

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TRIBOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY POVRCHOVĚ KALENÝCH LITIN

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE QUENCHED CAST
IRONS

AUTOR: Eva Horká

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Horká	Jméno: Eva	Osobní číslo: 458493
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávající katedra/ústav:	Ústav materiálového inženýrství		
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství		
Studijní obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tribologické charakteristiky povrchově kalených litin

Název bakalářské práce anglicky:

Tribological characteristics of surface quenched cast irons

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše v oblasti povrchového kalení a tribologických vlastností litin.
Návrh experimentu, provedení experimentu a jeho vyhodnocení (pin on disc, metalografie).
Diskuse výsledků a závěry.

Seznam doporučené literatury:

[1] G. Cueva, A. Sinatora, W.L. Guesser, A.P. Tschiptschin, Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors, Wear, Volume 255, Issues 7-12, 2003, Pages 1256-1260, ISSN 0043-1648
[2] Mores, A.; Horník, J.; Odehnal, J.; Srbek, B.; Němec, M.; Krčil, J. Povrchové indukční kalení feritické litiny s kuličkovým grafitem se zvýšeným obsahem Si In: Sborník přednášek z 54. slévárenských dnů. Brno: Česká slévárenská společnost, 2017. pp. 1-12. ISBN 978-80-02-02759-1
[3] Sochořová M. Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl. TUL 2008. Dostupné z https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2497/bc_14778.pdf-sequence=1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

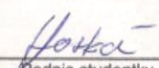
Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

 Ing. Jakub Horník, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	 prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
---	--	---

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

<u>24.4.2018</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studentky
---	---

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato práce se zabývá hodnocením tribologických vlastností povrchově kalených litin. V první části je podrobně popsána charakteristika litin, jejich vlastností a následně problematika povrchového kalení a tribologie. Experimentální část je zaměřena na měření průběhů tvrdosti zakalených povrchových vrstev litinových vzorků, na vyhodnocování jejich mikrostruktury po tepelném zpracování a následně na porovnávání jejich otěruvzdornosti před a po indukčním povrchovém kalení. V závěru práce jsou okomentovány výsledky u všech použitých měřících metod.

Klíčová slova

litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, tuhý roztok zpevněný křemíkem, mikrostruktura, tribologie, povrchové kalení, Pin-On-Disk, otěruvzdornost, tvrdost

Annotation

This work deals with evaluation of tribological properties of surface quenched cast irons. The first part describes in detail the characteristics of cast irons, their properties and subsequently the problems of surface quenching and tribology. The experimental part is focused on measuring the hardness of the quenched surface layers of cast iron samples, evaluation their microstructure after heat treatment and subsequently comparing their wear resistance before and after induction hardening of the surface. At the conclusion are presented the results for all used measuring methods.

Keywords

spheroidal graphite cast iron, grey cast iron, solid solution strengthened by silicon, microstructure, tribology, surface hardening , Pin-On-Disc, wear resistance, hardness

Poděkování

Tímto děkuji mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jakobovi Horníkovi, Ph.D. za jeho trpělivost, cenné rady a také čas, který mi věnoval na odborné konzultování teoretické části a výsledků měření.

Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Janu Krčilovi za jeho ochotu, pohotovost a pomoc při vypracovávání experimentální části této práce.

Obsah

Úvod	- 10 -
1 Litiny	- 11 -
1.1 Charakteristika litin	- 11 -
1.2 Struktura litin	- 12 -
1.2.1 Grafit	- 12 -
1.2.2 Velikost a tvar grafitu	- 13 -
1.2.3 Základní kovová hmota	- 14 -
2 Chemické složení a struktura litin	- 17 -
2.1 Vliv základních prvků na strukturu a vlastnosti litin.....	- 17 -
2.2 Vliv chemických prvků na grafitizaci	- 18 -
2.3 Vyhodnocování chemického složení	- 19 -
3 Základní rozdělení litin	- 20 -
3.1 Grafitické litiny	- 20 -
3.1.1 Litina s kuličkovým grafitem LKG (GJS).....	- 20 -
3.1.2 Litina s lupínkovým grafitem LLG (GJL)	- 23 -
3.1.3 Litina s červíkovitým grafitem LČG (GJV)	- 25 -
3.2 Cementitické litiny	- 25 -
3.2.1 Temperovaná litina	- 25 -
4 Vliv křemíku na vlastnosti LKG a LLG.....	- 27 -
4.1 Litina s lupínkovým grafitem a zvýšeným obsahem křemíku	- 28 -
4.2 Litina s kuličkovým grafitem a zvýšeným obsahem křemíku	- 29 -
5 Tepelné zpracování litin	- 30 -
5.1 Kalení.....	- 30 -
5.1.1 Martenzitické kalení.....	- 32 -
5.1.2 Baitické kalení	- 32 -
5.2 Povrchové kalení	- 33 -
5.2.1 Povrchové kalení laserem	- 33 -
5.2.2 Indukční povrchové kalení	- 34 -

6	Tribologie	- 36 -
6.1	Základní tribologické vlastnosti.....	- 36 -
6.2	Metody zkoušení tribologických vlastností.....	- 39 -
6.2.1	Zkoušení tvrdosti.....	- 39 -
6.2.2	Zkoušení otěruvzdornosti	- 41 -
6.3	Tribologické vlastnosti litin	- 44 -
6.4	Vliv povrchového kalení na tribologické vlastnosti litin.....	- 45 -
7	Experimentální část.....	- 46 -
7.1	Příprava vzorků	- 46 -
7.2	Chemické složení a charakteristika vzorků	- 48 -
7.3	Měření tvrdosti	- 48 -
7.4	Výsledky měření tvrdosti a diskuze.....	- 50 -
7.4.1	Vzorek č. 16 - EN-GJS-500-14.....	- 50 -
7.4.2	Porovnání výsledků tvrdostí fází mikrostruktury všech vzorků	- 54 -
7.4.3	Porovnání průběhu tvrdostí všech vzorků	- 56 -
7.4.4	Diskuze výsledků	- 58 -
7.5	Měření otěruvzdornosti a koeficientu tření.....	- 59 -
7.6	Výsledky otěruvzdornosti a měření koeficientu tření.....	- 61 -
7.6.1	Vzorek č. 16 - EN-GJS-400-15.....	- 61 -
7.6.2	Porovnání výsledků měření všech vzorků metodou PIN-ON-DISK.....	- 64 -
7.6.3	Diskuze výsledků	- 66 -
	Závěr.....	- 67 -
	Seznam použité literatury.....	- 69 -
	Seznam obrázků, grafů a tabulek	- 72 -
8	Přílohy	- 76 -
8.1	Naměřené průběhy tvrdostí a hodnoty tvrdostí fází mikrostruktur	- 76 -
8.2	Fotografie mikrostruktur.....	- 83 -
8.3	Závislosti koeficientu tření na vzdálenosti	- 87 -
8.4	Fotografie vybroušených stop a otěrů	- 90 -

Seznam použitých zkratek a symbolů

LKG - litina s kuličkovým grafitem

LLG - litina s lupínkovým grafitem

LČG - litina s červíkovitým grafitem

EN-GJS - litina s kuličkovým grafitem (evropské pojmenování)

EN-GJL - litina s lupínkovým grafitem (evropské pojmenování)

EN-GJV - litina s červíkovitým grafitem (evropské pojmenování)

Fe_{α} - železo alfa

Fe_{γ} - železo gama

M_s - martenzit start

CE - uhlíkový ekvivalent

S_C - stupeň eutektičnosti

R_a [μm] - střední aritmetická úchylka profilu drsnost [μm]

R_m [Mpa] - mez pevnosti v tahu

$R_{p0,2}$ [Mpa] - smluvní mez kluzu

A [%] - tažnost

F [N] - síla

HV - označení tvrdosti podle Vickerse

HB - označení tvrdosti podle Brinella

HBW - označení tvrdosti podle Brinella za použití indentoru ve tvaru kuličky ze slinutého karbidu

d_1, d_2 - úhlopříčky vtisku po indentoru podle Vickerse

SF - indukční středofrekvenční kalení

VF - indukční vysokofrekvenční kalení

SMO - směrodatná odchylka

Úvod

Cílem této práce je analyzovat tribologické vlastnosti povrchově kalených litin. Pro objasnění předmětu experimentu bude v teoretické části podrobně popsána charakteristika litin a faktory ovlivňující jejich vlastnosti. Dále bude specifikována problematika povrchového kalení, kde budou blíže charakterizovány principy indukčního a laserového povrchového kalení, protože tyto technologie byly použity k povrchovému vytvrzení vzorků testovaných v experimentální části práce. Poslední kapitola teoretické části bakalářské práce bude věnována tribologii, tribologickým vlastnostem a zkoušení těchto vlastností.

Samotný experiment spočívá v měření průběhů tvrdostí laserově a indukčně zakalených vrstev, ve fotografování nezakalených a zakalených mikrostruktur a následně v měření otěruvzdornosti a koeficientu tření mezi ocelovým indentorem a povrchem litinových vzorků. Měření tvrdosti bylo provedeno metodou dle Vickerse, protože je tato metoda pro vyhodnocování mikrotvrdosti a tvrdosti při nízkém zatížení nejvhodnější. Průběh tvrdosti byl měřen na dvou rozměrově odlišných laserově zakalených vrstvách a na souvisle indukčně zakalené vrstvě. Předmětem vyhodnocení bude porovnání výsledných průběhů tvrdostí.

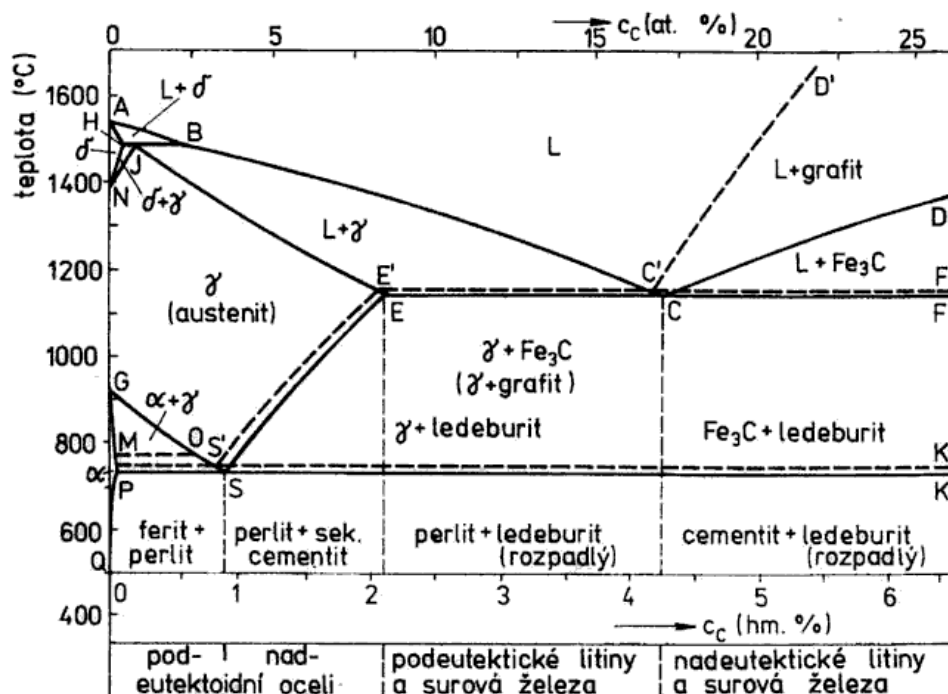
Měření koeficientu tření bylo provedeno na tribometru pomocí metody Pin-On-Disk u nezakalených a indukčně zakalených vzorků. Výsledkem měření je hodnota koeficientu tření mezi ocelovým indentorem tribometru a povrchem litinového vzorku. Zároveň byla po měření vyhodnocena šířka vybroušené stopy na povrchu vzorku a velikost vybroušené plochy na ocelovém indentoru. Díky těmto výsledkům byl získán přehled o změně otěruvzdornosti litinových vzorků po vytvrzení povrchu indukčním zakalením.

1 Litiny

Litiny patří mezi nejvýznamnější skupinu slévárenských slitin. Základní rozdíl mezi litinami a oceli vychází z obsahu uhlíku ve slitině. Tato hranice v rovnovážném diagramu odpovídá bodu, který určuje maximální rozpustnost uhlíku v austenitu. Podle obsahu uhlíku se slitiny rozlišují na oceli (do 2,0 %C), nízkouhlíkové litiny (2,0-2,6 % C) a na litiny a surová železa (nad 2,6 %). Mezi nejstarší a doposud nejpoužívanější slitiny železa patří grafitické litiny. Světová výroba odlitků ze slitin železa je kryta cca z 85% právě odlitky z grafitických litin. Tyto litiny jsou tak rozšířené díky jejich vhodným slévárenským vlastnostem, které jsou srovnatelné s jinými, mnohdy i dražšími materiály. Například ve srovnání s oceli vykazují grafitické litiny lepší obrobitelnost, nižší hustotu a lepší třecí a tlumící vlastnosti. U litin s příznivým tvarem grafitu (tvárná a temperovaná litina) lze dosáhnout velmi dobrých mechanických vlastností srovnatelnými s oceli, při zachování jejich specifických vlastností, které zaručuje přítomnost grafitu. Další výhodou těchto druhů litin je možnost pomocí tepelné úpravy měnit základní strukturu kovové hmoty a jejich vlastnosti a to v poměrně značném rozsahu. [1,2]

1.1 Charakteristika litin

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky jako například křemík, mangan a další. Obsah uhlíku v litinách je vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu (vyšší, než 2,14 %C)



Obr. 1 - Rovnovážné diagramy Fe – C a Fe – Fe₃C [3]

Uhlík se může v litinách vyskytovat buď ve formě grafitu nebo ve formě cementitu. Během tuhnutí dle stabilního diagramu Fe-C začne vznikat grafitické eutektikum¹, které tvoří austenit a grafit (Obr. 1.) Tyto litiny jsou označovány jako grafitické. Mezi grafitické litiny patří litina s lupínkovým grafitem (LLG), litina s kuličkovým grafitem (LKG) a litina s červíkovitým (vermikulárním) grafitem (LČG). Během tuhnutí dle metastabilního rovnovážného diagramu $Fe - Fe_3C$ vzniká eutektikum zvané ledeburit (Obr. 1). Ledeburit je tvořen austenitem a cementitem Fe_3C a vyznačuje se velkou tvrdostí a křehkostí. Struktura těchto litin neobsahuje žádný volný grafit, a proto se označují za cementitické nebo karbidické litiny. Cementitické litiny jsou velice křehké, tvrdé a těžko obrobitelné. Jejich vznik je podporován vyšší rychlostí tuhnutí a zvýšeným obsahem karbidotvorných prvků v litině (Mn, Cr). Pomocí temperování je možné eutektické karbidy v ledeburitu rozložit na volný temperový grafit. [3,4]

1.2 Struktura litin

Strukturu litin tvoří základní kovová hmota a grafit, který se může vyskytovat v různém tvaru a rozložení. Následující kapitola se zabývá právě touto problematikou. U cementitických (bílých) litin tvoří strukturu pouze základní kovová hmota. [4]

1.2.1 Grafit

Grafit je forma uhlíku, která krystalizuje v šesterečné soustavě. Je měkký, drobný a málo pevný. Jeho plastické vlastnosti závisí více na způsobu vyloučení grafitu, než na jeho množství. Litiny s grafitem vyloučeným ve formě lupínků jsou křehké, zatímco tvárnější jsou litiny s grafitem vyloučeným ve formě kuliček. [1,4]

Rozlišujeme několik základních druhů grafitu.

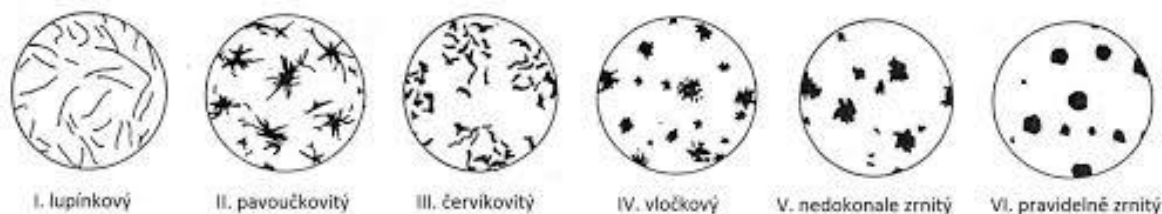
- **Eutektický grafit** - Vzniká během tuhnutí eutektika a společně s austenitem tvoří grafitické eutektikum.
- **Grafit vznikající při grafitizaci** - Vzniká rozpadem cementitu na grafit a ferit při tepelném zpracování (například při temperování nebo žhání na odstranění karbidů).
- **Primární, sekundární a terciární grafit** - Primární grafit vzniká jako primární fáze během tuhnutí grafitických nadeutektických litin. Má lupínkový tvar a při dostatečně pomalém tuhnutí vyplouvá na hladinu kovu a tvoří grafitický šum, což může mít za následek horší kvalitu litiny. Primární grafit ve struktuře litiny má nepříznivý vliv na její mechanické vlastnosti. V rovnovážném diagramu se grafit vyskytuje ještě jako sekundární grafit, který vzniká z austenitu a grafit terciární, vznikající z Fe_α v důsledku snižování rozpustnosti uhlíku s klesající teplotou. Jejich podíl ve struktuře litin je však zanedbatelný. [4,5]

¹ Eutektikum – tuhá směs dvou chemických látek, jejichž krystaly se vytvářely během tuhnutí společně

1.2.2 Velikost a tvar grafitu

Tvar grafitu

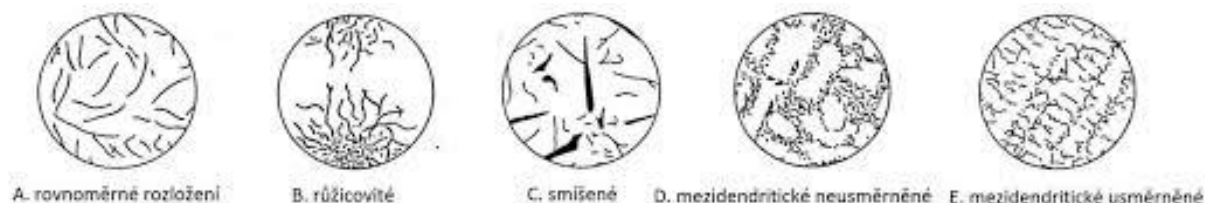
Tvar grafitu a jeho rozložení ve struktuře zásadně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti litin. Dle normy ČSN EN ISO 945 (420464) se tvar grafitu rozděluje do šesti tříd, které jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 2). [4,6]



Obr. 2 - Tvar grafitu [6]

Rozložení grafitu

Jak již bylo řečeno, rozložení grafitu ve struktuře zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti litin. Vyloučený grafit ve struktuře může být uspořádaný ve formě pravidelných, velikostně podobných útvarů, nebo naopak ve formě nerovnoměrně uspořádaných, různě velkých útvarů. Právě tento typ uspořádání způsobuje horší mechanické vlastnosti litin. Rozložení grafitu se hodnotí podle etalonové řady dle normy ČSN 42 0461. Nejlepší mechanické vlastnosti vykazují litiny s rozložením grafitu dle typu A, tedy rovnoměrným rozložením se stejnoměrnou velikostí (Obr. 3). [1,4]



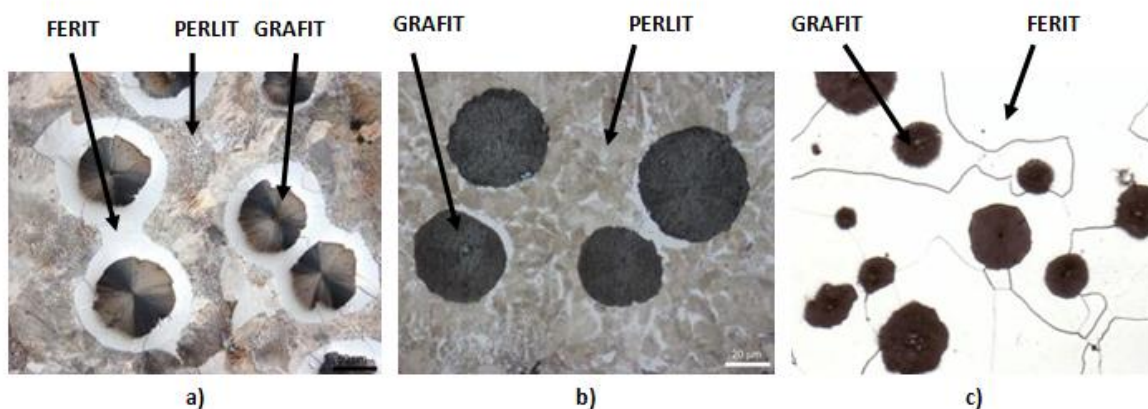
Obr. 3 - Rozložení grafitu [6]

Velikost grafitu

Z hlediska mechanických vlastností litin je ideální jemnozrný grafit ve struktuře, vyloučený zejména ve formě globulí nebo lupínků. Jemnozrná struktura vykazuje lepší tvárné vlastnosti oproti hrubozrné. Zhoršení mechanických vlastností způsobuje i přítomnost hrubých lamel grafitu. Vyhodnocování velikosti grafitu se provádí metalograficky, avšak záleží na způsobu vyloučení neboli tvaru grafitu. Velikost kuličkového grafitu se vyhodnocuje podle počtu kuliček na mm^2 výbrusu a velikost lupínkového grafitu podle délky lupínků. [4,6]

1.2.3 Základní kovová hmota

Základní kovová hmota litin je za normálních teplot tvořena feritem, perlitem a v některých případech i ledeburitem. Struktura základní kovové hmoty je závislá na několika faktorech, a to zejména na chemickém složení litiny, způsobu tepelného zpracování a rychlosti ochlazování během tuhnutí a chladnutí. Pomocí legování a tepelného zpracování lze získat austenit a nerovnovážné složky jako je martenzit či bainit. Chemickým složením, použitím vhodných prvků a jejich kombinací je možné strukturu a vlastnosti litin upravovat dle našich potřeb v závislosti na jejich budoucím použití. Vliv chemických prvků na strukturu a vlastnosti litin budou následně popsány v kapitole 2.1. [4]



Obr. 4 – a) feriticko-perlitická struktura, b) perlitická struktura, c) feritická struktura [7,8,9]

Struktura LKG a LLG

Pro litinu s kuličkovým grafitem (LKG) je typická feritická, perlitická či feriticko-perlitická struktura (Obr. 4). *Feritické struktury* se u litin dosahuje tepelnou úpravou, konkrétně feritizačním žíháním). V tomto případě je důležitá rychlost ochlazování, neboť vznik feritu je podporován pomalým ochlazováním. Dalším způsobem dosažení feritické struktury je zvýšení obsahu křemíku. Vyšší obsah křemíku ve struktuře však způsobuje nižší houževnatost feritu. Pokud se tedy požaduje vysoká tažnost litiny s feritickou strukturou, je nutné, aby obsahovala co nejméně Si, P a Mn. [2]

Perlitická struktura vzniká při rychlém chladnutí litiny v závislosti na jejím chemickém složení. Přidáním Sn a Cu je možné zbrzdit feritizaci a tím podpořit vznik perlitické struktury. *Perliticko-feritickou strukturu* lze získat vhodnou poměrem chemických prvků a tepelným zpracováním. Výsledný poměr feritu a perlitu ve struktuře pak ovlivňuje mechanické vlastnosti konkrétního typu litiny. [2]

U litiny s lupínkovým grafitem vzniká *feritická struktura* stejně jako u LKG pomalým ochlazováním, nebo v případě, že litina obsahuje dostatek grafitizačních prvků. LLG s feritickou maticí je velmi měkká a málo pevná. Z toho důvodu se nevyužívá jako konstrukční materiál na rozdíl od LLG s *perlitickou strukturou*. Takové struktury se dosahuje vhodným obsahem grafitizačních přísad a vyšší rychlostí ochlazování, než je tomu u LKG. Snížením obsahu grafitizačních prvků je možné zvýšit pevnost litiny, protože klesá hrubost a množství grafitu. Pokud bude množství grafitizačních přísad příliš nízké a rychlost ochlazování příliš vysoká, nemusí grafitizace proběhnout úplně. Pro dosažení této struktury je tedy nutné zvolit optimální množství grafitizačních přísad a správnou rychlost ochlazování. [2,10]

Posledním případem je struktura *feriticko-perlitická*. Ta je oproti perlitické struktuře měkkší, méně pevná, a proto je méně vhodná jako konstrukční materiál. Pokud je množství grafitizačních prvků pro danou rychlost ochlazování přebývající, vznikne šedá litina, ve které je lupínkový grafit uložen ve feritu a zbytek je vyplněn perlitem. [2]

Abychom lépe porozuměli vlastnostem materiálu a jeho chování v závislosti na jeho struktuře, je třeba popsat jednotlivé fáze základní kovové hmoty vyskytující se u litin.

Rovnovážné a nerovnovážné strukturní složky litin

Ferit – Ferit je definován jako intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α nebo δ . Ferit α je stabilní do teploty 911°C a ferit δ mezi teplotami 1392°C a 1536°C. Je měkký, tvárný, málo pevný a dobře obrobitelný. Vlastnosti feritu jsou ovlivňovány chemickým složením litiny. S vyšším obsahem křemíku klesá houževnatost feritu a roste s vyšším obsahem Ni, Cr a Mn. [4,5]

Perlit - Jedná se u homogenní směs feritu a cementitu, neboli eutektoid metastabilní soustavy. Právě díky cementitu je perlit tvrdší a pevnější, než ferit. Podle způsobu tepelného zpracování se rozlišuje globulární (zrnitý) perlit, ve kterém se cementit vylučuje cementit ve formě globulí a lamelární perlit, ve kterém se cementit vylučuje ve formě lamel. Globulární perlit je díky tvaru vyloučeného cementitu měkkší a lépe obrobitelný, než perlit lamelární. [4,5]

Cementit – Karbid železa Fe_3C - intermediální fáze s obsahem uhlíku 6,68%. Je velice tvrdý (okolo 700 HV) a křehký. V rovnovážném diagramu Fe – Fe_3C se vyskytuje jako primární krystalizující z taveniny, sekundární (perlitický), který vzniká z austenitu a terciární (eutektický) vznikající z Fe_{α} . [4,5]

Austenit – Austenit je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ (Fe_γ). U nelegovaných litin je stabilní pouze při nadeutektoidních teplotách, tedy v rozmezí teplot 911°C a 1392°C. Po tepelném zpracování se vyskytuje jako zbytkový austenit a v odlitcích pouze u nelegovaných litin. Může obsahovat až 2,11% uhlíku. Je dobře tvárný, plastický, měkký a nemagnetický. [4,5]

Ledeburit – Jde o eutektikum metastabilní soustavy Fe – Fe_3C tvořené směsí austenitu a ledeburitického cementitu. Při dosažení eutektoidní teploty se austenit transformuje na cementit a vznikne transformovaný ledeburit. Ledeburit se vyznačuje křehkostí a je jednou ze základních složek bílé litiny. [4,5]

Martenzit – Martenzit je metastabilní přesycený tuhý roztok v železe α ($Fe \alpha$). Je to nerovnovážná strukturní složka, která vzniká bezdifuzním rozpadem austenitu při kalení legovaných a nelegovaných litin. Během martenzitické přeměny dochází k přeměně plošně středěné mřížky železa γ na prostorově středěnou mřížku železa α . Mezi typické vlastnosti martenzitu patří vysoká tvrdost (až 1000 HV) a křehkost. [2,5]

Bainit – jedná se o směs feritu a cementitu s jehlicovitou strukturou. Vzniká u litin legovaných molybdenem a niklem a u nelegovaných litin během tepelného zpracování. Bainitická struktura se vyznačuje vysokou pevností a tvrdostí, při relativně dobrých plastických vlastnostech. Rozlišují se dva základní druhy bainitu - horní bainit a dolní bainit. Horní bainit vzniká nad teplotou 350°C a dolní bainit mezi teplotami 350 °C a M_s . [2,5]

Steadit – Steadit je fosfidické eutektikum, které vzniká u litin s vyšším obsahem fosforu (nad 0,3%). Tato fáze zvyšuje zabíhavost materiálu a odolnost vůči opotřebení. Vyznačuje se vysokou křehkostí a tvrdostí. Běžně se vyskytuje u LLG. U LKG se jeho výskyt považuje za nežádoucí. [2]

2 Chemické složení a struktura litin

Mezi základní chemické prvky litin patří uhlík (*C*), křemík (*Si*), mangan (*Mn*), síra (*S*) a fosfor (*P*). Tyto prvky jsou obsaženy v každém druhu litin a jejich množství ovlivňují výsledné chemické, fyzikální i mechanické vlastnosti litin. Největší vliv na vlastnosti a mikrostrukturu litin má **uhlík a křemík**. Tyto dva prvky jsou silnými grafitizátory. [2,4]

2.1 Vliv základních prvků na strukturu a vlastnosti litin

Uhlík

Uhlík je základní prvek litin, který výrazně ovlivňuje jejich strukturu a mechanické vlastnosti. Jeho množství ve struktuře, má zásadní vliv na výsledné vlastnosti litin. Obecně platí, že čím více uhlíku se vyloučí ve formě grafitu, tím menší je stahování litiny během tuhnutí. Avšak příliš vysoký obsah uhlíku způsobuje hrubnutí grafitu, což způsobuje pokles mechanických vlastností. [2,4]

Křemík

Tento prvek je spolu s uhlíkem nejvýznamnějším prvkem v litinách. Během tuhnutí podporuje grafitizaci a vznik feritu (grafitového eutektoidu) při transformaci austenitu. Významný vliv má křemík i na mechanické vlastnosti litin. Zvyšuje tvrdost feritu, snižuje tažnost a rázovou houževnatost, a to zejména u litiny s kuličkovým grafitem LKG. Křemík také podporuje za nízkých teplot vznik křehkých lomů. [2,4]

Síra

Obecně se v litinách považuje za nežádoucí prvek. Jejím zdrojem jsou zejména vsázkové suroviny, nahličovadla a také koks při tavení v kuplovnách. Vyšší obsah síry zabraňuje grafitizaci a způsobuje křehkost litiny. Síra má vysokou afinitu k manganu. Toho se využívá ke kompenzaci nežádoucích vlastností síry přidáním manganu do taveniny, a tím vznikne sloučenina MnS. V případě, že litina obsahuje nedostatek Mn, vzniká FeS, což může vést ke vzniku mezidendritického neusměrněného grafitu. [4]

Mangan

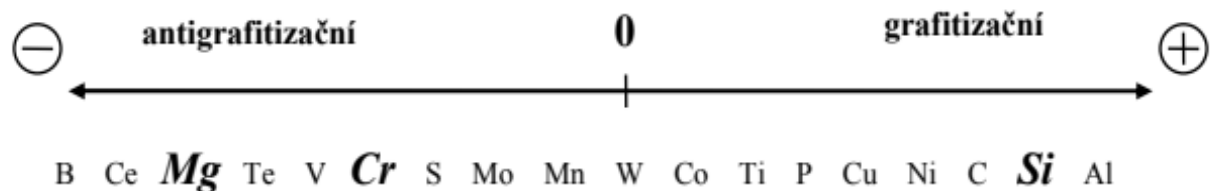
Hlavní úlohou manganu v litinách je kompenzace negativních účinků síry. Přebytek manganu způsobuje tendenci litiny k tuhnutí dle metastabilní rovnováhy a současně zvyšuje sklon litiny k tvorbě obrácené zákalky. Obrácená zákalka, neboli tzv. inverzní zákalka tvoří tvrdá místa uvnitř odlitku z šedé, případně tvárné litiny. Je tvořena většinou bílou, nebo makovou strukturou. [4]

Fosfor – Fosfor je mírně grafitizační prvek. Během tuhnutí se odměšuje do zbylé taveniny a vytváří fosfidické eutektikum na hranicích zrn. Toto eutektikum se nazývá steadit. Je tvrdý, křehký a výrazně snižuje houževnatost litiny. Z toho důvodu se jeho obsah (zejména u LKG a LVG) udržuje pod 0,08%. [4]

2.2 Vliv chemických prvků na grafitizaci

Podle účinků grafitizace během tuhnutí eutektika se prvky rozlišují dle následujícího způsobu (Obr. 5).

- *grafitizační* (Al, Si, C, Ni, Cu, P, Ti)
- *antigrafitizační* (B, Ce, Mg, Te, V, Cr, S)
- *neutrální* (Mn, Co, Zn)



Obr. 5 – osa míry grafitizace chemických prvků [4]

Grafitizační prvky jsou typické tím, že podporují tuhnutí podle stabilního systému. Uhlík se tedy vylučuje ve formě grafitického eutektika. Mezi nejvýznamnější grafitizační prvky patří uhlík a křemík.

Antigrafitizační prvky naopak podporují tuhnutí podle metastabilního systému, při kterém vzniká eutektikum zvané ledeburit. Nejdůležitějším antigrafitizačním prvkem v litinách je chrom.

