

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

**Turek
Jaroslav**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turek** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **473533**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití odlítků ve stavebních strojích

Název bakalářské práce anglicky:

Casting using in construction machinery

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do aplikace odlítků ve stavebních strojích
2. Otěruvzdorné slitiny
3. Mechanismy opotřebení
4. Experimentální část (příprava vzorků, zkoušky erozivního opotřebení, metalografie)
5. Závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

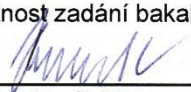
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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


Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**



doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

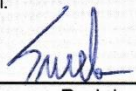


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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.

9.6.2020
Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Abstrakt

Bakalářská práce řeší problematiku otěruvzdorných slitin, využívaných při odlévání částí stavebních strojů. V rešeršní části práce jsou analyzovány materiály, jež jsou schopné odolávat silnému opotřebení. Jsou uvedeny společně s konkrétními příklady využití. Dále jsou v práci popsány mechanismy opotřebení. V experimentální části jsou srovnány vzorky chromové bílé litiny o různých tepelných zpracováních z hlediska tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a mikrostruktury. Vyhodnocením bylo zjištěno, jaké tepelné zpracování má příznivý vliv na mechanické vlastnosti.

Klíčová slova:

stavební stroje, otěruvzdornost, otěruvzdorná slitina, opotřebení, tvrdost, tepelné zpracování

Abstract

Bachelor thesis deals with issues of abrasion resistant alloys, which are used in casting parts of construction machinery. In search part are analyzed materials, which are wear resistant. There are also listed specific examples of application. Next is description of wear mechanisms. In experimental part are compared samples of chrome white cast iron in terms of hardness, wear resistance and microstructure. Each sample went through different heat treatment. The evaluation is to find heat treatment, which can improve mechanical properties of tested material.

Key words:

construction machinery, abrasion resistance, abrasion resistant alloy, wear, hardness, heat treatment

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Využití odlišků ve stavebních strojích** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. 7. 2020

.....

Jaroslav Turek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. vedoucímu mé bakalářské práce za vstřícný přístup, odborné konzultace včetně cenných rad a poznatků. Dále bych chtěl poděkovat Slévárně Chomutov, a.s. za poskytnutí litinových vzorků, dále pak panu Ing. Alexandru Sedláčkovi, Ph.D. a firmě S. A. F. za uskutečnění experimentu erozivních zkoušek. V neposlední řadě patří poděkování lidem ústavů strojírenské technologie, technologie obrábění, metrologie a projektování a lidem ústavu materiálového inženýrství.

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Cíl práce	8
2	Stavební stroje	9
3	Ocel na odlitky	10
3.1	Nelegované oceli	10
3.2	Legované oceli	10
3.2.1	Ocel 40Cr	10
3.2.2	Hadfieldova manganová ocel	11
4	Litiny	13
4.1	Grafitické litiny	13
4.1.1	Litiny s kuličkovým grafitem	13
4.1.2	Izotermicky zušlechtěné litiny	15
4.2	Cementitické litiny	17
4.2.1	Nelegované nebo nízkolegované litiny	18
4.2.2	Nikl-chromové litiny	18
4.2.3	Litiny s vyšším obsahem chromu	19
5	Mechanismy opotřebení	22
5.1	Adhezivní opotřebení	22
5.2	Abrazivní opotřebení	23
5.3	Erozivní opotřebení	23
5.4	Kavitační opotřebení	24
5.5	Únavové opotřebení	25
5.6	Vibrační opotřebení	26

6	Experimentální část	27
6.1	Úvod	27
6.2	Vzorky	27
6.2.1	Chemické složení	27
6.2.2	Tepelná zpracování	29
6.2.3	Příprava vzorků	31
6.3	Měření tvrdosti	33
6.3.1	Popis měření a použitá zařízení	33
6.3.2	Výsledky měření	34
6.3.3	Shrnutí výsledků tvrdosti	34
6.4	Erozivní zkouška	35
6.4.1	Popis měření a použitá zařízení	35
6.4.2	Výsledky měření	38
6.4.3	Shrnutí výsledků erozivní zkoušky	40
6.5	Metalografie vzorků	41
6.5.1	Příprava vzorků pro pozorování	41
6.5.2	Vyhodnocení mikrostruktury	42
7	Rozbor výsledků	50
8	Závěr	52

1 Úvod

Části stavebních strojů, jako jsou například zuby připevněné na ocelové bagrové lžíci, jsou během pracovní činnosti vystaveny velkému opotřebení. Mnohdy odolávají abrazivním účinkům částic, jež jsou obsaženy v nabírané zemině nebo suti. Od takového zubu se také očekává, že při náhlém prudkém nárazu, třeba do kamene, zůstane vcelku. Proto musí být zvolen takový materiál, který dokáže těmto podmínkám vyhovět.

V dnešní době je nejdůležitějším aspektem u výrobků cena. Jinak tomu není ani v případě stavební techniky a jejích nástrojů. Je velká snaha zvolit na výrobu materiál, který bude možné maximálně využít, a to při nejnižších nákladech. Když se vrátíme zpět k zubům bagrové lžíce, je nutné podotknout, že jsou většinou vyráběny jako odlitky. Volba této technologie výroby skrývá mnoho výhod. Mezi výhody patří bezesporu využití materiálu, rozmanitost tvarů, ale také hlavně konfigurace složení materiálu, čímž lze dosáhnout požadovaných vlastností. Nejčastěji je sáhnuto po otěruvzdorných legovaných litinách.

1.1 Cíl práce

Rešeršní část analyzuje otěruvzdorné materiály, které jsou využívány při výrobě odlévaných částí stavebních strojů. Dále také popisuje mechanismy opotřebení.

Cílem experimentální části je posoudit příznivý vliv tepelného zpracování bílé otěruvzdorné litiny na její tvrdost, opotřebení a strukturu.

2 Stavební stroje

Ve stavebním průmyslu je využíváno mnoha strojů a zařízení, jež usnadňují a podstatně urychlují proces výstavby objektu, či úpravy terénu. Takovéto stroje a zařízení bychom mohli rozdělit do čtyř hlavních skupin. První skupinu zastupují zařízení určená k přemísťování a práci se zeminou. Mezi takové stroje patří např.: exkavátory, rypadla, buldozery atd. Do druhé skupiny spadají vozidla zajišťující přepravu materiálu, těmi jsou např.: nákladní automobily, sklápěče či pevné dampry. Třetí skupinu tvoří stroje určené k manipulaci se stavebním materiálem. Pod těmito stroji si můžeme představit jeřáby, vysokozdvížné vozíky, ale také i pásové dopravníky nacházející se v lomech a dolech. Čtvrtá skupina je zastoupena dalším stavebním vybavením, mezi které můžeme zařadit míchačky betonu, vibrační a pěchovací techniku nebo také silniční válce. [1]



Obr. 2.1 Exkavátor [2]

Na funkční části, vykonávající předpokládané úkony všech těchto strojů a zařízení, jsou kladeny vysoké nároky v oblasti maximálního využití, spolehlivosti, odolnosti vůči opotřebení a jiných. Těmto nárokům je možné vyhovět vhodnou volbou konstrukčního řešení, jehož nedílnou součástí je právě volba vhodného materiálu. V současnosti je k dispozici široká škála dostupných materiálů, které lze pro části stavebních strojů použít. V této práci se však omezíme na součásti odlévané.

3 Ocel na odlitky

Mezi značně rozšířené materiály použité při konstrukci stavební techniky a zároveň určené k lití zařazujeme právě oceli na odlitky. Litá ocel je slitinou železa, uhlíku s maximálním obsahem okolo 0,75 % a dalších legujících prvků. Oceli lze v podstatě rozdělit do dvou skupin, na nelegované (uhlíkové) a legované. [3]

3.1 Nelegované oceli

V závislosti na obsahu uhlíku dělíme nelegované oceli na nízko, středně a vysoce uhlíkové. U nízkouhlíkových ocelí nepřekračuje obsah uhlíku 0,2 %. Takové oceli jsou relativně měkké a těžko tepelně zpracovatelné z důvodu malého obsahu uhlíku. Středně uhlíkové oceli, u nichž se zastoupení uhlíku pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 %, disponují vyšší tvrdostí a přístupnějším tepelným zpracováním. Vysoce uhlíkových ocelí, jejichž obsah uhlíku se pohybuje okolo 0,5 %, je využíváno tam, kde je potřeba maximální tvrdosti a zvýšené odolnosti vůči opotřebení. [3]

