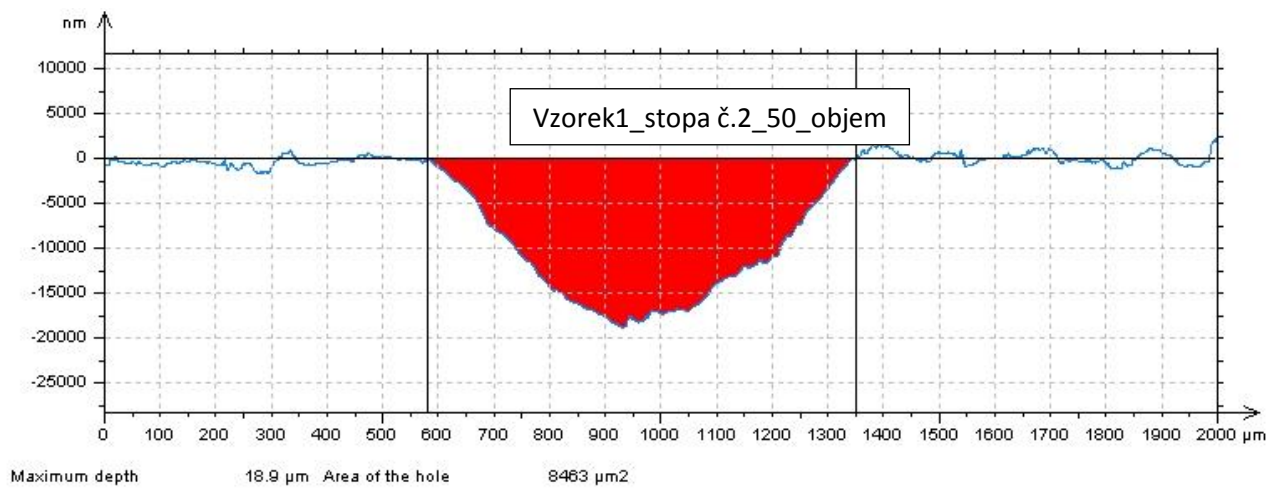
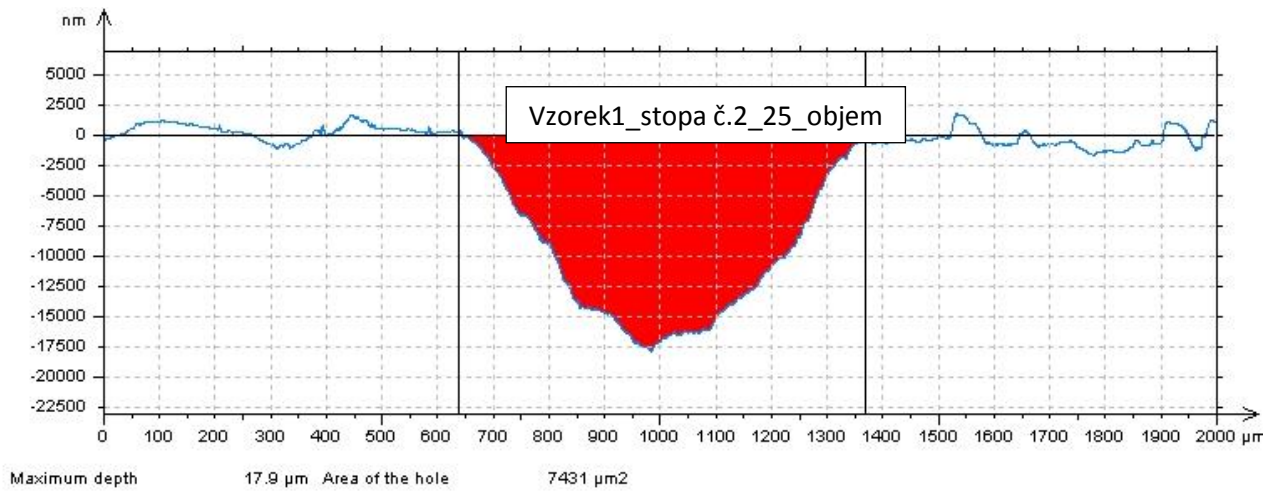
Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,6209$

Grafy z profilometru – vzorek č.1

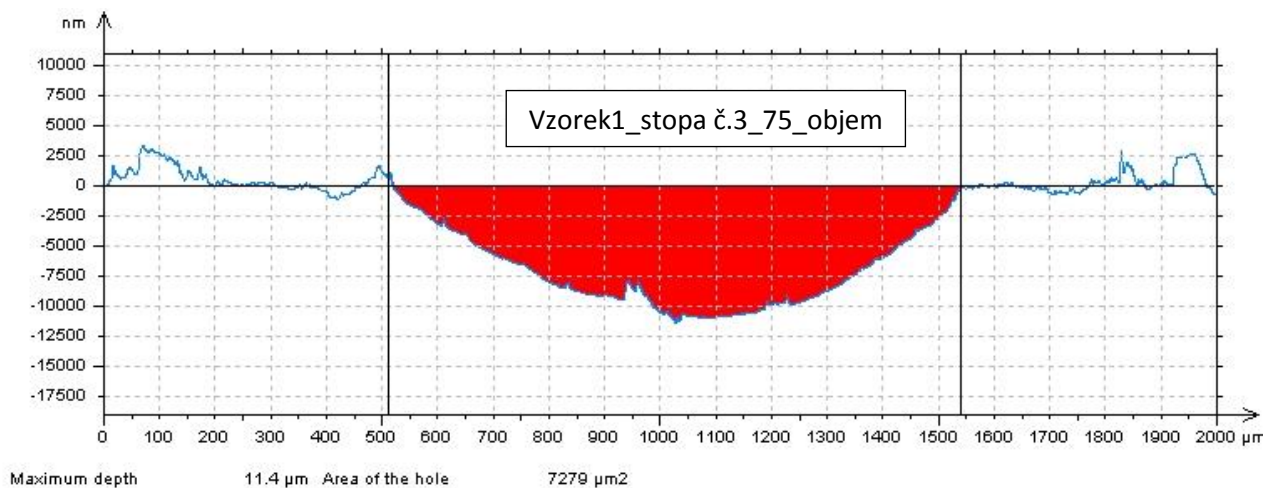
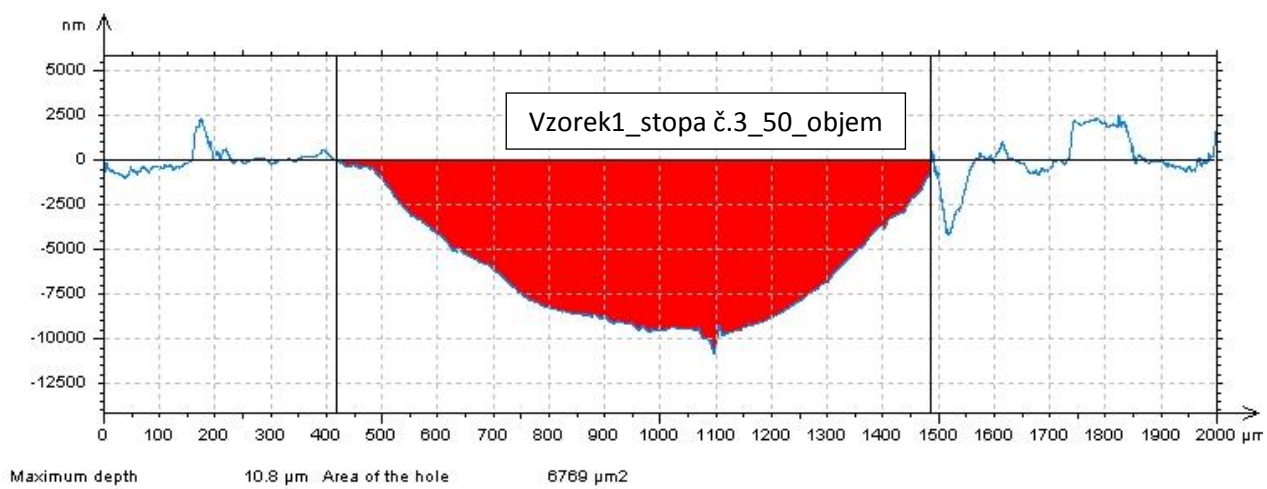
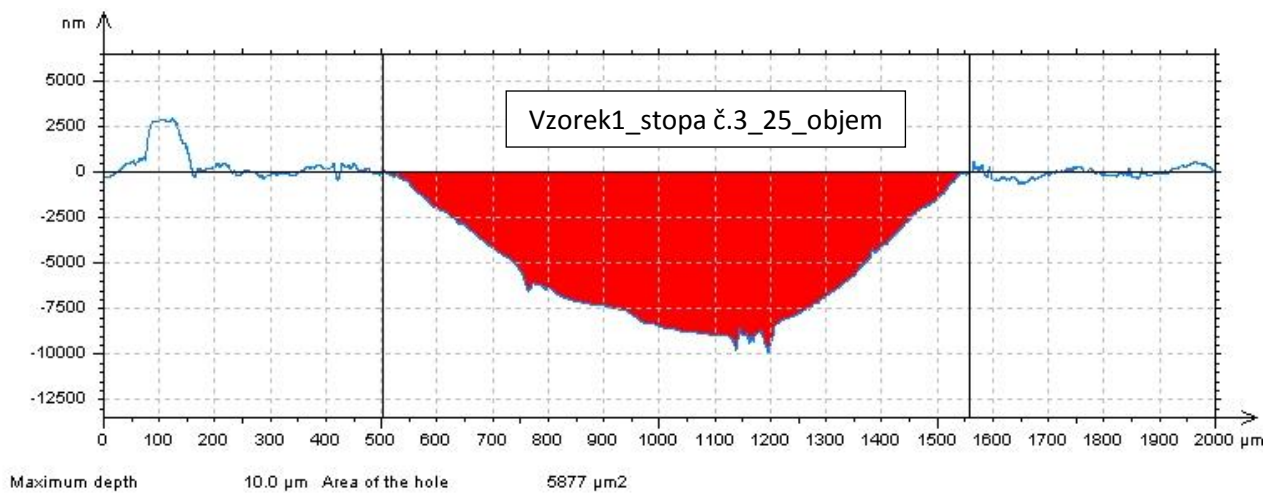
Stopa č.1