Dalšími důležitými prvky jsou tzv. feritotvorné prvky. Tyto prvky podporují transformaci austenitu podle stabilního systému. Jeden z nejdůležitějších feritotvorných prvků je křemík, který způsobuje změny v průběhu krystalizace v oblasti tuhnutí a eutektoidní transformace. Další účinky křemíku v litinách budou popsány v kapitole 3. [4]

2.3 Vyhodnocování chemického složení

Uhlíkový ekvivalent

Chemické složení u litin se hodnotí pomocí tzv. uhlíkového ekvivalentu CE. Díky němu jsme schopni vyjádřit vliv uhlíku a ostatních chemických prvků v litině. Podle jeho hodnoty se pak posuzuje chemické složení litin. Vztah pro jeho výpočet je následující.

$$CE = C + \frac{1}{3}(Si + P)$$

Pokud je uhlíkový ekvivalent menší, než 4,3%, jedná se o podeutektickou litinu. V případě, že je jeho hodnota naopak větší, než 4,3%, jde o litinu nadeutektickou. Jestliže je hodnota uhlíkového ekvivalentu rovna 4,3%, jedná se o litinu eutektickou. [4]

Stupeň eutektičnosti

Stupeň eutektičnosti, neboli stupeň sycení je další pomůcka k vyjádření chemického složení litin. Je určen poměrem obsahu uhlíku v litině a obsahu uhlíku v eutektiku, přičemž musí být brán zřetel na množství křemíku a fosforu v litině.

$$S_C = \frac{C}{4,3 - \frac{1}{3}(Si + P)}$$

Hodnocení stupně eutektičnosti S_C je v podstatě totožné s vyhodnocováním uhlíkového ekvivalentu. Liší se pouze v tom, že eutektická litině v tomto případě odpovídá stupni eutektičnosti rovnu jedné. Pokud je S_C větší, než jedna, jedná se o litinu nadeutektickou a pokud je menší, jde o litinu podeutektickou. [2, 4]

Poměr uhlíku a křemíku

„Čím nižší je hodnota poměru C/Si při stejném uhlíkovém ekvivalentu (nižší uhlík, vyšší křemík), tím dokonalejší je grafitizace - menší sklon k zákalce a větší podíl feritu ve struktuře. Poměr C/Si se běžně pohybuje v rozmezí 1,2 - 2,4.“ [4]

3 Základní rozdělení litin

3.1 Grafitické litiny

Grafitické litiny jsou tvořeny kovovou maticí, ve které je přítomen grafit. Jak již bylo řečeno v úvodu první kapitoly, grafitické litiny krystalizují dle rovnovážného stabilního diagramu Fe – Grafit. Způsob vyloučení grafitu a matrice mají největší vliv na výsledné vlastnosti litiny. Základní kovová hmota v nelegovaných litinách je tvořena feritem, perlitem a někdy ledeburitem. Pomocí tepelného zpracování, nebo legováním je možné získat struktury jako austenit, martenzit a bainit.

Vlastnosti struktury základní kovové hmoty závisí na rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chlazení, způsobu tepelného zpracování, stavem krystalizačních zárodků a chemickém složení litiny. Obsah uhlíku je 2,5–3,8 % a křemíku 0,8–3,5 %. Tyto litiny mají šedý lom a patří mezi nepoužívanější. [11,12]

3.1.1 Litina s kuličkovým grafitem LKG (GJS)

Litina s kuličkovým grafitem se také označuje jako tvárná litina. Struktura LKG je tvořena kovovou maticí feritického, perlitického, nebo feriticko-perlitického typu. Patří mezi vysoce jakostní litiny, v jejichž základní kovové hmotě je vyloučen grafit v zrnitém (kuličkovém) tvaru. Velký vliv na tvorbu kuliček mají doprovodné prvky, zejména křemík a kyslík.

Křemík zvyšuje množství grafitových zrn, snižuje velikost buněk a potlačuje vznik karbidů. To se však realizuje efektivním sekundárním očkovaním. Množství křemíku ve struktuře a rychlost ochlazování ovlivňuje konečné množství feritu a jeho vlastnosti. Během pomalého ochlazování LKG v rozmezí kritické teplotní oblasti dochází k transformaci austenitu v oblasti kolem grafitových zrn na ferit. Množství feritu závisí na rychlosti ochlazování (čím pomalejší ochlazování, tím větší množství feritu) a na složení austenitu (vyšší obsah křemíku ve struktuře vede k většímu množství feritu). Křemík také stabilizuje ferit a zvětšuje interval přeměny v α a γ fázi. Na tvar grafitu nemá do obsahu přibližně 4% téměř žádný vliv. [2, 4, 11]

Mechanické vlastnosti odlitku ovlivňuje kuličkový tvar grafitu a množství přítomnosti lupínkového grafitu. Zrnitý tvar grafitu však narušuje pevnost základní kovové hmoty mnohem méně než tvar lupínkový, a proto má LKG proti LLG výrazně vyšší pevnost a lepší plastické vlastnosti.

Nežádoucí složka matrice je karbidická fáze složená z ledeburitu a sekundárního cementitu, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny. Z toho důvodu je třeba zabezpečit vysokou grafitizační schopnost taveniny, které se docílí zvolením správného stupně eutektičnosti. LKG se používá zejména na výrobu dynamicky namáhaných součástí. [2, 4, 11]

Tabulka 1 – Mechanické vlastnosti LKG v závislosti na struktuře matrice [12]

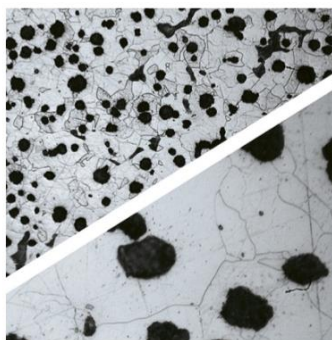
Typ litiny	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
LKG	Rm = 350-400 MPa A = 15-22%	Rm = 400-600 MPa A = 3-10%	Rm = 600-900 MPa A = 2%

EN-GJS-400-18

Litina EN-GJS-400-18 je litina s kuličkovým grafitem s feritickou matricí (Obr. 6). Tento typ litiny disponuje dobrou pevností (Tabulka 2), tvárností, vysokou odolností vůči vzniku trhlin a rázovému namáhání. Díky těmto vlastnostem se GJS-400-18 používá v automobilovém průmyslu na výrobu strojních součástí, jako jsou hřídele, ventily, spojky, trubky apod. V následující tabulce je uvedeno chemické složení a mechanické vlastnosti této litiny (Tabulka 2). [13]

Tabulka 2 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-400-18 [13]

Chemické složení					
C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]
3,4-3,85	0,10-0,3	2,3-3,1	0,10 max	0,02 max	0,07 max
Mechanické vlastnosti					
Pevnost v tahu Rm		Tvrdost HB		Tažnost A	
400 MPa		120-180		15%	



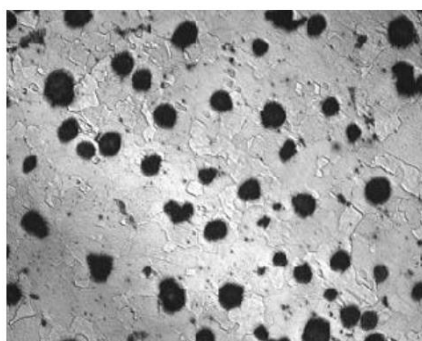
Obr. 6 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-400-18 [13]

EN-GJS- 500-14

Jedná se o tvárnou litinu, která se vyrábí i kontinuálním litím bez dalšího tepelného zpracování. Přidáním křemíku se dosáhne vyššího stupně nasycení tuhého roztoku a tím se zvýší pevnost feritické matrice litiny (Obr. 7). Tento materiál je charakterizován vynikající kombinací pevnosti v tahu, tvrdosti a meze pružnosti (Tabulka 3). [13]

Tabulka 3 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-500-14 [13]

Chemické složení					
<i>C [%]</i>	<i>Mn [%]</i>	<i>Si [%]</i>	<i>P [%]</i>	<i>S [%]</i>	<i>Mg [%]</i>
3,0-3,3	0,50 max	3,40-3,80	-	-	0,02-0,07
Mechanické vlastnosti					
<i>Pevnost v tahu Rm</i>		<i>Tvrdost HB</i>		<i>Tažnost A</i>	
500 MPa		185-215		14%	



Obr. 7 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-500-14 [13]

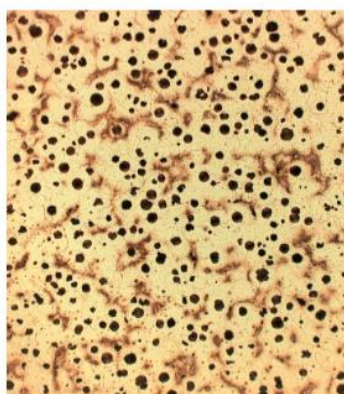
EN-GJS- SiMo35-5

EN-GJS-SiMo35-5 je speciální slitinová litina s feriticko-perlitickou matricí (Obr. 8). Její mechanické a jiné důležité vlastnosti, jako je odolnost proti tepelné únavě, odolnost proti opotřebení nebo odolnost proti vysokoteplotní korozi lze optimalizovat změnou složení slitiny nebo zvláštním tepelným zpracováním. Díky přidání prvků Si a Mo se dá zvýšit odolnost proti vysokým teplotám a tepelné únavě. Proto se tyto SiMo litiny staly typickým materiálem pro vysokoteplotní komponenty.

Litina EN-GJS-SiMo35-5 je doporučena pro vysokoteplotní aplikace (<760°C), ve kterých je nutná odolnost proti tepelnému šoku, oxidaci a odlupování. Bohužel je tento materiál relativně křehký. Obvykle se používá ve vyžíhaném stavu. Litina EN-GJS-SiMo35-5 se používá například na výrobu výfukových potrubí pro motory a turbokompresory. Následující tabulka upřesňuje chemické složení a mechanické vlastnosti této litiny (Tabulka 4). [13]

Tabulka 4 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-SiMo35-5 [13]

Chemické složení					
<i>C [%]</i>	<i>Mn [%]</i>	<i>Si [%]</i>	<i>P [%]</i>	<i>S [%]</i>	<i>Mg [%]</i>
2,8-3,3	-	3,3-3,7	-	-	0,4-0,7
Mechanické vlastnosti					
<i>Pevnost v tahu Rm</i>		<i>Tvrdost HB</i>		<i>Tažnost A</i>	
440 MPa		160-230		8%	



Obr. 8 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-SiMo35-5 [13]

3.1.2 Litina s lupínkovým grafitem LLG (GJL)

Litina s lupínkovým grafitem (dříve označovaná jako šedá litina) je podeutektická slitina železa, v jejíž základní kovové hmotě jsou rozptýleny částice, které svým tvarem připomínají lupínky. Kovovou matici tvoří ferit a perlit. Perlitická i feritická matrice se může vyskytovat i samostatně, ale ve většině případů je struktura u LLG složená z obou fází. Mechanické vlastnosti šedé litiny tedy závisí na druhu matrice (Tabulka 5), ale také na velikosti a tvaru grafitu. Čím je poloměr zakřivení lupínků menší, tím roste koncentrace napětí v materiálu. Lupínkový tvar grafitu má špatné účinky na pevnost v tahu litiny. Na rozdíl pevnost v tlaku je třikrát až čtyřikrát větší, než v tahu. Proto se šedá litina používá na součásti, které jsou namáhané tlakem. Také pevnost v ohybu může být až dvakrát vyšší než v tahu. Čím jsou lupínky grafitu jemnější, tím vyšší je pevnost materiálu. LLG se ve většině případů odlévá jako podeutektická. [10,14]

V porovnání s oceli, má tato litina lepší tepelnou vodivost a dobrou zabíhavost. LLG je nejpoužívanější litinou v celosvětovém objemu výroby, díky jejím dobrým technologickým vlastnostem a nízkými výrobním nákladům. V průmyslu se tato litina používá na výrobu součástí strojů, stojanů obráběcích strojů, poklopů, řemenic apod. [10,14]

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti LLG v závislosti na struktuře matrice [12]

Typ litiny	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
LLG	Rm = 100-200 MPa 100-155 HB	Rm = 150-300 MPa 120-195 HB	Rm = 250-350 MPa 145-215 HB

EN-GJL-250

Tato litina má jemnou lamelární perlitickou strukturu (Obr. 9). Díky tomu má velmi dobrou odolnost vůči korozi a tepelné deformaci. Jejími dalšími kladnými vlastnostmi jsou vysoká pevnost a tvrdost struktury (Tabulka 6), dobře tlumí chvění a je velmi dobře obrobitelná. Avšak svařitelnost této litiny je obtížná. Díky vynikající obrobitelnosti je možné obrábět s vysokou řeznou rychlostí a snížit předčasné opotřebení nástrojů. Je vhodná pro výrobu součástí, které vyžadují střední mechanické vlastnosti jako řemenice, kroužky, kladky, příruby, ale i válce motorů, ozubená kola a lože obráběcích strojů. [13]

Tabulka 6 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJL-250 [13]

Chemické složení					
C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]
2,8-3,3	0,8-1,2	1,2-1,7	0,15 max	0,12 max	0,07 max
Mechanické vlastnosti					
Pevnost v tahu Rm		Tvrdost HB		Tažnost A	
250 MPa		155-215		0,3-0,8%	



Obr. 9 - Mikrostruktura litiny EN-GJL-250 [13]

3.1.3 Litina s červíkovitým grafitem LČG (GJV)

Litina s červíkovitým (vermikulárním) grafitem má feritickou, perlitickou nebo feriticko-perlitickou matici. Převážná část uhlíku v tomto typu grafitické litiny je vyloučena v podobě červíkovitého grafitu. Tato litina tvoří svými vlastnostmi a strukturou přechod mezi LLG a LKG (Tabulka 7). Červíkovitý grafit může vzniknout buď jako nežádoucí struktura litiny nebo se vyrábí cíleně. Vzniká při nedostatečné modifikaci nebo při poměrně vysokém obsahu síry v litině. Mechanické vlastnosti litiny se pohybují mezi vlastnostmi litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem. LLG se používá například v případech, kdy je žádoucí vyšší slévatelnost u tvarově složitějších odlitků a pro výrobu dynamicky namáhaných součástí. [14, 15]

Tabulka 7 - Mechanické vlastnosti LČG v závislosti na struktuře matrice [12]

Typ litiny	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
LČG	Mechanické vlastnosti leží mezi litinou s lupínkovým grafitem a litinou s kuličkovým grafitem		

3.2 Cementitické litiny

Cementitické (bílé) litiny krystalizují podle metastabilního diagramu $Fe - Fe_3C$. Mikrostruktura se skládá ze základní perlitické nebo martenzitické mateční fáze, ve které jsou rozloženy karbidy. Bílá litina vzniká rychlým ochlazením (s výjimkou chemického složení). Grafit je zcela nebo částečně vázán na karbid železa, chromu, manganu, molybdenu a dalších prvků. Výsledné vlastnosti litiny závisí na matici a množství cementitu ve struktuře. Cementit ve struktuře způsobuje velkou tvrdost materiálu (pohybuje se okolo 350 – 500 HB), otěruvzdornost, která se zvyšuje legováním nebo tepelným zpracováním, křehkost a špatnou obrobitelnost. Není vhodná pro svařování. Bílá litina je výchozím materiálem pro výrobu temperované litiny. Dále se využívá na výrobu odlitků, u kterých je požadována vyšší odolnost vůči opotřebení. [4,16]

3.2.1 Temperovaná litina

Temperovaná litina, zvaná také litina s vločkovým grafitem obsahuje grafit ve tvaru vloček, který vzniká rozpadem ledeburitického cementitu. Je to slitina železa s uhlíkem obsahující další prvky jako mangan, křemík, síru a fosfor. Tato litina tuhne podle metastabilního systému, bez přítomnosti volného uhlíku. Chemické složení je takové, že litina tuhne jako tzv. bílá litina, jejíž strukturu tvoří perlit a ledeburitický cementit. Kvůli přítomnosti cementitu je struktura velmi tvrdá a křehká. Žháním bílé litiny (tzv. temperováním) dosáhneme určitých podmínek potřebných ke strukturní přeměně. Litinu, kterou lze získat právě takovým tepelným zpracováním nazýváme temperovanou litinou. Cementit se během temperování odstraňuje buď rozkladem ($Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$) nebo oduhličením. Uhlík se tak vylučuje ve formě zrnitého tvaru (temperovaný uhlík). Temperováním lze dosáhnout

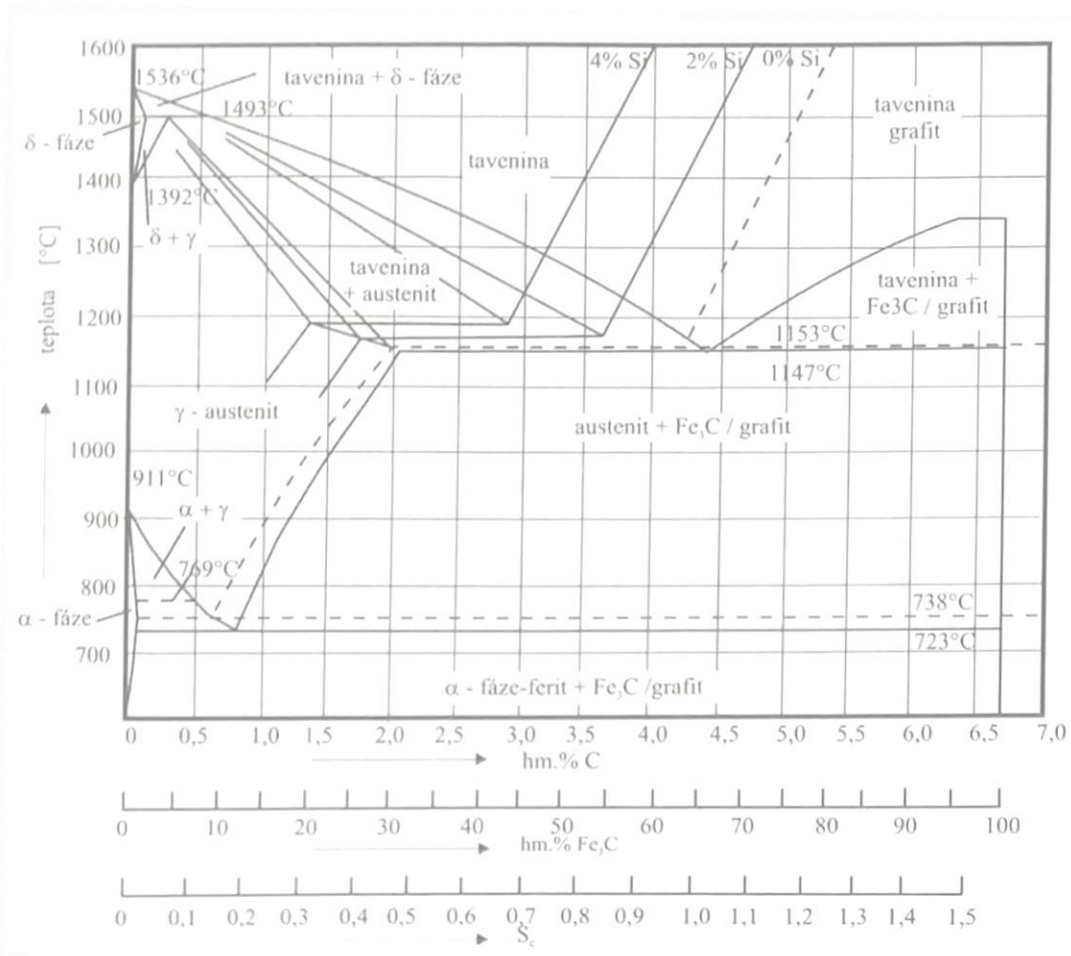
úplného rozpadu ledeburitického cementitu nebo perlitického cementitu. Tento typ litin disponuje dobrou pevností, tažností (Tabulka 8), odolností vůči rázovému a vibračnímu zatížení, žáruvzdorností a otěruvzdorností. Podle chemického složení výchozí litiny a typem žíhacího prostředí během temperování se výroba odlitků řadí do dvou základních skupin. První skupinu tvoří litina s bílým lomem a druhou skupinu litina s černým lomem. [4, 12, 16]

Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti temperované litiny s černým a bílým lomem [12]

Temperovaná litina s bílým lomem	Rm = 350-550 MPa A = 4-12 % 200-250HB
Temperovaná litina s černým lomem	Rm = 350-800 MPa A = 1-10 % 140-320HB

4 Vliv křemíku na vlastnosti LKG a LLG

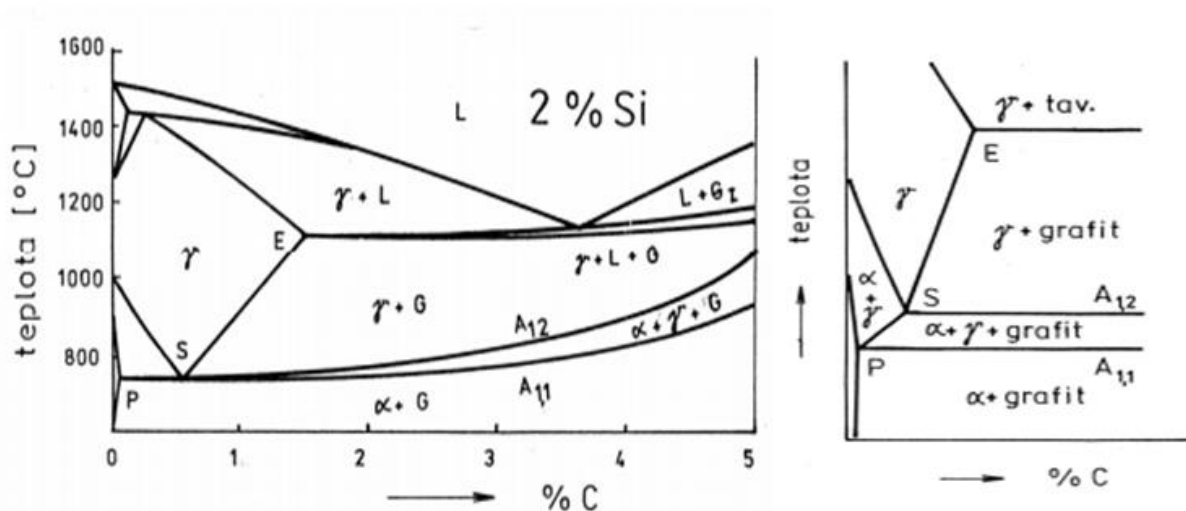
V kapitole 2 již bylo řečeno, že křemík je silně grafitizační prvek a jeho přítomnost a množství v litinách má rozhodující účinek na jejich vlastnosti. Tento prvek má velký vliv na strukturu základní kovové hmoty. Zvyšuje tvrdost feritu, podporuje jeho vznik při transformaci austenitu v průběhu tuhnutí litiny a při vyšším obsahu snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Skutečnost, že křemík se projevuje jako grafitizační prvek, ovlivňuje rovnovážný stabilní a metastabilní diagram soustavy Fe-C, ve které je uhlík přítomen ve formě grafitu (Obr. 10). Ten tvoří spolu s feritem rovnovážné fáze. Křemík se rozpouští ve feritu, kdy společně vytváří tuhý roztok označovaný jako silikoferit (ferit zpevněný křemíkem). [2, 4, 17]



Obr. 10 - Vliv křemíku na stabilní a metastabilní rovnovážný diagram Fe-C [17]

Na následujícím obrázku (Obr. 11) je zobrazen rovnovážný diagram Fe-C-2%Si, ze kterého je patrné, že dochází k posunu eutektického bodu směrem doleva na hodnotu, která odpovídá přibližně 3,6%C. Dochází tak i ke snížení maximální rozpustnosti uhlíku v austenitu a vzniku teplotního pásma v oblasti eutektické teploty.

Přítomnost křemíku ovlivňuje transformaci austenitu, která pak probíhá v oblasti vymezené teplotami $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ v diagramu Fe-C-Si. Tato oblast obsahuje ferit, austenit a grafit. [4]



Obr. 11 - rovnovážný diagram Fe-C-2%Si [4]

4.1 Litina s lupínkovým grafitem a zvýšeným obsahem křemíku

Kvůli tomu, že uhlík a křemík podporují grafitizaci, s jejich rostoucím obsahem v grafitické litině rostou i grafitové lupínky, které velmi zhoršují mechanické vlastnosti LLG. Lupínkový grafit kvůli svému tvaru narušuje základní kovovou hmotu vrubovým účinkem. Z toho důvodu by mělo být celkové množství uhlíku v LLG co nejmenší. Zároveň oba tyto prvky zvyšují počet zárodků a eutektickou teplotu. Vliv křemíku jsme si vysvětlili již na diagramu Fe-C-Si, kde křemík zvyšuje eutektickou i eutektoidní teplotu a posouvá tyto body doleva, tzn. k vyšším teplotám a nižší koncentraci uhlíku. Dalším účinkem křemíku je snížení rozpustnosti uhlíku v tuhém i tekutém stavu a tím podporuje grafitizaci. Se zvyšujícím obsahem křemíku zároveň dochází k zúžení oblasti tuhého roztoku γ . Při překročení tohoto obsahu cca nad 9 % Si tato oblast zcela vymizí, po ztuhnutí neproběhne překrystalizace a litina tak má primárně feritickou základní kovovou hmotu. Vyšší obsah křemíku a uhlíku má za následek snížení teploty likvidu a zúžení intervalu tuhnutí, díky čemuž pak litina vykazuje lepší slévárenské vlastnosti. [2, 10]

„Poněvadž meziatomové slučovací síly křemíku se železem jsou mnohem větší než mezi křemíkem a uhlíkem, rozpouští se křemík převážně ve feritu, oslabuje vazbu železa s uhlíkem a tím způsobuje difusní grafitizaci. Křemík se zároveň částečně rozpouští i v cementitu, zmenšuje jeho stálost a způsobuje jeho rozpad.“ [10]

4.2 Litina s kuličkovým grafitem a zvýšeným obsahem křemíku

U litiny s kuličkovým grafitem k vrubovým účinkům nedochází. Je to způsobeno právě kulovitým tvarem vyloučeného grafitu. Díky tomuto tvaru narušuje grafit základní kovovou hmotu jen minimálně a nepůsobí na ni vrubovým účinkem, jako je tomu u litiny s lupínkovým grafitem. Litina s vyšším obsahem křemíku je v podstatě specifický typ legované litiny s kuličkovým grafitem. Vyšší obsah křemíku v LKG se uvažuje v rozmezí cca od 2,4 do 4,1 % a díky němu je možné ovlivňovat mechanické vlastnosti litiny. Pro litinu s kuličkovým grafitem platí v současnosti norma ČSN EN 1563, která spolu s běžnými druhy LKG obsahuje i část, v níž je popsáno přibližné chemické složení pro „Zpevněný tuhý roztok feritické litiny s kuličkovým grafitem“. Zpevněného roztoku se dosahuje právě zvýšeným obsahem Si. Struktura matrice je pak převážně feritická s maximálním obsahem perlitu 5 % a volného cementitu 1 %.

S vyšším obsahem křemíku ve feritické tvárné litině narůstá zejména pevnost, tvrdost a také mez průtažnosti. Oproti klasickým LKG, které mají ve struktuře vysoký podíl perlitu, vykazují feritické LKG se zvýšeným obsahem Si nižší tvrdost. Přesto je tvrdost LKG se zvýšeným obsahem Si vyšší, než u klasických feritických LKG. Mezi největší výhody LKG se zvýšeným obsahem Si patří malé rozptyly tvrdostí (+- 5 HBW) pro různé tloušťky stěn.

Jak už bylo řečeno, s vyšším obsahem Si ve feritické LKG narůstá i pevnost a mez průtažnosti. Největší hodnoty pevnosti a meze průtažnosti nabývá tvárná litina při cca 1,5 až 3 % křemíku. Současně dochází k téměř dvojnásobnému nárůstu tažnosti oproti běžným LKG při stejných pevnostech v tahu R_m . Další výhodou je dosahovaná vysoká hodnota meze kluzu $R_{p0,2}$, která ve vztahu k mezi pevnosti v tahu R_m dosahuje hodnot až 75-85%. Naopak s klesajícím obsahem křemíku v litině dochází k poklesu pevnosti a meze pevnosti. K zajištění dobrých mechanických vlastností, spolu s vyšší rázovou houževnatostí by se obsah křemíku měl pohybovat v rozsahu 2,0 až 2,5 % Si. Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku nachází své uplatnění v automobilovém průmyslu. Tento typ litiny se využívá například ve Švédsku při výrobě dílů vozů Volvo a Scania a poprvé o ni informoval Bjorkegren. [14, 17, 18]

„Zvýšený obsah křemíku až na hodnotu 4,1% získal typ litiny s kuličkovým grafitem, který vykazoval poměrně malý rozptyl hodnot tvrdostí v různých tloušťkách stěn odlitků. Tento typ litiny byl ověřen i při výrobě odlitku pro nákladní automobil. Základním předpokladem je jednofázová feritická matrice, která je zárukou stejnoměrných mechanických vlastností, především tvrdosti, než struktura feriticko-perlitická.“ [18]

Obecně je známo, že litiny legované křemíkem, chromem a hliníkem patří mezi litiny žáruvzdorné. Obsah křemíku v takových litinách se pohybuje v rozmezí 5 až 8% a zmenšuje růst litiny při cyklickém tepelném namáhání. Globulární grafit díky svému kulovitému tvaru zvyšuje odolnost litiny proti oxidaci a je schopen snést teplotu ve výši až 950 °C. [18]

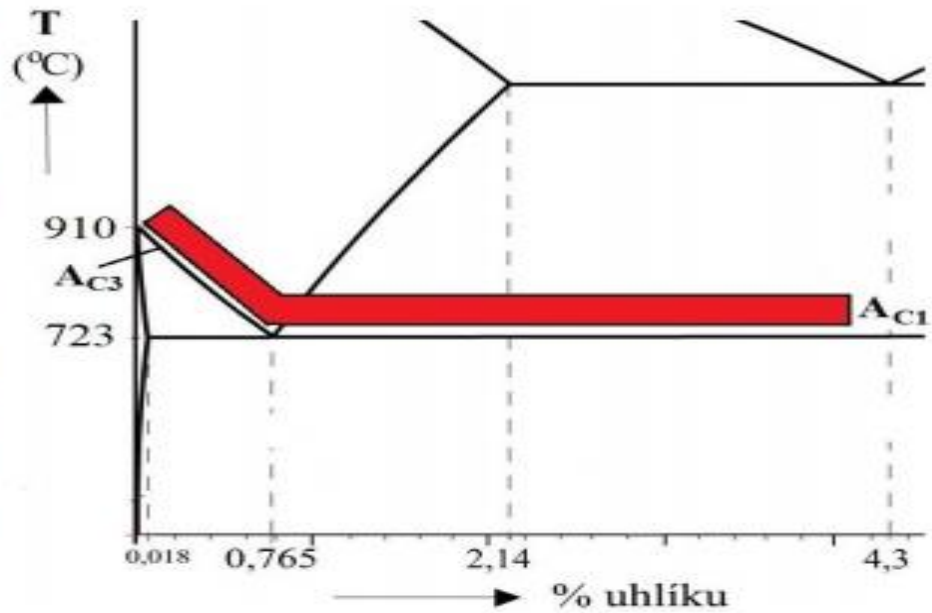
„V této souvislosti je nutno dodat, že BJORKEGREN se nezabýval litinou s vyšším obsahem křemíku za účelem její žáruvzdornosti, ale chtěl vyrobit litinu, která by měla značné uplatnění v automobilovém průmyslu s ohledem na její obrobitelnost a homogenní mechanické vlastnosti ve větším rozmezí různých tloušťek stěn odlitku. Proto při výrobě litiny uvažoval od 3,2 do 3,7% křemíku. Výsledky jeho výzkumu byly začleněny do ISO 1083:2004 (E). Tato litina se vyznačuje pevností cca 500 MPa, tvrdostí 185 až 215 HB a minimální tažností 10%, pro odlitky tuhnoucí s tloušťkou stěny ≤ 30 mm.“ [18]

5 Tepelné zpracování litin

5.1 Kalení

Kalení je druh tepelného zpracování, které se provádí za účelem zvýšení tvrdosti a současně pevnosti materiálu. Zakaleného materiálu dosáhneme ohřevem součásti na kalící (austenitizační) teplotu, setrváním na této teplotě a následným ochlazením v kalícím prostředí (voda, olej, solná lázeň, vzduch). Rychlým ochlazením materiálu vznikne bainitická nebo martenzitická struktura.