3.2 Legované oceli

Stejně jako nelegované oceli lze analogicky rozdělit legované oceli podle obsahu legujících prvků. Nízkolegované oceli na odlitky s obsahem legujících prvků nižším nebo rovnému 8 % vykazují podobné chování jako uhlíkové oceli, avšak mají lepší kalitelnost. U vysokolegovaných ocelí naopak legující prvky překračují hranici 8 % a můžeme u nich očekávat vysokou odolnost proti korozi, žáru a opotřebení. Prvky, jež mají zásadní vliv na korozivzdornost oceli, jsou chrom a nikl. Díky chromu je ocel schopna pasivace. Jedná se o proces, kdy se na povrchu ocelového výrobku vytváří tenký film oxidu chromového, který výrobek chrání. Množství chromu pro dosažení korozivzdornosti se pohybuje za hranicí 10,5 %. Aby ocel dosáhla také dobré odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení, je při její výrobě použit mangan. Obsah manganu v takovýchto ocelích se pohybuje mezi 11-15 %. [3]

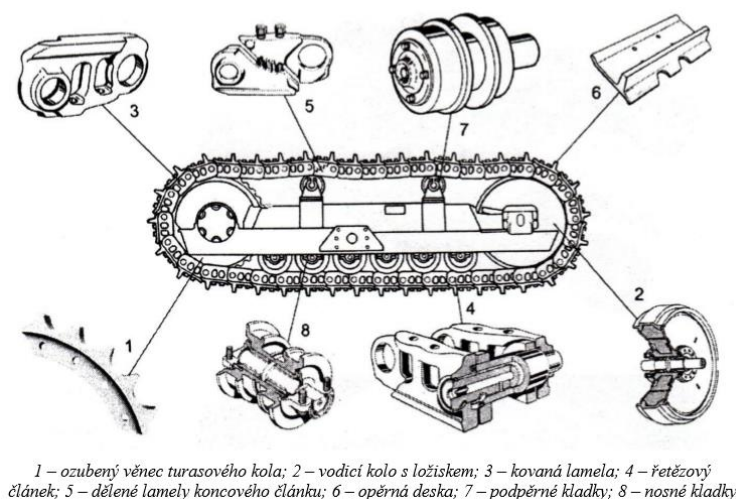
3.2.1 Ocel 40Cr

Jako zářný příklad lze uvést materiál nesoucí označení 40Cr dle GB/T 3077 či ekvivalentní 41Cr4 dle ISO 683-1. Jedná se o značně rozšířenou legovanou chromovou ocel, podléhající čínským národním standardům. Chemické složení oceli je tvořeno z 0,37-0,44 % uhlíkem, z 0,17-0,37 % křemíkem, z 0,5-0,8 % manganem a z 0,80-1,10 % chromem. Co se týče mechanických vlastností materiálu, tak je dobré zmínit mez pevnosti

v tahu, jejíž hodnoty se pohybují kolem $810 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ při tvrdosti 25 HRC. Hodnoty meze kluzu dosahují $785 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. [4]

Tažnost materiálu činí více jak 9 %. Dále pak kontrakce, jejíž hodnoty šplhají k 45 %. Vliv na výslednou strukturu, a tím pádem oblast použití materiálu má bezesporu tepelné či chemicko-tepelné zpracování. V případě stavebních strojů se bavíme o materiálu, jehož předností je odolnost vůči opotřebení. Toho lze dosáhnout kalením a nízkoteplotním popouštěním. Výrobky pak mohou být např.: hřídele, objímky, šneci ve šnekovém soukolí, vřetena atd. [4]

Mnohdy bývá z oceli 40Cr vyroben v podstatě celý podvozek pásového nakladače. Konkrétně lze uvést například hnací turasová kola, podpěrné a nosné kladky, vodící kola, a nakonec také řetězové články společně s nosnými deskami (obr. 3.1). Eventuálně mohou být tyto komponenty vyrobeny z oceli 40MnB.



1 – ozubený věnec turasového kola; 2 – vodící kolo s ložiskem; 3 – kovaná lamela; 4 – řetězový článek; 5 – dělené lamely koncového článku; 6 – opěrná deska; 7 – podpěrné kladky; 8 – nosné kladky

Obr. 3.1 Složení pásového podvozku [5]

3.2.2 Hadfieldova manganová ocel

Kromě chromové oceli se nabízí k výrobě dílů stavební techniky také manganová ocel. Manganová ocel, nazývána též Hadfieldova ocel nebo mangalloy, je ocelí na odlitky obsahující 12-14 % manganu. Tento druh materiálu se pyšní vysokou odolností vůči dynamickým rázům, ale také hlavně vůči abrazi. Výrobky z Hadfieldovy oceli mají tu vlastnost, že na jejich pracovním povrchu vzniká vytvrzená vrstva v důsledku vystavení dynamickým rázům a tlakům. Tato vrstva může nabýt tloušťky několika milimetrů. Další výhodou je absence lámavosti, protože si jádro součásti zachovává vysokou houževnatost. Pokud je výrobek vystaven pouze abrazi, a ne i dynamickým zatížením, není možné, aby tato vytvrzená vrstva vznikla.

V souvislosti s obsahem uhlíku je nutné podotknout, že pokud bude jeho obsah nad 1,30 % dojde k poklesu hodnot plastických vlastností, avšak tvrdost poroste. Hodnoty meze kluzu se pohybují za hranicí $390 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a tažnost dosahuje 40 %. Při poklesu obsahu uhlíku ke spodní hranici 1,10 % je vytvrzená a zpevněná vrstva oslabena. Tím klesá její tvrdost, a tedy i odolnost vůči abrazi. Chemické složení je uvedeno v *tab. 3.1*. [6], [7]

Tab. 3.1 Chemické složení Manganové oceli [7]

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Zr
1,10	12,00	Max.	Max.	Max.	0,70	0,05
1,35	14,00	0,70	0,06	0,05	1,20	0,07

Během pomalého chladnutí je charakteristická tvorba karbidů uhlíku a karbidů chromu, jež se vylučují na hranicích austenitických zrn. Díky tepelnému zpracování je možné vyloučení těchto karbidů redukovat, a tím tak zjemnit austenitickou strukturu. Je využito rozpouštěcího žíhání. Rozpouštěcí žíhání se provádí jako konečné tepelné zpracování při teplotách v rozmezí 1000-1150 °C. Dochází k rozpuštění nežádoucích karbidů a vzniká homogenní austenitická struktura. Následuje prudké ochlazení, nejčastěji dusíkem, nadkritickou rychlostí. Hadfieldova ocel byla dříve využívána pro své samovytvrzovací schopnosti jako materiál na výrobu mříží ve vězeních. Dnes však nachází uplatnění ve výrobě drtičů kamenů, čepů pojezdových pásů a korečků rypadel. [7], [8]



Obr. 3.2 Korečky rypadla [9]

4 Litiny

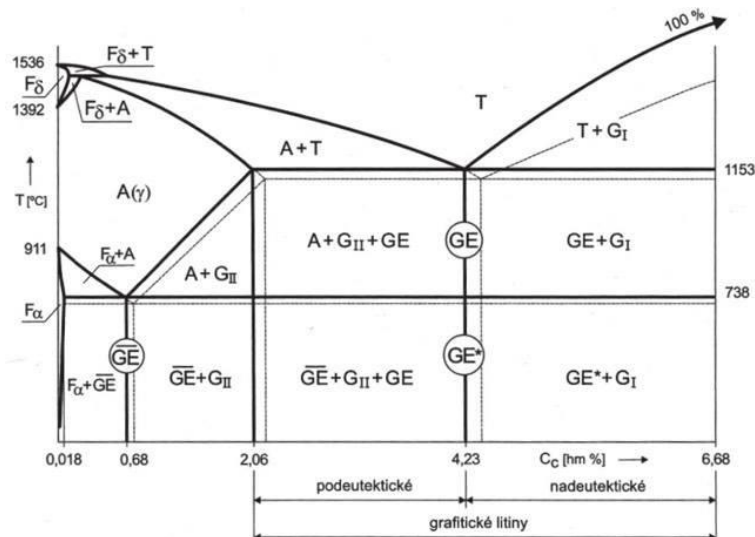
Litiny jsou slitinami železa a uhlíku s obsahem uhlíku vyšším než 2 %. Kromě uhlíku se v litinách vyskytují další prvky jako: křemík, síra, fosfor a mangan. Tato základní sestava utváří litiny nelegované. Legované litiny jsou navíc při výrobě obohaceny dalšími prvky jako: chrom, nikl, měď, molybden či hořčík. Každý z těchto prvků pak zásadně ovlivňuje výslednou strukturu litiny, a tím i její základní vlastnosti. Podle způsobu vyloučení uhlíku jsou litiny rozděleny na grafitické, cementitické a tvrzené. [10], [11]

4.1 Grafitické litiny

Jak již název napovídá, u grafitických litin je uhlík přítomen v podobě grafitu. Dle tvaru grafitu mohou být litiny dále rozděleny na litiny s lupínkovým grafitem (LLG), litiny s kuličkovým grafitem (LKG), litiny s červíkovitým grafitem (LVG) a litiny temperované (TL). V oblasti výroby stavebních strojů jsou zajímavé litiny s kuličkovým grafitem.