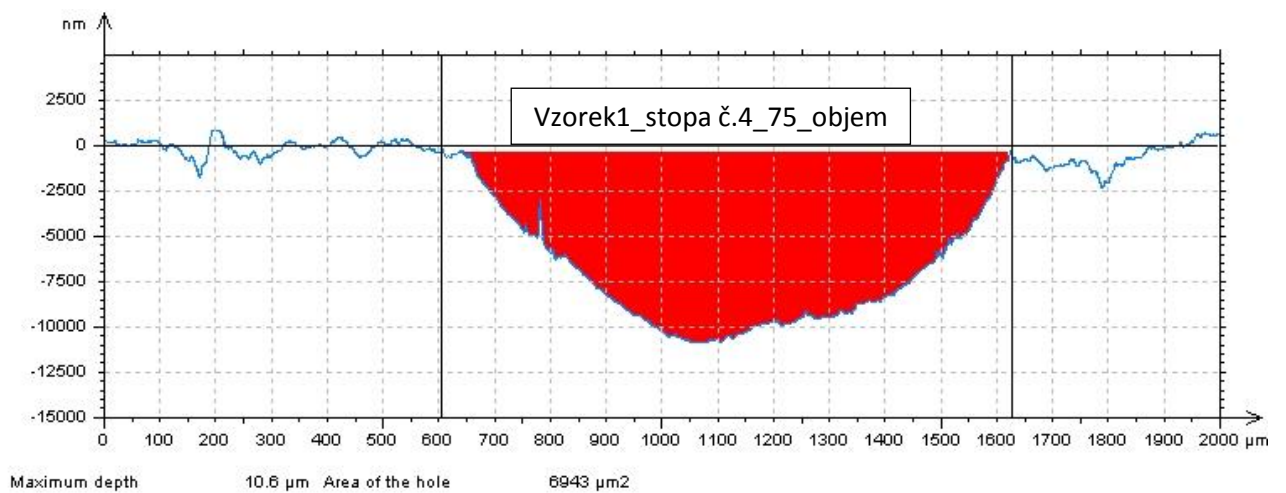
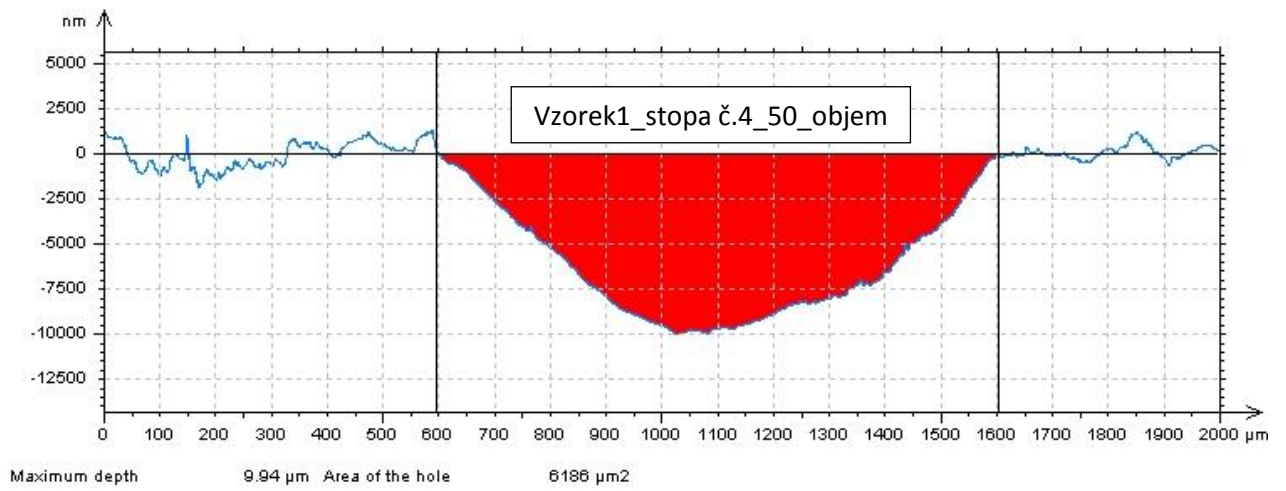
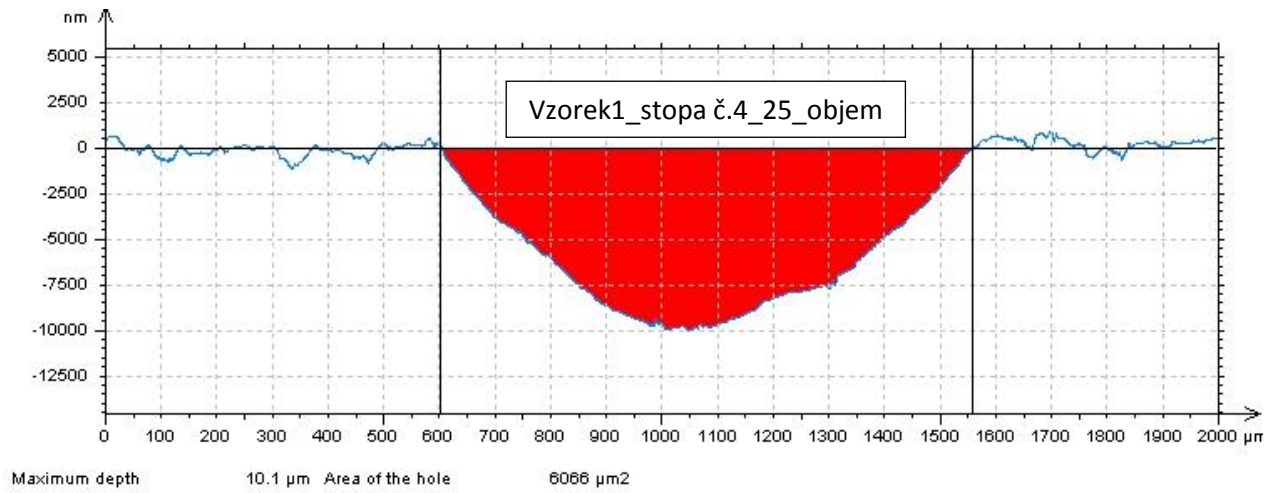
Stopa č.2