Austenitizační teplota se pohybuje mezi 30° až 50°C nad teplotou A_3 a A_1 (Obr. 12). Výsledná hodnota tvrdosti je ovlivněna obsahem uhlíku. Tato práce je zaměřena na litiny, a proto se dále bude pojednávat kalení litin, nikoliv o kalení ocelí. Způsob kalení litin je stejný jako u ocelí. U litin je ovlivněna hlavně matrice, zatímco tvar, množství a uspořádání grafitu zůstává stejné. Kalením litin se dosahuje struktur, jejichž základní kovovou maticí tvoří (stejně jako u ocelí) bainit a martenzit. Tvrdost grafitických litin po kalení je nižší než u kalení ocelí, kvůli výskytu částic grafitu. [16, 19]



Obr. 12 - Austenitizační teplota [19]

Grafit ovlivňuje tvrdost litin svým tvarem, velikostí a způsobem uspořádání v matici. Nejvíce ovlivněny jsou litiny s lupínkovým grafitem, které dosahují po martenzitickém kalení tvrdosti až 50 HRC (485 HB). Litiny s kuličkovým grafitem dosahují vyšších hodnot tvrdosti než litiny s lupínkovým grafitem (cca 55 HRC – 560 HB). [19]

5.1.1 Martenzitické kalení

Používá se pro bílé (karbidické) i grafitické litiny. Martenzitické kalení bílých litin je nejdůležitějším tepelným zpracováním, protože výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu, jako je tvrdost, odolnost vůči opotřebení apod. Kalící teploty a volba kalícího prostředí závisí na druhu použité litiny. Kalící teploty grafitických litin se pohybují v rozmezí 850–900 °C. Pokud by se tyto litiny kalily za vyšších teplot, struktura by obsahovala vyšší podíl zbytkového austenitu, a to by mělo za následek nižší tvrdost, protože zbytkový austenit je druhou nejměkčí strukturální složkou po feritu. Kalící prostředí jsou nejčastěji studené lázně (olej, voda). Po kalení vznikají uvnitř materiálu vnitřní pnutí. Litinové odlitky se musejí po kalení popustit, kvůli snížení vnitřních pnutí. Teplota popouštění je maximálně 200 °C. [19]

5.1.2 Bainitické kalení

Tento způsob kalení se používá pro litiny s kuličkovým nebo lupínkovým grafitem, za účelem vytvoření bainitické struktury. Odlitek se ohřeje na austenitizační teplotu a následně se zchladí na teplotu v rozmezí 250 - 400 °C. Na této teplotě se setrvává, dokud nedojde k přeměně na bainit (1-3 hodiny) a poté se nechá zchladit na vzduchu. Výsledná struktura zakalené části obsahuje bainit a zbytkový austenit. Po bainitickém kalení se už neprovádí další tepelné zpracování, jelikož výsledná struktura má příznivé kombinace mechanických vlastností. Oproti martenzitickému kalení dochází ve struktuře k nižším vnitřním pnutím a tím ke snížení náchylnosti ke vzniku prasklin. [19]

5.2 Povrchové kalení

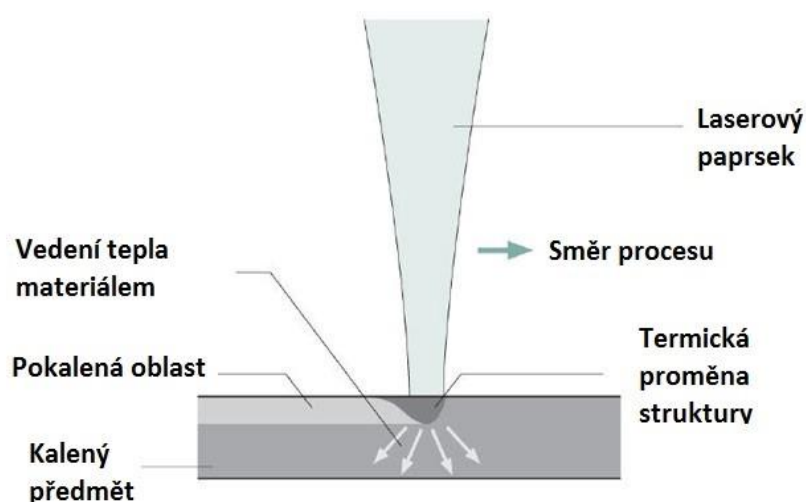
Cílem povrchového kalení je zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a zpevnění povrchu součástí. Je to typ martenzitického kalení, kdy se zakalí pouze povrch součástí do určité hloubky, přičemž jádro materiálu si zachovává původní vlastnosti. Z toho vyplývá, že povrch materiálu je velmi tvrdý, přičemž jsou zachovány jeho původní mechanické vlastnosti. V mnoha případech se jedná o odlitky, které jsou v provozu namáhány kluzným třením. Působením tření se částečně redukuje vrstva odlitku, která je ovšem tak tenká, že vlastnosti povrchu neovlivní. K ochraně povrchu tedy stačí povrchové kalení, kde martenzitická struktura sahá do hloubky 1 až 2 mm pod povrch. Hloubka povrchově zakalené vrstvy se dá zvětšit pomocí určitých legujících prvků, např. Cr, Mo nebo Ni. Při tom je velmi důležitá rychlost ohřevu povrchu součástí a zároveň na rychlost odvodu tepla do nitra odlitku. Rychlost ohřevu během povrchového kalení je velice vysoká a doba ohřevu naopak krátká, aby došlo k ohřátí pouze povrchové vrstvy. Oproti objemovému kalení se neprovádí výdrž na teplotě, aby nedošlo k prohřátí součástí. Vysokou rychlostí ohřevu během povrchového kalení se zjemňuje austenitické zrna a martenzitická struktura. Díky tomuto zjemnění se dosahuje vyšších hodnot tvrdosti. Doba nasycení austenitu uhlíkem je poměrně krátká. Pro usnadnění tohoto procesu by měla být struktura litiny perlitická, kdy se vlivem povrchového prohřátí, rychlého ohřevu a následného ochlazení dosáhne jemná martenzitická struktura. Tato struktura má velmi vysokou tvrdost při zachování dostatečné houževnatosti. Zároveň je důležité, aby byl odlitek před povrchovým kalením zbaven vnitřních pnutí vzniklých během výroby. Litiny, jejichž povrch se vytvrzuje povrchovým kalením, jsou ve většině případů mírně legované. [18, 19]

Povrchové kalení se používá pro součásti, u kterých je požadována odolnost vůči opotřebení a rázu. Jsou to například ozubená kola, vačky, čepy, kola apod. Mezi nepoužívanější typy povrchového kalení patří indukční kalení, kalení laserem a plamenem. [19]

5.2.1 Povrchové kalení laserem

Laserové kalení se řadí mezi moderní technologie tepelného zpracování, jehož princip spočívá ve velmi rychlém zahřátí povrchu součástí laserovým paprskem na kalící teplotu. Při tomto ohřevu dochází ve struktuře materiálu k austenitizaci. Laserový paprsek plynulým pohybem zahřívá povrch součástí ve směru posuvu (Obr. 13). Tato zahřátá místa se ochladí okolním materiálem. V případě laserového kalení se zakalený povrch součástí neochlazuje kapalinou, protože by měl obrovský rozdíl teplot za následek vznik velkých vnitřních pnutí. U laserového kalení dochází k vyrovnání teplot zevnitř a tím pádem je vznik vnitřních pnutí minimalizován. Je to způsobeno právě samočinným ochlazením, během kterého odvod tepla z povrchové vrstvy začíná odvodem do studené matrice. Materiál se tedy zakalí sám. [19, 20]

Tato skutečnost je velikou výhodou laserového kalení. Vysoká rychlost ohřevu a rychlé ochlazení má za následek vznik velmi jemné struktury s drobnými karbidy a martenzitickými jehlicemi. Dochází tak ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy součástí, přičemž je zachována houževnatost jádra. Pomocí povrchového laserového kalení se běžně dosahuje hloubky zakalení cca 0,5 až 1 mm. [18, 19, 20]



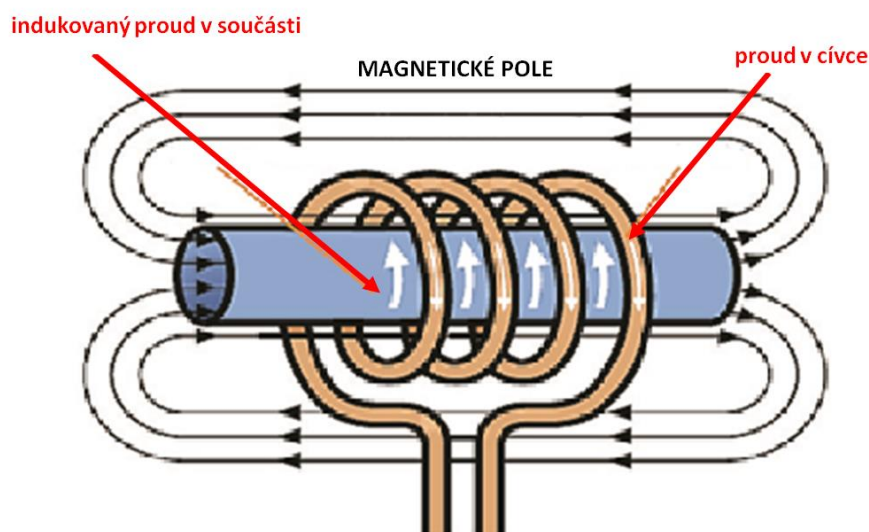
Obr. 13 - princip laserového kalení [21]

5.2.2 Indukční povrchové kalení

Indukční kalení je způsob povrchového kalení součástí, jehož princip je založen na ohřevu povrchu součásti pomocí induktoru. Induktorem je v tomto případě cívka o určitém počtu závitů, jejíž tvar je přizpůsoben tvaru součásti. Povrch součásti je zahříván střídavým proudem o střední nebo vysoké frekvenci. Hodnoty střední frekvence se pohybují v rozsahu 5 až 50 kHz a vysoké frekvence mezi 50 až 500 kHz. Délka ohřevu a hodnota proudu však závisí na rozměrech součásti a na výchozí struktuře. Aby výsledné vlastnosti litiny odpovídaly těm požadovaným, je nutné před kalením vybrat litinu s vhodnou strukturou (např. LLG s perlitickou strukturou). U LLG by měl být obsah feritu ve struktuře co nejmenší. V případě LKG se zvýšeným obsahem Si je struktura převážně feritická, kvůli čemuž tato litina disponuje nízkou tvrdostí. Z toho důvodu se využívá povrchového indukčního kalení, jehož cílem je zvýšit tvrdost povrchu a odolnost vůči opotřebení, díky kterým budou mít součásti vyrobené z této litiny delší životnost. U běžných feritických LKG se někdy využívá normalizačního žíhání s popouštěním, za účelem zvýšení podílu perlitu ve struktuře. Běžně se však LLG a LKG před povrchovým indukčním kalením tepelně nezpracovávají. [18, 19]

V případě indukčního kalení se součásti zakalují nejčastěji vodní sprchou. V některých případech je možné kalit součásti na vzduchu, a to konkrétně součásti z litin legovaných niklem. Princip povrchového indukčního kalení je patrný z následujícího obrázku (Obr. 14). Do induktoru vstupuje střídavý proud, který ve vloženém elektricky vodivém předmětu indukuje magnetické pole generující vířivé proudy, jejichž intenzita je nejvyšší právě na povrchu součásti. Tímto způsobem dochází k ohřevu povrchové vrstvy. Následným rychlým ochlazením této vrstvy vznikne zakalená struktura, která se vyznačuje lepšími pevnostními charakteristikami, vyšší odolností proti opotřebení a únavě, ale zejména vyšší tvrdostí. Tvrdost a hloubka zakalené vrstvy závisí především na původní struktuře litiny. Tvrdost indukčně kalených součástí může dosahovat 650 až 680 HV při hloubce zakalené vrstvy 0,8 až 2,5 mm. U indukčního kalení je přechod mezi zakalenou vrstvou a jádrem materiálu poměrně prudký. Například u součásti, která má v hloubce pod povrchem tvrdost cca 650 HV se sníží hodnota tvrdosti v hloubce 2,5 mm až na cca 275 HV. [18, 19]

Tento způsob povrchového kalení je nejpoužívanější. Díky této technologii je možné dosahovat větší hloubky ohřevu. Nejčastěji používá u tvarově symetrických součástí, jakými jsou například ozubená kola, hřídele, vřetena, výstupky vaček apod. [18, 19]

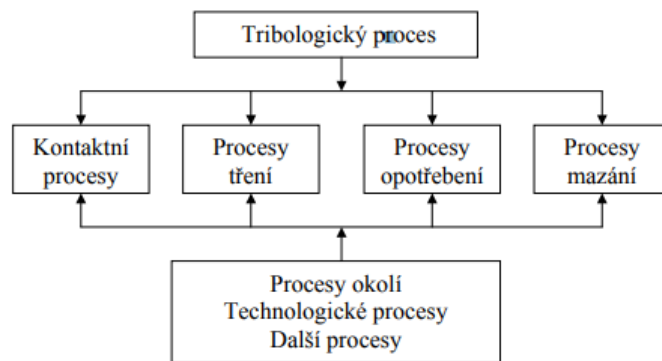


Obr. 14 - Princip povrchového indukčního kalení [22]

6 Tribologie

Tribologie je vědní obor, zabývající se chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu. Tento pohyb může být například valivý, kluzný, kmitavý nebo nárazový. Ve skutečnosti se vždy uplatňují alespoň dva z těchto pohybů. Tribologické procesy jsou charakterizovány vzájemnou interakcí třecích těles, jejichž důsledkem je opotřebenění. Tření i opotřebenění je však možné snížit vhodným mazáním. Prostřednictvím maziva lze zabránit bezprostřednímu styku povrchů.

Tribologické procesy se rozlišují na procesy mazání, třecí procesy, procesy opotřebenění a kontaktní procesy. Klíčové vlastnosti v průmyslové praxi jsou adheze, otěr, koeficient tření, tvrdost a drsnost materiálu. Aplikace výsledků tribologie do praxe je disciplína, která se nazývá tribotechnika. Tato disciplína se zabývá např. mazivy a jejich zkoušením, způsobem mazání a mazacích zařízeních, materiály třecích dvojic, výpočty, konstrukcí a optimalizací třecích dvojic atd. Díky správnému využití a aplikaci poznatků z tribotechniky je možné v průmyslové výrobě dosáhnout značných úspor, a to zejména snížením nákladů na údržbu a opravy strojů, zvýšením životnosti přístrojů a jiných zařízení, snížením spotřeby energie na pohon strojů atd. [23, 24]



Obr. 15 – Tribologické procesy [23]

6.1 Základní tribologické vlastnosti

V úvodu kapitoly bylo řečeno, že mezi základní tribologické vlastnosti patří otěr, koeficient tření, tvrdost a drsnost materiálu. Důsledkem těchto vlastností je opotřebenění materiálu. Vzhledem k zaměření této bakalářské práce budou dále konkrétněji popisovány pouze vlastnosti bezmezně související s předmětem experimentální části.

Tvrдост

Tvrдост je obecně charakterizována jako odpor proti vnikání zkušebního tělesa do povrchu materiálu. Zkoušky tvrdosti jsou velmi rychlé a levné. Nejčastěji se používají na zjištění tvrdosti jednotlivých fází mikrostruktury materiálů, tvrzených vrstev, svarových spojů atd. Metody zkoušení tvrdosti se primárně řadí mezi nedestruktivní, s výjimkou například zkoušení tvrdosti svarových spojů, kdy vniknutím indentoru do povrchu zaneseme do materiálu napětí, které může mít za následek vytvoření a následné šíření trhliny. Vyhodnocování tvrdosti se provádí jak na zkušebních vzorcích, tak na hotových součástech. [5]

Tvrдост se zkouší několika různými metodami, které se dají rozlišit podle:

- principu zkoušky - vrypové, vnikací, odrazové a kyvadlové
- rychlosti zatěžující síly - statické a dynamické
- velikosti zatěžující síly - rozsah 0,1 mN až 500 N
- účelu měření - zkouška nanotvrдостi, mikrotvrдостi a makrotvrдостi.

Bližší charakteristika metod zkoušení tvrdosti bude popsána v kapitole č. 6.3.1.

Tření

Tření se označuje jako vznik tečné síly ve styčné ploše mezi dvěma tělesy. Váže se na relativní pohyb dvou dotýkajících se těles tribologického systému. V závislosti na hloubce zkoumání procesů tření se rozlišuje výzkum na úrovni mikromodelu a makromodelu. Při zkoumání na úrovni mikromodelu je nahlíženo na tření jako elementární proces, zatímco při zkoumání na úrovni makromodelu se bere zřetel na celkový funkční projev sledovaného modelu. [23, 24]

Tření se v praxi rozlišuje na tři základní stavy:

- **suché tření** - Tento typ tření vzniká tehdy, kdy se vzájemně na sebe působící tělesa nachází v tuhém stavu. Stykové plochy se navzájem dotýkají bez mazání, tím dochází k opotřebením kluzných ploch, k jejich zahřívání a zadírání
- **tření polosuché** - Během polosuchého tření dochází k adhezi mazadla ke třecím plochám, protože mazání není dostatečné, a nemůže se tak vytvořit souvislý mazací film. V určitých místech dochází k přímému styku obou materiálů a dochází tak k opotřebením.
- **Tření kapalinné** - V tomto případě je mazání dostatečné, protože je mezi stykovými plochami souvislá vrstva maziva, kde se uplatňuje jeho viskozita. Díky dostatečné vrstvě maziva mezi plochami nedochází k opotřebením materiálu a vzniká tak minimální tření.

Jednotlivé způsoby tření se v praxi vyskytují samostatně jen zřídka. Ve skutečných případech nastává kombinace výše uvedených způsobů tření. Velikost třecích sil je však závislá na druhu pohybu (kluzný a valivý). V praxi se tření nejčastěji projevuje následujícími způsoby:

- *vznikem třecích sil a momentů*
- *opotřebením*
- *přeměnou mechanické práce v teplo*

Tyto projevy však závisí na mezních stavech tření, zdali se mezi styčnými plochami nachází nějaké mazivo, na rychlosti vzájemného pohybu a také na drsnosti obou materiálů. Jednotlivé mezní stavy tření budou blíže popsány v kapitole č. 6.3.2. [23, 24]

Drsnost

Drsnost povrchu se rozumí nerovnost povrchu materiálu, která vzniká při výrobě součásti a je ovlivněna způsobem výrobní technologie. Základní parametr pro hodnocení drsnosti je profil drsnosti. [23]

Opotřebením

Opotřebením se uvažuje poškození či nežádoucí změna povrchu nebo rozměru materiálu a součástí, vlivem působení vnějšího prostředí a funkčních povrchů při jejich vzájemném pohybu. Tento jev se projevuje přemísťováním částic hmoty povrchu působením mechanických účinků, které mohou být doprovázeny například chemickými, elektrochemickými a elektrickými vlivy. V praxi se však často setkáváme se situacemi, ve kterém působí více druhů opotřebením. Mezi základní druhy opotřebením patří:

- adhezivní
- abrazivní
- erozivní
- kavitační
- únavové
- vibrační

V závislosti na předmětu experimentální části práce bude v kapitole 6.2.2 blíže popsána pouze problematika adhezivního opotřebením. [23, 24]

6.2 Metody zkoušení tribologických vlastností

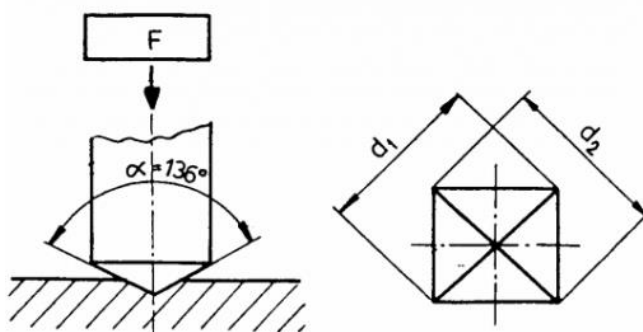
6.2.1 Zkoušení tvrdosti

Tvrdot byla již charakterizována v kapitole 6.1, ve které bylo současně řečeno, že dle účelu měření se zkoušky tvrdosti rozlišují na zkoušky nanotvrdoti, mikrotrdoti a makrotvrdoti. Zkoušky nanotvrdoti se používají k měření povlaků, kde je maximální velikost zatěžující síly 0,1 N. Zkouška mikrotrdoti se provádí se zatěžující silou v rozmezí 0,1 – 10 N a výsledkem je stanovení tvrdosti jednotlivých strukturních složek kovů a slitin. Makrotvrdot se měří na materiálu jako celku se zatěžující silou vyšší než 10 N. Velikost zatěžující síly se v mnoha případech udává v kilopondech [kp], kde platí, že 1 kp = 9,81 N. [5]

Nejčastější způsob zkoušení tvrdosti je statická vnikací zkouška, do které lze zařadit zkoušky podle Rockwella, Brinella a Vickerse. Princip vnikací zkoušky je pozvolné vtlačení indentoru do povrchu zkoušeného materiálu, v němž se vytvoří vtisk. Pro všechny výše uvedené metody platí, že se musí provádět na rovném, hladkém a čistém povrchu bez okují, cizích látek a zejména bez mazadel. Vzhledem k tomu, že měření tvrdosti povrchově zakalených litin se v experimentální části provádělo pomocí zkoušky dle Vickerse, bude následně popsán pouze tento typ zkoušky. [5]

6.2.1.1 Zkouška podle Vickerse

Podstata této zkoušky spočívá ve vtlačení indentoru do povrchu zkušební vzorku pod určitou zatěžující silou F . Indentorem je v tomto případě diamantový pravidelný čtyřboký jehlan, jehož vrchol svírá úhel 136° (Obr. 16). Po odlehčení indentoru je zanechán v povrchu zkušební vzorku vtisk, který má tvar čtverce s úhlopříčkami d_1 a d_2 (Obr. 16). [5]



Obr. 16 – Schéma Vickersova indentoru [25]

Délky úhlopříček se změří a následně se vypočte jejich aritmetický průměr d . Tato hodnota se poté dosadí do následujícího vztahu pro výpočet tvrdosti HV.

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

- F - zatěžující síla [N]
- d - průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

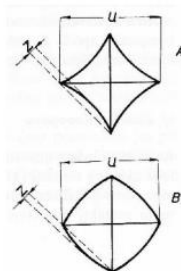
V následující tabulce (Tabulka 9) jsou uvedeny doporučené rozsahy zkušebního zařízení pro metodu měření tvrdosti podle Vickerse.

Tabulka 9 - Rozsahy zkušebních zařízení při zkoušce dle Vickerse

Název	Tvrdot	Rozsah zkušebního zatížení
Zkouška tvrdosti dle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \geq 49,03$
Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení	$HV 0,2 \text{ až } < HV 5$	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdoti dle Vickerse	$HV 0,01 \text{ až } < HV 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$

V některých případech se může stát, že se čtvercový tvar vtisku zdeformuje. Tato deformace je způsobena především rozdílným zpevněním při hranách a uprostřed ploch jehlanu. U nezpevněných materiálů se hrany vtisku jeví jako vyduté a u zpevněných materiálů naopak jako vypouklé (Obr. 17).

[5]



Obr. 17 - Deformace vtisku – A) nezpevněný materiál, B) zpevněný materiál [26]

Označení tvrdosti podle Vickerse

Tvrdot dle Vickerse se zapisuje např. tímto způsobem 450 HV 30. První číslice představuje hodnotu tvrdosti, následují písmena HV označující tvrdost dle Vickerse a za nimi číslici označující velikost zkušebního zatížení v kilipondech. Průměrně se doba zatížení pohybuje mezi 10s a 15s. V případě, že byla použita jiná doba zatížení, následuje za lomítkem i ona použitá doba zátěže v sekundách. Např. 620 HV 10/20. Tento zápis tedy říká, že byla naměřena tvrdost dle Vickerse 620 při velikosti zkušebního zatížení 10 kp (98,1 N) a době zatížení 20s. [5]

6.2.2 Zkoušení otěruvzdornosti

Otěruvzdornost neboli odolnost proti otěru je odvozená mechanická vlastnost materiálů, která je definována jako schopnost materiálu odolávat opotřebení povrchu způsobenému kontaktním třením mezi dvěma stykovými plochami. Těchto kontaktních třecích procesů a druhů opotřebení rozeznáváme několik (kapitola 6.1). V této kapitole bude však blíže specifikováno adhezivní opotřebení, jelikož je předmětem experimentální části této bakalářské práce.

Adhezivní opotřebení vzniká při vzájemném pohybu dvou stykových ploch, jehož důsledkem je oddělování a přemísťování částic materiálu, které vede k narušení povrchových vrstev. Vlivem vzájemného pohybu za spolupůsobení velkých sil dochází mezi stykovými plochami k plastickým deformacím a vytvářením mikrospojů. Vznik mikrospojů je doprovázen lokálním ohřevem materiálu a vznikem chemických reakcí mezi kovem a okolním prostředím, které může vést ke zvýšení rychlosti opotřebení. Opotřebení lze snížit vhodným mazáním funkčních povrchů, které v dostatečném množství funguje jako souvislá vrstva zabraňující přímému styku povrchů a současně funguje jako chemická ochrana před působením kyslíku. Adhezivní opotřebení se v praxi nejčastěji vyskytuje například u kontaktu kola s kolejnicí, u kluzných ložisek, čepů atd. [23, 24]

Samotné testování otěruvzdornosti materiálů je založeno na kontaktním pohybu objektu či indentoru po povrchu testovaného materiálu. Nejpoužívanější metodou hodnocení opotřebení materiálů je metoda Pin-on-disc, jejíž princip bude vysvětlen v následující kapitole. Mezi další metody testování opotřebení patří například metoda Blade-on-block, která se využívá na testování otěruvzdornosti břitů. [27]

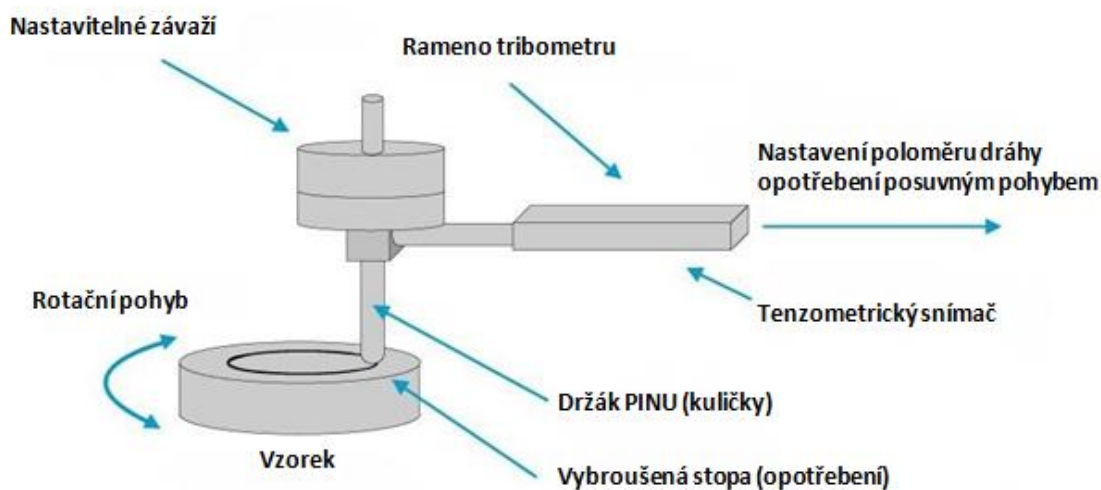
6.2.2.1 Metoda Pin-on-disc

Tato metoda se provádí na přístroji zvaném tribometr, který je konstruován tak, aby měření nebylo ovlivněno podmínkami okolního prostředí. Disponuje ochranným krytem, ve kterém se sleduje teplota a vlhkost vzduchu. Mezi nejpodstatnější části tribometru patří elastické rameno (Obr. 19), ve kterém je uchycen držák, do jehož dutiny se vkládá „PIN“ tělíčko (kulička).



Obr. 18 – držák s „PIN“ tělískem [28]

Rameno je spojeno s držákem závaží, jež umožňuje nastavit zatížení, které se pohybuje v rozmezí 0,25 až 60 N. Další nezbytnou součástí tribometru je snímač, který v průběhu měření snímá odchylku elastického ramene (Obr. 19). Tato odchylka určuje hodnotu koeficientu tření mezi tělískem a testovaným povrchem. Disk se vkládá na „sklíčidla“, které se v průběhu měření otáčí předem zvolenou rychlostí (10 až 500 ot/min).



Obr. 19 - Schéma měření [30]

Samotná podstata metody spočívá ve vzájemné interakci rotujícího zkušební vzorku se zatíženým indentorem. Kulička (PIN) je zatížena přesně definovanou silou, přičemž se měřený vzorek otáčí konstantní rychlostí. Výsledkem měření je graf závislosti koeficientu tření na vzdálenosti (resp. počtu otáček). Tyto výsledky jsou charakteristické pro danou materiálovou dvojici. Po provedení zkoušky se pomocí optického mikroskopu zjišťuje velikost a charakter opotřebení kuličky. Rychlost opotřebení vrstev se určuje s pomocí profilometru, na kterém se měří velikost vytvořené tribologické stopy na vzorku. [29, 30]

Rozsah opotřebení a průběh koeficientu tření však závisejí na několika následujících faktorech.

- Stav povrchu vzorku (drsnot, kvalita, teplota)
- Geometrie PINU (velikost stykové plochy)
- Podmínky okolního prostředí (teplota, vlhkost)
- Přítomnost maziva
- Zatěžující síla
- Doba trvání testu (počet cyklů)
- Rychlost pohybu mezi kuličkou (PINEM) a vzorkem
- Mechanické a fyzikální vlastnosti vzorku a kuličky

Materiál tělíška

Materiál tělíška je jeden z klíčových parametrů ovlivňujících výsledek zkoušky. Nejčastějším materiálem, ze kterého je tělíško (PIN) vyrobeno je ocel. Často se používá ocel ČSN 41 4109. Může se však stát, že tvrdost takového tělíška bude nižší než tvrdost testovaného povrchu a dojde k opotřebení tělíška (resp. změni svoji geometrii). Tím, že se na tělíšku vytvoří vybroušená plocha, poklesne tlak, který je na materiál vyvíjen. Zároveň dochází k ulpívání materiálu z tělíška na vybroušené stopě testovaného vzorku. Tyto faktory pak zkreslují výsledky měření. Možností, jak těmto nežádoucím faktorům zabránit je změnit materiál tělíška. Často se používají keramická tělíška. Další možností je změna tvaru tělíška, například váleček o malém průměru. [29, 30]

Poloměr vybroušené stopy

Velikost poloměru vybroušené stopy se projeví na velikosti opotřebení tělíška. Větší poloměr, při zachování počtu cyklů způsobuje prodloužení dráhy, kterou tělíško urazí. Naopak zmenšením poloměru vybroušené stopy se tato dráha zkrátí, nicméně pro zachování rychlosti je potřeba zvýšit otáčky. Dalším problémem je nárůst teploty v průběhu měření. To je způsobeno tím, že teplo se při zkrácení dráhy nemá čas odvádět. To se pak projeví na průběhu zkoušky. [29, 30]

Opotřebení povrchu

Během zkoušky dochází vlivem vzájemného pohybu vzorku a tělíška k opotřebení povrchu vzorku a PINu. Vlivem nerovností, při použití měkčího materiálu tělíška vznikají na povrchu materiálu malé elementy, které adhezivně ulpívají v trilobogické stopě. Následkem je zvýšení hodnoty součinitele tření, kvůli zvýšení drsnosti styčné plochy. Tento nežádoucí jev ovlivňuje výsledky měření.

Samotný průběh opotřebení lze rozdělit do tří fází. V první fázi dochází k iniciaci opotřebení. Roste velikost opotřebení a současně součinitel tření. V druhé fázi dochází ke vzniku kontaktních ploch, což má za následek vysokou hodnotu součinitele tření a velikost opotřebení. Ve třetí fázi dochází k ustálení opotřebení a koeficient tření klesá i velikost opotřebení klesá. [29, 30]

6.3 Tribologické vlastnosti litin

Základní tribologické vlastnosti jednotlivých druhů litin ovlivňuje řada faktorů. Mechanické a tribologické vlastnosti litin jsou závislé na chemickém složení ale především na struktuře základní kovové hmoty. Litiny převážně s feritickou strukturou disponují velmi dobrými plastickými a dynamickými vlastnostmi. Perlitická struktura zase způsobuje vyšší pevnost a tvrdost. Hodnoty tvrdosti litin s kuličkovým grafitem se pohybují v rozmezí 130 až 330 HB v závislosti na struktuře základní kovové hmoty. Pokud má struktura převážně feritickou strukturu, tvrdost materiálu se pohybuje okolo 150 HB, protože ferit je měkký a dobře tvárný (tvrdost okolo 80 HB). Vliv na tvrdost materiálu má i chemické složení. Například vyšší obsah křemíku v litině způsobuje vyšší tvrdost feritu. Vliv chemických prvků na vlastnosti litin je blíže popsán v kapitole 2.