4.1.1 Litiny s kuličkovým grafitem

Litiny s kuličkovým grafitem se vyznačují sférickou formou vyloučeného grafitu. Díky modifikaci je možné dosáhnout změny morfologie grafitu. Nadále společně s modifikací, ať už během nebo po ní, je litina očkovaná. Procesem očkování je myšleno dosazení vhodných prvků – očkovaadel do taveniny ještě před samotným litím. Díky očkování je zajištěn vznik krystalografických zárodků. S narůstajícím počtem zárodků se zjemňuje struktura matrice. Tím pádem ubývá pórovitosti, a je možné tak snížit pravděpodobnost vzniku trhlin při tuhnutí. Při očkování je potlačeno metastabilní tuhnutí ve všech částech odlitku. Jsou také zrovnomeněny vlastnosti litiny v různých částech odlitku a zvyšuje se také tažnost litiny. Vzhledem k tomu, že v celém odlitku dochází i ke zrovnornění tvrdosti, stává se odlitek lépe obrobiteľný. Nejvýznamnějším prvkem pro očkování LKG je křemík. Společně s uhlíkem se řadí mezi grafitotvorné prvky, zajišťující tuhnutí podle stabilní soustavy Fe-C (*obr. 4.1*). Ferit v matrici je substitučně nahrazován křemíkem a napomáhá ke zvýšení meze kluzu a meze pevnosti. Na druhou stranu křemík snižuje houževnatost a zvyšuje tranzitní teplotu. Tranzitní teplota je taková teplota, nad jejíž hodnotou se zkušební vzorky porušují houževnatě a pod její hodnotou křehce. [11], [12]



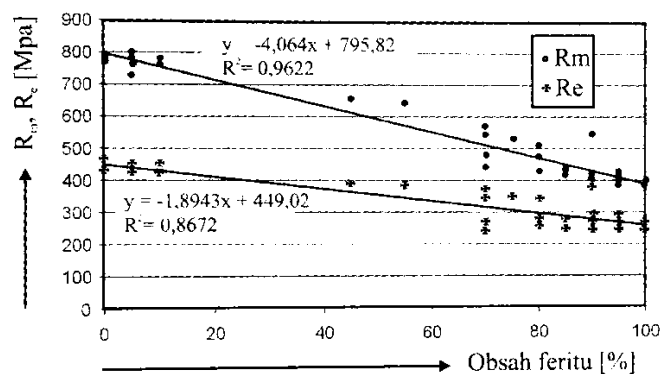
Obr. 4.1 Stabilní rovnovážný diagram Fe-C [13]

Vlivem křemíku dochází také ke snižování tepelné vodivosti materiálu. Obecně složení litin s kuličkovým grafitem je přibližně eutektické, případně mírně nadeutektické. Doporučuje se chemické složení v hmotnostních procentech podle tab. 4.1.

Tab. 4.1 Chemické složení pro litiny s kuličkovým grafitem [12]

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Cu
3,5	2,0	0,08	Max.	0,010	0,020	0,02
3,8	2,5	0,65	0,035	0,020	0,065	0,80

V tab. 4.1 je uveden minimální obsah hořčíku 0,020 %, avšak při takto nízkém obsahu nemusí být zaručeno vyloučení grafitu ve sférické podobě. Proto je v praxi udržován obsah hořčíku nad 0,025-0,030 %. V licím stavu může být u litin struktura matrice feritická, feriticko-perlitická a perlitická. Díky perlitu roste u litiny tvrdost a pevnost, ale klesají plastické vlastnosti a houževnatost. [11]

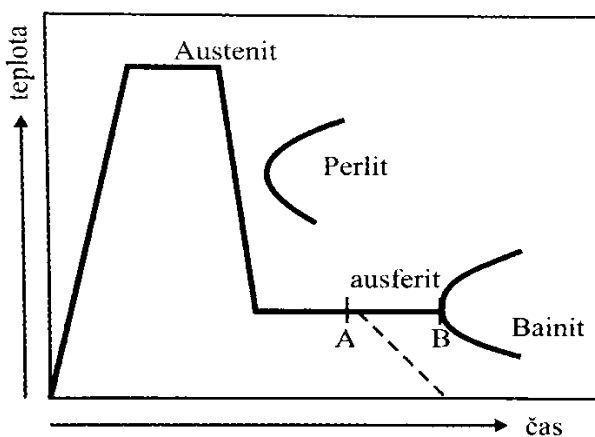


Obr. 4.2 Vliv podílu feritu v matrici na pevnost R_m a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [11]

Pozitivní vliv na slévárenské vlastnosti má rostoucí obsah uhlíku. Snižuje tvorbu ředin a mikrostaženin. Při tuhnutí se projevuje vyšší obsah uhlíku zmenšující se změnou objemu. [11]

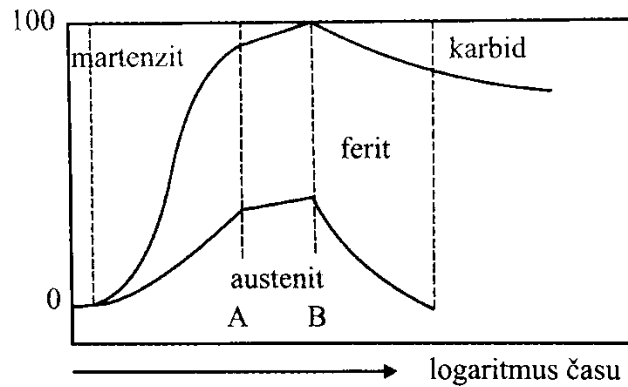
4.1.2 Izotermicky zušlechtěné litiny

Izotermicky kalené litiny, takto se nazývající dle normy EN 1564, jsou často označovány anglickou zkratkou ADI (Austempered Ductile Iron). Dle slova „ductile“, které v překladu znamená tažný či tvárný, je zřejmé, že při výrobě ADI litin je používána jakostní tvárná litina, tedy litina s kuličkovým grafitem. Ve skutečnosti však nelze tvrdit, že se jedná o kalené litiny. Výsledná struktura litiny není totiž bainitická ani martenzitická, ale austenito-feritická. Aby bylo možné dosáhnout takovéto struktury, je nutné nejprve litinu ohřát na austenitizační teplotu. Ve stabilním diagramu (*obr. 4.1*) se při ohřívání pohybujeme nad teplotou A_3 . Ohřev je možný provést v šachtové peci s řízenou atmosférou. Důležitým požadavkem při tepelném zpracování je zabránit oduhličení povrchové vrstvy odlitku. To zajišťuje právě ochranná atmosféra v peci. Samotná austenitizace u menších odlitků trvá kolem jedné hodiny. Jakmile odlitek dosáhne homogenní austenitické struktury, je následně ponořen do solné lázně. Teplota izotermické výdrže v solné lázni se pohybuje v rozmezí 250-450 °C. V této fázi probíhá u odlitku izotermické zušlechtění. Je zásadní, aby byla dodržena specifická doba, po kterou je nutné odlitek udržovat při stálé teplotě. Pokud by byla doba příliš krátká, obsahovala by výsledná struktura i martenzit. Naopak při delší, než požadované době by byl z austenitu vyloučen ϵ -karbid, s jehož růstem klesají plastické vlastnosti. Schematicky znázorněný postup tepelného zpracování je uveden na *obr. 4.3*. [11]



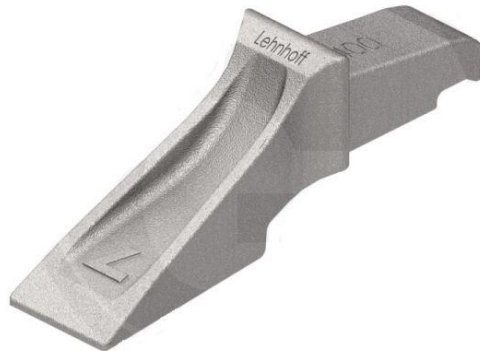
Obr. 4.3 Tepelné zpracování ADI [11]

Potřebná doba izotermické výdrže je v *obr. 4.3* vytyčena úsečkou AB. Při izotermické výdrži je z austenitu vylučován ferit. Zbýlý austenit se stabilizuje a ve výsledné tzv. ausferitické struktuře je jeho obsah 20-35 %. Závislost výsledné struktury na době izotermické výdrže je znázorněna na *obr. 4.4*.