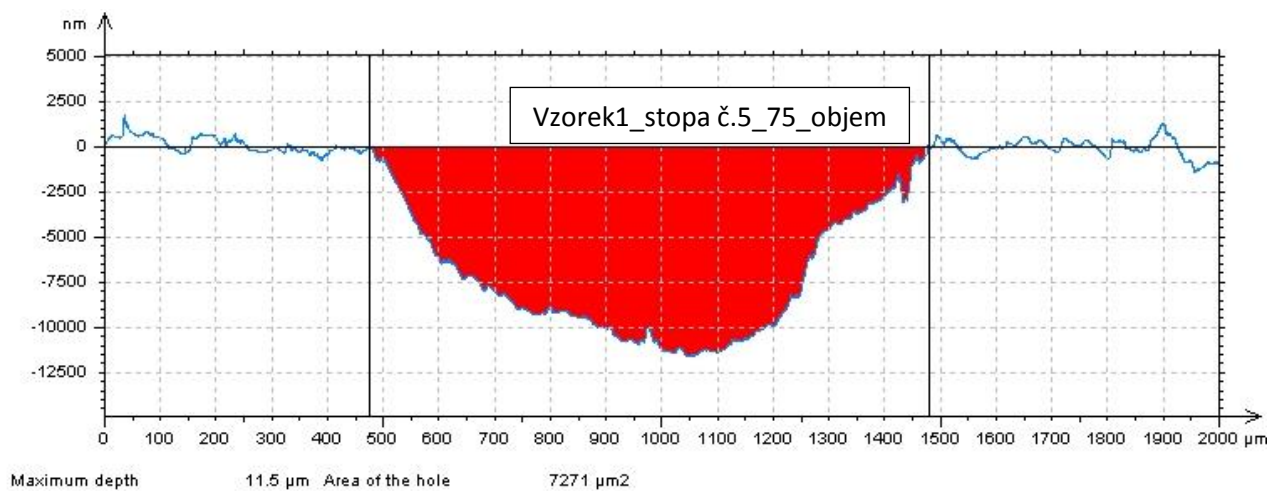
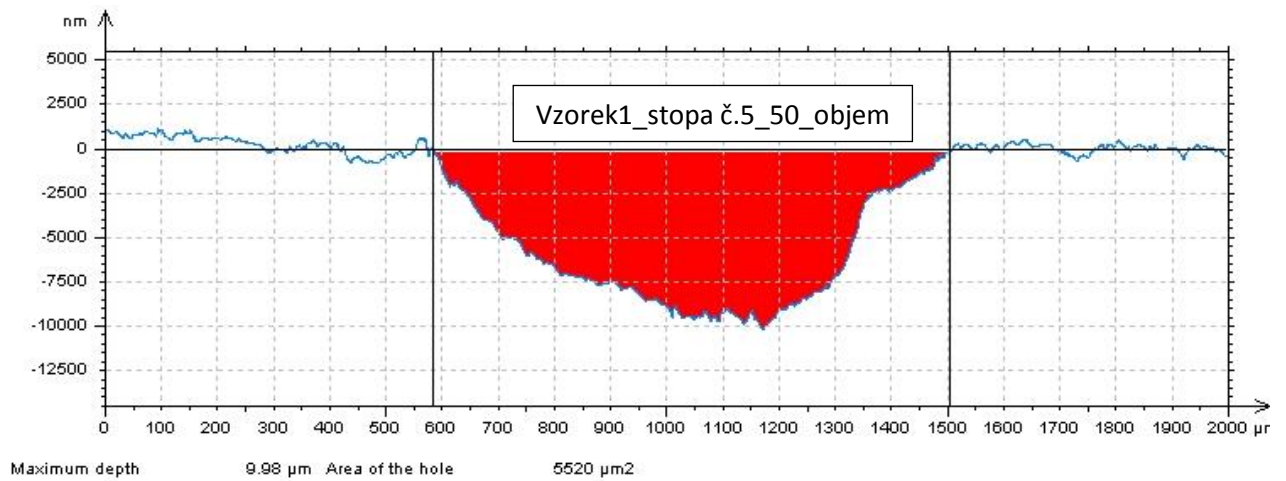
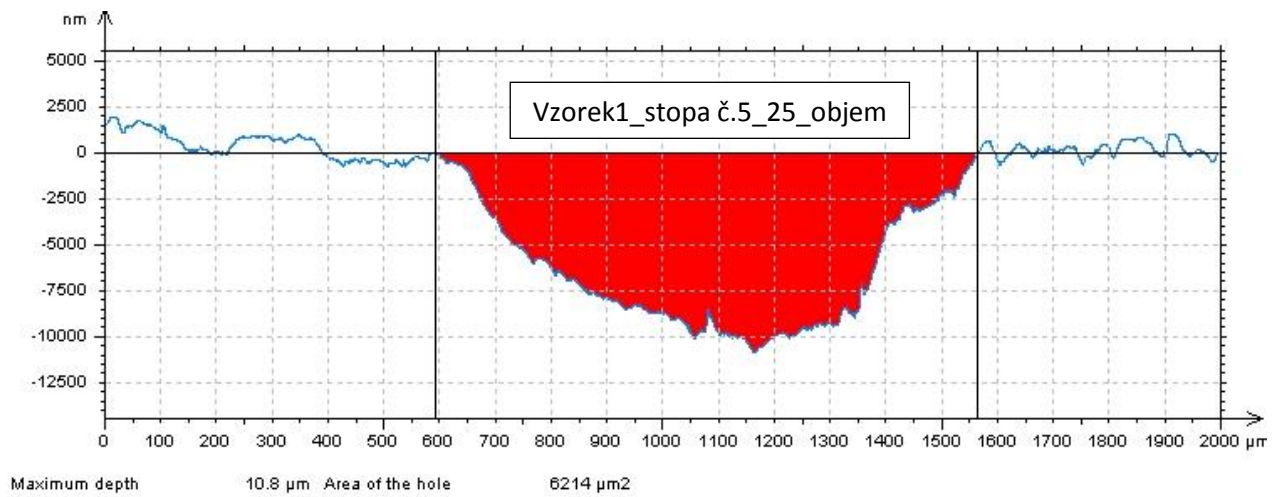
Stopa č.3