Hodnotu tvrdosti lze zvýšit samozřejmě i procentuálním zastoupením perlitu. Obecně platí, že čím více perlitu struktura obsahuje, tím je tvrdší. Perlit se vyskytuje ve struktuře v lamelární formě, nicméně pomocí žhání ho lze přeměnit na globulární, díky čemuž je měkký a lépe tvárný. Hodnoty tvrdosti litin jsou tedy vysoce ovlivněné jejich základní kovovou hmotou, chemickým složením i tepelným zpracováním. [2, 10]

Další důležitá tribologická vlastnost, nejen litin, ale i jiných materiálů je otěruvzdornost. Vztah mezi tvrdostí a otěruvzdorností je takový, že čím je materiál tvrdší, tím má i vyšší otěruvzdornost. Mezi otěruvzdorné litiny patří litiny cementické. Jedná se o karbidické litiny, kde je uhlík vázaný výhradně ve formě karbidů. Díky vysokému obsahu tvrdých karbidů ve struktuře a martenzitické matici jsou cementické litiny velmi tvrdé (550-700 HB), křehké a prakticky neobrobitelné. V případě, že je vyžadována vysoká odolnost vůči opotřebení v náročných provozních podmínkách, například suchého tření či abrazivního opotřebení, využívají se právě cementické litiny. Grafitické litiny se na výrobu součástí namáhané na tření téměř nepoužívají. Jejich tribologické vlastnosti lze však vylepšit pomocí tepelného zpracování povrchu materiálu. [23, 24, 32]

Mezi zásadní tribologické vlastnosti materiálů, které je ještě třeba zmínit, patří koeficient tření mezi dvěma materiály a drsnost materiálu. Tyto dvě vlastnosti jsou spolu úzce spjaty, nicméně jejich vztah je nepřímý, protože závisí na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří v první řadě materiál obou druhů dotýkajících se povrchů, typ jejich vzájemného pohybu (např. statický, posuvný, valivý) a působení okolního prostředí (teplota, vlhkost, mazání).

Drsnost povrchu litin je ovlivněna zejména způsobem výroby. Druh použité technologie se ve výsledku projeví na drsnosti hotové součásti. Například při technologii kokilového lití se běžně dosahuje drsnosti R_a v rozmezí 12 – 6,3 μm , ale je možné dosáhnout hodnoty drsnosti až 3,6 μm . Pomocí technologie vysokotlakového lití lze dosáhnout hodnoty drsnosti až 1,6 μm a nízkotlakového lití až 3,6 μm . Výsledné hodnoty drsnosti lze snížit následným obráběním součástí a dokončovacími procesy. [33]

6.4 Vliv povrchového kalení na tribologické vlastnosti litin

Vlastnosti povrchů litin a dalších materiálů lze vylepšovat vytvářením povrchových vrstev nebo povlaků. Rozdíl mezi vrstvou a povlakem je v tom, že povrchovou vrstvou se rozumí vrstva, která vznikla modifikací povrchu základního materiálu. Na rozdíl povlak je jiný materiál, který je rovnoměrně nanesen na povrch základního materiálu. Vzhledem k tomu, že experimentální část této bakalářské práce se týká pouze vzorků povrchově kalených, bude dále zmiňována pouze problematika vlastností povrchových vrstev. [34]

Vytváření povrchových vrstev se používá za účelem zvýšení tvrdosti povrchu materiálů. Princip povrchového kalení byl již vysvětlen kapitole 5.2. Zvýšením tvrdosti se zvyšuje i otěruvzdornost. Litiny, pokud jde o mechanické vlastnosti, nabízí širokou škálu pevností v kombinaci s dobrými kluznými vlastnostmi, houževnatostí a schopností tlumení vibrací. Pomocí povrchového kalení, bez ohledu na způsob (laserové nebo indukční) lze docílit podstatně vyšších hodnot tvrdosti a prakticky zdvojnásobit odolnost proti opotřebení. Zásadní rozdíl mezi laserově zakalenou vrstvou a indukčně zakalenou vrstvou je v tom, že při indukčním kalení dochází vlivem intenzivnějšího prohřátí k hlubšímu zakalení (až 6 mm), zatímco u laserového kalení se hloubky vrstev běžně pohybují okolo 1 mm (viz kapitola 5.2). U laserového kalení, lze snadno volit parametry kalení, zatímco u indukčního kalení závisí celý proces zejména na zkušenostech kaliče. Vhodná kombinace teploty a rychlosti pohybu laserového paprsku po povrchu poskytuje optimální martenzitickou strukturu s grafitem a zároveň je možné docílit vyšší otěruvzdornosti a lepších třecích vlastností. Průměrná hodnota koeficientu tření (ocel-litina v nezakaleném stavu) by se měla pohybovat v rozmezí 0,25 – 0,4. [19, 20, 35, 36]

7 Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na povrchové vlastnosti laserově a indukčně povrchově zakalených litinových vzorků. Konkrétně se jedná o měření tvrdosti pomocí metody dle Vickerse, vyhodnocení mikrostruktury a měření koeficientu tření a otěruvzdornosti indukčně zakalených vzorků metodou Pin-on-disk. V následujících kapitolách bude čtenář seznámen s přípravou vzorků na jednotlivá měření, samotným průběhem měření, použitými přístroji a výsledky měření jednotlivých vzorků.

7.1 Příprava vzorků

Měření a vyhodnocování tvrdosti se provádělo na čtyřech indukčně povrchově zakalených vzorcích a na čtyřech laserově zakalených vzorcích. Na vzorcích kalených laserem byly vytvořeny dvě zakalené vrstvy s odlišnou hloubkou zakalení a na indukčně kalených vzorcích pouze jedna. Technologický postup a parametry obou typů povrchového kalení litinových vzorků je popsán níže.

Technologický postup a parametry laserového kalení

Vzorek byl zakalen jedním průjezdem laserové hlavy bez rotace vzorku. Nejdříve byla kalena oblast (cca ½ obvodu) podle parametrů č. 1. Po vychladnutí se zakalila druhá polovina parametry č.2. Proces byl řízen pyrometrem, který zpětnovazebně upravoval výkon tak, aby byla dodržena definovaná povrchová teplota. Všechny vzorky byly zakaleny se stejnými parametry (Tabulka 10). Použitý přístroj je prototyp, z toho důvodu nemá žádné typové označení.

Tabulka 10 - Parametry laserového kalení [37]

	Průjezd č.1	Průjezd č.2
Teplota	1060 °C	1060 °C
Velikost laserového spotu	8x20 mm	8x20 mm
Povrchová rychlost	45 cm/min	90 cm/min
Použitý laser	Laserline LDF 10000-100	
Fokusační vzdálenost	348 mm	
Manipulátor	robot Fanuc M710iC s jednoosým polohovadlem	
Kalící optika	Laserline zoom optics (proměnný rozměr paprsku v obou osách 8 – 54 mm)	

Technologický postup a parametry indukčního kalení

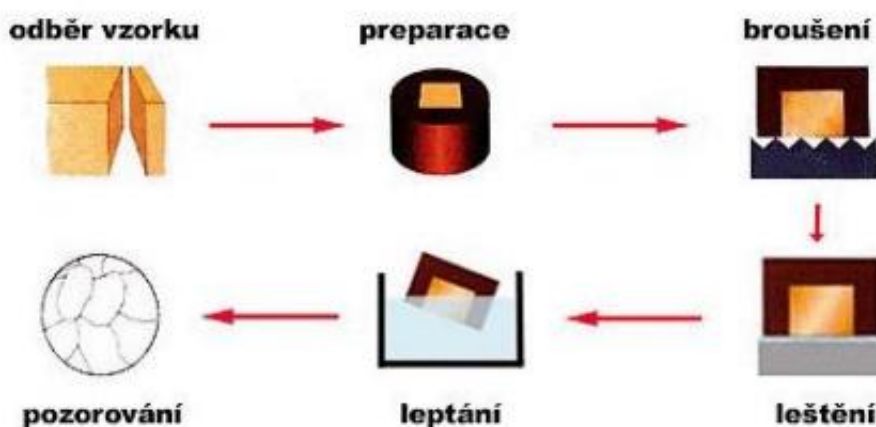
Vzorky byly povrchově indukčně kaleny střední frekvencí (SF) s parametry ve firmě MARTENZIT. Vysokofrekvenční indukční kalení (VF) nebylo použito z důvodu, že u podobných zkoušek nebylo dosaženo vyhovujících výsledků. Středofrekvenční povrchové kalení vykazuje dostatečnou hloubku zakalení a minimální rozptyly hodnot tvrdostí. Použité parametry k zakalení vzorků jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 11).

Tabulka 11 - Parametry indukčního středofrekvenčního kalení [38]

SF Kalení - SMK150/05/500					
Rotace	Převod trafo	Kapacita	Napětí	Proud	Frekvence
[1/min]		[uF]	[V]	[A]	[kHz]
180	1:12	30	248	153	7,9
Vodní sprcha	Posuv	Čas předehřevu	Čas dochlazení	Teplota popuštění	Výdrž na teplotě
[l/min]	[mm/sec]	[s]	[s]	[°C]	[min]
≈ 12	4	1	15	155-165	60

Broušení, leštění a leptání vzorků

Před měřením tvrdosti a fotografováním mikrostruktury bylo potřeba připravit vzorky pro samotný experiment. Tato příprava spočívala v broušení, leštění a leptání vzorku. Broušení se provádělo od nejhrubších brusných papírů až po ty nejjemnější. Následně se provádělo leštění, po kterém už bylo možné pozorovat na vzorcích póry, grafit, případně nějaké vměstky. Po broušení a následném leštění by se drsnost ploch vzorků měla pohybovat v rozmezí R_a 0,05-0,1 μm . Konečnou úpravou bylo leptání, které se provádělo za účelem vyvolání struktury. Princip této přípravy a celkové výroby vzorků je patrný z následujícího obrázku (Obr. 20).



Obr. 20- Příprava vzorků [39]

7.2 Chemické složení a charakteristika vzorků

Vzorky litin byly laboratorně vyrobeny a k analýze dodány ve formě obrobených krátkých válcových tyčí. Chemické složení použitých materiálů a jejich značení je uvedeno v Tabulka 12.

Tabulka 12 - Chemické složení vzorků [13]

Vzorek Značka	Materiál dle EN-ČSN	Tvrdość dle HV (přepočet)			Chemické složení (%)							
					C	Si	Mn	P	S	Sn	Cu	
3	EN-GJS-SiMo35-5	498	471	498	3,1	3,58	0,18	0,025	0,018	0,004	0,02	Mo 0,76
4	EN-GJL-250	560	595	577	3,66	1,87	0,80	0,030	0,040	0,090	0,06	-
7	EN-GJS-400-18	279	254	310	3,5	2,34	0,17	0,021	0,008	0,003	0,02	Mg 0,050
16	EN-GJS-500-14	372	372	382	3,05	3,75	0,23	0,023	0,008	0,005	0,013	Mg 0,045

- Vzorek č.3 je nízkolegovaná litina dle ČSN EN 16124
- Vzorek č.16 je litina s kuličkovým grafitem dle ČSN EN 1563; značka EN-GJS-500-14 - feritická litina s kuličkovým grafitem (ferit cca 90%) s křemíkem zpevněným tuhým roztokem

Fotografie jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze.

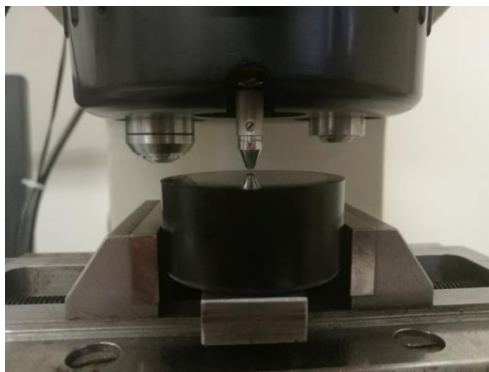
7.3 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti se provádělo na mikrotvrdoměru LECO-M-400-G1 (Obr. 21, Obr. 22) s rozsahem zatěžující síly 0,1 až 10 N. Tento přístroj používá hrot (indentor) typu Vickerse.



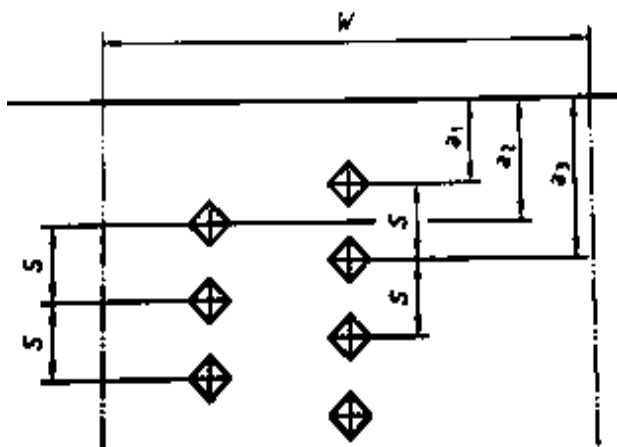
Obr. 21 – Mikrotvrdoměr LECO-M-400-G1 [28]

Princip měření metody dle Vickerse byl již popsán v kapitole 6.2.1.



Obr. 22 - detail měření na mikrotvrdoměru [28]

Experiment spočíval v měření průběhu tvrdosti od zakalené vrstvy až po nezakalenou strukturu. Průběh tvrdosti se zjišťovalo na základě provedení dvou pásů vtisků metodou dle Vickerse (Obr. 23). Použité zatížení muselo být v rozmezí od HV 0,1 (0,98 N) do HV 1 (9,8 N)



Obr. 23 - Schéma umístění vtisků v pásu [28]

Po změření průběhu tvrdostí u jednotlivých vzorků byla zdokumentována mikrostruktura zakalených vrstev a jádra vzorků na mikroskopu NEOPHOT 32 (Obr. 24). Úprava snímků mikrostruktur se prováděla v počítačovém programu NIS-Elements. Ke každému laserově kalenému vzorku bylo pořízeno celkem devět fotografií, protože se zachycovaly snímky z jádra materiálu a obou kalených vrstev. Ke každému typu struktury se následně pořizovaly snímky ve třech různých zvětšeních. Vzhledem k obsáhlosti výstupních dat a množství fotografií bude následně podrobně popsán průběh měření jen u vzorku č. 16. Výsledky měření ostatních vzorků budou dále vyhodnoceny pouze formou tabulek. Veškeré naměřené hodnoty a fotografie jsou uvedeny v příslušných přílohách (8.1, 8.2).



Obr. 24 – Mikroskop NEOPHOT 32 [28]

7.4 Výsledky měření tvrdosti a diskuze

7.4.1 Vzorek č. 16 - EN-GJS-500-14

U zakalených vzorků se spolu s průběhy tvrdostí zakalených vrstev měřily i tvrdosti jednotlivých fází mikrostruktury. Hodnota **a [mm]** v pravém sloupci tabulky je vzdálenost prvního vtisku od okraje vzorku při měření průběhu tvrdosti. Výsledné hodnoty tvrdostí fází obsažené v tabulce odpovídají průměru naměřených hodnot, které jsou obsaženy v příloze.

Vtisky prováděné při měření tvrdosti jednotlivých fází byly prováděny náhodně.

Chemické složení testovaného materiálu

Tabulka 13 - Chemické složení vzorku č. 16 [13]

Vzorek	Materiál dle EN-ČSN	Chemické složení (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Sn	Cu	
16	EN-GJS- 500-14	3,05	3,75	0,23	0,023	0,008	0,005	0,013	Mg 0,045

Výsledky tvrdostí jednotlivých fází struktury

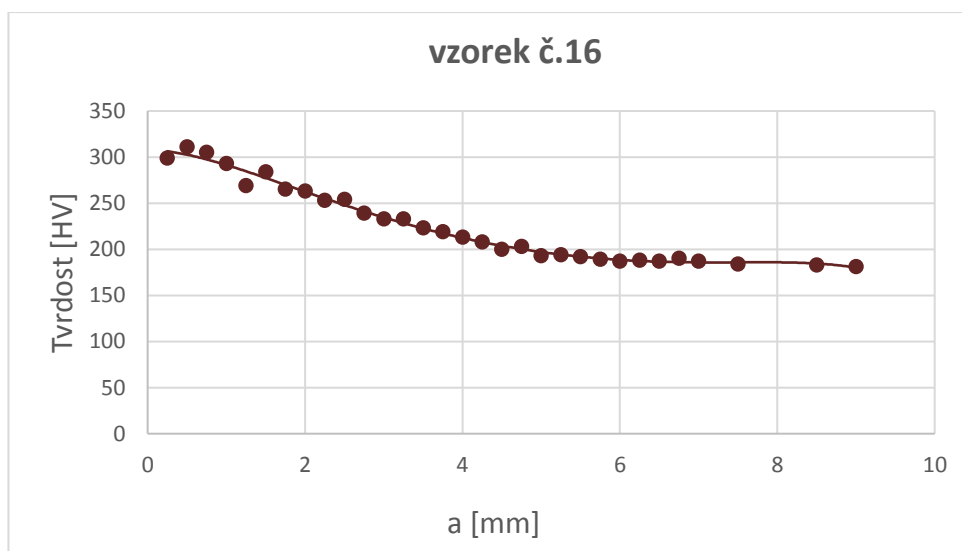
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty tvrdostí fází

Vzorek	Materiál	HV (přepočten)			Tvrdost jádra (měřeno)
16	EN-GJS-500-14	372	372	382	220 HV 0,5
Vrstva	Ferit – HV 0,2	Martenzit - HV 0,2			a [mm]
Laser - malá	231	540			0,4
Laser - jádro	212	-			-
Laser - velká	267	803			0,66
Indukce	301	765			0,25

Po povrchovém zakalení této litiny s došlo k difúznímu vyloučení martenzitu v okolí globulárního grafitu, což má za následek nárůst tvrdosti povrchu. Na rozdíl od indukčně zakalené vrstvy a velké laserově zakalené vrstvy, byla u malé laserově zakalené vrstvy naměřena poměrně nízká hodnota tvrdosti martenzitu. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno malými rozměry oblastí vyloučeného martenzitu, kvůli kterému bylo obtížné provést vtisk indentorem pouze do této tvrdé fáze a pravděpodobně byla zasažena spolu s martenzitem i feritická fáze mikrostruktury.

Průběhy tvrdostí

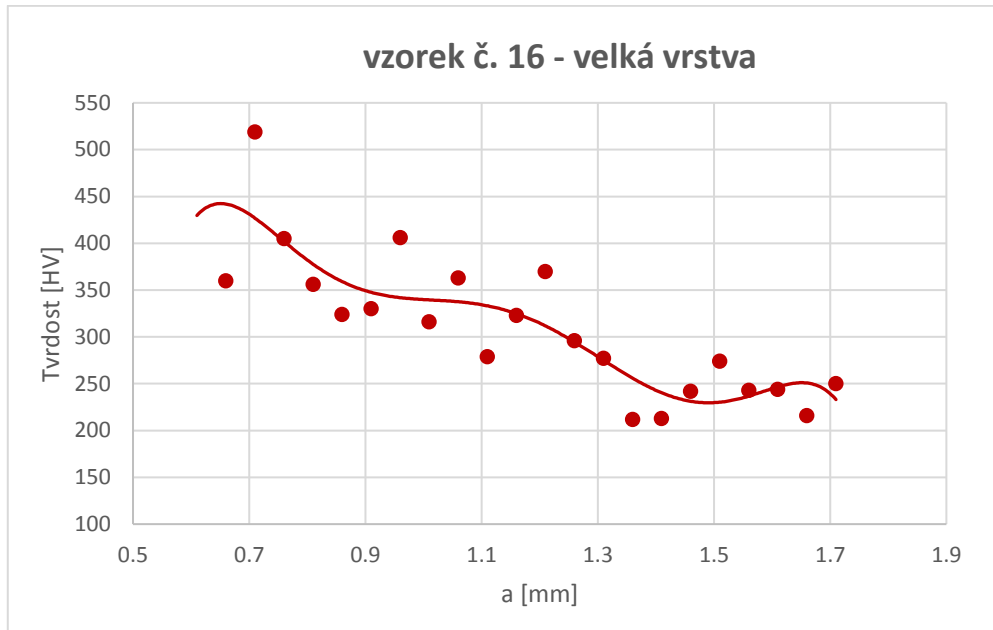
- Indukční kalení



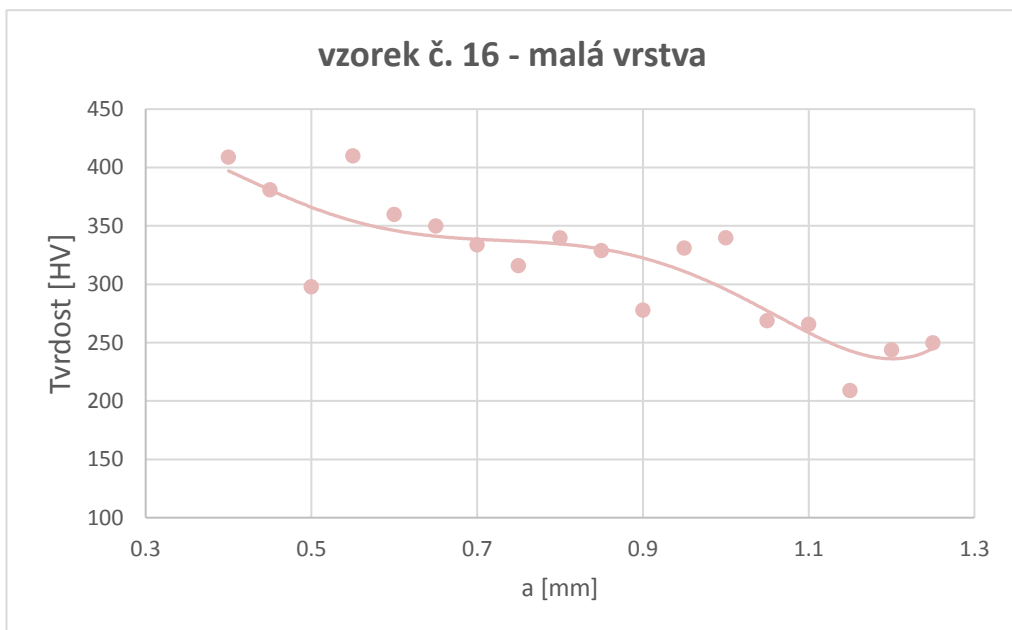
Graf 1 - Průběh tvrdosti indukčně zakalené vrstvy

Z Graf 1 je na první pohled vidět, že naměřený průběh tvrdosti zakalené vrstvy směrem k jádru je plynulý. Je to způsobeno zejména tím, že oblasti martenzitu jsou poměrně velké, a proto nedochází k významnému rozptylu hodnot. Po indukčním zakalení této struktury došlo k nárůstu tvrdosti o cca 100 HV.

- **Laserové kalení**



Graf 2 - Průběh tvrdosti velké laserově zakalené vrstvy

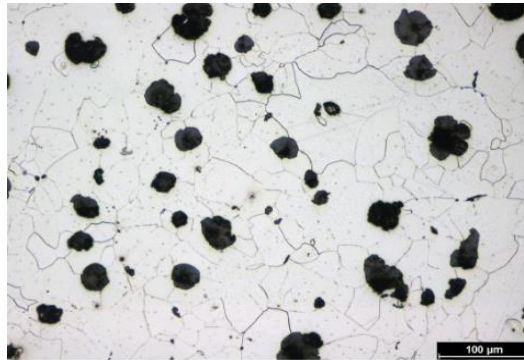


Graf 3 - Průběh tvrdosti malé laserově zakalené vrstvy

U laserově zakalených vrstev byly (Graf 2, Graf 3), oproti indukčně zakalené vrstvě, výraznější rozptyly naměřených hodnot. Tyto rozptyly vznikly vlivem vlačování indentoru do různých fází mikrostruktury (grafit, ferit, martenzit), které mají samy o sobě rozdílnou hodnotu tvrdosti. Další příčina rozptylu hodnot byla několikanásobně menší hloubka zakalené vrstvy, na které se průběh tvrdosti vyhodnocoval.

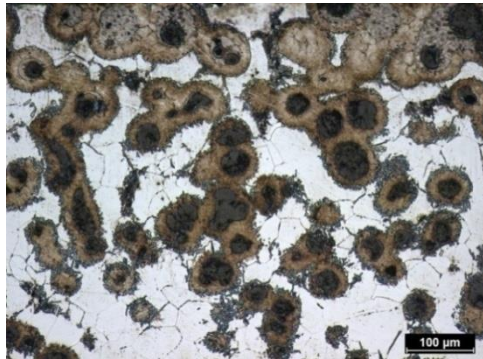
Fotografie mikrostruktury zakalených vrstev a jádra

Na následujícím snímku (Obr. 25) je zobrazena mikrostruktura litiny EN-GJS-500-14 v nezakaleném stavu. Jedná se u litinu s kuličkovým grafitem, která má v nezakaleném stavu feritickou matici.

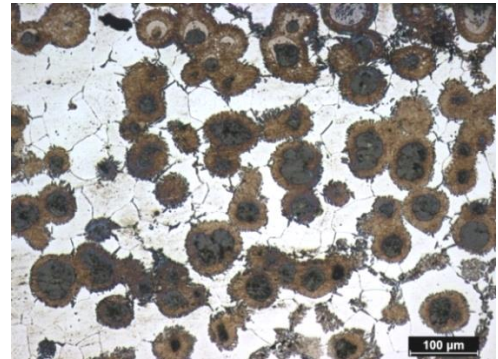


Obr. 25 - vzorek č. 16 - jádro (přehled)

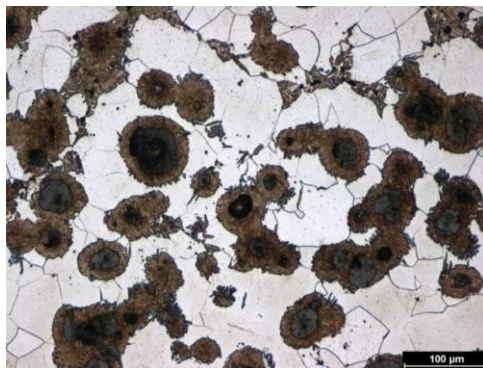
Na níže uvedených snímcích (Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28) je zobrazena mikrostruktura litiny EN-GJS-500-14 již po povrchovém zakalení. Tyto snímky jsou si navzájem velice podobné. Z fotografií je patrné, že po zakalení došlo k vyloučení martenzitu v okolí globulárního grafitu. Martenzitu odpovídají na fotografiích hnědé plošky a vrstvy okolo grafitových zrn. Ostatní vzorky litin s kuličkovým grafitem vykazují obdobné strukturní projevy (Příloha 8.2).



Obr. 26 - vzorek č.16m - laserově zakalená vrstva



Obr. 27 - vzorek č. 16v - laserově zakalená vrstva



Obr. 28 - vzorek č. 16 - indukčně zakalená vrstva

7.4.2 Porovnání výsledků tvrdostí fází mikrostruktury všech vzorků

Naměřené tvrdosti jednotlivých fází

Výsledky měření tvrdostí jednotlivých fází matrice v zakalených vrstvách a jádru hodnocených litin je uvedeno v tabulce 15 a 16.

Tabulka 15 - Tvrdosti fází laserově zakalených vzorků

vzorek	Ferit	Ferit - SMO	Martenzit	Martenzit - SMO
3j	230	35	-	-
3m	300	17	818	73
3v	278	37	769	71
7j	174	21	-	-
7m	221	20	434	54
7v	223	13	681	94
16j	212	20	-	-
16m	261	10	540	135
16v	267	16	803	52
vzorek	Perlit	Perlit – SMO	Martenzit	Martenzit-SMO
4j	285	26	-	-
4m	556	56	747	55
4v	551	44	760	72

- Použitá měřicí síla / označení tvrdosti pro Ferit a Perlit: **0,2 N (200 g) / HV 0,2**
- Použitá měřicí síla / označení tvrdosti pro Martenzit (vzorek č.7m) : **0,1 N (100 g) / HV 0,1**
- j = jádro; m = malá vrstva; v = velká vrstva
- **SMO** = Směrodatná odchylka

Po laserovém zakalení malých vrstev u vzorků č. 7 a 16 došlo k nárůstu tvrdosti povrchu vlivem vyloučeného martenzitu, avšak hodnoty tvrdostí martenzitu u malých vrstev jsou ve srovnání s tvrdostí martenzitu u velkých vrstev podstatně nižší (Tabulka 15). Je to způsobeno nižším množstvím vyloučeného martenzitu, kde bylo obtížné při měření tvrdosti provést vtisk pouze do této fáze, protože se martenzit vyloučil pouze v okolí globulárního grafitu. S tím jsou spojeny vysoké odchylky tvrdostí martenzitu. Zároveň bylo z těchto důvodů nutné použít pro měření tvrdosti martenzitu u malé vrstvy vzorku č. 7 nižší zatížení. U vzorku č. 3 k tomuto problému nedošlo, díky původní feriticko-perlitické matici litiny. Perlitická struktura snadněji austenitizuje a je zdrojem uhlíku pro martenzitickou přeměnu. V tomto případě tedy bylo snadnější změřit hodnotu tvrdosti martenzitu, protože jeho množství ve struktuře bylo dostačující. U vzorku č. 4 byly po zakalení naměřeny zejména vysoké hodnoty tvrdostí perlitu. Hodnoty tvrdostí martenzitu jsou v tomto případě optimální.

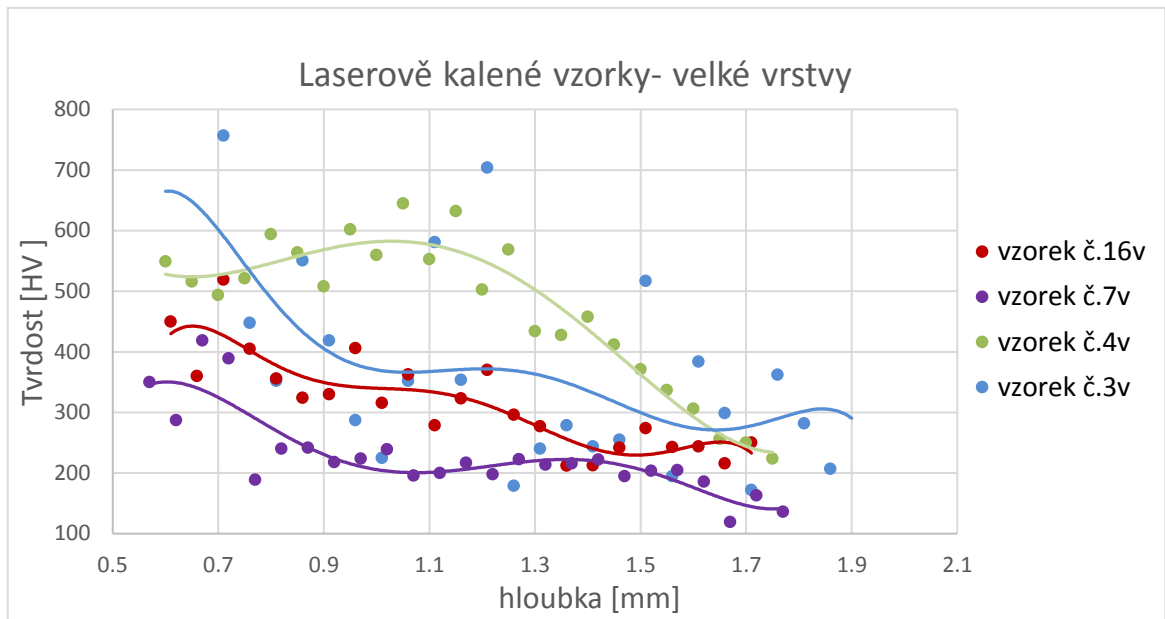
vzorek	Ferit	Ferit - SMO	Martenzit	Martenzit - SMO
3-jádno	320	26	-	-
3-vrstva	383	18	958	50
7-jádno	223	6	-	-
7-vrstva	321	20	877	58
16-jádno	241	9	-	-
16-vrstva	301	22	765	97
vzorek	Perlit	Perlit – SMO	Martenzit	Martenzit-SMO
4-jádno	285	26	-	-
4-vrstva	321	25	941	54

Tabulka 16 - Tvrdosti fází indukčně zakalených vzorků

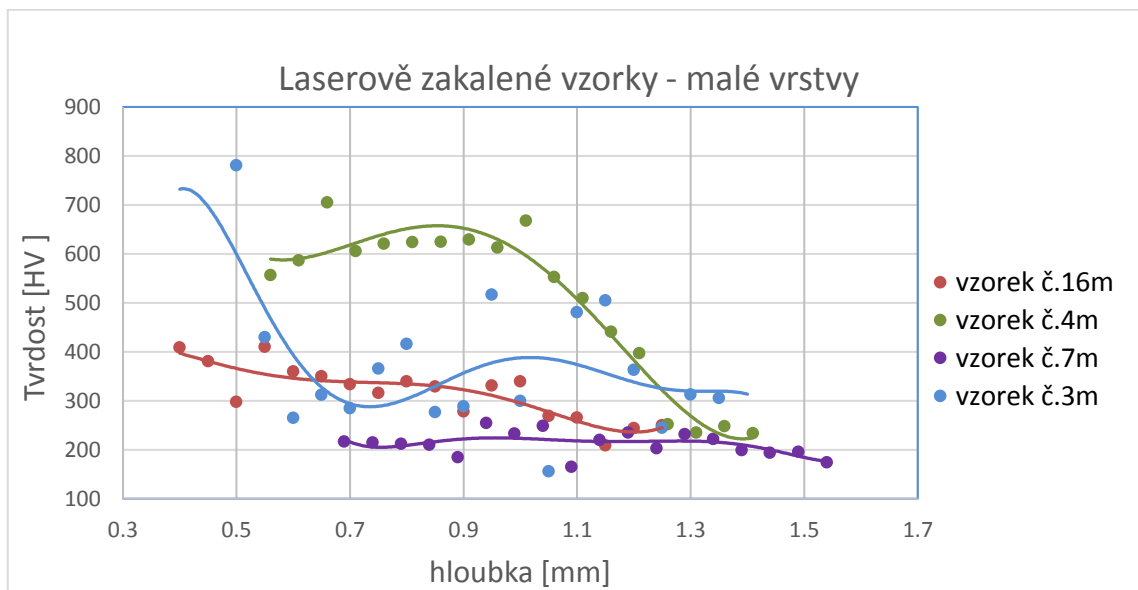
- Použitá měřicí síla / označení tvrdosti pro Ferit a Perlit: **0,05 N (50 g) / HV 0,05**
- Použitá měřicí síla / označení tvrdosti pro Martenzit: **0,1 N (100 g) / HV 0,1**
- **SMO** = Směrodatná odchylka

V případě indukčního kalení dosahovaly hodnoty tvrdostí martenzitu mnohem lepších hodnot oproti laserovému kalení. Nejvyšších hodnot tvrdostí dosáhly vzorky č. 3 a 4, protože mají vhodnější mikrostrukturu pro tvorbu martenzitu. Dobrých výsledků hodnot tvrdosti, s poměrně nízkými odchylkami, dosáhl i vzorek č. 7. Na rozdíl u vzorku č. 16 byly naměřeny hodnoty tvrdostí martenzitu s vysokými odchylkami, které jsou způsobené, stejně jako u laserově zakalených vrstev, heterogenitou zakalené struktury.