Obr. 4.4 Změna struktury během izotermické výdrže [11]

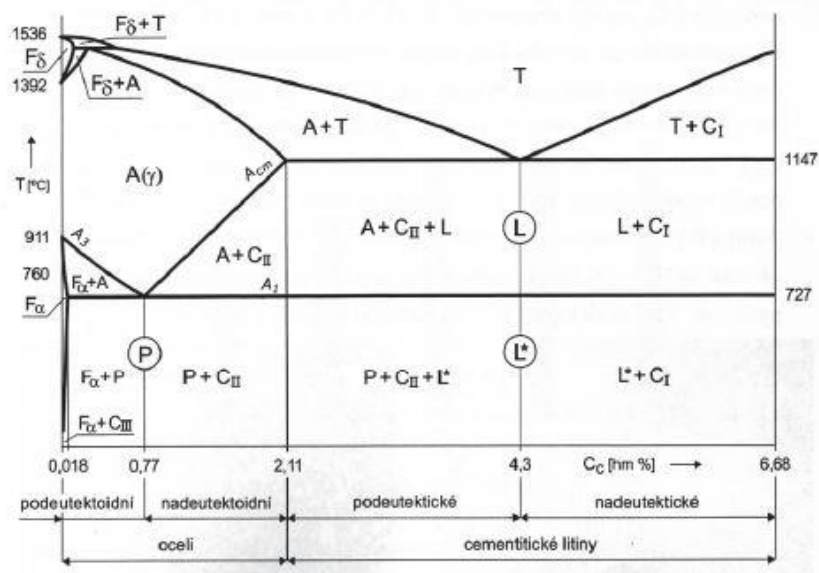
Austenit pozitivně ovlivňuje nejen plastické vlastnosti litiny, ale zároveň také její otěruvzdornost. ADI litina je díky své otěruvzdornosti využívána například při výrobě zubů pro bagrové lžíce. [11]



Obr. 4.5 Zub Lehnhoff pro lopaty nakladačů a lžíce bagrů [14]

4.2 Cementitické litiny

U cementitických litin, též nazývaných bílých, je uhlík vyloučen v podobě cementitu, tj karbidu železa (Fe_3C). Obvyklý obsah uhlíku bývá 2,4-4,5 %. Nazývána bílá je proto, že lomová plocha litiny má charakteristické bílé zbarvení. Díky vyšším ochlazovacím rychlostem při tuhnutí je možné podpořit vznik cementitu. To lze učinit i za pomoci karbidotvorných prvků zejména manganu (0,4-1 %) a naopak nižšího obsahu křemíku (0,3-1,6 %), který je právě nekarbidotvorným prvkem. Díky vysokému obsahu karbidu železa jsou bílé litiny velmi tvrdé (350-500 HB), avšak křehké a téměř neobrobitelné. Obecně jsou cementitické litiny používány na součástky, které jsou extrémně namáhány třením. Také nacházejí uplatnění jako výchozí materiál pro výrobu temperované litiny. Cementitické litiny krystalizují podle metastabilního rovnovážného diagramu Fe- Fe_3C (obr. 4.6) [15], [16]



Obr. 4.6 Metastabilní rovnovážný diagram Fe- Fe_3C [13]

Bílé otěruvzdorné litiny se dle ČSN EN 12513 dělí na nelegované nebo nízkolegované, nikl-chromové dvou hlavních druhů a na litiny s vyšším obsahem chromu.

4.2.1 Nelegované nebo nízkolegované litiny

Nelegované bílé litiny jsou používány u odlitků, které mají odolávat abrazivním a erozivním účinkům nejčastěji minerálních částí. Jejich struktura je tvořena tvrdými karbidy Fe_3C a dále pak relativně měkkým perlitem nebo feritem. Navzdory tomu, že jejich odolnost oproti legovaným bílým litinám je o poznání nižší, jsou stále používány. Je tomu z důvodu nízké ceny. [17]

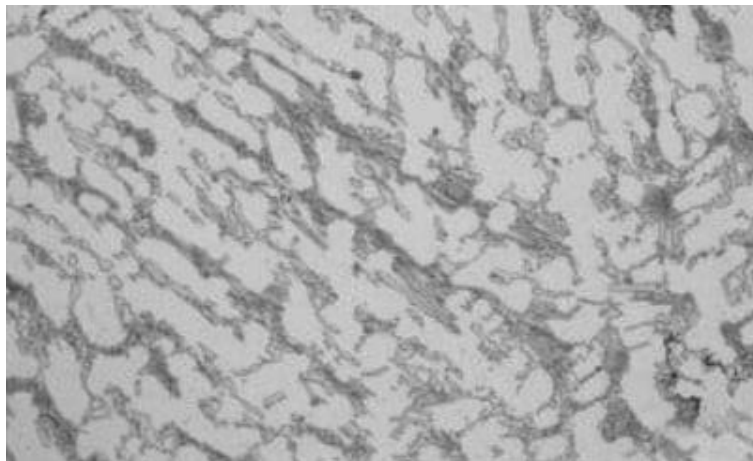
4.2.2 Nikl-chromové litiny

Použitím legur v bílých litinách lze nahradit perlitickou nebo feritickou maticí martenzitem a zbytkovým austenitem. Pokud má litina vhodné složení, je možné vytvořit směs martenzitu a austenitu během ochlazování odlitku na vzduchu nebo ve formě. Známé jsou litiny Ni-Hard (1-4). Konkrétně typy 1 a 2 jsou principiálně křemíkové litiny legované 3-5 % Ni a 1-3,5 % Cr. Tyto litiny se obvykle popouští na 275 °C/10-12 h/vzd. Mikrostruktura je po odlití složena z martenzitu, dendritů austenitu a ledeburitického eutektika. Během popouštění je zbytkový austenit transformován na velmi jemný martenzit. Co se týče karbidů M_3C , je jejich podíl závislý na obsahu uhlíku. Uplatnění nachází tam, kde není vystavena vysokému dynamickému namáhání, tj. například součásti míchaček betonu a asfaltu (*obr. 4.7*). [17], [18]



Obr. 4.7 Pohled do bubnu míchačky asfaltu [19]

Modifikací Ni-Hard 1 a Ni-Hard 2 vzniká litina Ni-Hard 4 (*obr. 4.8*), jejíž podíl chromu je 8-10 % a niklu 4-6 %. Oproti ostatním nikl-chromovým bílým litinám nabízí vyšší houževnatost. [17], [20]



Obr. 4.8 Mikrostruktura litiny Ni-Hard 4 [21]

4.2.3 Litiny s vyšším obsahem chromu

Litiny s vyšším obsahem chromu jsou rozděleny do následujících čtyř skupin podle obsahu chromu:

11 % $<Cr \leq 14$ %;

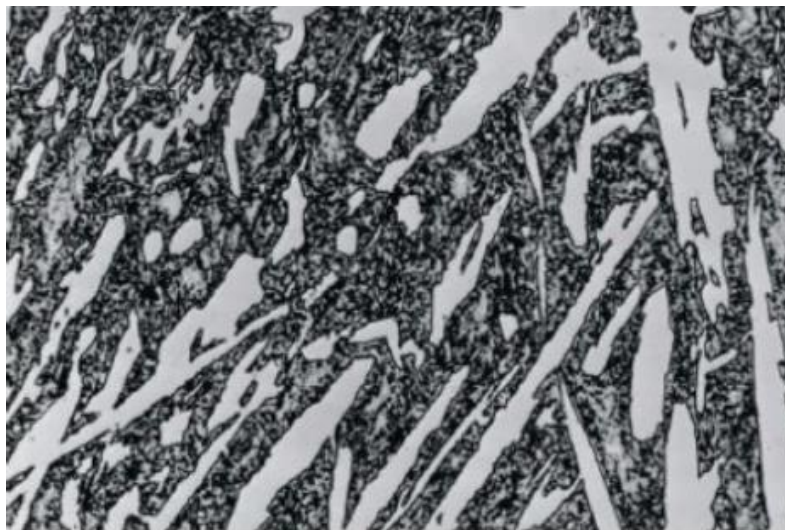
14 % $<Cr \leq 18$ %;

18 % $<Cr \leq 23$ %;

23 % $<Cr \leq 30$ %.