Stopa č.4

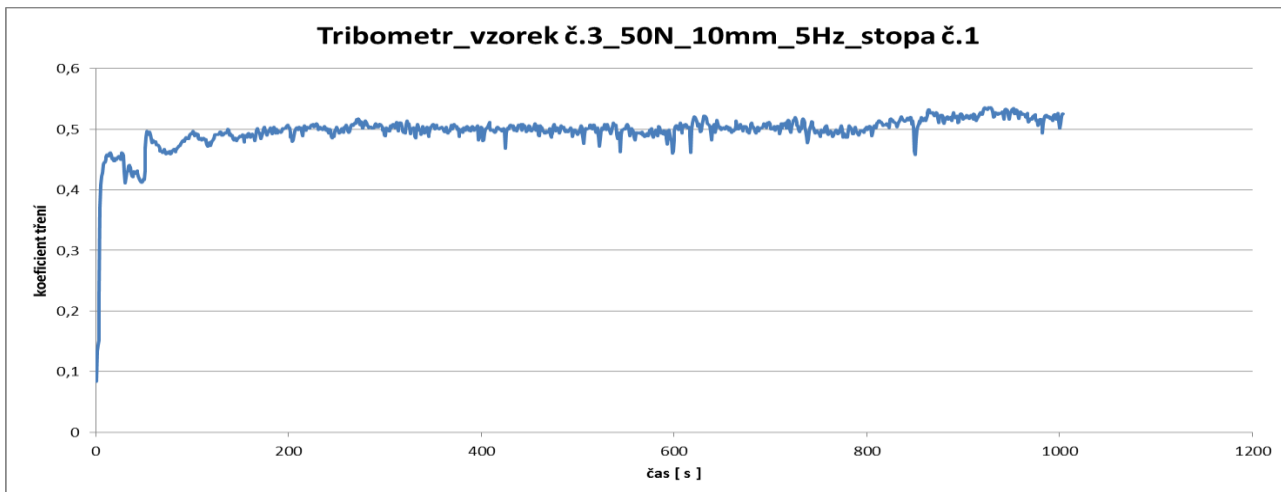


Stopa č.5



Tribometrické grafy – vzorek č.3

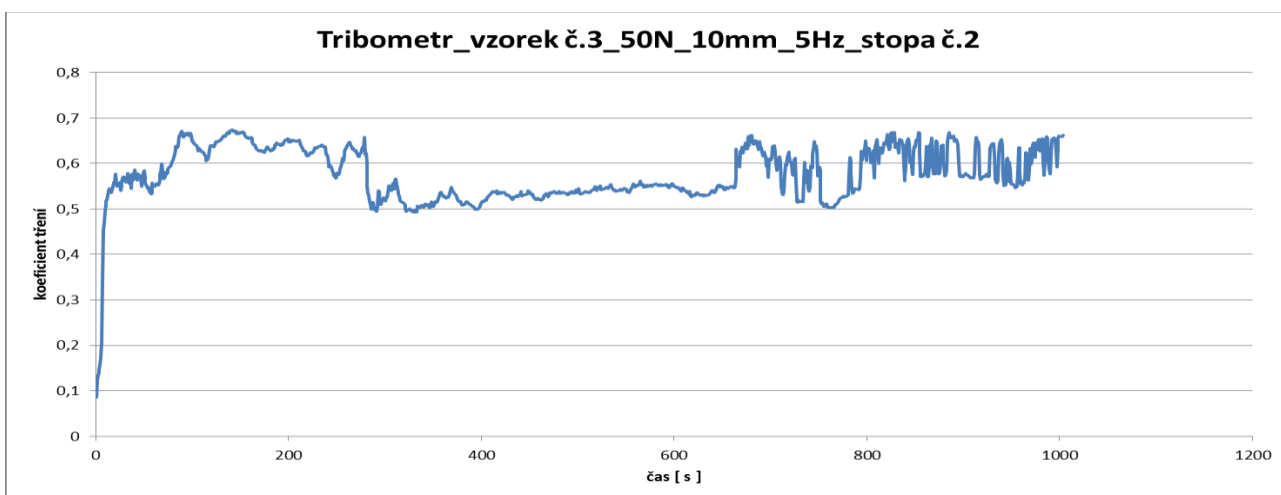
Stopa č.1



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,4974$

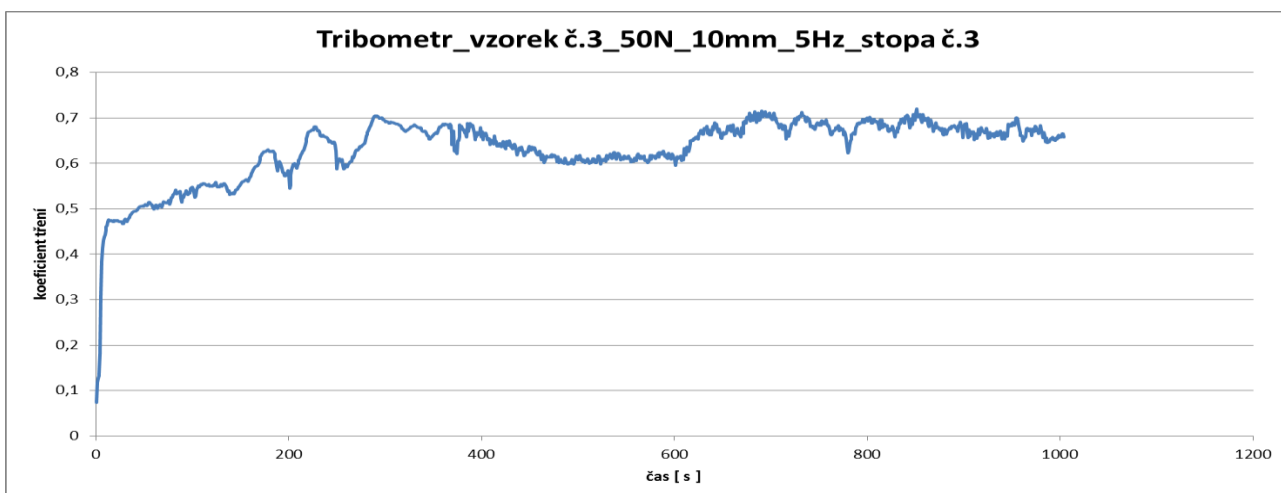
Stopa č.2 - překryv stop

- v této stopě je patrný překryv dvou vzájemně sousedících kalených ploch.



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,5746$

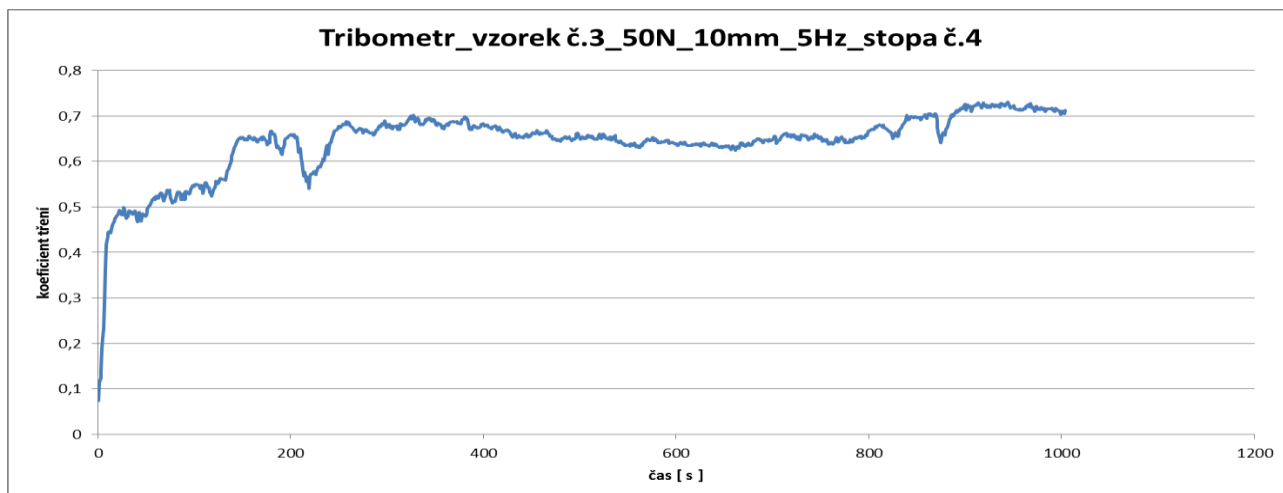
Stopa č.3



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,6321$

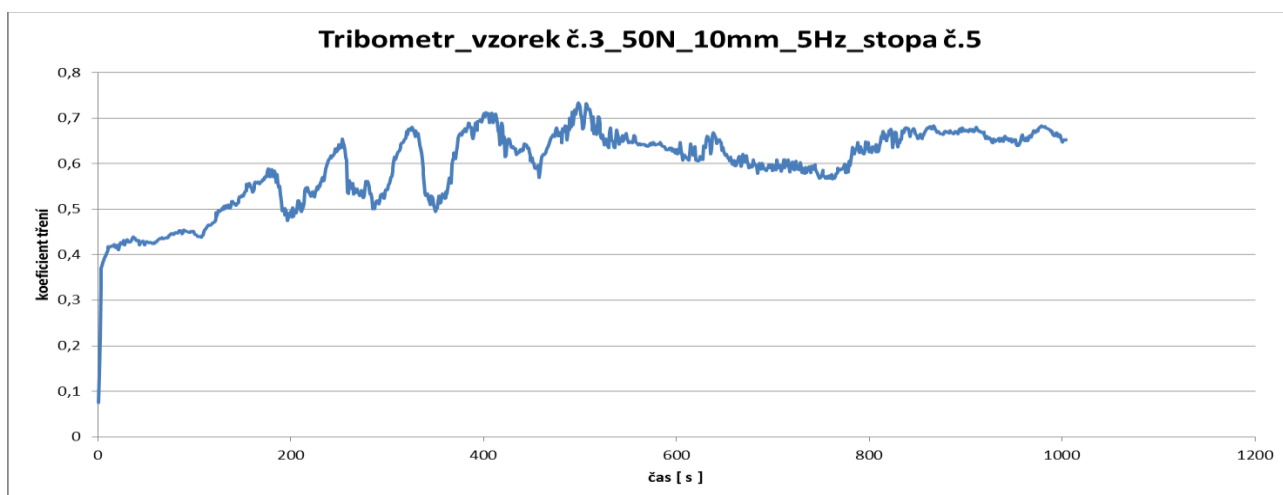
Stopa č.4 - překryv stop

- v této stopě je patrný překryv dvou vzájemně sousedících kalených ploch.