7.4.3 Porovnání průběhu tvrdostí všech vzorků



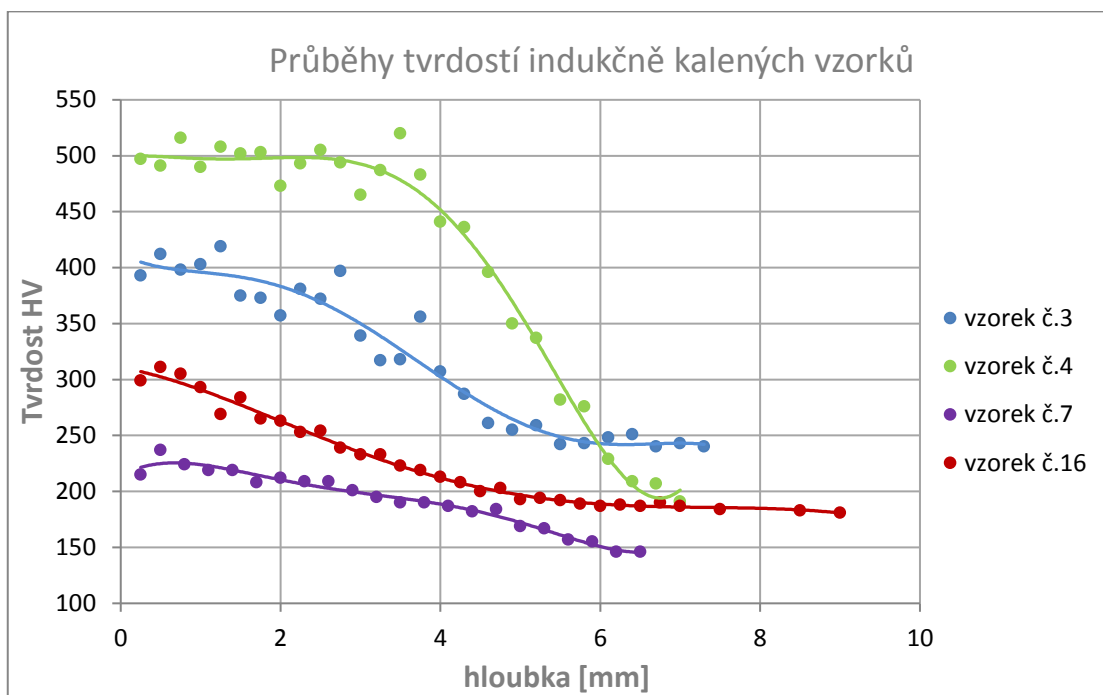
Graf 4 - Porovnání průběhů tvrdostí (velkých) laserově kalených vrstev



Graf 5 - Porovnání průběhů tvrdostí (malých) laserově kalených vrstev

Z porovnání průběhů tvrdostí malých a velkých laserově zakalených vrstev (Graf 4, Graf 5) je patrné, že křivky mají podobný charakter. V obou případech dosahuje nejvyššího nárůstu tvrdosti vzorek č. 4 (cca o 400 HV) a nejnižšího vzorek č. 7 a 16. Vzorek č. 3 vykazuje v obou případech největší rozptyl hodnot, jehož příčinou je heterogenní struktura materiálu.

U velkých laserově kalených vrstev je však na první pohled vidět, že oproti průběhům malých laserově kalených vrstev mají plynulejší průběh. To je s největší pravděpodobností dáno větší hloubkou zakalení.



Graf 6 - Porovnání průběhů tvrdostí indukčně kalených vrstev

V případě indukčně zakalených vrstev (Graf 6) je rozptyl hodnot velmi malý protože se měření provádělo na mnohem větší vzdálenosti a díky tomu jsou průběhy plynulé. Všechny tři grafy se shodují v tom, že průběhy tvrdostí vzorků jsou ve stejném pořadí.

Následující tabulka (Tabulka 17) obsahuje maximální naměřené hodnoty tvrdostí v závislosti na hloubce zakalené vrstvy.

Tabulka 17 - Maximální naměřené hodnoty průběhů tvrdostí

vzorek	HV max	Hloubka [mm]
3 - indukce	419	1,25
3m – laser	781	0,5
3v – laser	757	0,71
4 – indukce	520	3,5
4m – laser	705	0,66
4v – laser	645	1,05
7 – indukce	237	0,5
7m – laser	255	0,94
7v – laser	419	0,67
16- indukce	311	0,5
16m – laser	410	0,55
16v - laser	519	0,71

7.4.4 Diskuze výsledků

Z naměřených hodnot je patrné, že největší vliv na výsledné průběhy tvrdostí má zejména mikrostruktura litiny a způsob vyloučení grafitu. U vzorku č. 16, jehož průběh měření byl blíže specifikován v experimentální části práce, došlo po indukčním i laserovém povrchovém kalení k nárůstu tvrdosti o cca 100 HV. Příčinnou takového nízkého nárůstu tvrdosti byla zejména feritická matrice litiny, ale také způsob vyloučení grafitu a množství vyloučeného martenzitu. Například u malé, laserově zakalené vrstvy byla naměřena poměrně nízká hodnota tvrdosti martenzitu, což bylo s největší pravděpodobností způsobeno malými rozměry oblastí vyloučeného martenzitu, kvůli kterému bylo obtížné provést vpich indentorem přímo do této tvrdé fáze. Z toho důvodu může být naměřená hodnota tvrdosti martenzitu zkreslená. Naopak u větší vrstvy a u indukčně zakalených vrstev byly naměřeny mnohem vyšší hodnoty, odpovídající průměrné hodnotě tvrdosti martenzitu. Podobných výsledků bylo dosaženo i u vzorku č. 7. K významnějšímu nárůstu tvrdosti povrchu (cca o 100 HV) došlo u indukčně kaleného vzorku a vzorku č. 7v, tedy u vzorku, kde byla provedena větší hloubka zakalení. Vyšší hodnoty tvrdosti se pravděpodobně dosáhlo hlubším zakalením, díky kterému vzniklo větší množství martenzitu. Hodnota tvrdosti martenzitu se pak pohybovala nad hranicí 800 HV. Naopak u malé laserově zakalené vrstvy došlo pouze k minimálnímu nárůstu tvrdosti, způsobeným malým množstvím martenzitu. Hodnota tvrdosti martenzitu při zatížení 200g (0,2 N) odpovídala pouze 289 HV. Z toho důvodu bylo použito nižší zatížení, které odpovídalo síle 0,1 N. Při použití nižšího zatížení bylo dosaženo hodnoty tvrdosti martenzitu 434 HV, která se již dala považovat za průkaznou pro tuto fázi.

Nejlepších výsledků dosáhla dle předpokladu litina s lupínkovým grafitem EN-GJS-250 - vzorek č. 4. Tento vzorek vykazoval po laserovém zakalení nárůst tvrdosti o cca 400 HV a po indukčním kalení o cca 300 HV. Takový nárůst tvrdosti je spojen především s jemnou perlitickou strukturou, jež snadněji austenitizuje a je současně zdrojem uhlíku pro martenzitickou přeměnu. Díky těmto vlastnostem se tato litina běžně povrchově kalí. Fotografie mikrostruktury jádra vzorku č. 4 a mikrostruktury po zakalení jsou obsaženy v příloze 8.2. Z fotografií je patrné, že díky perlitické matici došlo po zakalení ke vzniku velkého množství martenzitu a tím i ke zvýšení tvrdosti.

Relativně dobrých výsledků dosáhla i litina EN-GJS-SiMo35-5 – vzorek č. 3. Po indukčním kalení vzrostla tvrdost této litiny cca o 150 HV a po laserovém kalení cca o 200 HV. Nicméně výsledky průběhu tvrdostí po laserovém kalení zejména u litin s kuličkovým grafitem vykazují veliký rozptyl hodnot. Tyto rozptyly vznikly vlivem vtačování indentoru do různých fází mikrostruktury (ferit, perlit, martenzit), jejichž samotné hodnoty tvrdosti jsou značně odlišné. Nejvíce je to patrné právě u laserově zakalených vrstev. V jejich případě je hloubka zakalené vrstvy mnohem menší, než u indukčně zakalené vrstvy. Z toho důvodu se průběh tvrdosti na laserově kalených vzorcích měřil na mnohem kratší vzdálenosti. Vzhledem k menšímu podílu martenzitu je rozptyl hodnot tvrdostí větší a průběh

není tak plynulý, jako je tomu u indukčně zakalené vrstvy. Na snímcích mikrostruktury vzorku č.3, které jsou obsaženy v příloze 8.2 je zobrazena změna mikrostruktury po zakalení. Díky feriticko-perlitické struktuře došlo k vyloučení velkého množství martenzitu především na místech, kde se původně nacházel perlit.

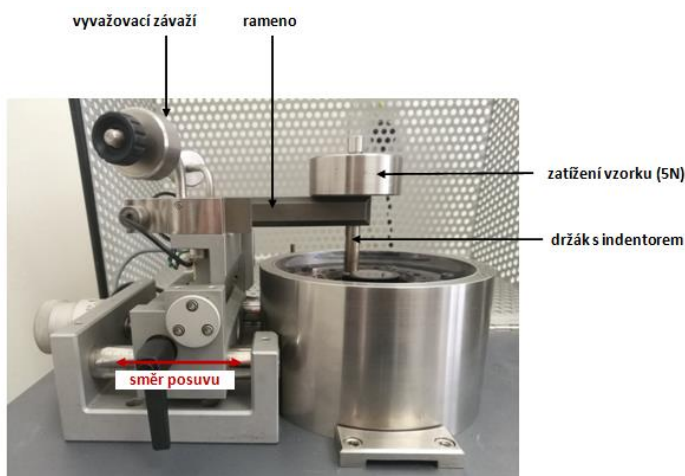
7.5 Měření otěruvzdornosti a koeficientu tření

Měření koeficientu tření jednotlivých vzorků se provádělo na tribometru TRB-S-CE-0000 (Obr. 29). Princip této metody byl již popsán v kapitole 6.2.2.1. Samotné měření se provádělo pouze na indukčně zakalených vzorcích a nezakalených strukturách. Měření na laserově kalených vzorcích se neprovádělo, protože mají dvě nesouměrné zakalené vrstvy a jejich hloubka není dostatečná, jako je tomu u indukčně kalených vzorků.



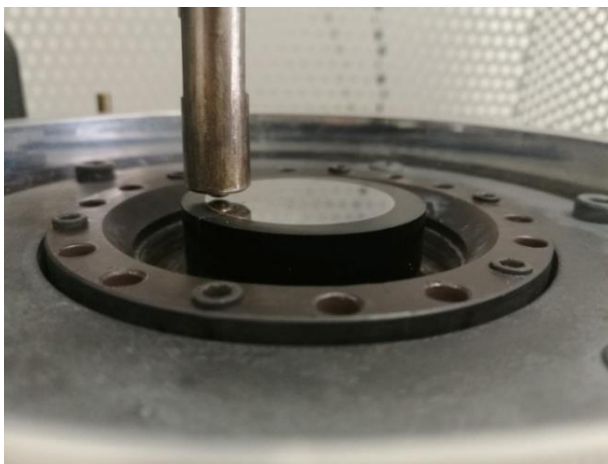
Obr. 29 - Tribometr TRB-S-CE-0000 [28]

Před měřením bylo nutné vzorky zarovnat do stejné výšky na kotoučové pile a očistit je od nečistot, které by mohly ovlivnit výsledky měření. Na očištění povrchu vzorků byl použit aceton. Po očištění se vzorek připevnil na otočnou podložku tribometru. Jelikož tento přístroj nedisponoval vhodným upínacím mechanismem pro tento typ vzorku, musel se vzorek vystředit s osou podložky ručně a následně přilepit vteřinovým lepidlem, aby v průběhu měření nedošlo k jeho vychýlení.



Obr. 30 - Popis součástí tribometru [28]

Po připevnění vzorku bylo třeba vyvážit rameno s držákem indentoru, aby během měření nepůsobil vlastní vahou na vzorek. Po vyvážení se pomocí počítačového programu rameno vyrovnalo do roviny a následně se na něj nasadilo závaží, odpovídající zatížení 5 N (Obr. 30). V poslední řadě bylo potřeba nastavit polohu indentoru posuvným pohybem tak, aby se v místě dotyku nacházel v zakalené vrstvě (Obr. 31). Indentorem byla v našem případě kalená ocelová kulička o průměru 6 mm.



Obr. 31 - Poloha indentoru v zakalené vrstvě [28]

Po upevnění vzorku a seřízení ramene s indentorem do správné polohy se v počítačovém programu nastavily vstupní parametry měření. Tyto parametry jsou obsaženy v následující tabulce (Tabulka 18).

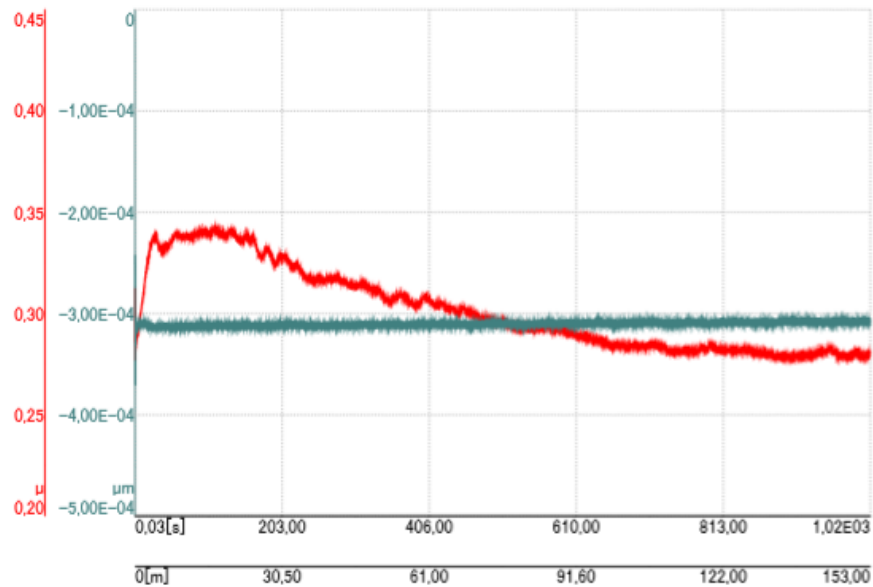
Tabulka 18 - Vstupní parametry měření

Vstupní parametry měření	
Lineární rychlost [cm/s]	15,0
Normálové zatížení [N]	5
Poloměr [mm]	12,0
Frekvence snímaných hodnot [Hz]	20,0
Pracovní teplota [°C]	20
Vlhkost vzduchu [%]	60,0

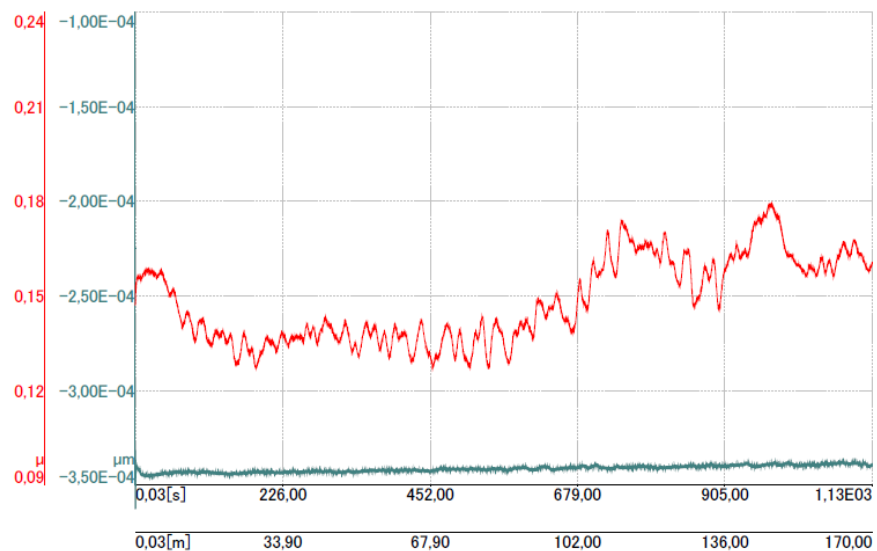
7.6 Výsledky otěruvzdornosti a měření koeficientu tření

7.6.1 Vzorek č. 16 - EN-GJS-500-14

Hodnoty koeficientu tření mezi indukčně zakaleným litinovým vzorkem a kalenou ocelovou kuličkou byly zaznamenávány v průběhu měření, které trvalo přibližně 15 minut. Výsledkem měření byl graf závislosti koeficientu tření a hloubky otěru na vzdálenosti (Graf 7), ze kterého se zaznamenala maximální, minimální a průměrná hodnota koeficientu tření.



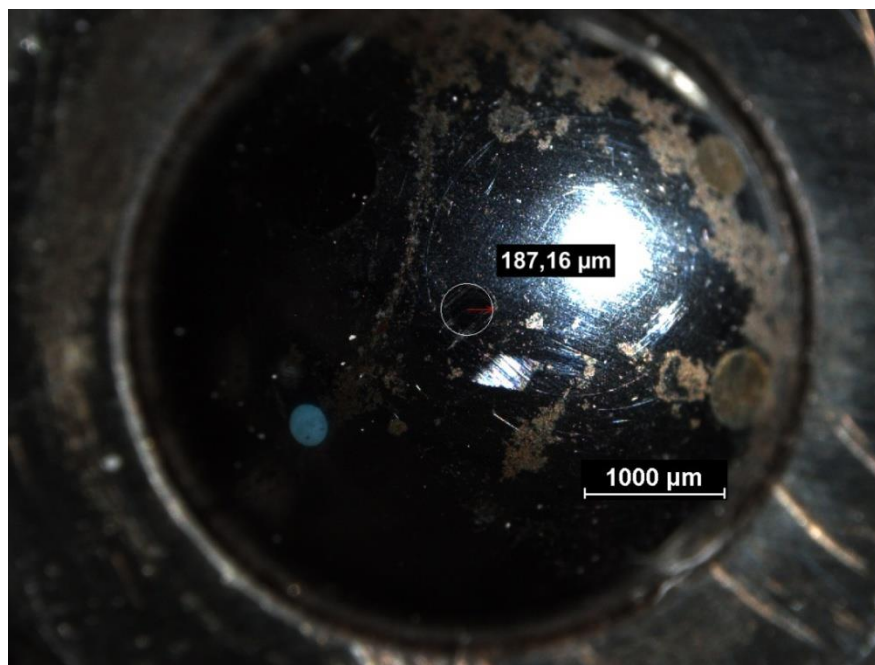
Graf 7- Vzorek č. 16A - Závislost koeficientu tření a hloubky otěru na vzdálenosti



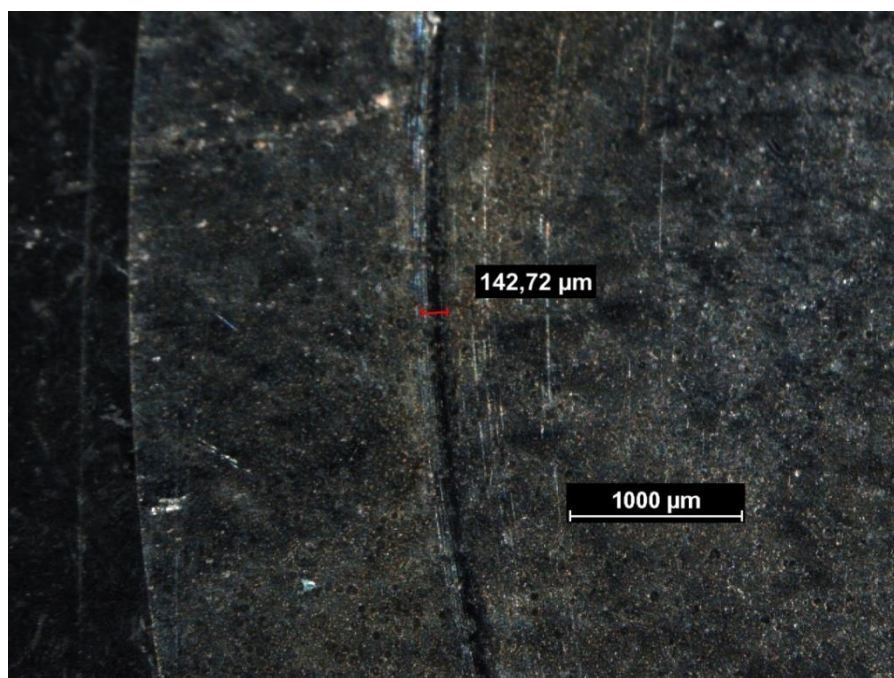
Graf 8 - Vzorek č. 16B - Závislost koeficientu tření a hloubky otěru na vzdálenosti

Z těchto závislostí je patrné, že vyšší hodnoty koeficientu tření vykazuje vzorek č. 16A (indukčně zakalená struktura). Průměrné, minimální a maximální hodnoty koeficientů tření jsou zaznamenány v Tabulka 21.

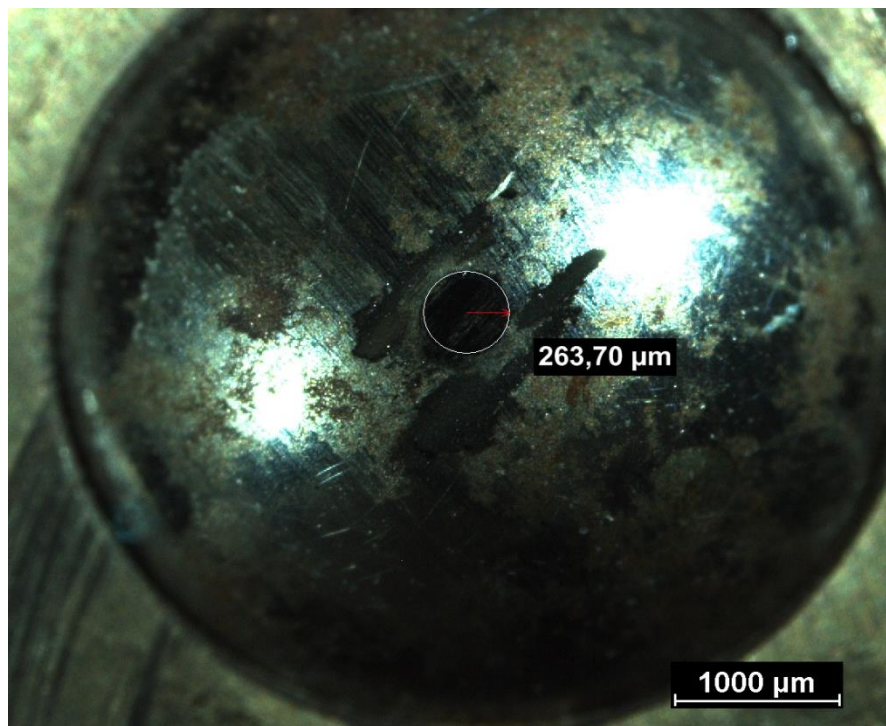
Po dokončení měření zůstala na povrchu vzorku vybroušená stopa od indentoru (Obr. 33, Obr. 35). Stejně jako na povrchu vzorku, i na ocelové kuličce (indentoru) zůstala po měření vybroušená plocha kruhového tvaru (Obr. 34). Velikosti vybroušených stop byly následně vyfotografovány a změřeny pomocí programu NIS-Element, který byl použit již na fotografování mikrostruktur v první části experimentu. Z těchto snímků byla následně vyhodnocována otěruvzdornost litinového vzorku.



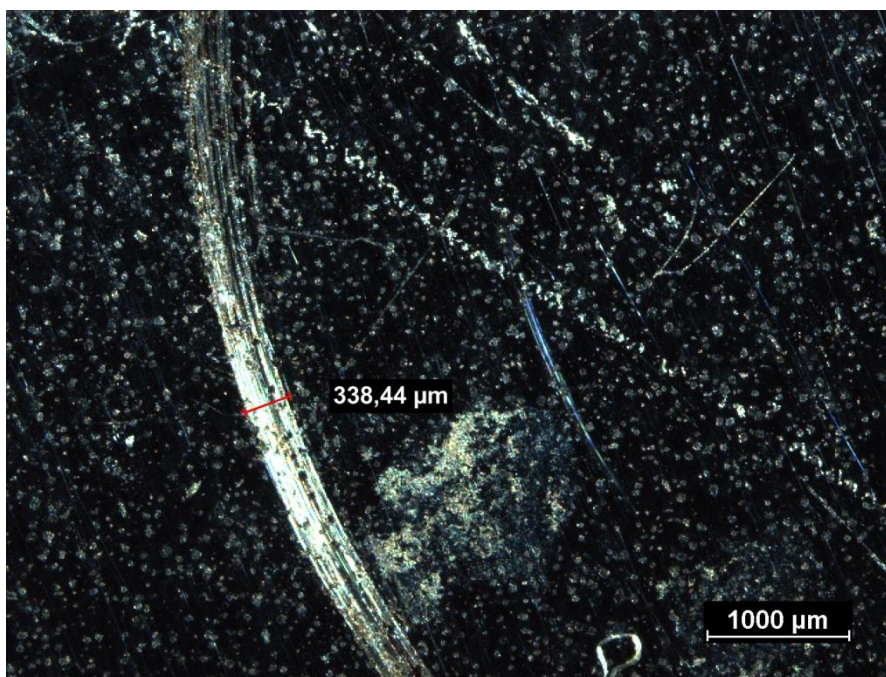
Obr. 32 – Vzorek č. 16A - Detail otěru kuličky



Obr. 33 – Vzorek č. 16A - Detail vybroušené stopy



Obr. 34 – Vzorek č. 16B – Detail otěru kuličky



Obr. 35 – Vzorek č. 16B – Detail vybroušené stopy

7.6.2 Porovnání výsledků měření všech vzorků metodou PIN-ON-DISK

Základní vstupní parametry a podmínky měření byly pro všechny vzorky stejné. Veškeré fotografie otěrů a výsledky koeficientů tření jsou obsaženy v přílohách (8.3 ,8.4).

Tabulka 19 - Parametry a podmínky měření

Parametry měření	
Lineární rychlost [cm/s]	15,0
Normálové zatížení [N]	5
Snímací frekvence [Hz]	20,0
Indentor	
Materiál indentoru	Kalená ocel 100Cr6
Tvrdość indentoru [HV]	cca 750
Geometrie indentoru	Kulička
Průměr indentoru [mm]	6
Prostředí	
Teplota [°C]	20,0
Vlhkost [%]	60,0

V následujících tabulkách (Tabulka 20, Tabulka 21) jsou uvedeny parametry a výsledky měření zakalených i nezakalených vzorků. Porovnání těchto výsledků a bližší komentář je obsažen v diskuzi výsledků 7.6.3

Tabulka 20 - Charakteristika vzorků a výsledné hodnoty otěruvzdornosti

Vzorek	Charakteristika měřených vzorků					Parametry měření - Pin on Disk	
	materiál	Tvrdość jádra	Tvrdość vrstvy HV			Koncový stav [m]	Poloměr [mm]
3A	EN-GJS-SiMo35-5	150 HV 0,5	498	454	473	228	12,1
3B	EN-GJS-SiMo35-5	150 HV 0,5	-			152,68	4,4
4A	EN-GJL-250	220 HV 0,5	560	317	520	152,68	9,4
4B	EN-GJL-250	220 HV 0,5	-			152,68	8,6
7A	EN-GJS-400-18	145 HV 0,5	279	236	296	152,68	10,7
7B	EN-GJS-400-18	145 HV 0,5	-			222,94	7,1
16A	EN-GJS-500-14	220 HV 0,5	372	187	143	152,68	12
16B	EN-GJS-500-14	220 HV 0,5	-			169,56	5,4

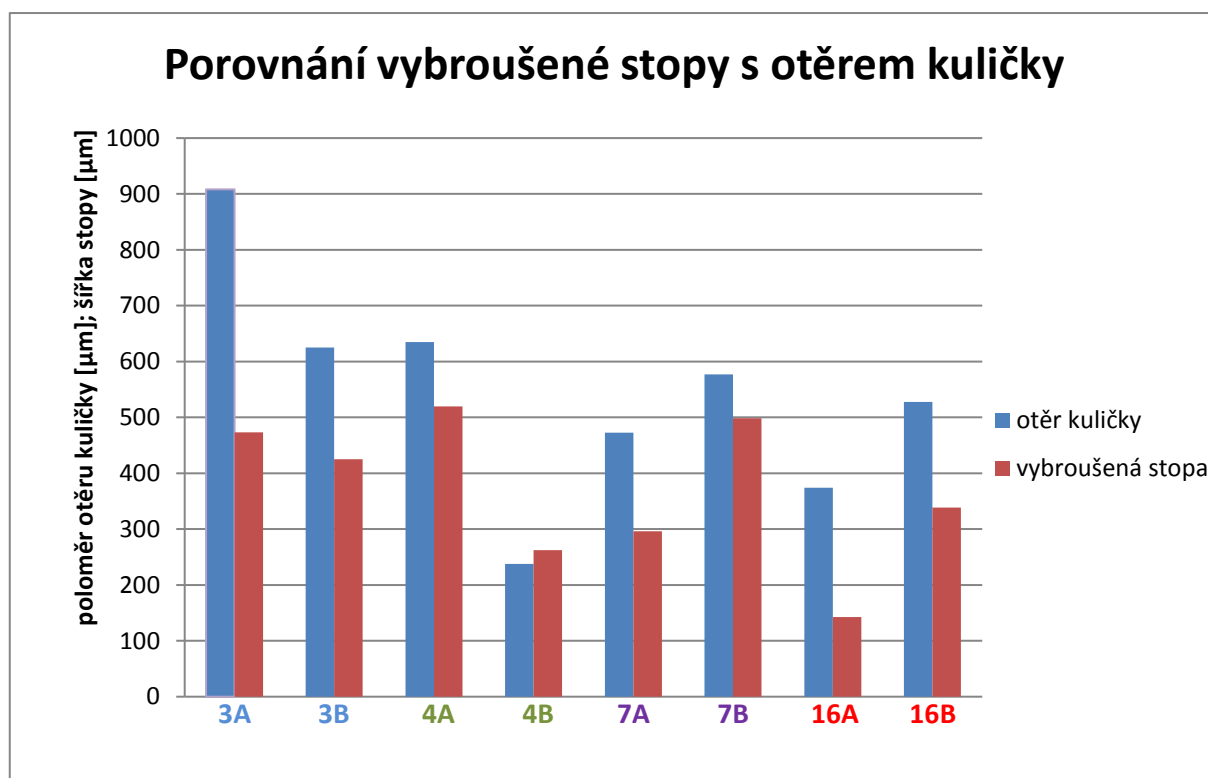
- Vzorky označené písmenem **A** jsou indukčně zakalené
- Vzorky označené písmenem **B** jsou nezakalené

Tabulka 21 - Naměřené hodnoty koeficientů tření a parametry měření

vzorek	Koeficient tření					Otěruvzdornost	
	průměr	start	min	max	odchylka	otěr kuličky - \varnothing [μm]	šířka stopy [μm]
3A	0,912	0,539	0,413	1,088	0,099	908,22	473,43
3B	0,580	0,169	0,110	0,812	0,105	625,32	424,93
4A	0,363	0,420	0,252	0,524	0,092	634,68	519,53
4B	0,271	0,506	0,247	0,506	0,021	237,94	262,54
7A	0,531	0,349	0,319	0,606	0,041	472,62	295,99
7B	0,097	0,072	0,059	0,166	0,028	576,98	498,17
16A	0,301	0,286	0,277	0,343	0,021	374,32	142,72
16B	0,148	0,147	0,127	0,179	0,013	527,4	338,44

- Vzorky označené písmenem **A** jsou indukčně zakalené
- Vzorky označené písmenem **B** jsou nezakalené

Pro snadnější porovnání rozměrů vybroušených stop a otěrů indentoru je v následujícím grafu uvedeno grafické znázornění výsledků (Graf 9).