Takové litiny mají po odlití mikrostrukturu vykazující dva hlavní druhy – podeutektickou a nadeutektickou. Podeutektická struktura je složena z eutektických karbidů v matrici primárních austenitických dendritů a eutektického austenitu. Nadeutektická struktura se skládá z primárních a eutektických karbidů v matrici eutektického austenitu. Kalením se austenitická fáze převážně přemění na martenzit, jež obsahuje jemně rozptýlené sekundární karbidy. Dále pak může matrice obsahovat zbytkový austenit či bainit. Objemový podíl komplexních karbidů M_7C_3 je poměrně velký (20-40 %). Díky této struktuře dosahují vysoké tvrdosti (min. 600 HV) a dobré odolnosti vůči abrazivním a erozivním účinkům částic. Mikrostruktura (*obr. 4.9*) matrice je závislá na obsahu legujících prvků a na tepelném zpracování, kterým také lze měnit morfologii sekundárních karbidů. Je třeba zajistit správné rovnováhy mezi odolností proti opotřebení a houževnatostí, která je důležitá z hlediska namáhání součástí opakovanými nárazy. Chromové bílé litiny pro všeobecné použití obsahují 23-28 % Cr a kolem 1,5 % Mo. Molybden zabraňuje perlitické transformaci a zajišťuje tak maximální tvrdost.

Je tedy vhodné legovat litiny vždy molybdenem. Též jsou bílé chromové litiny legovány Ni a Cu do 1 %, avšak docílená tvrdost není taková jako u Cr-Mo bílých litin. Nicméně se tyto litiny používají jak v prostředí, kde je kombinace účinků opotřebení částicemi, tak i korozního působení okolního prostředí. [17], [22]



Obr. 4.9 Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo [17]

Odlitky z litin s vyšším obsahem chromu jsou dodávány buďto ve stavu hrubého odlitku nebo ve stavu tepelně zpracovaném. Typickým tepelným zpracováním je kalení, popouštění a žihání naměkko. [22]

Při kalení je odlitek pomalu ohříván na rozmezí teplot 900-1050 °C s dobou výdrže odpovídající tloušťce stěny a chemického složení. Následuje rychlé ochlazení. V oleji se ochlazují pouze tvarově jednoduché odlitky, aniž by byly vystaveny riziku vzniku prasklin. Rychlé ochlazování se častěji provádí vzduchem, resp. plynem. Při ochlazování vzduchem/plynem je využíváno ventilátorů, tlakového plynu nebo atomizovaného kapalinového spreje. Odlitky složitých tvarů je doporučeno ochlazovat na klidném vzduchu. Je tedy nutné, aby byla zaručena dostatečná prokalitelnost materiálu. [22]

Popouštění se provádí za účelem snížení tvrdosti materiálu, a tím navýšení houževnatosti. Lze tedy přizpůsobit poměr tvrdosti a houževnatosti konkrétní aplikaci. Popouštěcí cyklus zahrnuje pomalý ohřev na rozmezí teplot 400-750 °C. Doba výdrže je volena na základě požadované tvrdosti. Následuje ochlazení na vzduchu nebo v peci. [22]

Jestliže se požaduje tvrdost odlitku pod 380 HBW, je provedeno žihání naměkko. Využívá se zejména ke zlepšení obrobitelnosti odlitku. Odlitek je nejprve pomalu ohříván na rozmezí teplot 920-975 °C. Výdrž při takové teplotě je nejméně 1 hodina na každých 25 mm tloušťky. Následuje pomalé řízené ochlazování v peci na teplotu přibližně 810 °C. Pak opět pokračuje ochlazování na teplotu 600 °C rychlostí nepřevyšující 55 °C/h. Proces tohoto tepelného zpracování je zakončen dochlazením na vzduchu nebo v peci. [22]

Mohou být provedena i další tepelná zpracování. Například pokud je potřeba u odlitku snížit vnitřní pnutí, je provedeno žihání k odstranění pnutí. [22]

Tab. 4.2 Příklady označování bílých otěruvzdorných litin [22]

Označení materiálu		Tvrdost podle Vickerse HV min	Poznámka
značka	číselně		
EN-GJN-HV350	EN-JN2019	350	nízkolegovaná litina, 2 % Cr
EN-GJN-HV550	EN-JN2039	550	nikl-chromová litina 3-5 % Ni, 1-3,5 % Cr
EN-GJN-HV600	EN-JN2049	600	nikl-chromová litina 4-6 % Ni, 8-10 % Cr
EN-GJN-HV600 (XCr11)	EN-JN3019	600	litina s vyšš. obs. chromu 11-14 % Cr
EN-GJN-HV600 (XCr23)	EN-JN2049	600	litina s vyšš. obs. chromu 23-28 % Cr

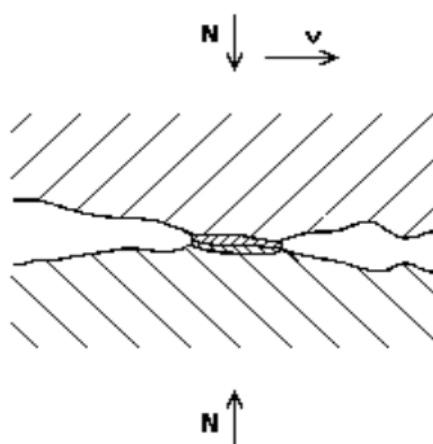
5 Mechanismy opotřebení

Pokud dochází ke změnám povrchu, rozměrů nebo vlastností tuhých těles, bavíme se o opotřebení. Je způsobeno vzájemným působením funkčních povrchů nebo povrchu a média vyvolávající opotřebení. V praxi dost často dochází ke kombinaci různých druhů opotřebení. Jen zřídka kdy je možné se setkat se součástí, na kterou působí pouze jeden druh opotřebení. Opotřebení lze rozdělit na 6 základních druhů: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. [23]

5.1 Adhezivní opotřebení

U adhezivního opotřebení je charakteristické oddělování a přemísťování částic kovu uprostřed dvou stykových ploch. Dochází k porušování povrchových vrstev materiálu v důsledku relativního pohybu funkčních povrchů. Díky velkému množství kontaktních plošek a spolupůsobení velkých sil dochází ke styku povrchů. Vznikají plastické deformace a vytváří se mikrospoje. Při vzniku mikrospojů je materiál lokálně ohříván, což napomáhá chemické reakci mezi kovem a okolním prostředím, jež může urychlit opotřebení. V praxi je možné se setkat s adhezivním opotřebením při kontaktu kola a kolejnice, u kluzných ložisek nebo u čepů. [23]

Velikost opotřebení hodně závisí na volbě materiálu kontaktní dvojice, opracování funkčních povrchů a v neposlední řadě na zatížení kontaktní dvojice. Vliv adhezivního opotřebení lze snížit mazáním funkčních povrchů. Současně působí také jako chemická ochrana povrchů, například před působením vzdušného kyslíku. [23]

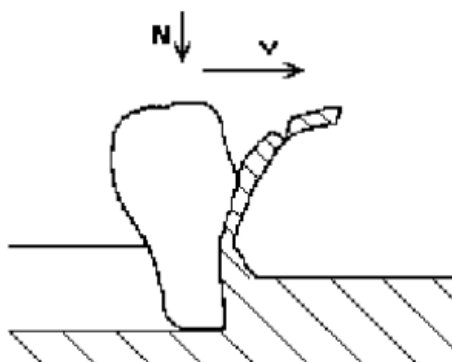


Obr. 5.1 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [23]

5.2 Abrazivní opotřebení

Tento druh opotřebení je typický v případech, kdy dochází ke styku dvou povrchů, přičemž jeden z nich nebo oba jsou drsné a tvrdé. Dále pak, když jsou mezi dvěma povrchy přítomny volné tvrdé částice nebo též při zpracování materiálu obsahující tvrdé částice. Na opotřebovávaném povrchu se částice materiálu oddělují rýhováním a seřezáváním. Pokud je opotřebení velice intenzivní, jsou vzniklé rýhy hluboké a viditelné pouhým okem. Při mírném opotřebení je zpočátku povrch vyleštěn a rýhy jsou viditelné pouze při zvětšení. [23]

Během opotřebení záleží na množství částic. Částice, které jsou menší než vůle mezi povrchy, mají tendenci se shlukovat a tím tak nepříznivě ovlivňovat dané povrchy. Zajisté také záleží na tvaru částic. Čím ostřejší hrany budou částice mít, tím bude povrch více opotřeben. Též záleží na tvrdosti částic. Logicky čím tvrdší částice budou, tím snáz proniknou do materiálu a intenzita opotřebení se rázem zvýší. Určitě je dále třeba brát v potaz pevnost částic a zatížení, které na soustavu opotřebovávaný povrch a abrazivní částice působí. [23]



Obr. 5.2 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [23]