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,6411$

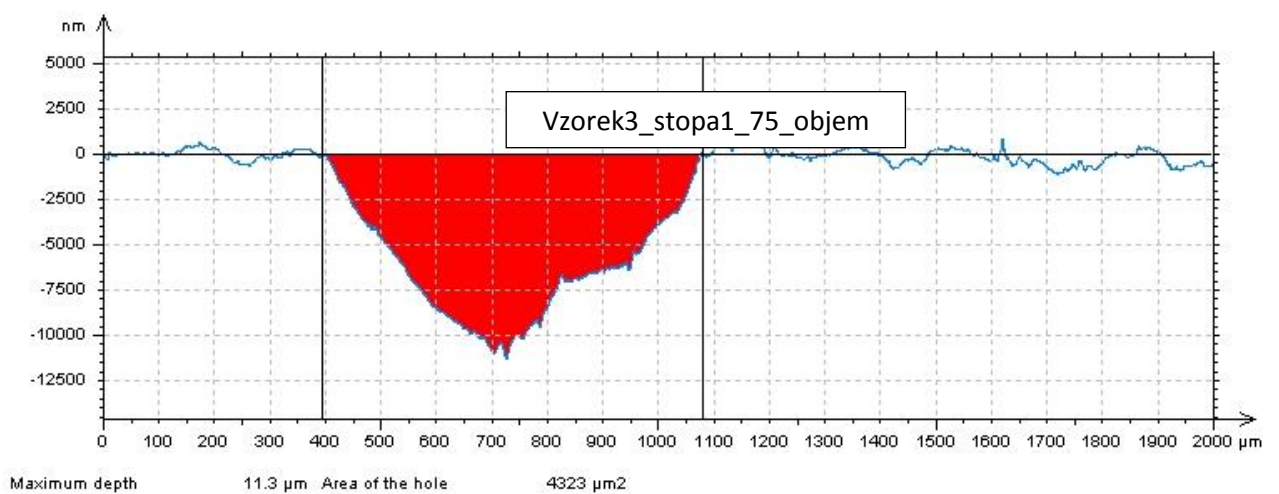
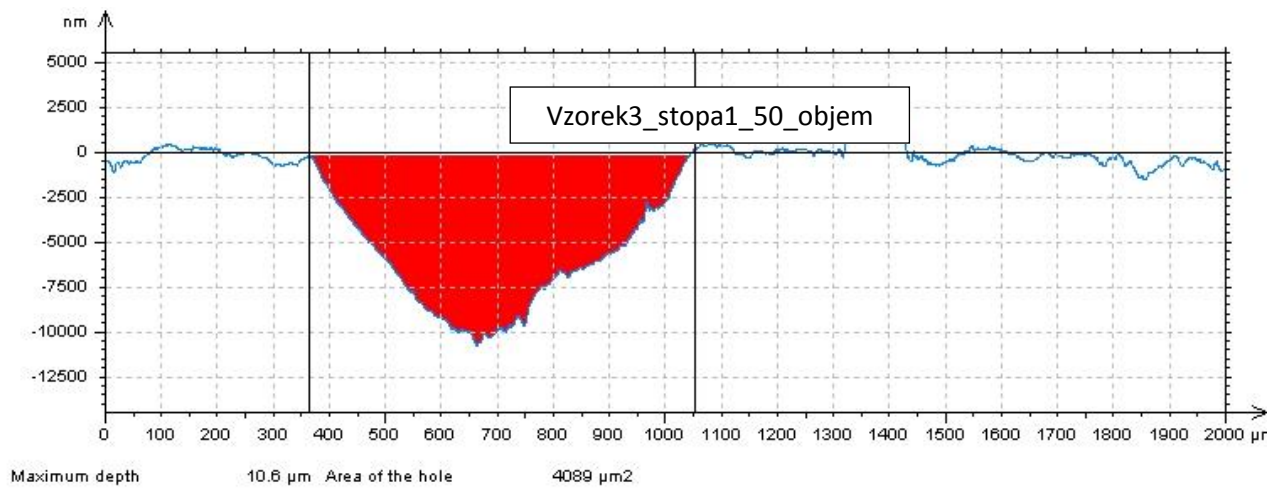
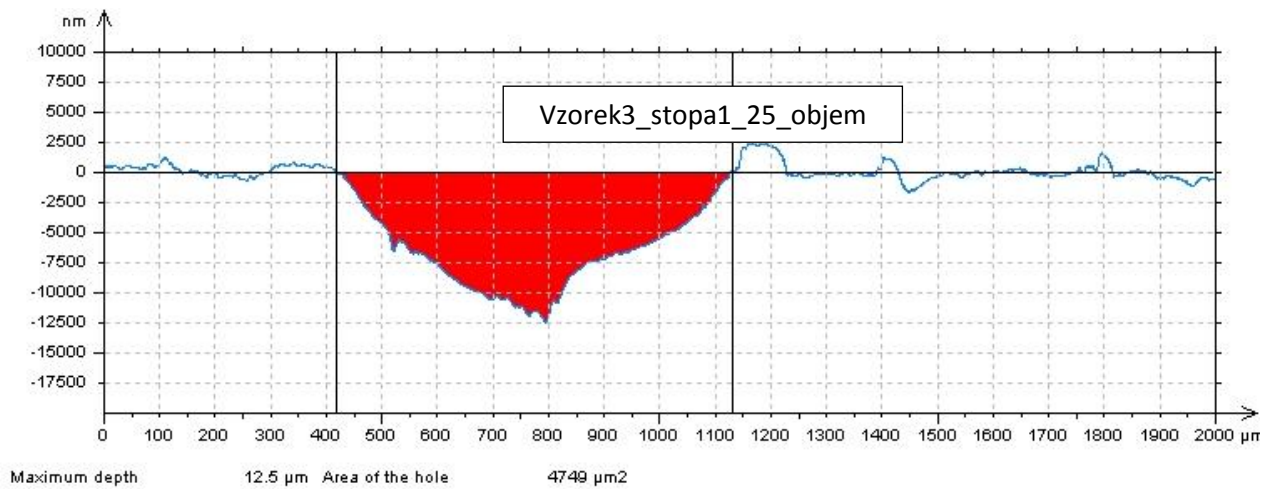
Stopa č.5



Ø hodnota koeficientu tření $u_k = 0,5959$

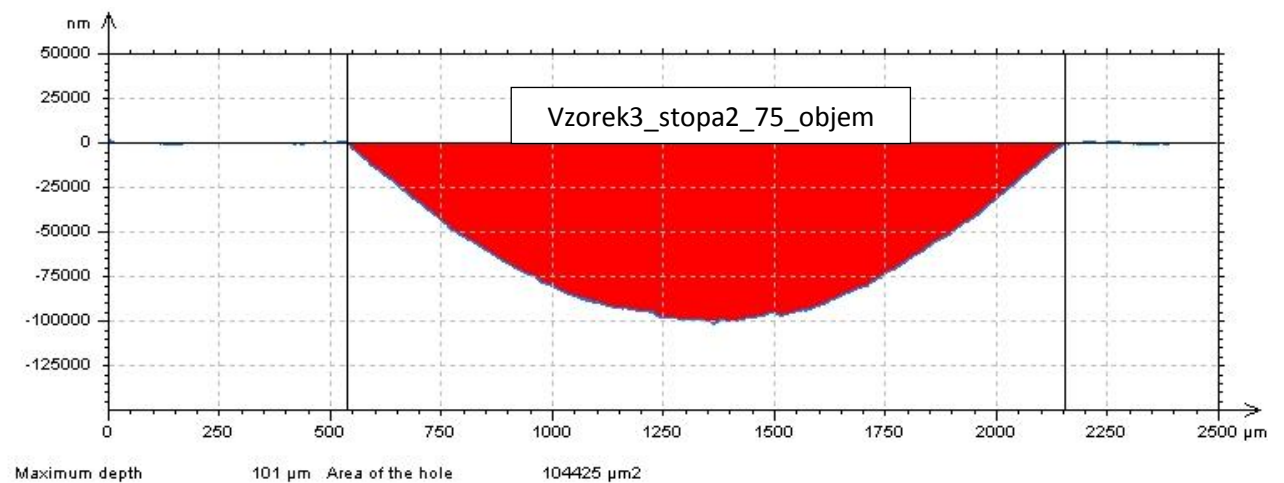
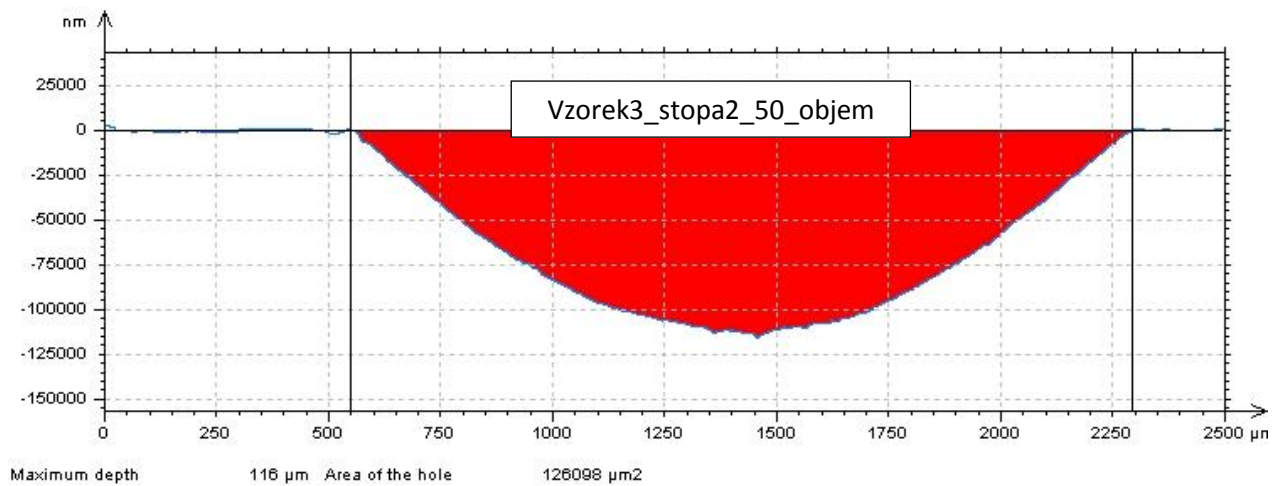
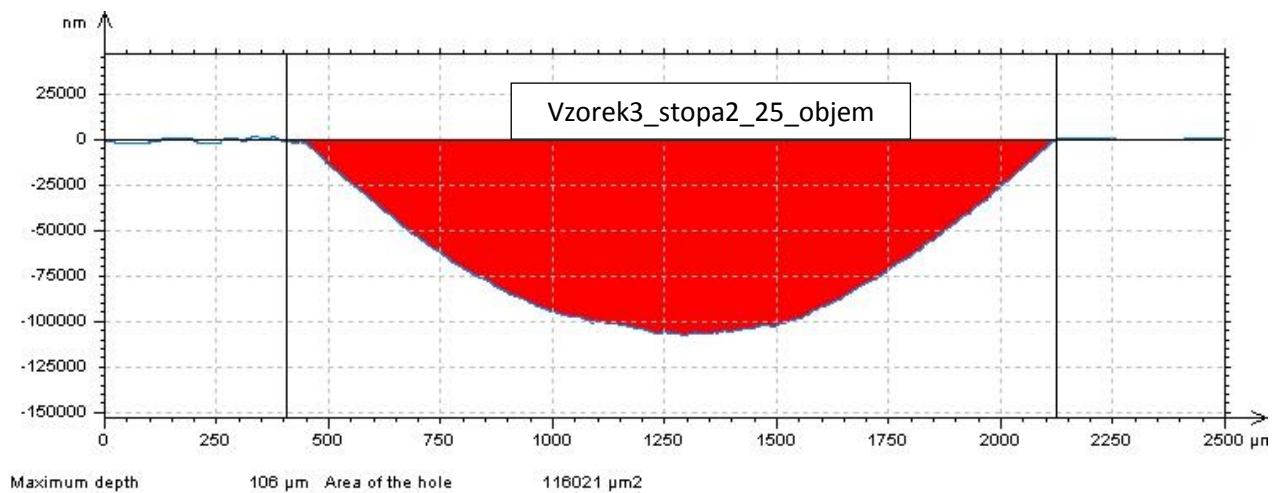
Grafy z profilometru – vzorek č.3