Graf 9 - Grafické znázornění výsledků otěruvzdornosti

7.6.3 Diskuze výsledků

Z výsledků měření koeficientu tření a otěruvzdornosti litinových vzorků bylo zjištěno, že vytvrzení povrchové vrstvy indukčním kalením vede oproti předpokladům k nárůstu koeficientu tření zjištěným metodou Pin-On-Disk. Nejvyšší naměřená hodnota u vzorku č. 3A byla s největší pravděpodobností ovlivněna vnějším faktorem. Průměrná hodnota koeficientu tření (ocel-litina v nezakaleném stavu) by se měla pohybovat v rozmezí 0,25 – 0,4. Naproti tomu nejnižší hodnotu koeficientu tření v zakaleném stavu vykazoval vzorek č. 16A – EN-GJS-500-14. Největší rozdíl mezi zakaleným a nezakaleným stavem dosahuje vzorek 7 - GJS-400-18. Naopak nejnižšího rozdílu bylo dosaženo v případě vzorku 4 (EN-GJL-250).

Opotřebení zjišťované na vzorku a na kuličce se pro zakalený a nezakalený materiál mění. U vzorků č. 7 – GJS-400-18 a č. 16 – EN-GJS-500-14 došlo po indukčním zakalení povrchu ke snížení opotřebení povrchu vzorku. U litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-250, vzorku č. 4, byla vybroušená stopa na nezakalené struktuře srovnatelně velká s průměrem vybroušené stopy na kuličce. Po zakalení struktury došlo téměř k trojnásobnému opotřebení kuličky, šířka vybroušené stopy také výrazně vzrostla kuličky. U vzorku 3 byl rovněž zjištěn pro zakalený stav nárůst opotřebení jak vzorku, tak kuličky, avšak rozdíl není tak výrazný, jako v případě vzorku 4. Opotřebení kuličky je pro tento vzorek nejvyšší. Nejnižší rozdíl byl zjištěn pro vzorek 7. Změna ve velikosti opotřebení stopy je největší pro vzorek 4 a nejmenší u vzorku 3.

Vzhledem k tomu, že se jedná o experimentální materiál (laboratorní tavby) a jeho množství dovolovalo provedení pouze jednoho měření, je tyto výsledky třeba považovat za informativní a bylo by třeba je statisticky ověřit.

Vhodným řešením by bylo provedení zakalení rovinných vzorků, což by umožnilo měřit bez rozměrového omezení hloubkou stopy a mohly by být hodnoceny i vzorky po laserovém kalení.

Jelikož se ve výsledcích objevují protichůdné trendy v opotřebení, bylo by vhodné provést detailnější analýzu stop po provedených testech s využitím profilometru a elektronové řádkovací mikroskopie.

Rozdíly v chování jednotlivých litin mohou souviset s vydrolováním grafitu a následně pak tvrdých martenzitických útvarů, jež pak mohou průběh opotřebení významně ovlivnit svým abrazivním účinkem.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnotit tribologické vlastnosti litin po povrchovém indukčním a laserovém kalení. Bakalářská práce je rozdělena na dvě základní části. Nejprve na část teoretickou, která popisuje problematiku litin, povrchového kalení a tribologie a následně na část experimentální, která obsahuje průběh a vyhodnocení tribologických zkoušek provedených na několika litinových vzorcích.

V úvodu teoretické části byla podrobně popsána charakteristika litin spolu s jejich jednotlivými druhy, které byly použity v experimentální části práce. Zároveň byla popsána charakteristika základní kovové hmoty a chemického složení. Těmto kapitolám byla věnována velká pozornost, jelikož tyto faktory výrazně ovlivňují nejen mechanické ale i tribologické vlastnosti litin. Větší pozornost byla věnována účinku křemíku, jelikož v experimentální části práce byly použity vzorky právě s jeho zvýšeným obsahem. V další kapitole byla shrnuta problematika povrchového kalení, ve které byl popsán princip laserového a indukčního kalení, protože tyto technologie byly použity k vytvrzení povrchu zkoumaných vzorků. Poslední kapitola teoretické části se zabývá tribologií, tribologickými vlastnostmi a jejich zkoušením. Tribologie je komplexní vědní obor, který se zabývá problematikou tření, mazání a povrchovými vlastnostmi materiálů. Vzhledem k předmětu experimentální části této bakalářské práce byla tato kapitola zaměřena zejména na tvrdost, otěruvzdornost a jejich zkoušení. Zároveň zde byly popsány jevy a činitelé bezmezně související s problematikou tribologie.

Experimentální část se věnovala měření průběhů tvrdosti a otěruvzdornosti laserově a indukčně povrchově zakalených vzorků. Měření tvrdosti se provádělo metodou dle Vickerse, protože se jedná o nepřesnější metodu vyhodnocování tvrdosti. Z výsledků měření tvrdosti lze konstatovat, že nejlepší výsledky vykazuje litina s lupínkovým grafitem EN-GJL-250. Oproti litinám s kuličkovým grafitem dosahuje nejlepšího poměru nárůstu tvrdosti a nejnižšího rozptylu naměřených hodnot. Tento typ litiny se díky perlitické struktuře běžně tepelně zpracovává, tudíž byl tento výsledek předpokládán. Hodnota tvrdosti litin EN-GJS-400-18 a EN-GJS-500-14 vzrostla pouze cca o 100 HV. Příčinnou je téměř čistě feritická matrice, ve které se po zakalení vyloučil martenzit pouze v okolí grafitu. U litiny EN-GJS-SiMo35-5 došlo nárůstu tvrdosti o cca 150 HV, avšak zejména u laserově kalených vrstev došlo k velikému rozptylu hodnot tvrdostí, jehož příčinnou je heterogenní struktura a relativně malé útvary martenzitu.

Měření koeficientu tření a otěruvzdornosti se provádělo na tribometru metodou Pin-On-Disk. Tato laboratorní metoda se pro vyhodnocování koeficientu tření mezi dvěma materiály a vyhodnocování odolnosti proti otěru používá nejvíce. Vyhodnocování se provádělo pouze na nezakalených a indukčně kalených vzorcích.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že po vytvrzení povrchu pomocí indukčního se změnila odolnost proti otěru u všech měřených vzorků. Současně vzrostla i hodnota koeficientu tření mezi ocelovou kuličkou a povrchovou vrstvou litiny. Největší nárůst odolnosti vůči opotřebení byl vyzorován u litin EN-GJS-400-18, EN-GJS-500-14 a u litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-250. Bližší specifikace výsledků je obsažena v příslušných diskuzích experimentální části práce.

Seznam použité literatury

- [1] - NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [2]- OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem*. Monografie, Metal Casting and Foundry Consult, Otahal Consult Brno, 1. vydání, Brno, 2006, 562
- [3] - *Rovnovážný diagram Fe-Fe₃C* [online]. In.: Dostupné z: <http://konstrukce.webz.cz/sups/2too2.html>
- [4] - ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [5] - ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] - ČSN 42 0461. *Hodnocení metalografické struktury litin*. Praha: Český normalizační institut, 1978
- [7] - Struktura a vlastnosti grafitických litin: Feriticko-perlitická struktura. In: *Archive.today* [online]. Dostupné z: <http://archive.is/zpIVJ>
- [8] - Struktura a vlastnosti grafitických litin: Perlitická struktura. In: *Archive.today* [online]. Dostupné z: <http://archive.is/zpIVJ>
- [9] - Ferrit. In: *GiessereLexikon* [online]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/giessereilexikon/Encyclopedia/show/ferrit-138/>
- [10] - OTÁHAL, Vlastislav. *Šedá litina, litina s lupínkovým grafitem*. Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2007
- [11] - VÍTEK, Radovan. *Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem vyrobené metodou Tundish a procesem Initek* [online]. Brno, 2003. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63697. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [12] - POSPÍŠILOVÁ, Simona a Bohumil PACAL. SlidePlayer. *SlidePlayer: Základní druhy litin* [online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2802025/>
- [13] - Materiály poskytl Ústav materiálového inženýrství ČVUT
- [14] - SCHOŘOVÁ, Miroslava. *Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl* [online]. Liberec, 2008. Dostupné z:

https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2497/bc_14778.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing Iva Nová, Csc.

[15] - OTÁHAL, Vlastislav. *OtahalConsult: Metal Casting and Foundry Consult* [online]. Brno. Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/litiny/litina-kopaktni-grafit/>

[16] - MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN isbn80-01-01507-6.

[17] - NOVÁ, Iva, Jan ŠMRHA, Iva NOVÁKOVÁ a Jiří MORÁVEK. *Výroba litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku pro automobilový průmysl = Production of spheroidal graphite cast iron with higher silicon content for automotive industry. Slévárenství*. 2009, **57(11)**, 391-396. ISSN 0037-6825

[18] - *Povrchové kalení litiny výkonovým polovodičovým laserem* [online]. Brno, 2015 . Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102886. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

[19] - NĚMEČEK, Stanislav a Tomáš MUŽÍK. *Tribotechnika* [online]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22013/laserove-kaleni-ozubenych-kol.html>

[20] - *Lokální mechanické vlastnosti laserově modifikovaných žárových nástřiků* [online]. Plzeň, 2016. Dostupné také z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/25242/1/BP_Stanislav_Rybar.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Olga Bláhová, Ph.D.

[21] - Induction Hardening. *Machine Tools: Principal Methods* [online]. Dostupné z: <http://admachinetools.in/index.php/services/principal-methods-induction-hardening/>

[22] - OBRUČNÍK, Daniel. *Tribologické hodnocení třecích dvojic dílců odstředivých čerpadel*: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 51, příloh 5. Ing. Karel Osička.

[23] - Termomechanika technologických procesů: Tribologické charakteristiky. *Nové technologie, Výzkumné centrum západočeské univerzity v Plzni* [online]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/tribologie/charakteristiky>

[24] - Strojírenství: Měření tvrdosti. *ELUC* [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1569>

[25] - *Zkoušky tvrdosti* [online]. In.: Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf

[26] - *Element: Abrasion Testing Explained* [online]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/abrasion-testing-explained>

[27] – Autor fotografie: Eva Horká

[28] - HÁJEK, Jiří a Antonín KŘÍŽ. *Tribologická analýza „PIN-on-DISC“* [online]. Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2005/sbornik/papers/70.pdf>

- [29] - HÁJEK, Jiří. *Tribologická analýza „PIN-on-DISC“* [online]. Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf
- [30] - Tribology used to Compare Rotative Wear and Linear Wear. *AZONANO* [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4708>
- [31] - ČSN 42 0961. *Slévárenství - Otěruvzdorné litiny*. Praha: Český normalizační institut, 2002
- [32] - HÝBAL, O. *Slévárenské technologie z pohledu rozměrové přesnosti odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 38 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [33] - JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [34] - Study of wear of as-cast and heat-treated spheroidal graphite cast iron under dry sliding conditions. *ScienceDirect* [online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0043164895066055>
- [35] - *Roymechx* [online]. Dostupné z: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_friect.htm
- [36] - Materiály poskytla firma LaserTherm
- [37] – Materiály poskytla firma Martenzit
- [38] - Metalografie - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem. *SŠ-COPT* [online]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=31415&revision=-1&instance=2>

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1 - Rovnovážné diagramy Fe – C a Fe – Fe ₃ C [3]	- 11 -
Obr. 2 - Tvar grafitu [6].....	- 13 -
Obr. 3 - Rozložení grafitu [6]	- 13 -
Obr. 4 – a) feriticko-perlitická struktura, b) perlitická struktura, c) feritická struktura [7,8,9]	- 14 -
Obr. 5 – osa míry grafitzace chemických prvků [4]	- 18 -
Obr. 6 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-400-18 [13]	- 21 -
Obr. 7 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-500-14 [13]	- 22 -
Obr. 8 – Mikrostruktura litiny EN-GJS-SiMo35-5 [13].....	- 23 -
Obr. 9 - Mikrostruktura litiny EN-GJL-250 [13]	- 24 -
Obr. 10 - Vliv křemíku na stabilní a metastabilní rovnovážný diagram Fe-C [17].....	- 27 -
Obr. 11 - rovnovážný diagram Fe-C-2%Si [4]	- 28 -
Obr. 12 - Austenitizační teplota [19].....	- 31 -
Obr. 13 - princip laserového kalení [21].....	- 34 -
Obr. 14 - Princip povrchového indukčního kalení [22]	- 35 -
Obr. 15 – Tribologické procesy [23]	- 36 -
Obr. 16 – Schéma Vickersova indentoru [25]	- 39 -
Obr. 17 - Deformace vtisku – A) nezpevněný materiál, B) zpevněný materiál [26].....	- 40 -
Obr. 18 – držák s „PIN“ tělískem [28].....	- 41 -
Obr. 19 - Schéma měření [30].....	- 42 -
Obr. 20- Příprava vzorků [39].....	- 47 -
Obr. 21 – Mikrotvrdoměr LECO-M-400-G1 [28]	- 48 -
Obr. 22 - detail měření na mikrotvrdoměru [28].....	- 49 -
Obr. 23 - Schéma umístění vtisků v pásu [28].....	- 49 -
Obr. 24 – Mikroskop NEOPHOT 32 [28]	- 50 -
Obr. 25 - vzorek č. 16 - jádro (přehled).....	- 53 -
Obr. 26 - vzorek č.16m - laserově zakalená vrstva.....	- 53 -
Obr. 27 - vzorek č. 16v - laserově zakalená vrstva	- 53 -
Obr. 28 - vzorek č. 16 - indukčně zakalená vrstva.....	- 53 -
Obr. 29 - Tribometr TRB-S-CE-0000 [28].....	- 59 -
Obr. 30 - Popis součástí tribometru [28].....	- 59 -
Obr. 31 - Poloha indentoru v zakalené vrstvě [28]	- 60 -
Obr. 32 – Vzorek č. 16A - Detail otěru kuličky	- 62 -
Obr. 33 – Vzorek č. 16A - Detail vybroušené stopy.....	- 62 -

Obr. 34 – Vzorek č. 16B – Detail otěru kuličky.....	- 63 -
Obr. 35 – Vzorek č. 16B – Detail vybroušené stopy.....	- 63 -
Obr. 36 – Vzorek č. 3 - jádro.....	- 83 -
Obr. 37 – Vzorek č.3m – laserově zakalená vrstva.....	- 83 -
Obr. 38 – Vzorek č. 3v – laserově zakalená vrstva.....	- 83 -
Obr. 39 – Vzorek č. 3 – indukčně zakalená vrstva.....	- 83 -
Obr. 40 – Vzorek č. 4 – jádro.....	- 84 -
Obr. 41 - Vzorek č.4m - laserově zakalená vrstva.....	- 84 -
Obr. 42 - Vzorek č.4v - laserově zakalená vrstva.....	- 84 -
Obr. 43 – Vzorek č. 4 – indukčně zakalená vrstva.....	- 84 -
Obr. 44 – Vzorek č. 7 - jádro.....	- 85 -
Obr. 45 – Vzorek č. 7m – laserově zakalená vrstva.....	- 85 -
Obr. 46 - Vzorek č. 7v - laserově zakalená vrstva.....	- 85 -
Obr. 47 - Vzorek č. 7 - indukčně zakalená vrstva.....	- 85 -
Obr. 48 - Vzorek č. 16 - jádro (přehled).....	- 86 -
Obr. 49 - Vzorek č. 16m - laserově zakalená vrstva.....	- 86 -
Obr. 50 - Vzorek č. 16v - laserově zakalená vrstva.....	- 86 -
Obr. 51 - Vzorek č. 16 - indukčně zakalená vrstva.....	- 86 -
Obr. 52 - Vzorek č. 3A - Detail otěru kuličky.....	- 90 -
Obr. 53 - Vzorek č. 3A - Detail vybroušené stopy.....	- 90 -
Obr. 54 - Vzorek č. 3B - Detail otěru kuličky.....	- 91 -
Obr. 55 - Vzorek č. 3B - Detail vybroušené stopy.....	- 91 -
Obr. 56 - Vzorek č. 4A - Detail otěru kuličky.....	- 92 -
Obr. 57 – Vzorek č. 4A – Detail vybroušené stopy.....	- 92 -
Obr. 58 - Vzorek č. 4B - Detail otěru kuličky.....	- 93 -
Obr. 59 - Vzorek č. 4B – Detail vybroušené stopy.....	- 93 -
Obr. 60 - Vzorek č. 7A - Detail otěru kuličky.....	- 94 -
Obr. 61 - Vzorek č. 7A – Detail vybroušené stopy.....	- 94 -
Obr. 62 - Vzorek č. 7B - Detail otěru kuličky.....	- 95 -
Obr. 63 - Vzorek č. 7B – Detail vybroušené stopy.....	- 95 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Mechanické vlastnosti LKG v závislosti na struktuře matrice [12]	- 21 -
Tabulka 2 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-400-18 [13].....	- 21 -
Tabulka 3 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-500-14 [13].....	- 22 -
Tabulka 4 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJS-SiMo35-5 [13]	- 23 -
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti LLG v závislosti na struktuře matrice [12].....	- 24 -
Tabulka 6 - Chemické složení a mechanické vlastnosti litiny EN-GJL-250 [13].....	- 24 -
Tabulka 7 - Mechanické vlastnosti LČG v závislosti na struktuře matrice [12]	- 25 -
Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti temperované litiny s černým a bílým lomem [12].....	- 26 -
Tabulka 9 - Rozsahy zkušebních zařízení při zkoušce dle Vickerse	- 40 -
Tabulka 10 - Parametry laserového kalení [37]	- 46 -
Tabulka 11 - Parametry indukčního středofrekvenčního kalení [38].....	- 47 -
Tabulka 12 - Chemické složení vzorků [13].....	- 48 -
Tabulka 13 - Chemické složení vzorku č. 16 [13]	- 50 -
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty tvrdostí fází	- 51 -
Tabulka 15 - Tvrdosti fází laserově zakalených vzorků	- 54 -
Tabulka 16 - Tvrdosti fází indukčně zakalených vzorků	- 55 -
Tabulka 17 - Maximální naměřené hodnoty průběhů tvrdostí.....	- 57 -
Tabulka 18 - Vstupní parametry měření	- 60 -
Tabulka 19 - Parametry a podmínky měření.....	- 64 -
Tabulka 20 - Charakteristika vzorků a výsledné hodnoty otěruvzdornosti.....	- 64 -
Tabulka 21 - Naměřené hodnoty koeficientů tření a parametry měření	- 65 -
Tabulka 22 – Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 4	- 80 -
Tabulka 23 - Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 3.....	- 80 -
Tabulka 24 - Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 7.....	- 81 -
Tabulka 25 - Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 16.....	- 81 -
Tabulka 26 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.3	- 81 -
Tabulka 27 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.4	- 82 -
Tabulka 28 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.7	- 82 -
Tabulka 29 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.16	- 82 -

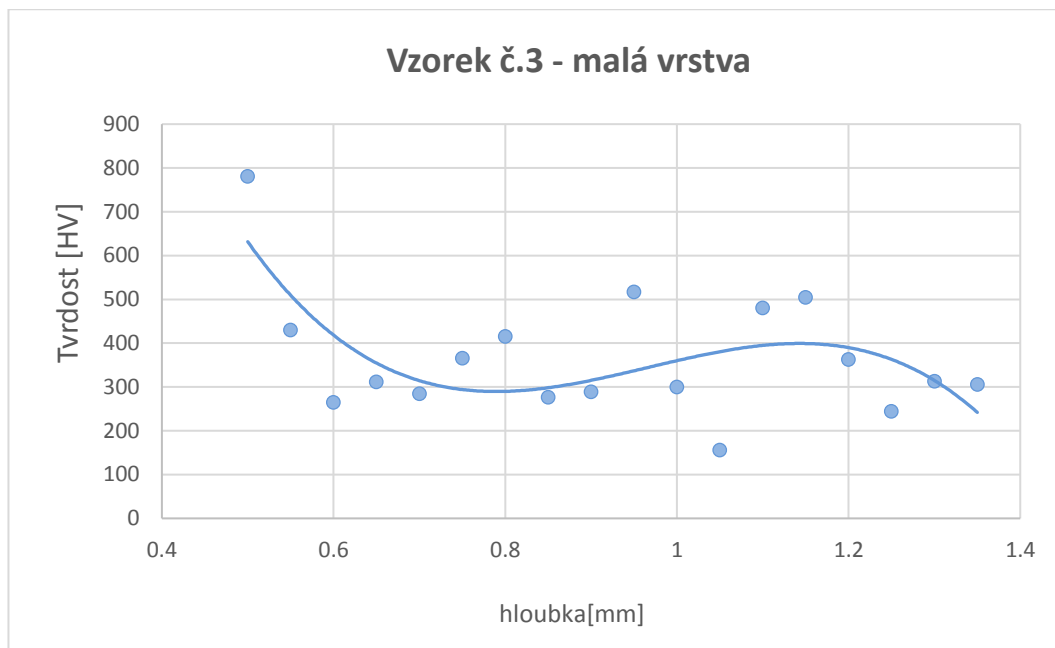
Seznam grafů

Graf 1 - Průběh tvrdosti indukčně zakalené vrstvy	- 51 -
Graf 2 - Průběh tvrdosti velké laserově zakalené vrstvy	- 52 -
Graf 3 - Průběh tvrdosti malé laserově zakalené vrstvy	- 52 -
Graf 4 - Porovnání průběhů tvrdostí (velkých) laserově kalených vrstev	- 56 -
Graf 5 - Porovnání průběhů tvrdostí (malých) laserově kalených vrstev.....	- 56 -
Graf 6 - Porovnání průběhů tvrdostí indukčně kalených vrstev	- 57 -
Graf 7- Vzorek č. 16A - Závislost koeficientu tření a hloubky otěru na vzdálenosti	- 61 -
Graf 8 - Vzorek č. 16B - Závislost koeficientu tření a hloubky otěru na vzdálenosti.....	- 61 -
Graf 9 - Grafické znázornění výsledků otěruvzdornosti.....	- 65 -
Graf 10 – Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3	- 76 -
Graf 11 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3.....	- 76 -
Graf 12 - Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3	- 77 -
Graf 13 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3.....	- 77 -
Graf 14 - Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 7	- 78 -
Graf 15 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 7.....	- 78 -
Graf 16 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 3	- 79 -
Graf 17 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 4	- 79 -
Graf 18 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 7	- 80 -
Graf 19 – Vzorek č. 3A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 87 -
Graf 20 - Vzorek č. 3B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 87 -
Graf 21 - Vzorek č. 4A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 88 -
Graf 22 - Vzorek č. 4B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 88 -
Graf 23 - Vzorek č. 7A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 89 -
Graf 24 - Vzorek č. 7B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti	- 89 -

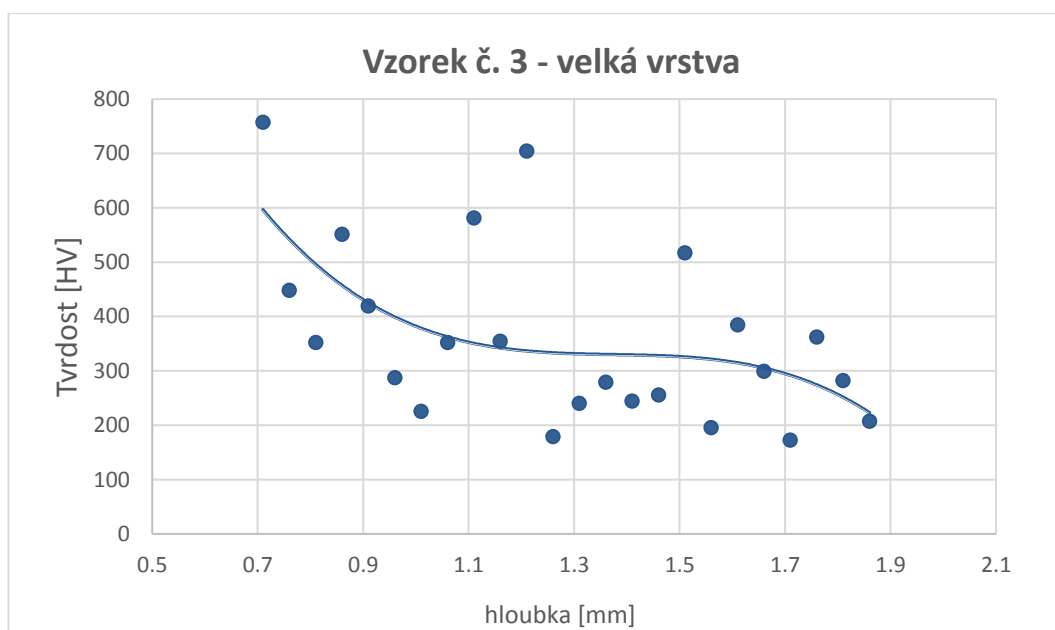
8 Přílohy

8.1 Naměřené průběhy tvrdostí a hodnoty tvrdostí fází mikrostruktur

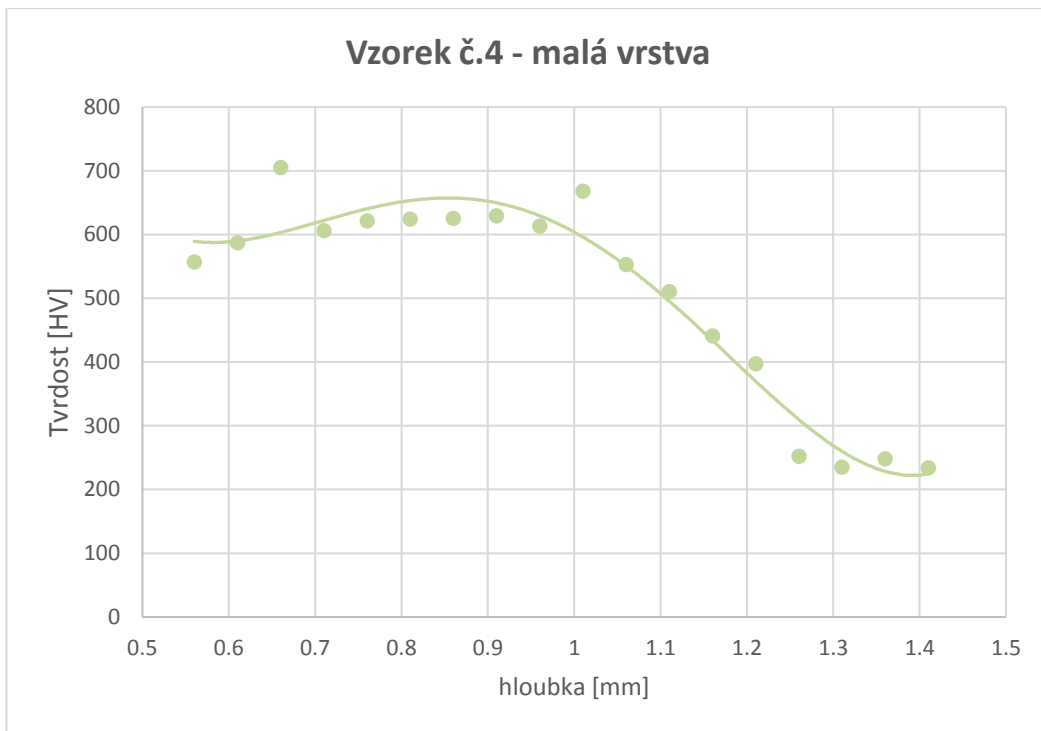
Laserově kalené vzorky



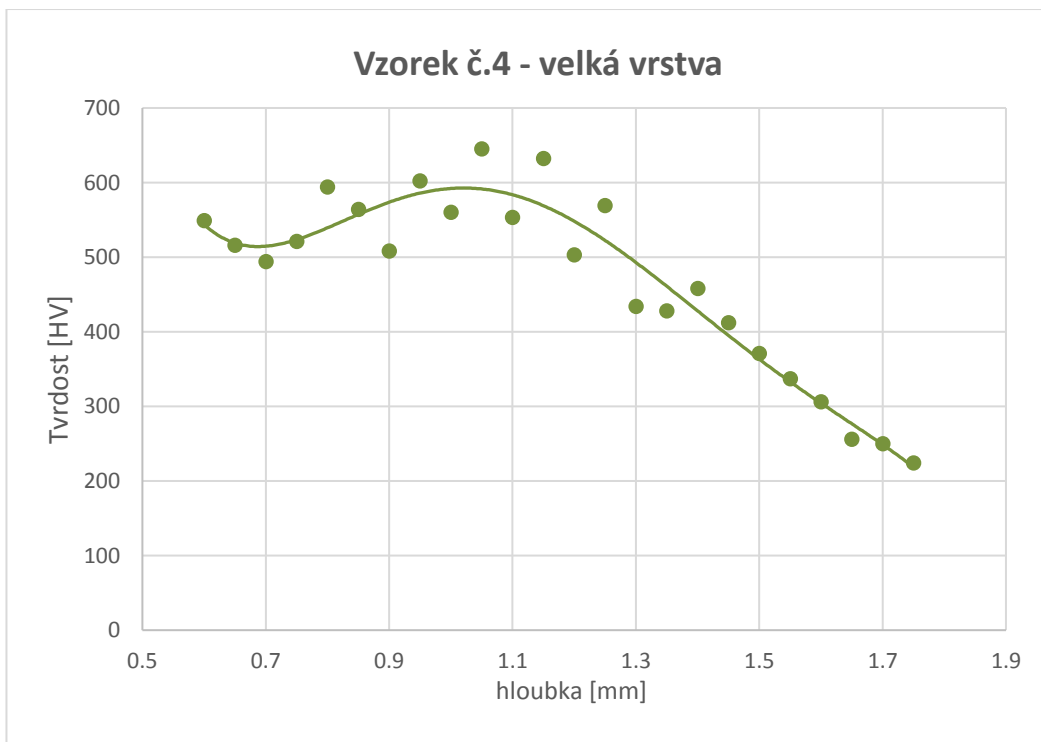
Graf 10 – Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3



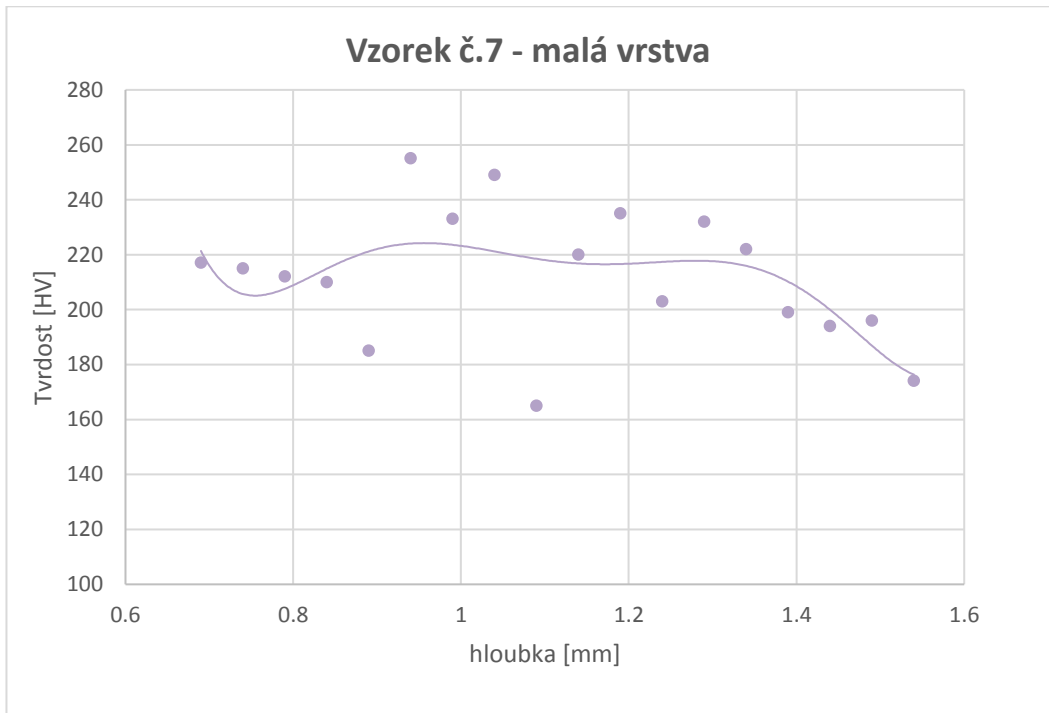
Graf 11 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3