5.3 Erozivní opotřebení

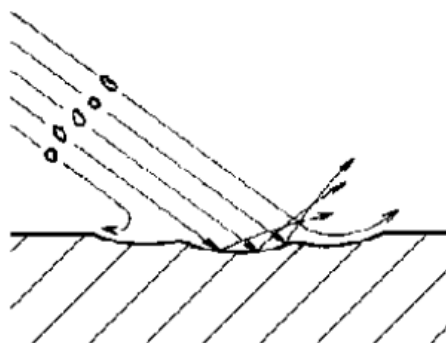
Erozivní opotřebení je charakterizováno oddělováním materiálu účinkem částic, které jsou unášeny kapalinou nebo plynem. Vyskytuje se například u ventilátorů, tryskačů nebo u pneumatických potrubí. Nicméně se může jednat i o samotné částice kapaliny, páry nebo plynu. Nejvíce jsou tak ohroženy parní armatury, plynové turbíny nebo ventily spalovacích motorů. [17], [23]

Princip opotřebení je podobný jako u abrazivního. Povrch materiálu je seřezáván a vznikají na něm rýhy. Pro erozivní opotřebení je typický nerovnoměrně porušený povrch, jenž je zvlněn a zvrásněn. Poškození je zřejmé i v prohlubeninách. [17], [23]

Vliv na erozivní opotřebení mají: relativní rychlost opotřebovávajících částic, teplota a chemické vlastnosti nosného média, druh a tvar společně s velikostí částic, kinetická energie a úhel dopadu částic a v neposlední řadě vlastnosti opotřebovávaného materiálu. Tyto všechny vlivy působí současně, ale každý v jiné míře. Záleží na specifické situaci. Děje jsou variabilní a poměrně komplikované. [17], [23]

Rychlost částic společně s jejich měrnou hmotností a velikostí jednoznačně určují kinetickou energii. Pokud budou částice lehké, nemusí ke kontaktu s povrchem vůbec dojít. U erozivního opotřebení tedy existuje kritická velikost, a i kritická rychlost částic.

Při dopadu částice na povrch je smýkána a přitlačena vzniklými silami. Děj je tedy závislý na velikosti vzniklých sil. Z praktických zkušeností lépe odolávají erozivnímu opotřebení materiály měkké a pružné (např. pryže) oproti materiálům tvrdým (např. kalené oceli nebo bílé litiny). [17], [23]

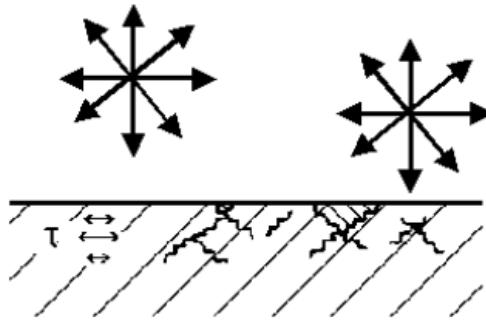


Obr. 5.3 Schéma mechanismu erozivního opotřebení [23]

5.4 Kavitační opotřebení

Proces tohoto opotřebení se týká součástí pracujících v kapalinách, nejčastěji ve vodě. Principem kavitačního opotřebení je oddělování částic z povrchu v důsledku zániku kavitačních dutin v kapalině. Při kavitaci vznikají kavitační dutiny (kaverny). Dochází k tomu při snížení tlaku určité oblasti kapaliny pod hodnotu tlaku nasycených par při dané teplotě. Kaverny jsou vyplněné parami kapaliny. Takto vzniklé dutiny následně v oblasti vyšších tlaků implodují. Imploze způsobí hydrodynamické rázy, které poškozují povrch pracující součásti. Povrch poškozený kavitací je drsný a jakoby vytrhaný. Kavitační opotřebení je ovlivněno obsahem plynů v kapalině, teplotou, tlakovými poměry, povrchovým napětím a viskozitou kapaliny. Kavitačnímu opotřebení

odolávají součásti jako jsou například redukční ventily, vodní turbíny, ale také i tlakově mazaná ložiska atd. [23]

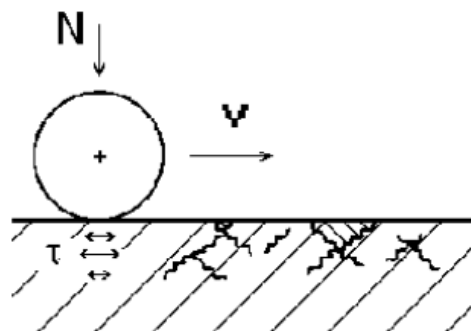


Obr. 5.4 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení [23]

5.5 Únavové opotřebení

Při únavovém opotřebení se postupně kumulují poruchy v povrchové vrstvě vlivem opakujících se kontaktních napětí. Pokud jsou tato napětí nad mezí kluzu, bavíme se o nízkocyklové únavě (10^3 - 10^4 cyklů). Jestliže jsou pod hodnotou meze kluzu, jedná se o vysokocyklovou únavu (10^6 - 10^7 cyklů). Během silového a cyklicky opakovaného styku dvou těles vzniká kontaktní únavové opotřebení. Vyskytují se zde vysoké lokální tlaky. [23]

Pozitivní vliv proti únavovému opotřebení má navýšení tvrdosti povrchu. Nepříznivě působí vměstky v materiálu. Chovají se jako vruby, a proto na nich nejdříve vznikají únavové mikrotrhliny, které postupným namáháním nabývají větších rozměrů. Podobně je to s drsností. Čím větší drsnost povrchu, tím více se projevuje její vrubový účinek. Typickými cyklicky namáhanými součástmi jsou vlaková soukolí či ozubení. [23]



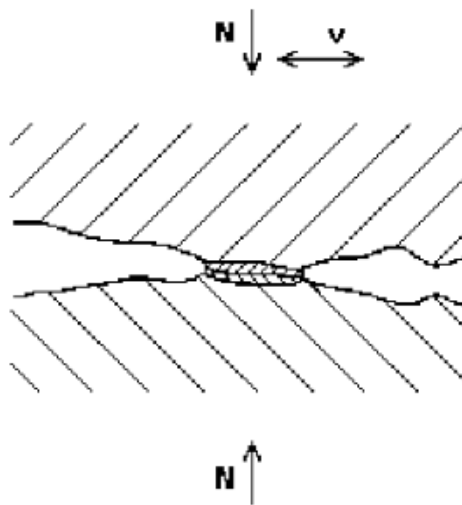
Obr. 5.5 Schéma mechanismu únavového opotřebení [23]

5.6 Vibrační opotřebení

Při vibračním opotřebení dochází k oddělování částic materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch, které jsou zároveň zatíženy normálovými silami. Pohyb ploch může být přímočarý vratný pohyb, pohyb způsobený přenesenými vibracemi nebo pohyb, který vznikl pružnými deformacemi v uložení mechanicky namáhaných součástí. [23]

Vibrační opotřebení vzniká, pokud je amplituda pohybu větší než ta, která může být vyrovnána pružnými deformacemi povrchů. S rostoucí amplitudou opotřebení roste. U frekvencí je to naopak. Při nižších frekvencích je opotřebení vyšší. Mohou se tak projevit chemické složky procesu, které potřebují ke svému průběhu určitý čas. S rostoucí frekvencí se zkracuje doba působení chemických činitelů. [23]

Často k takovému druhu opotřebení dochází v různých pohyblivých uloženíh, na která jsou přenášeny vlastní kmity nebo kmity buzené cizím zdrojem. Jimi jsou např.: valivá ložiska, čepy, hřídele, setrvačníky, náboje kol nebo křížové klouby. [23]



Obr. 5.6 Schéma mechanismu vibračního opotřebení [23]

6 Experimentální část

6.1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je posouzení příznivých účinků tepelného zpracování chromové bílé litiny EXL-1A na její tvrdost, odolnost proti opotřebení a výslednou strukturu. Experimentální část provází měření tvrdosti, erozivní zkoušky a metalografické vyhodnocení vzorků.

6.2 Vzorky

Pro uskutečnění experimentu byly dodány celkem 4 vzorky chromové bílé litiny EXL-1A o různých tepelných zpracováních. Jedná se o litinu s vyšším obsahem chromu spadající do skupiny obsahu chromu $23 \% < Cr \leq 30 \%$.

Vzorky nesou značení 0, 1, 3 a 17 dle druhu tepelného zpracování již ze slévárny. Toto značení je nadále zachováno ve zbylém textu až na výjimku erozivní zkoušky, kde je výchozí značení doplněno jiným. Je možné si povšimnout původního stavu vzorků na *obr. 6.1*.