3.3.2.1. Stopa č.1

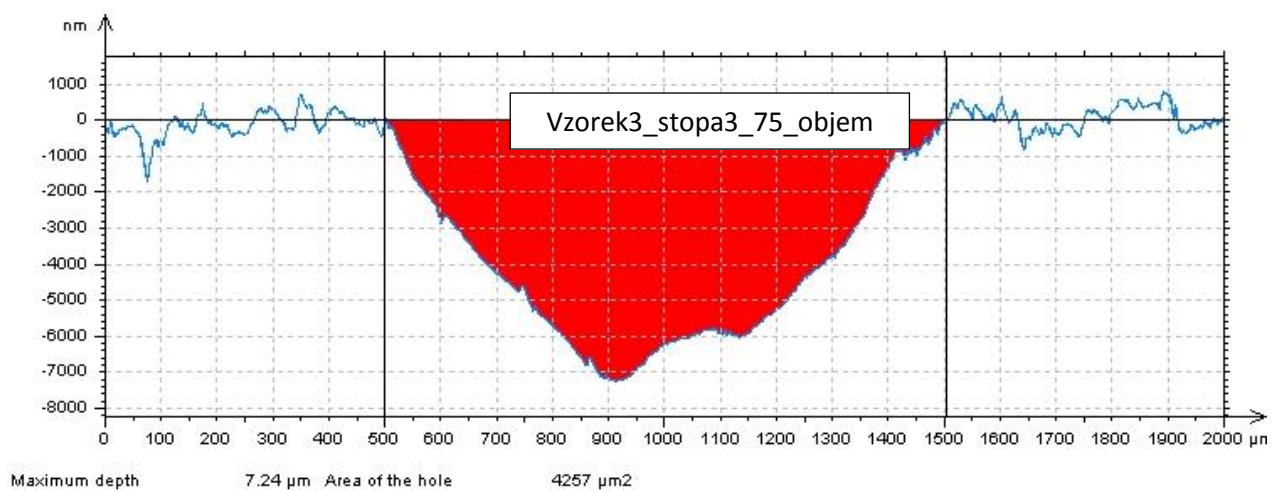
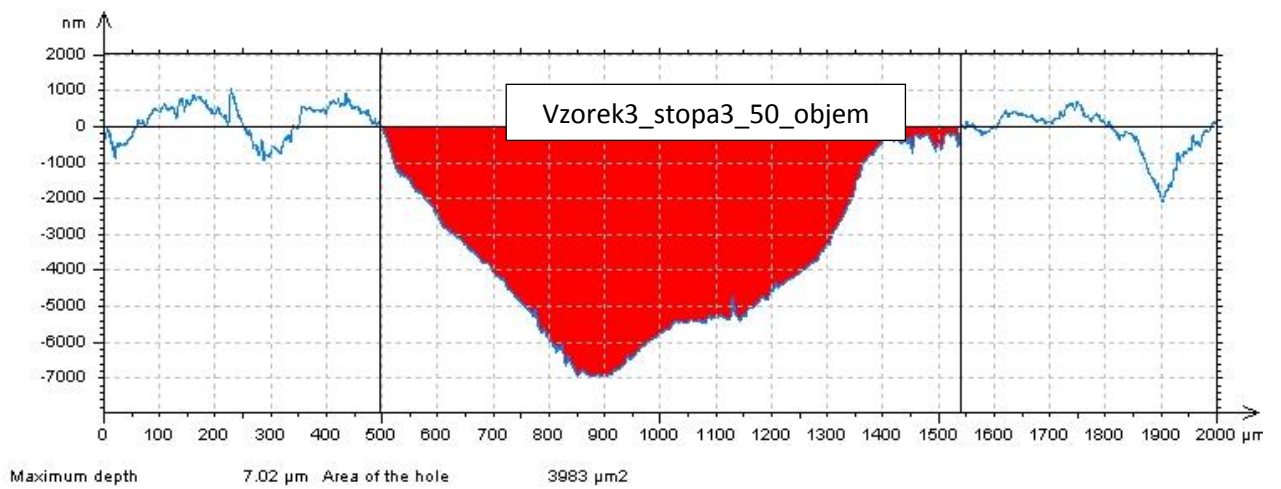
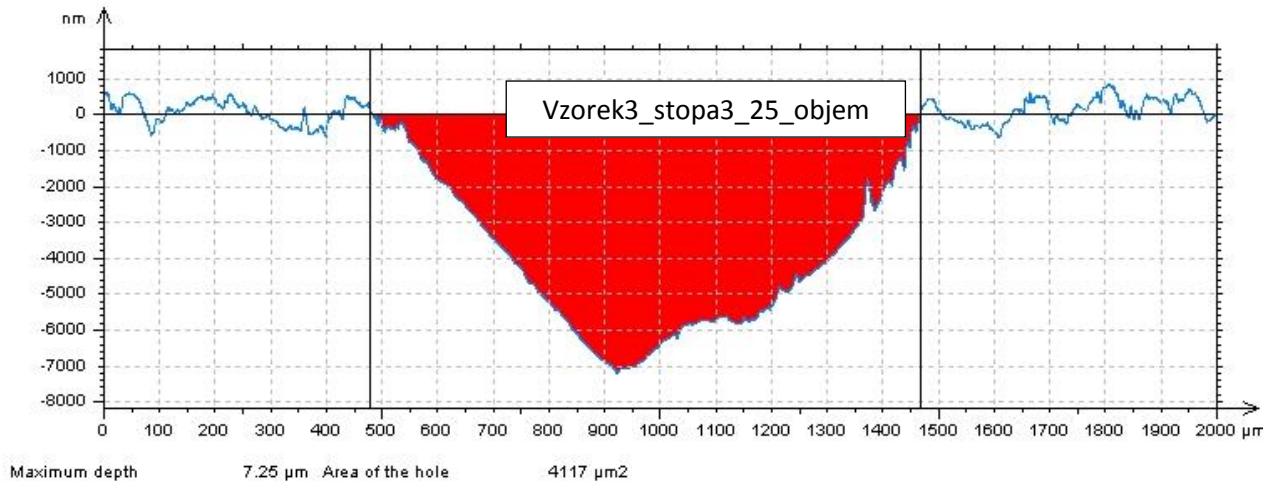


Stopa č.2 - překryv stop

- v této stopě je patrný překryv dvou vzájemně sousedících kalených ploch.