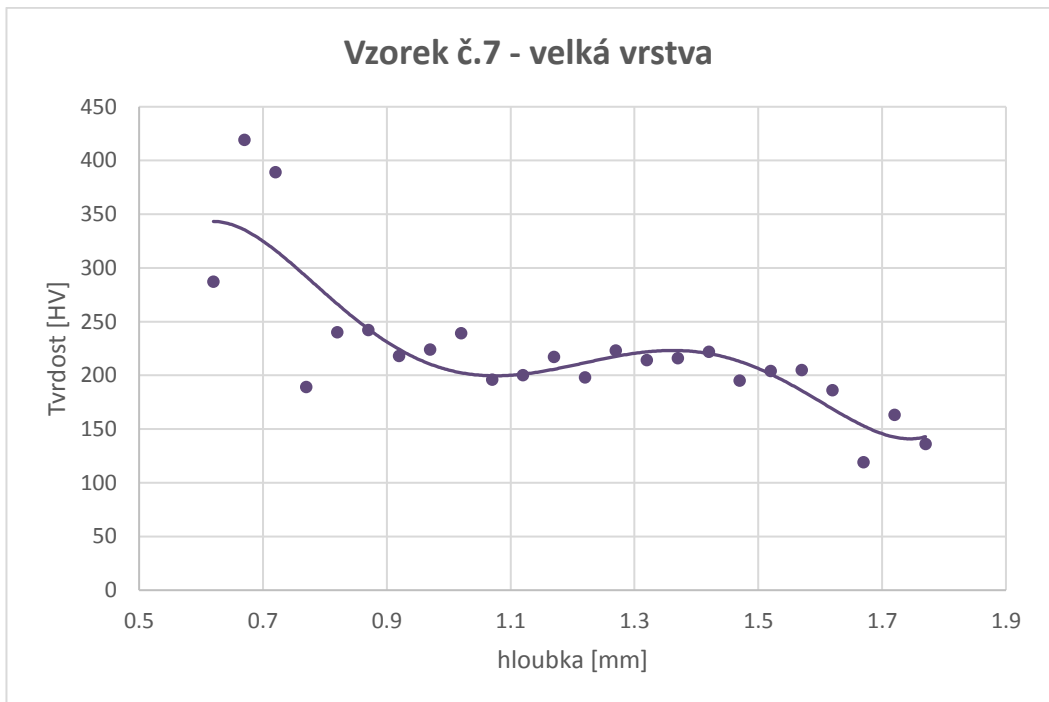
Graf 12 - Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3



Graf 13 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 3

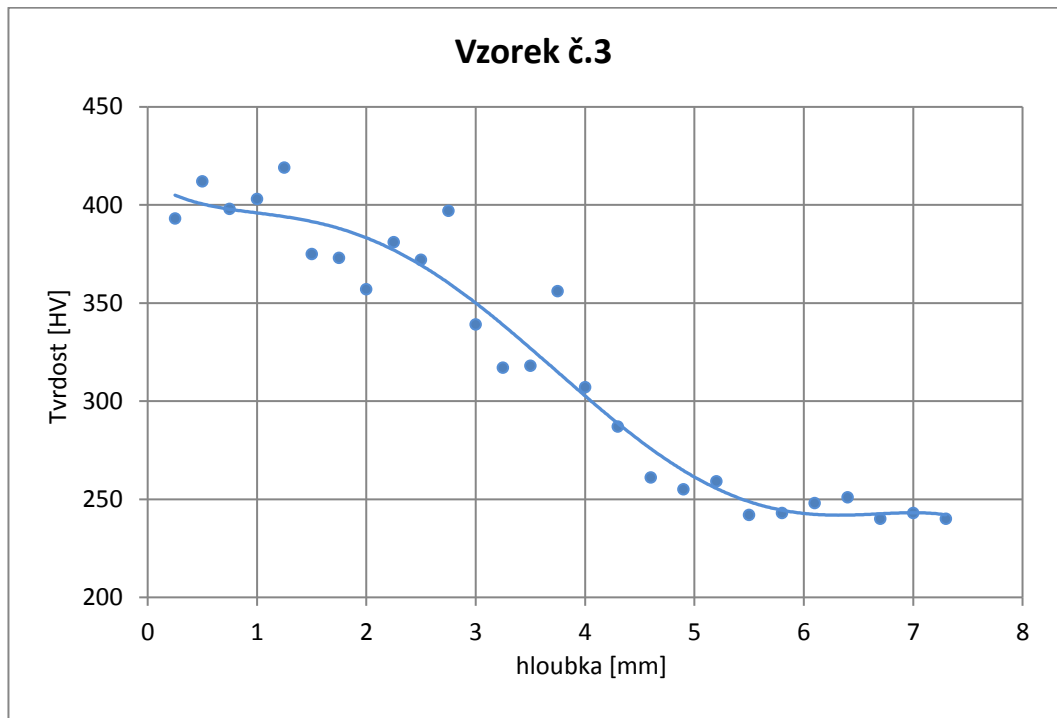


Graf 14 - Průběh tvrdosti (malé) laserově kalené vrstvy vzorku č. 7

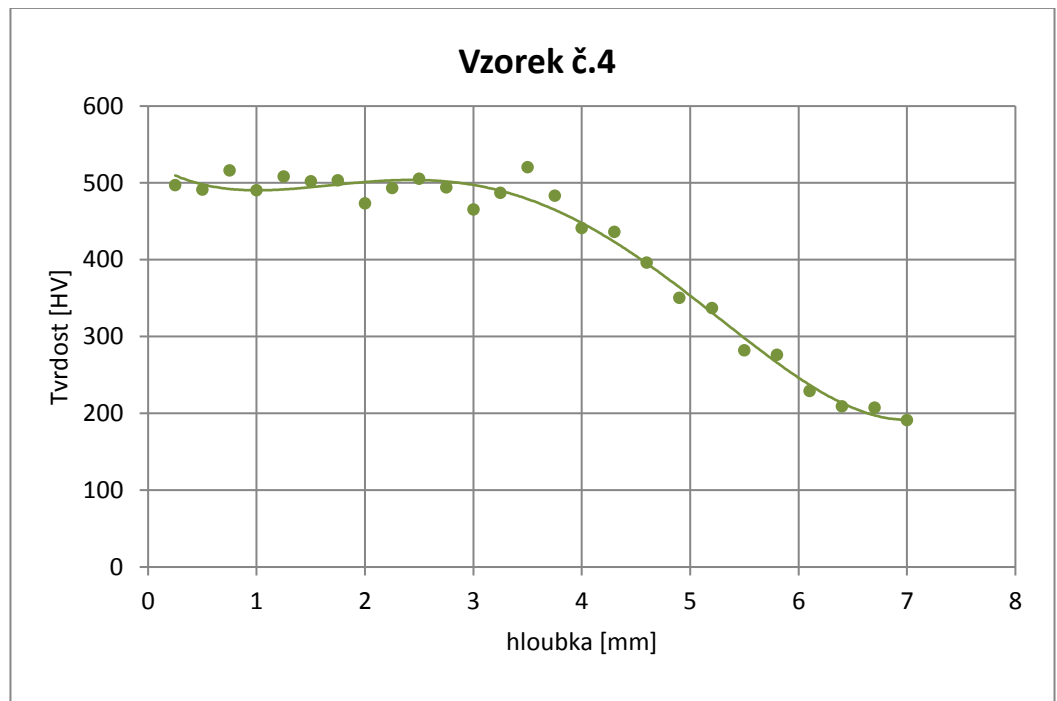


Graf 15 - Průběh tvrdosti (velké) laserově kalené vrstvy vzorku č. 7

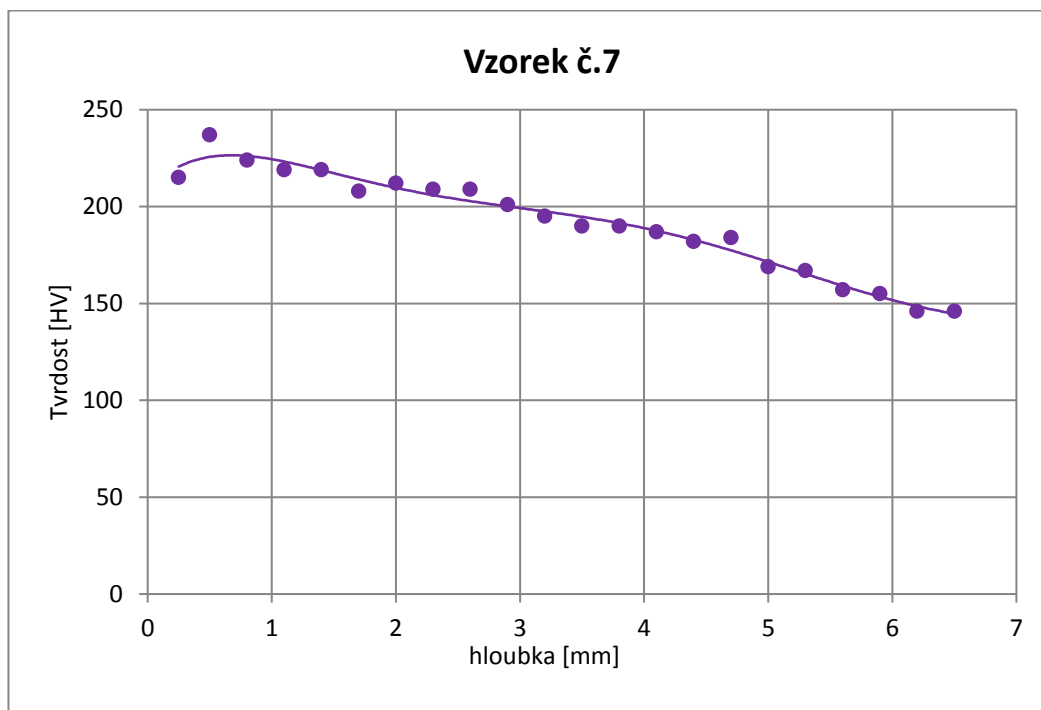
Indukčně kalené vzorky



Graf 16 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 3



Graf 17 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 4



Graf 18 - Průběh tvrdosti indukčně kalené vrstvy vzorku č. 7

Naměřené hodnoty tvrdostí fází

Tabulka 22 – Tvrdości fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 4

3j - HV 0,2		3m - HV 0,2		3v - HV 0,2	
Ferit		Martenzit		Ferit	
	191		922		328
	258		723		303
	195		784		304
	226		865		293
	231		732		271
	191		806		302
	276		810		311
	268		900		287
	230		818		300
					825
					763
					674
					802
					833
					798
					644
					810
					769
					290
					253
					272
					307
					299
					256
					330
					213
					278

Tabulka 23 - Tvrdości fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 3

4j - HV 0,2		4m - HV 0,2		4v - HV 0,2	
Perlit		Martenzit		Perlit	
	304		770		524
	276		812		660
	303		665		483
	328		689		507
	288		749		546
	258		817		570
	250		713		551
	272		762		605
	285		747		556
					810
					787
					799
					671
					716
					646
					817
					833
					760
					549
					576
					543
					610
					582
					560
					466
					520
					551

Tabulka 24 - Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 7

7j - HV 0,2		7m - HV 0,1		7v - HV 0,2	
Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit
182	399	258	698	207	
212	440	221	677	216	
164	461	234	780	242	
173	318	203	701	217	
144	467	224	656	209	
189	453	191	470	238	
154	390	215	712	232	
175	502	221	752	220	
174	434	221	681	223	

Tabulka 25 - Tvrdosti fází mikrostruktury laserově kaleného vzorku č. 16

16j - HV 0,2		16m - HV 0,2		16v - HV 0,2	
Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit
211	646	260	759	281	
175	553	272	796	278	
220	460	243	821	258	
217	729	269	849	251	
197	450	252	704	291	
242	621	255	870	262	
227	561	264	806	244	
205	297	271	817	272	
212	540	261	803	267	

Tabulka 26 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.3

3j - HV - 0,05		3 (vrstva) - HV - 0,1		3 (vrstva) - HV - 0,05	
Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit	Ferit	Martenzit
345		900		412	
330		919		391	
308		988		364	
338		907		391	
349		974		355	
261		960		369	
334		939		374	
303		981		404	
319		939		383	
313		1072		386	
320		958		383	

Tabulka 27 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.4

4j - HV - 0,2		4 (vrstva) - HV - 0,1		4 (vrstva) - HV - 0,05	
Perlit		Martenzit		Perlit	
	304		933		317
	276		913		283
	303		1033		312
	328		967		291
	288		939		323
	258		825		349
	250		907		353
	272		967		299
			974		334
			953		347
	285		941		321

Tabulka 28 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.7

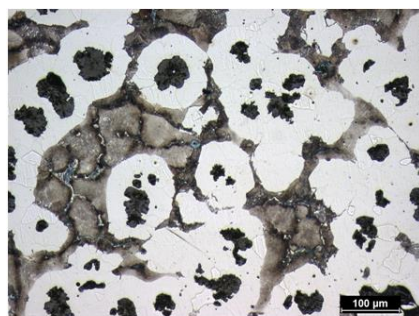
7j - HV - 0,05		7 (vrstva) - HV - 0,1		7 (vrstva) - HV - 0,05	
Ferit		Martenzit		Ferit	
	220		955		349
	213		933		325
	229		859		286
	225		911		323
	221		820		319
	218		796		334
	221		938		338
	229		823		293
	224		831		304
	233		901		334
	223		877		321

Tabulka 29 - Tvrdosti fází mikrostruktury indukčně kaleného vzorku č.16

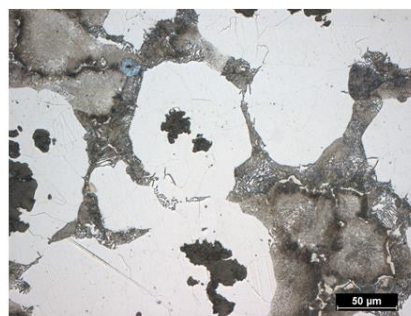
16j - HV - 0,05		16 (vrstva) - HV - 0,1		16 (vrstva) - HV - 0,05	
Ferit		Martenzit		Ferit	
	233		846		251
	253		724		336
	234		605		312
	239		902		294
	246		860		306
	246		743		304
	248		653		286
	250		830		294
	240		694		315
	225		792		313
	241		765		301

8.2 Fotografie mikrostruktur

Vzorek č. 3 – EN-GJS-SiMo35-5

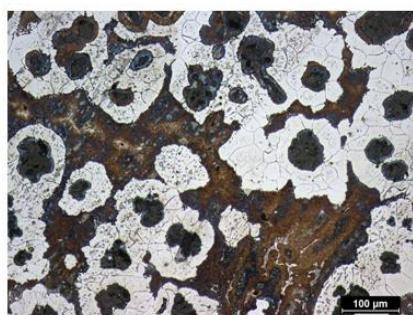


Přehled



Detail

Obr. 36 – Vzorek č. 3 - jádro



Přehled



Detail

Obr. 37 – Vzorek č.3m – laserově zakalená vrstva

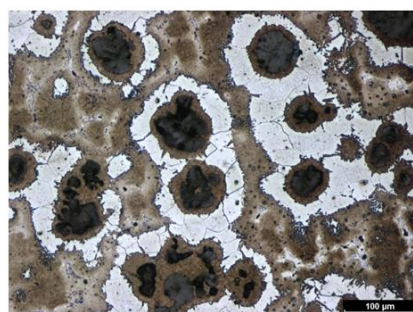


Přehled

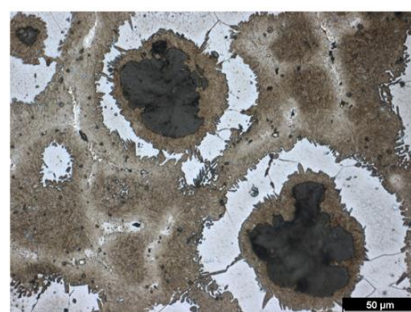


Detail

Obr. 38 – Vzorek č. 3v – laserově zakalená vrstva



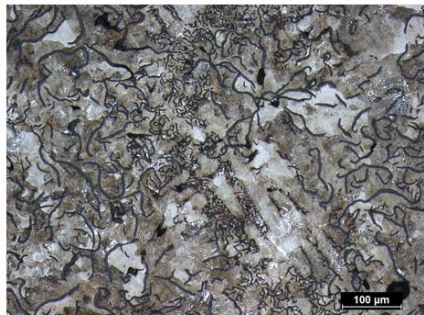
Přehled



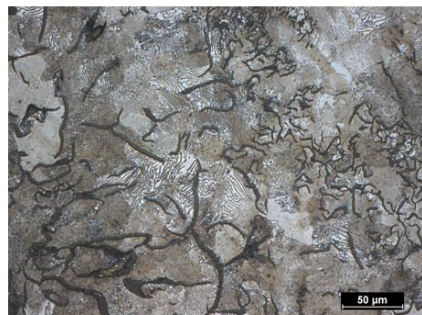
Detail

Obr. 39 – Vzorek č. 3 – indukčně zakalená vrstva

Vzorek č. 4 – EN-GJL-250

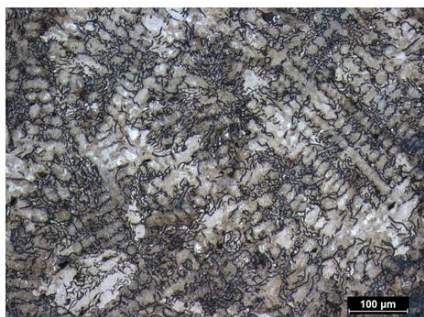


Přehled

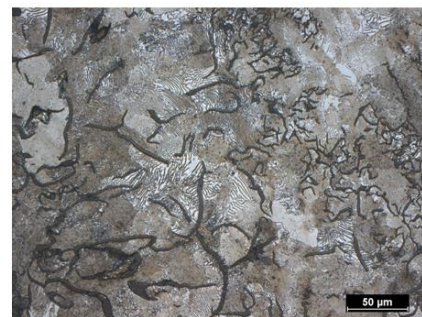


Detail

Obr. 40 – Vzorek č. 4 – jádro

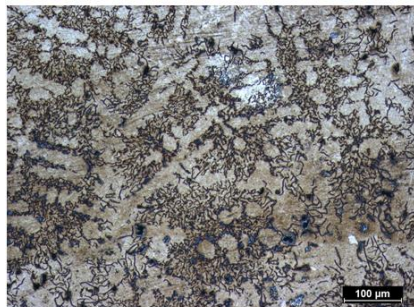


Přehled

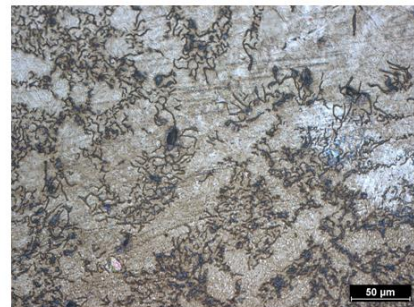


Detail

Obr. 41 - Vzorek č.4m - laserově zakalená vrstva

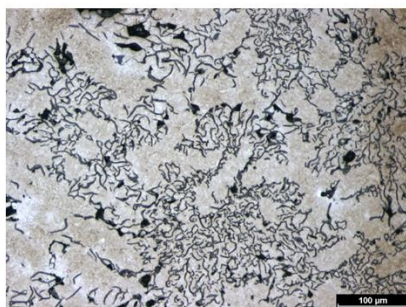


Přehled



Detail

Obr. 42 - Vzorek č.4v - laserově zakalená vrstva



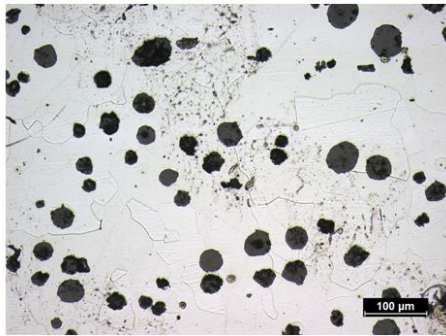
Přehled



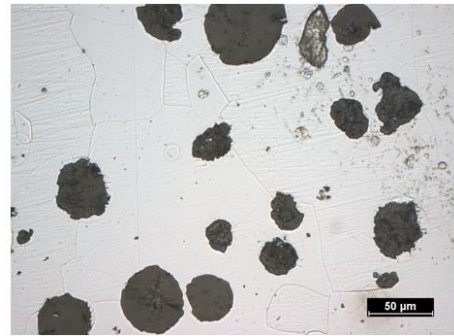
Detail

Obr. 43 – Vzorek č. 4 – indukčně zakalená vrstva

Vzorek č. 7 - EN-GJS-400-18

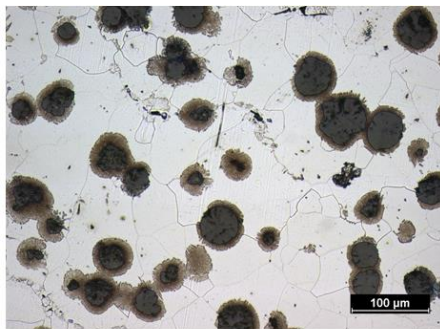


Přehled

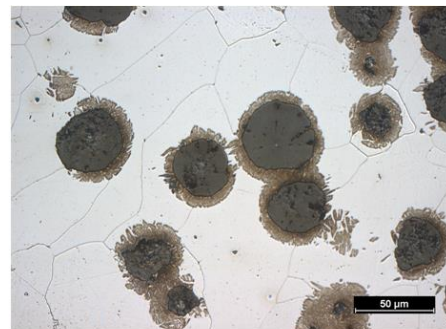


Detail

Obr. 44 – Vzorek č. 7 - jádro

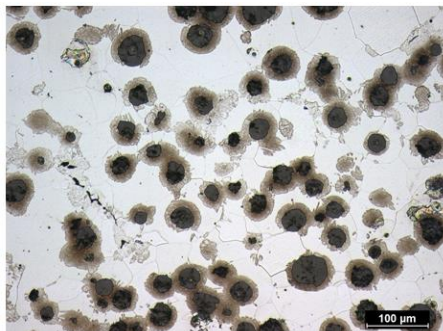


Přehled

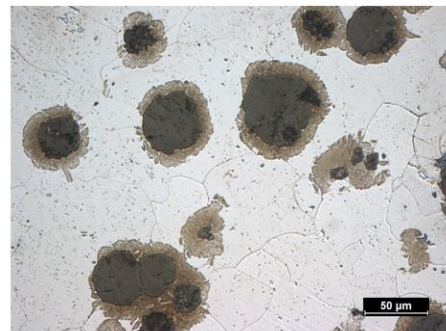


Detail

Obr. 45 – Vzorek č. 7m – laserově zakalená vrstva

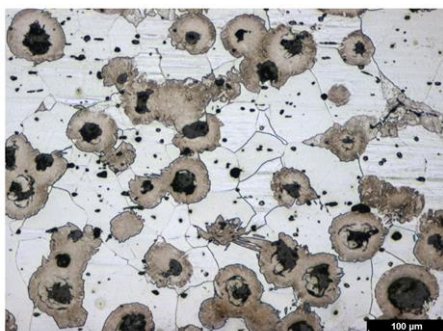


Přehled

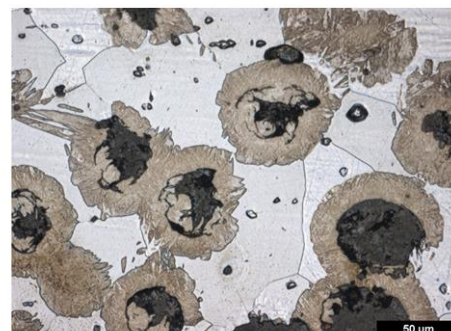


Detail

Obr. 46 - Vzorek č. 7v - laserově zakalená vrstva



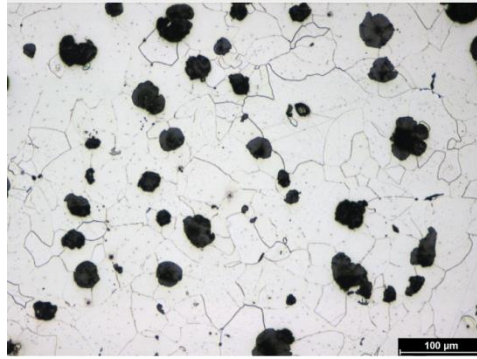
Přehled



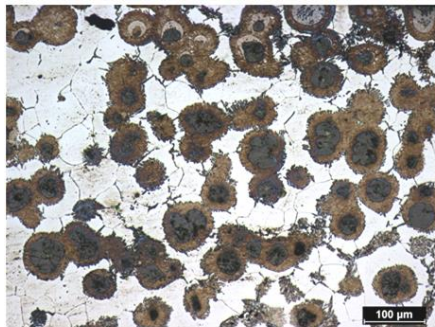
Detail

Obr. 47 - Vzorek č. 7 - indukčně zakalená vrstva

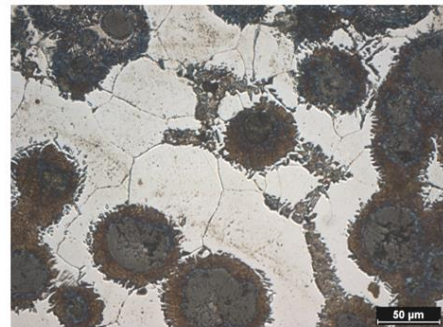
Vzorek č. 16 - EN-GJS-500-14



Obr. 48 - Vzorek č. 16 - jádro (přehled)

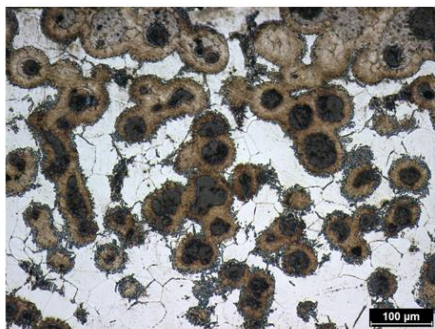


Přehled



Detail

Obr. 49 - Vzorek č. 16m - laserově zakalená vrstva

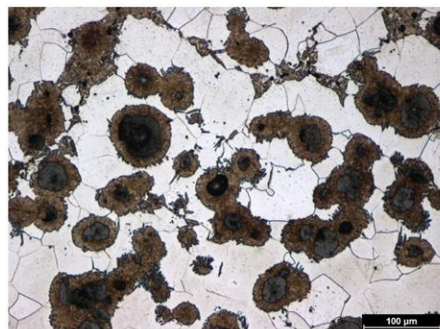


Přehled

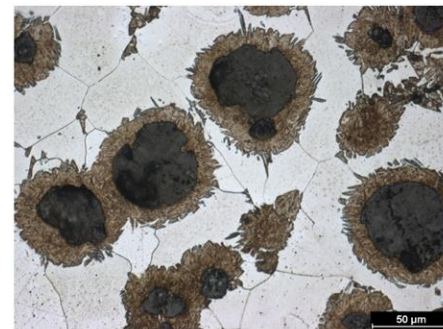


Detail

Obr. 50 - Vzorek č. 16v - laserově zakalená vrstva



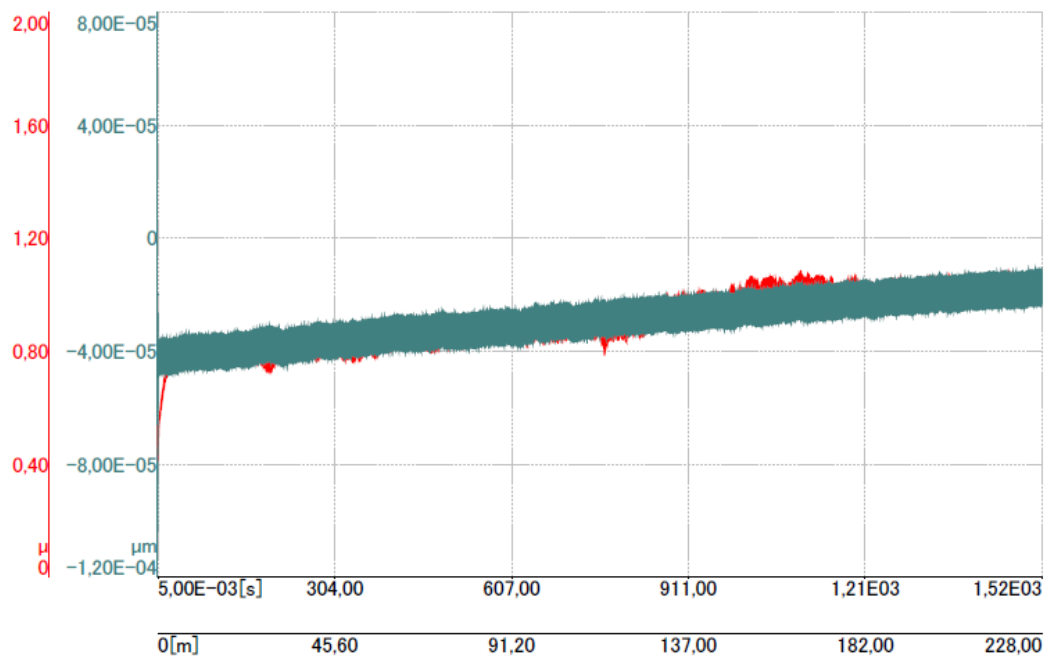
Přehled



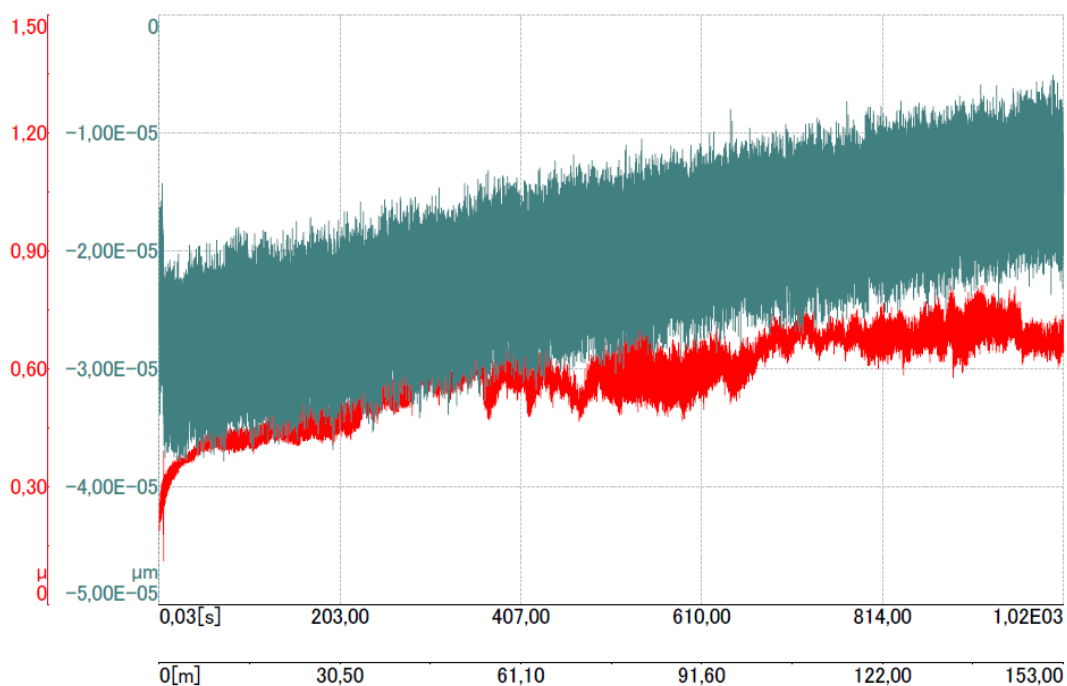
Detail

Obr. 51 - Vzorek č. 16 - indukčně zakalená vrstva

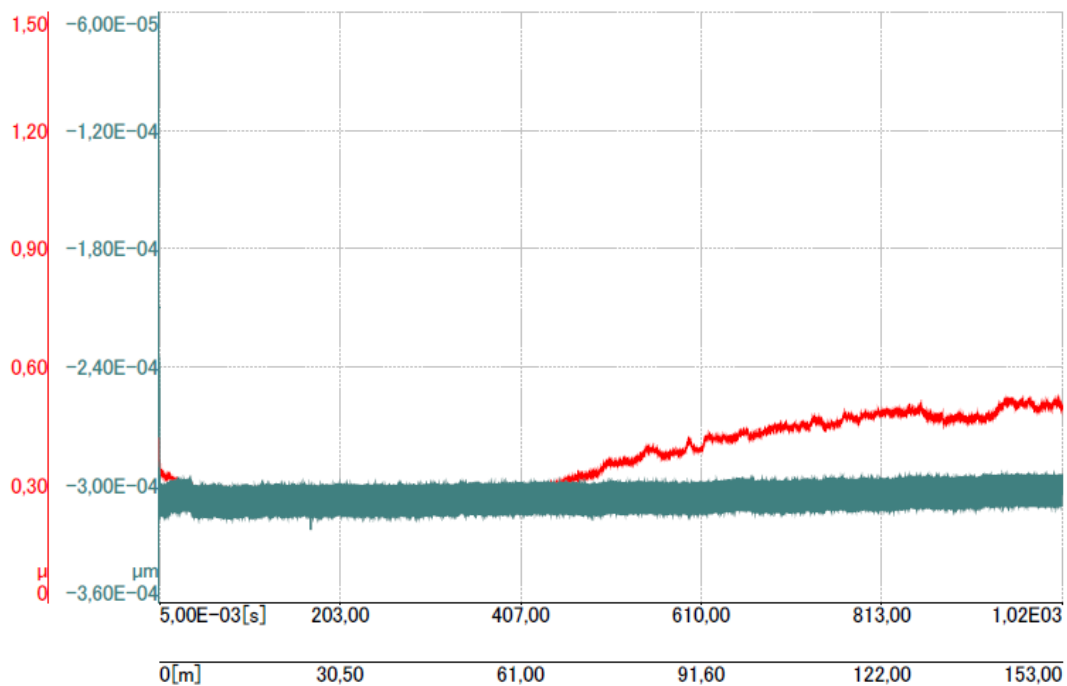
8.3 Závislosti koeficientu tření na vzdálenosti