Obr. 6.1 Stav vzorků po dodání od slévárny

6.2.1 Chemické složení

Rozbor chemického složení nebylo nutné provést, neboť byl již dodán od slévárny. Předpis a stav chemického složení je uveden v *tab. 6.1*. Bylo potřeba dopočítat uhlíkový ekvivalent dle vztahu (1) a procentuální zastoupení karbidů dle vztahu (2) uvedených v literatuře [24].

$$C_E = \% C + 0,0474 \cdot \% Cr \quad (1)$$

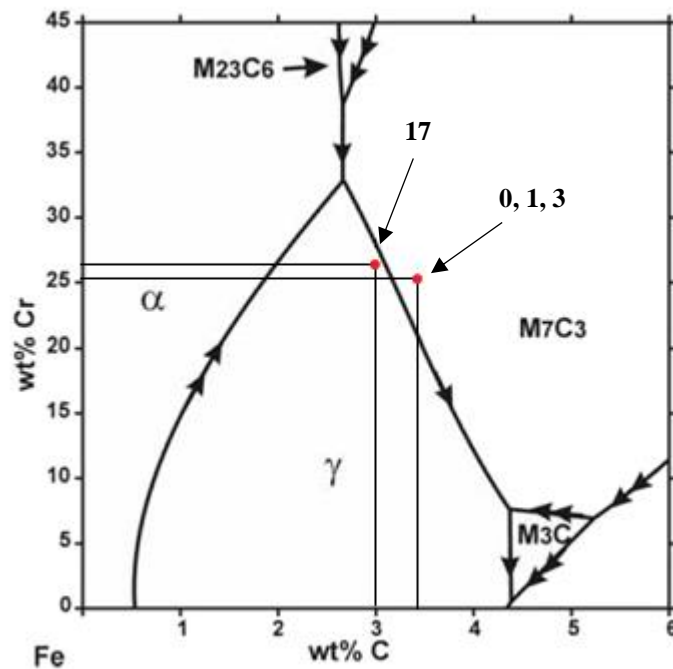
$$C_v = 12,33 \cdot \% C + 0,55 \cdot \% Cr - 15,2 \quad (2)$$

Tab. 6.1 Chemické složení chromové bílé litiny EXL-1A

	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	C _E	C _v
Předpis	2,8	0,8	max.	max.	max.	24,0	max.	0,50	-	-	-
EXL-1A	3,5	1,2	0,50	0,050	0,030	27,0	0,50	1,00	-	-	-
Vzorky 0; 1; 3	3,38	0,85	0,26	0,020	0,016	25,15	0,23	0,51	0,030	4,57	40,3
Vzorek 17	3,00	0,89	0,31	0,039	0,016	25,83	0,22	0,59	0,036	4,22	36

U všech vzorků dle *tab. 6.1* byl předpis chemického složení dodržen.

Na *obr. 6.2* je diagram stabilního systému Fe-Cr-C s vyznačenými body chemického složení vzorků použitých v experimentální části.

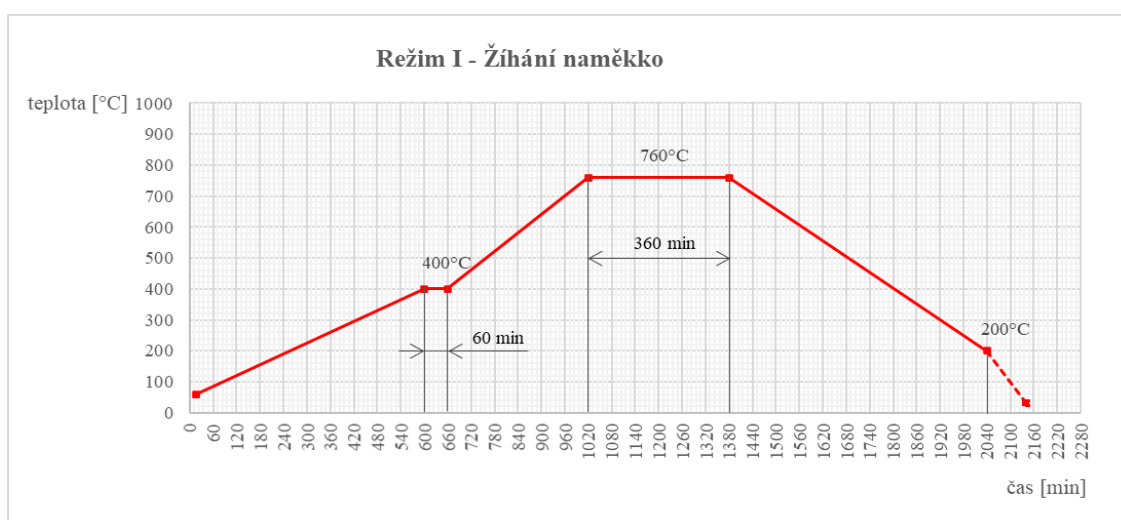


Obr. 6.2 Diagram stabilního systému Fe-Cr-C s vyznačenými body složení vzorků [25]

6.2.2 Tepelná zpracování

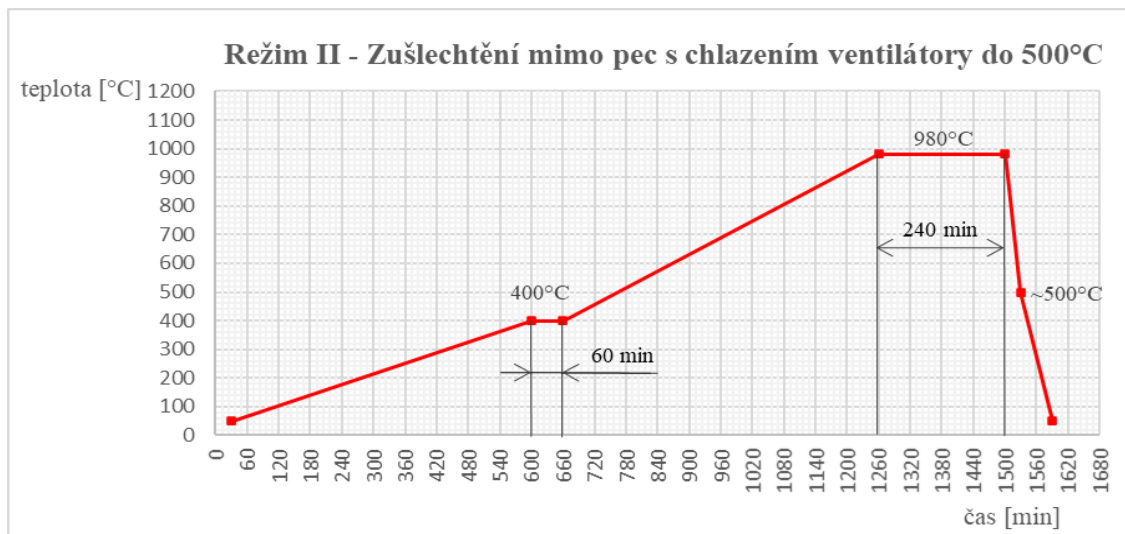
U jednotlivých vzorků byla provedena celkem tři tepelná zpracování s tím, že jeden vzorek zůstal v litém stavu. Provedení tepelných zpracování je následující:

1. Vzorek 0 – Režim č.0: bez tepelného zpracování
2. Vzorek 1 – Režim č.I: žiháno naměkko (*obr. 6.3*)
3. Vzorek 3 – Režim č.II: zušlechtěno mimo pec s chlazením ventilátory do 500 °C, pak neřízené ochlazování na vzduchu (*obr. 6.4*)
4. Vzorek 17 – Režim č.III: zušlechtěno mimo pec s chlazením ventilátory do pokojové teploty (*obr. 6.5*)



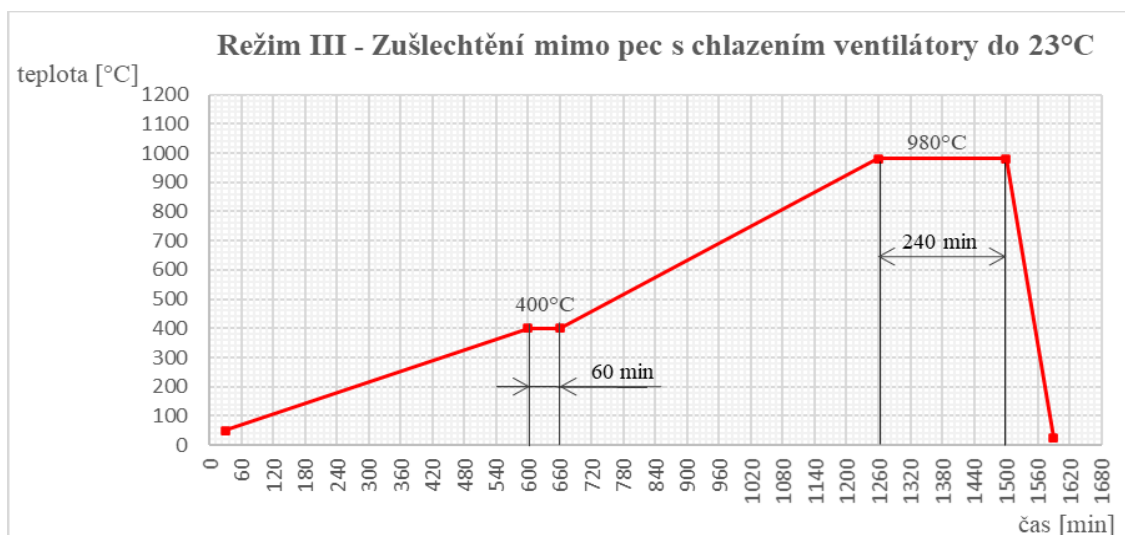
Obr. 6.3 Tepelné zpracování – Režim č.I

Při žihání naměkko došlo k 60minutové prodlevě při teplotě 400 °C a následně pak k 360minutové výdrži na teplotě 760 °C. Poté byl odlitek řízeně ochlazován v peci s poklesem teploty 50 °C za každou hodinu. Při teplotě 200 °C byl vůz vytažen z pece, a následně byl odlitek neřízeně ochlazován na vzduchu až do pokojové teploty (23 °C).