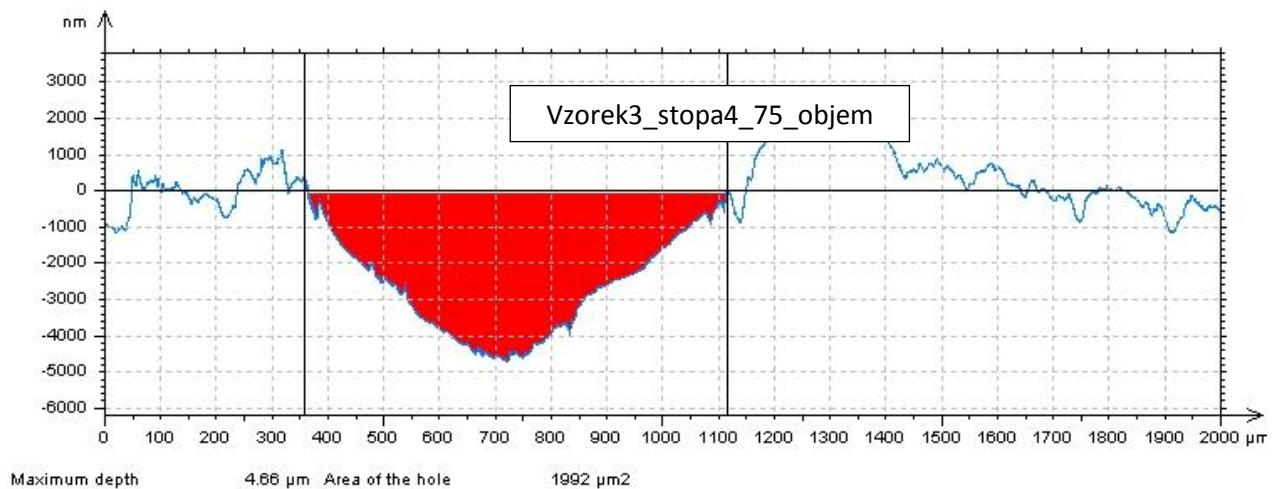
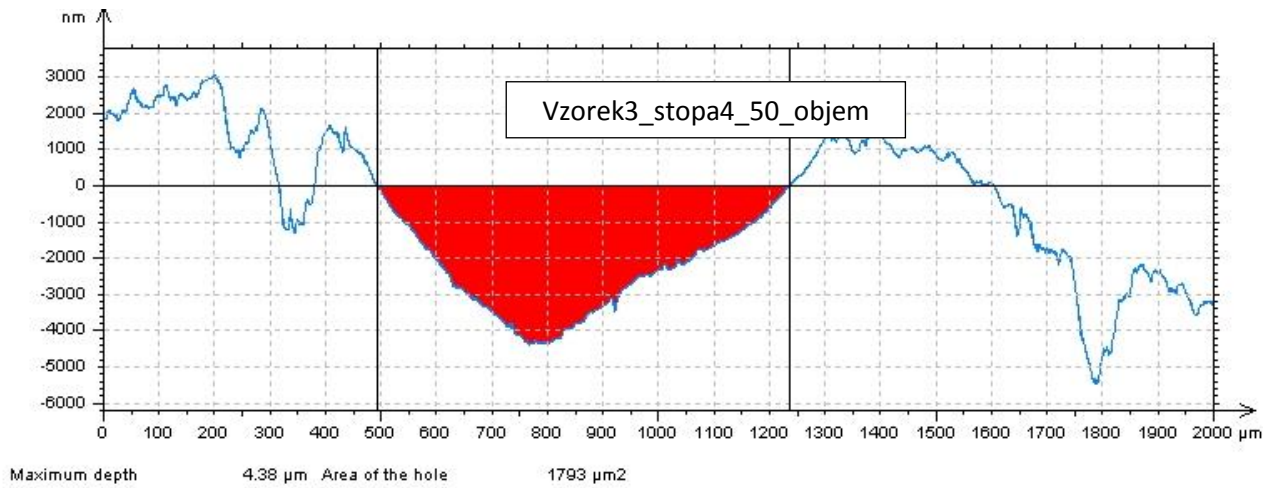
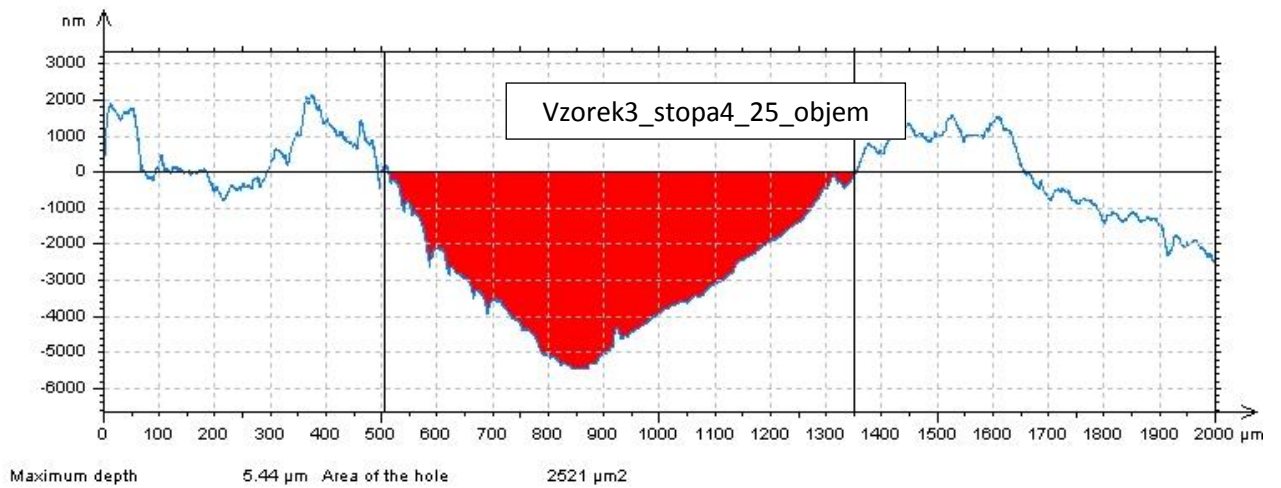


Stopa č.3

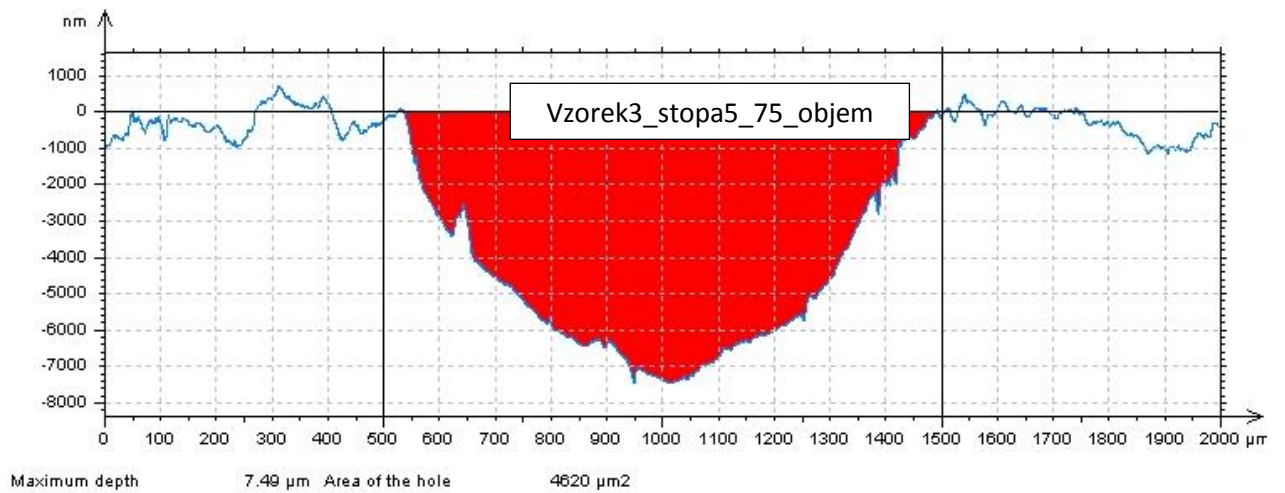
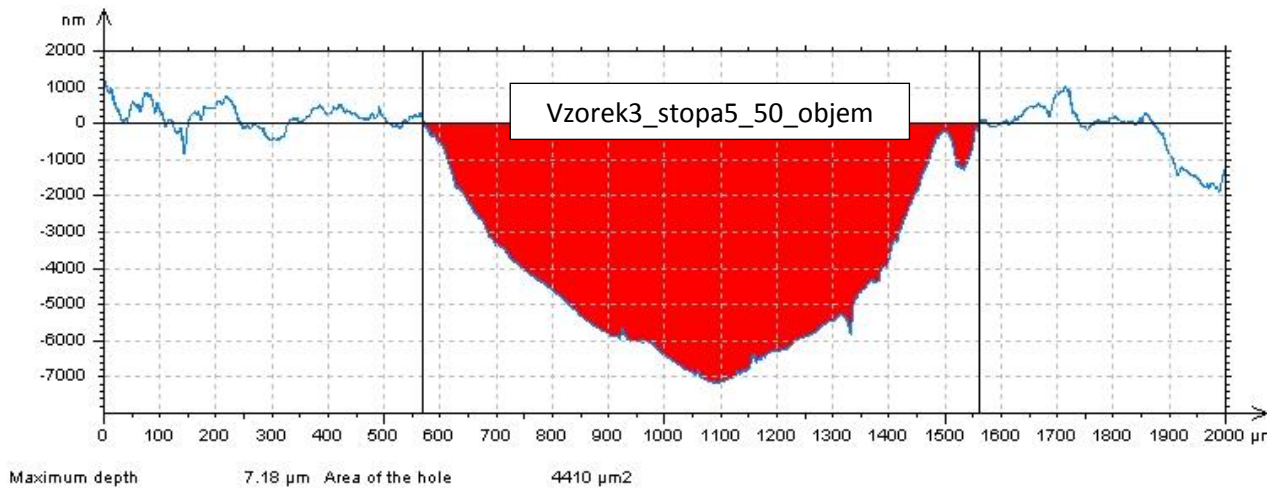
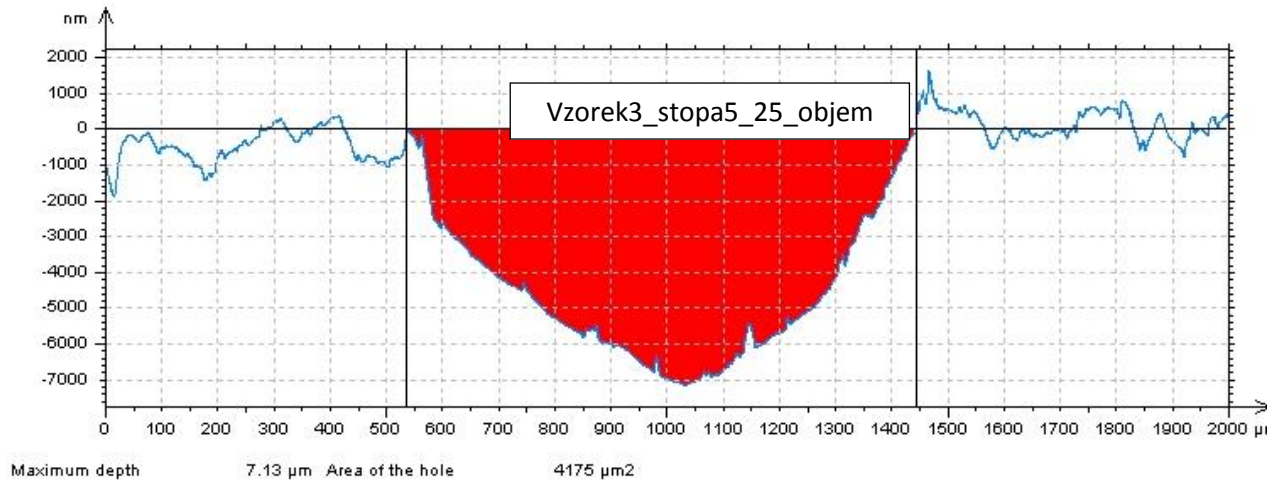