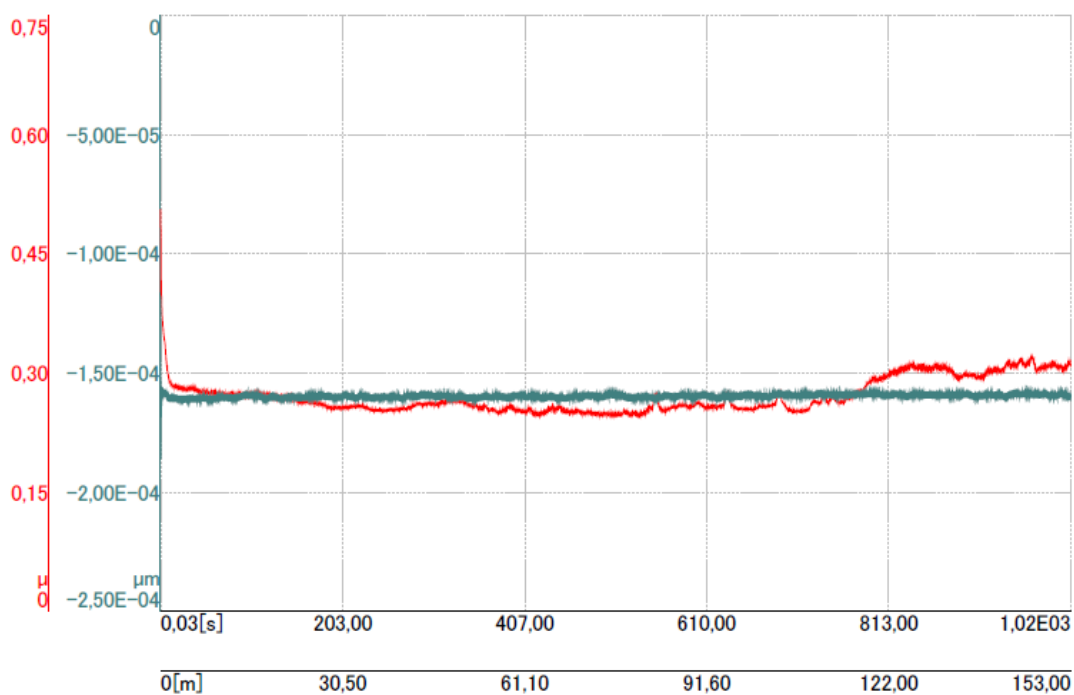
Graf 19 – Vzorek č. 3A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti



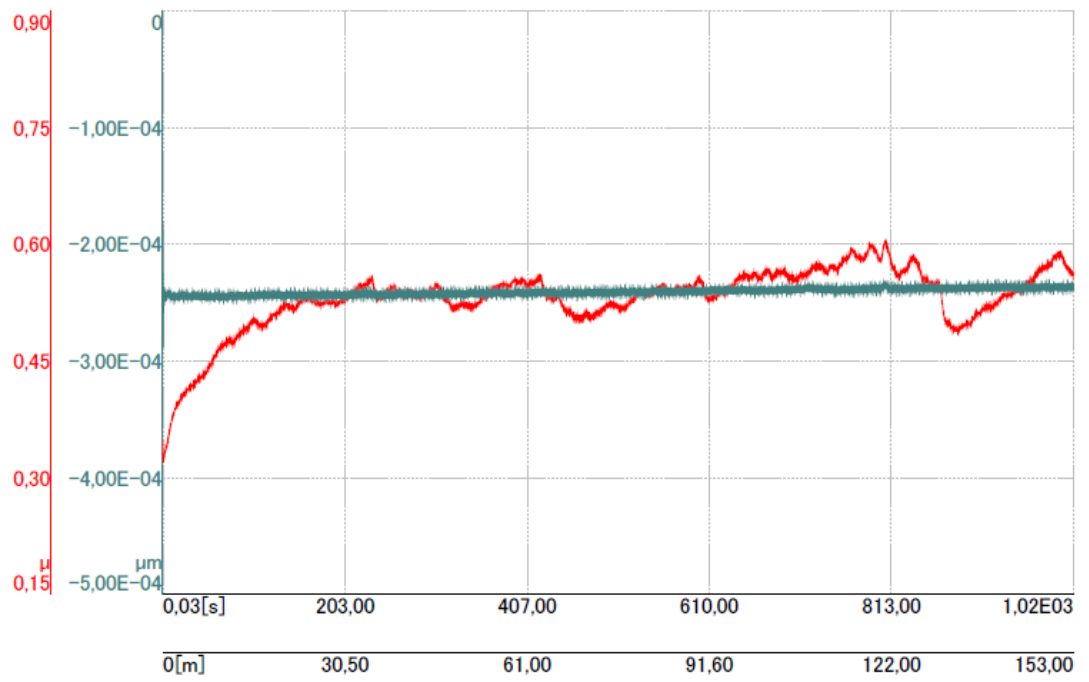
Graf 20 - Vzorek č. 3B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti



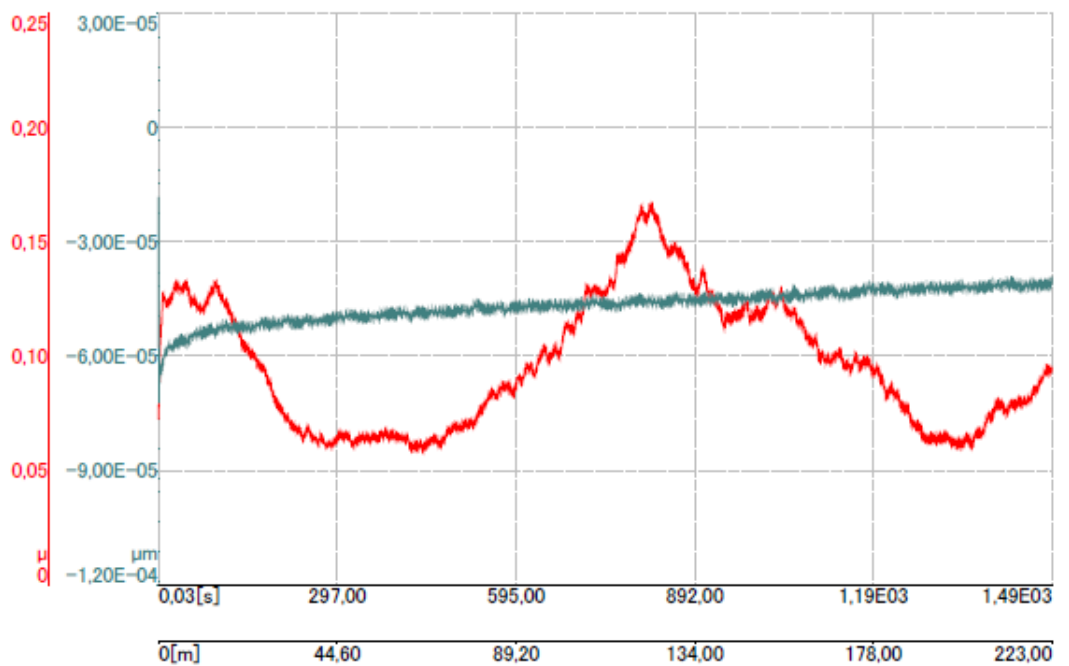
Graf 21 - Vzorek č. 4A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti



Graf 22 - Vzorek č. 4B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti



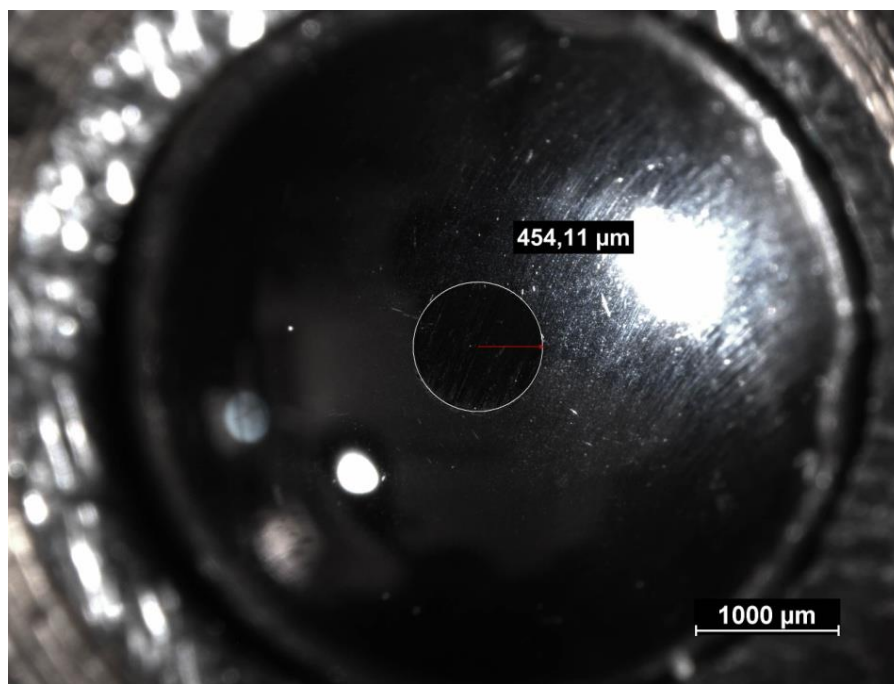
Graf 23 - Vzorek č. 7A - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti



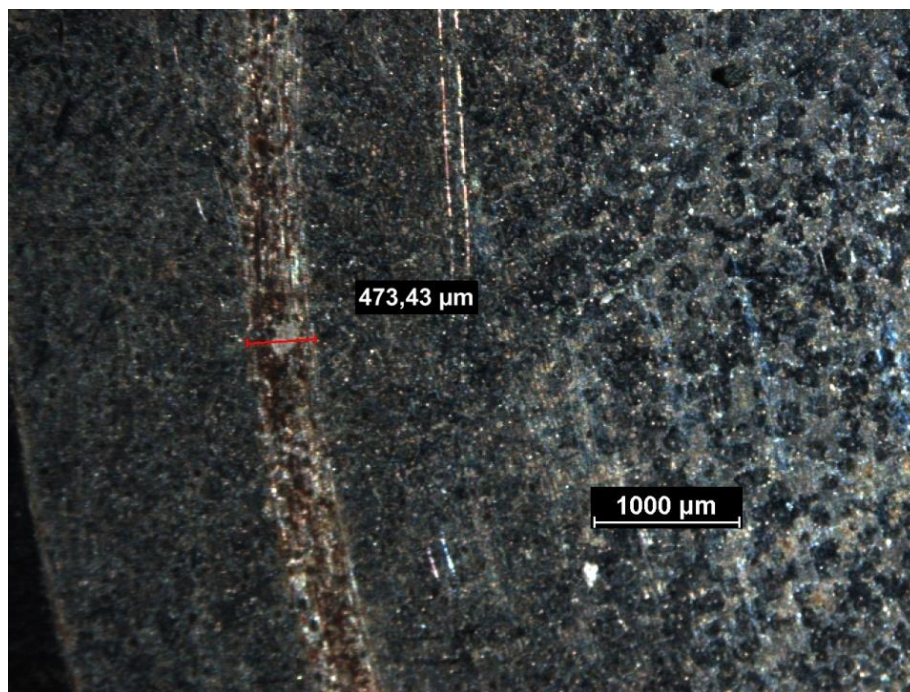
Graf 24 - Vzorek č. 7B - Závislost koeficientu tření na vzdálenosti

8.4 Fotografie vybroušených stop a otěrů

Vzorek č. 3A

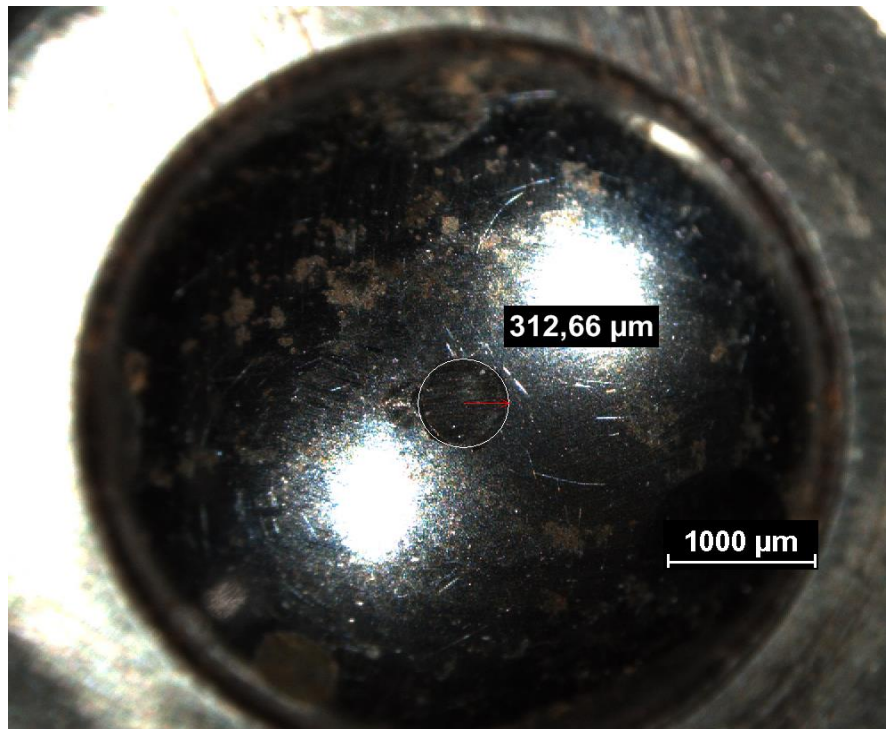


Obr. 52 - Vzorek č. 3A - Detail otěru kuličky

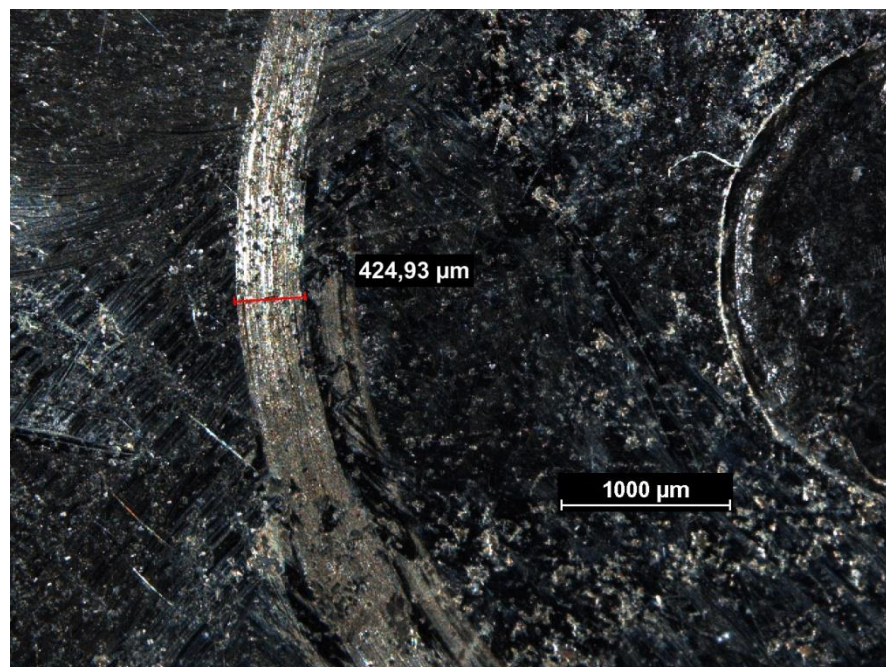


Obr. 53 - Vzorek č. 3A - Detail vybroušené stopy

Vzorek č. 3B

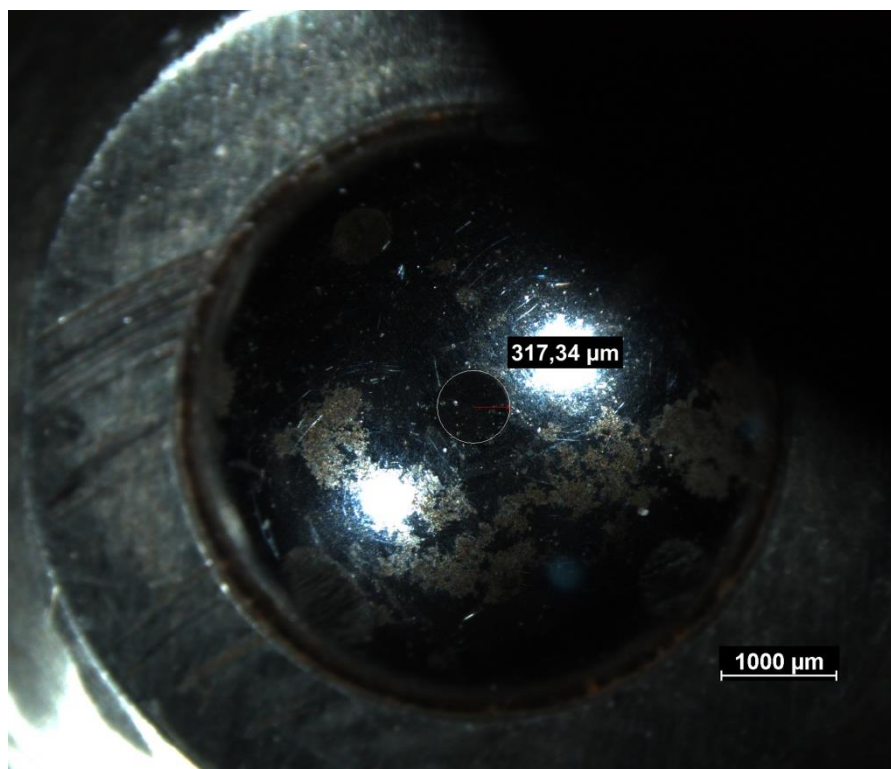


Obr. 54 - Vzorek č. 3B - Detail otěru kuličky

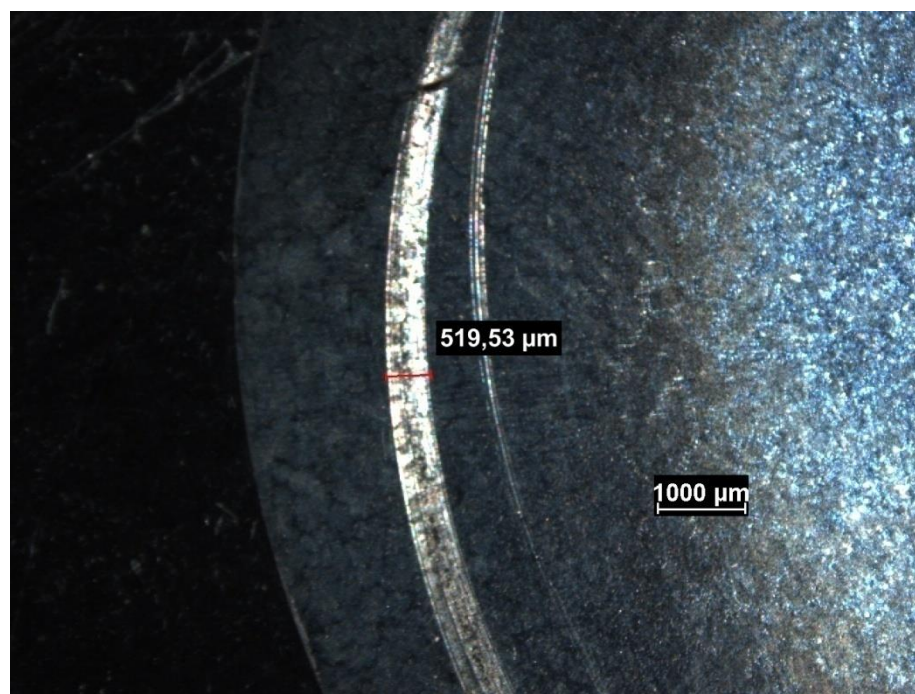


Obr. 55 - Vzorek č. 3B - Detail vybroušené stopy

Vzorek č. 4A

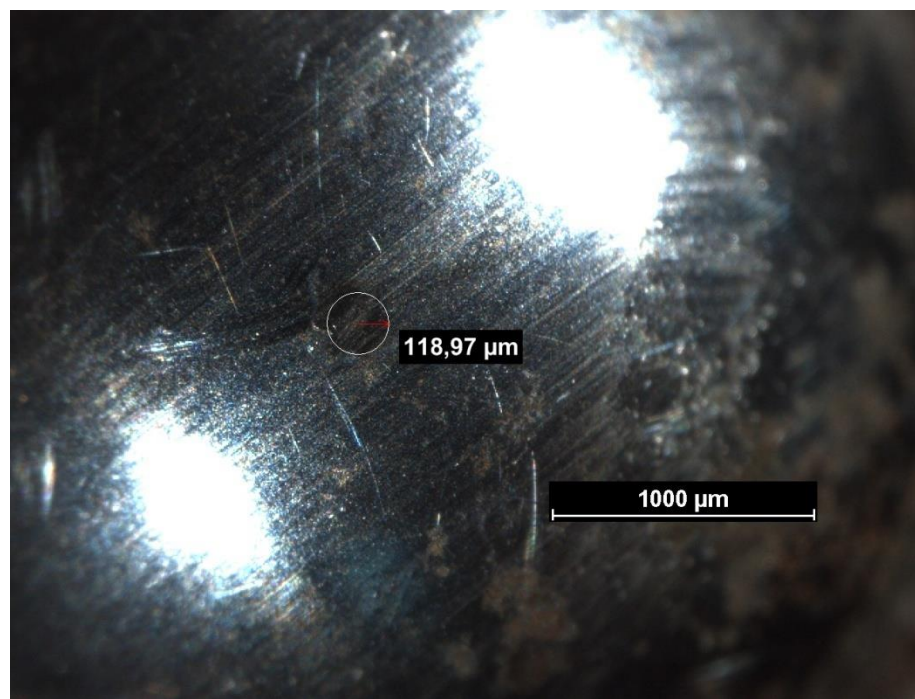


Obr. 56 - Vzorek č. 4A - Detail otěru kuličky

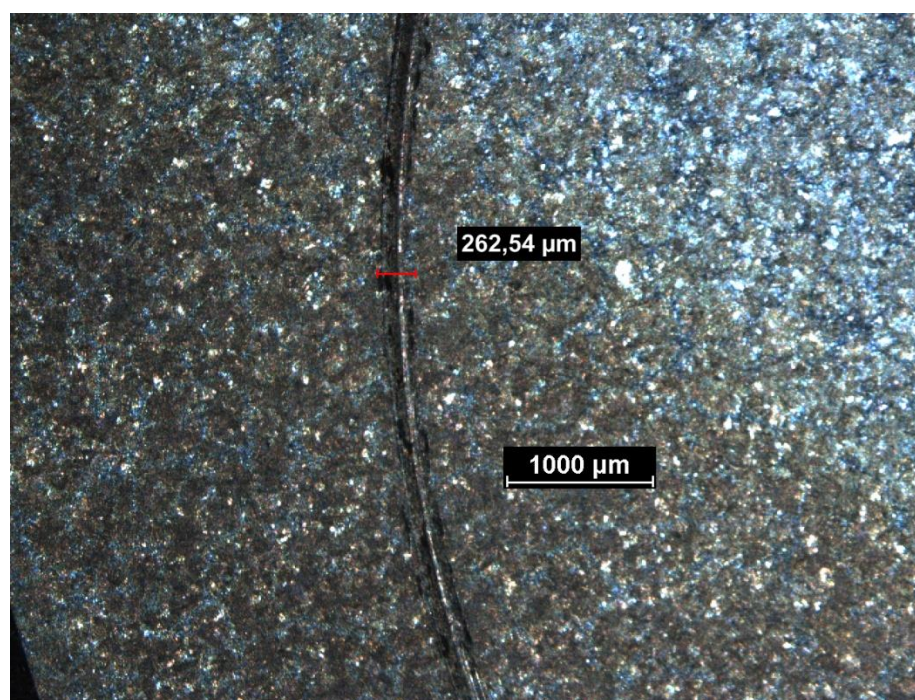


Obr. 57 – Vzorek č. 4A – Detail vybroušené stopy

Vzorek č. 4B

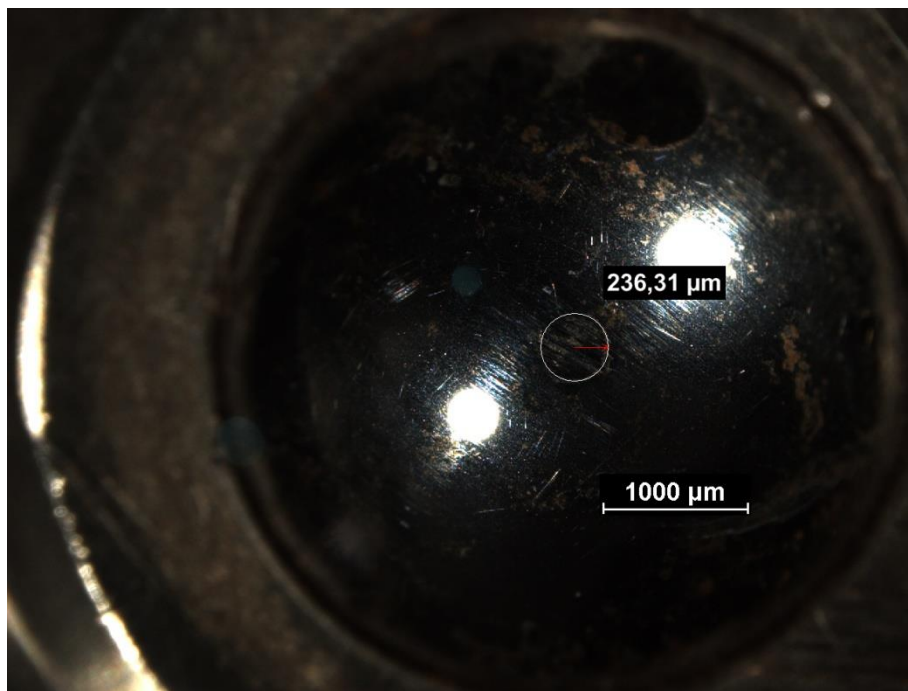


Obr. 58 - Vzorek č. 4B - Detail otěru kuličky

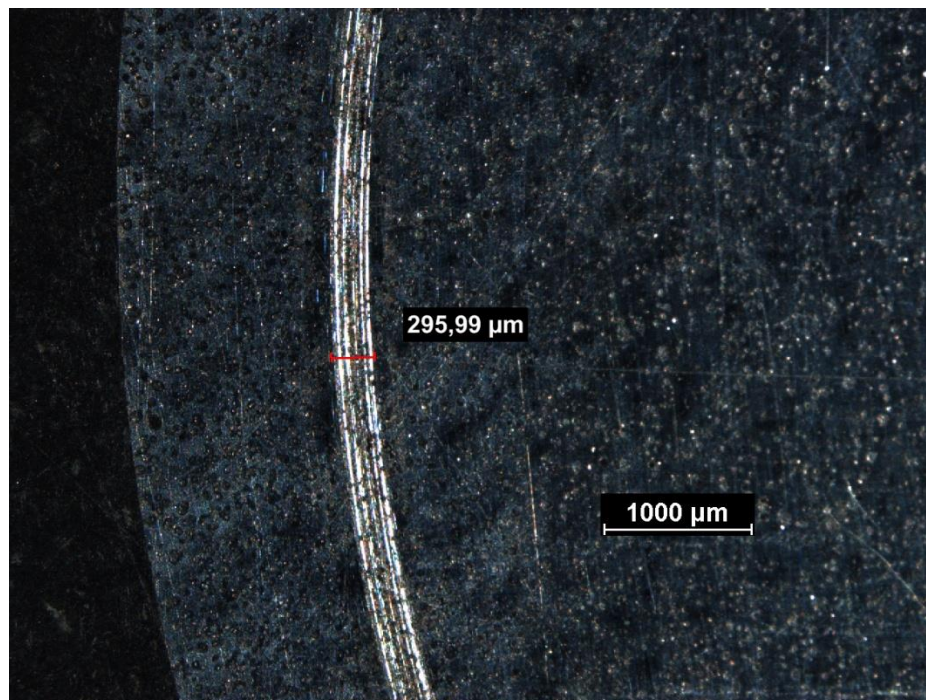


Obr. 59 - Vzorek č. 4B – Detail vybroušené stopy

Vzorek č. 7A

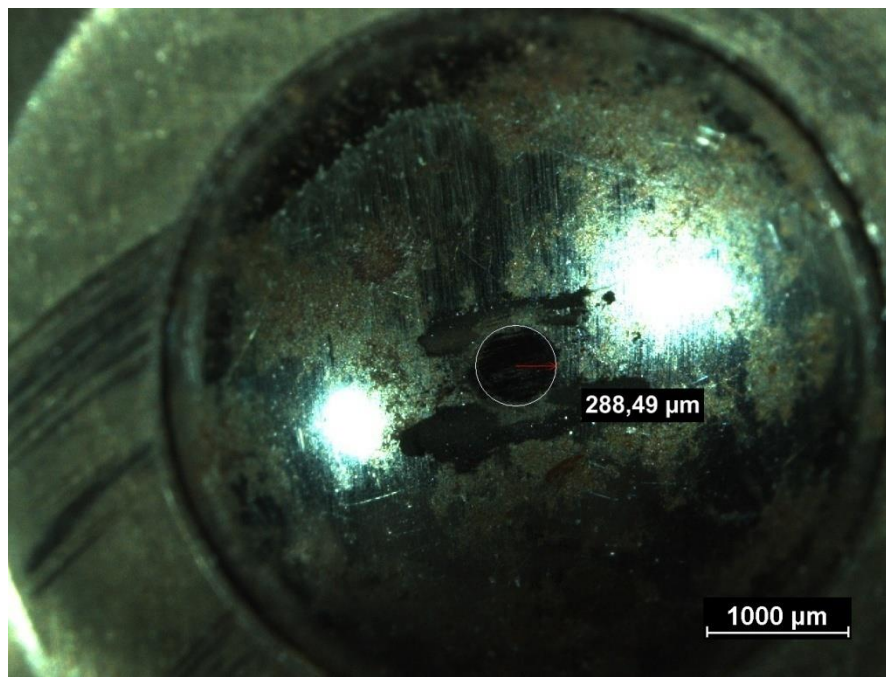


Obr. 60 - Vzorek č. 7A - Detail otěru kuličky

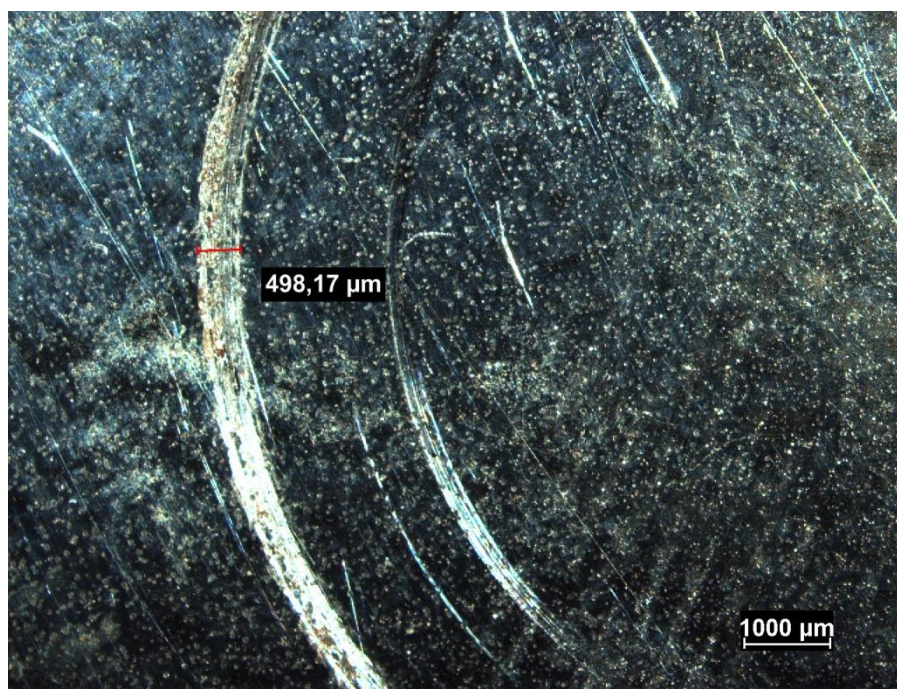


Obr. 61 - Vzorek č. 7A – Detail vybroušené stopy

Vzorek č. 7B



Obr. 62 - Vzorek č. 7B - Detail otěru kuličky



Obr. 63 - Vzorek č. 7B – Detail vybroušené stopy