Stopa č.4 - překryv stop

- v této stopě je patrný překryv dvou vzájemně sousedících kalených ploch.

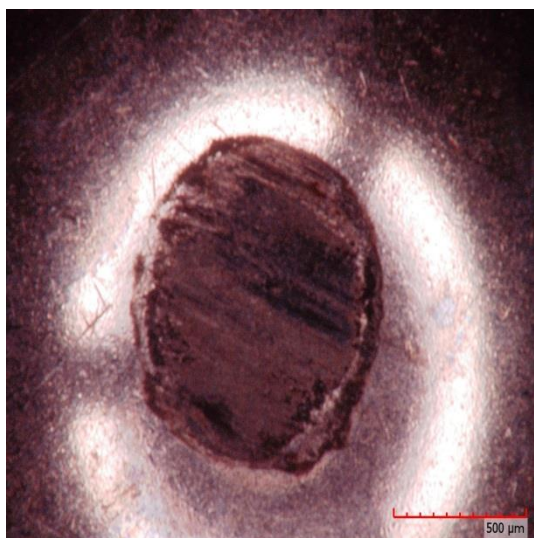


Stopa č.5

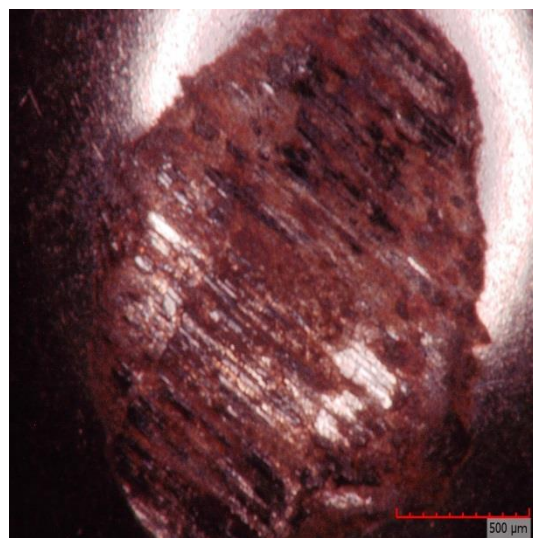


Opotřebení kulovitého vzorku

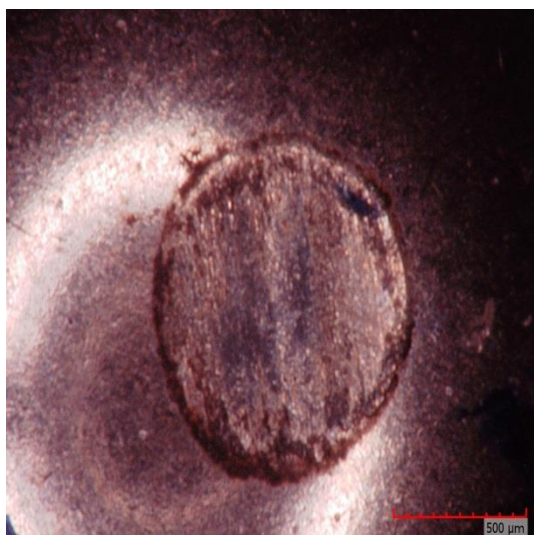
Na fotografiích je dokumentováno opotřebení - mechanismus opotřebení (vzniklá „ploška“) kulovitého vzorku následkem otěru mezi tímto vzorkem a rovinným vzorkem č.3. Dokumentováno je opotřebení pro stopy č.1- č.5. Je zde patrné ulpívání částic zkoušeného materiálu na přední a zadní hraně kuličky.



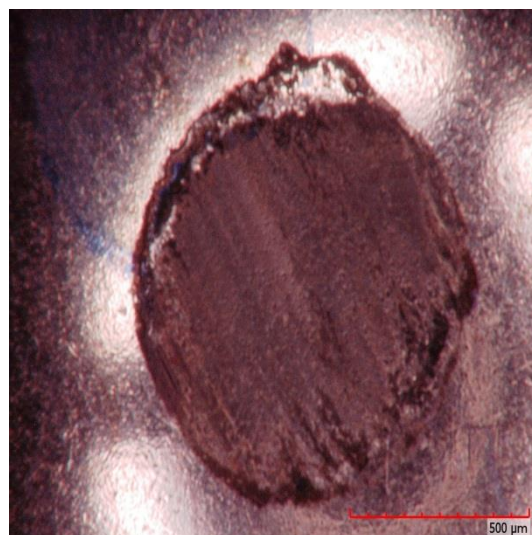
Obr.18: velikost opotřebení kuličky_vzorek č.3 _stopa č.1



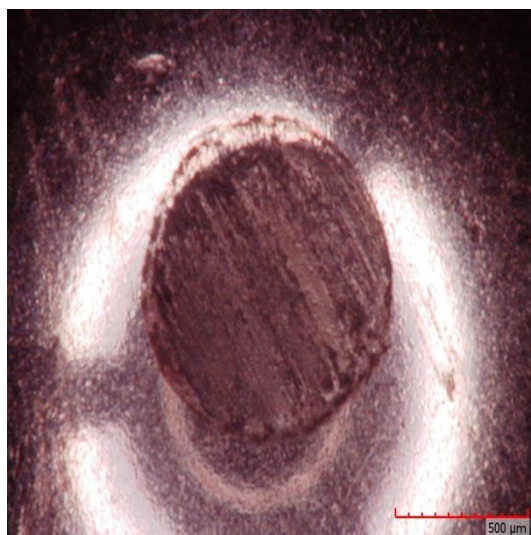
Obr.19: velikost opotřebení kuličky_vzorek č.3 _stopa č.2



Obr.20: velikost opotřebení kuličky_vzorek č.3 _stopa č.3



Obr.21: velikost opotřebení kuličky_vzorek č.3 _stopa č.4



Obr.22: velikost opotřebení kuličky_vzorek č.3 _stopa č.5