Obr. 6.4 Tepelné zpracování – Režim č.II

Při prvním zušlechtění mimo pec došlo opět k 60minutové prodlevě při teplotě 400 °C. Výsledná výdrž probíhala při teplotě 980 °C po dobu 240 minut. Následně byl vůz vytažen z pece a odlitek byl ochlazován ventilátory až do teploty 500 °C, kdy byl poté neřízeně ochlazován na vzduchu opět do pokojové teploty.



Obr. 6.5 Tepelné zpracování – Režim č. III

Druhé zušlechtění je obdobné jako první. Liší se mezi sebou tím, že odlitek je u druhého chlazen ventilátory až do pokojové teploty.

6.2.3 Příprava vzorků

Původní odřezky ze slévárny bylo třeba nechat před měřením tvrdosti sbrousit. Odstranil se tak značkovací sprej a nerovnosti povrchů vzorků, které by mohly být nežádoucími elementy při měření tvrdosti. Bylo tak učiněno na rovinné brusce BRH 20 CNC od firmy Mikronex. Bruska disponuje magnetickým upínacím stolem.



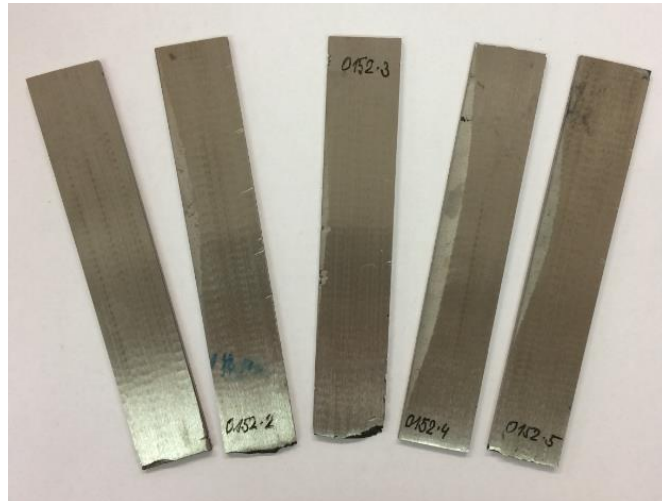
Obr. 6.6 Rovinná bruska Mikronex BRH 20 CNC [26]

Jakmile proběhlo měření tvrdosti, bylo třeba vzorky následně připravit na erozivní zkoušky. Vzhledem k tomu, že původní vzorky byly jak rozměrově, tak i váhově nevhodné k uskutečnění experimentu, bylo je třeba nechat upravit vodním paprskem. Z každého původního již sbroušeného vzorku byla odříznuta patka cca 20 mm široká (*obr. 6.7*), jež posloužila k metalografickému výbrusu.

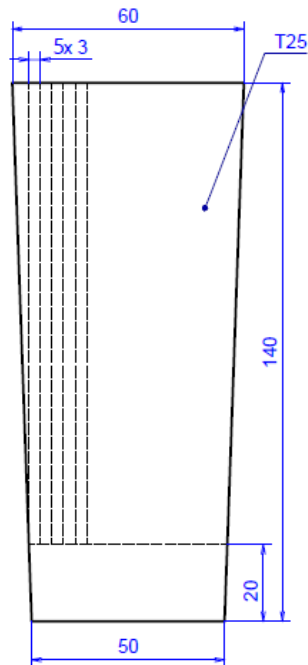


Obr. 6.7 Odřezané patky

Dále pak bylo z původního tvaru odříznuto 5 plátek o tloušťce cca 3 mm, na nichž byl prováděn samotný experiment. Zmíněné rozměry nejsou přesné z důvodu řezání chromové litiny vodním paprskem. Dále bylo tedy nutné tenké plátky opět sbrousit, aby se eliminoval nepříznivý vliv drsného a nerovného povrchu po řezání vodním paprskem (*obr. 6.8*). Rozměrová úprava vzorků je znázorněna na *obr. 6.9*.



Obr. 6.8 Tenké plátky



Obr. 6.9 Rozměry vzorku

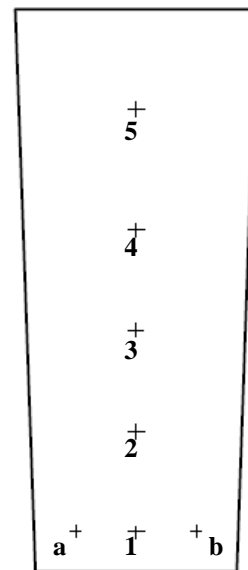
6.3 Měření tvrdosti

6.3.1 Popis měření a použité zařízení

Měření tvrdosti podle Brinella dle ČSN EN ISO 6506-1 bylo provedeno na tvrdoměru HPO 300 (*obr. 6.10*). Na každém vzorku bylo provedeno celkem 7 vpichů dle *obr. 6.11*. Jako indentor byla použita kulička ze slinutého karbidu o průměru **10 mm**, která byla zatěžována silou **3000 kp** po dobu **30 s**. Rozměry vpichů byly vyhodnocovány pomocí mikroskopu Olympus DSX1000 (*obr. 6.12*).



Obr. 6.10 Tvrdoměr HPO 300



Obr. 6.11 Rozložení vpichů



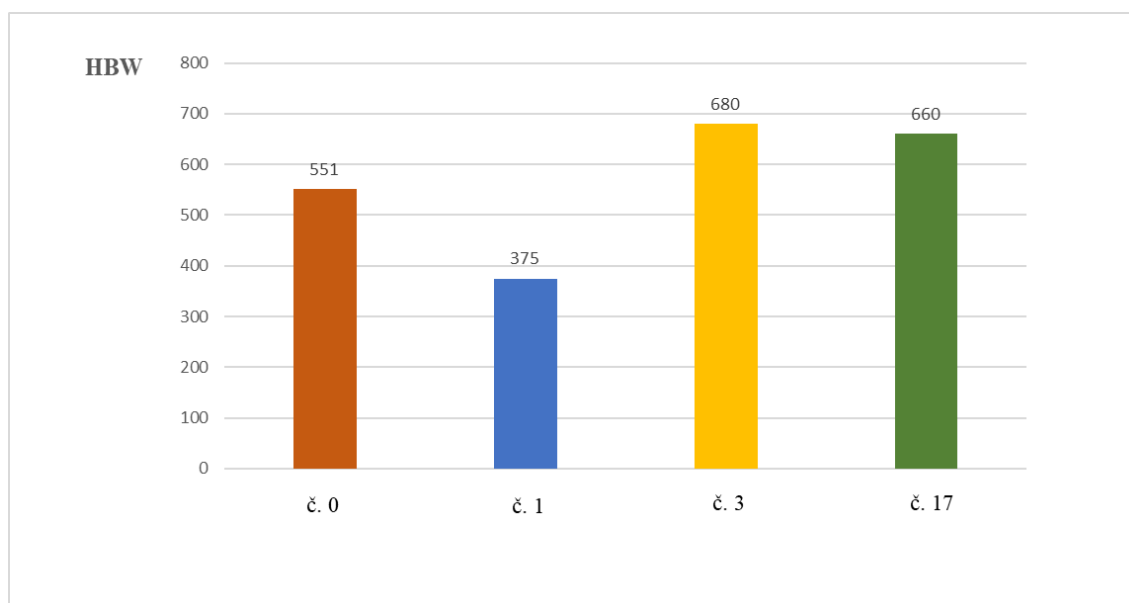
Obr. 6.12 Mikroskop Olympus DSX1000

6.3.2 Výsledky měření

Již zprůměrované hodnoty tvrdostí 4 vzorků jsou shrnuty v následující tabulce (tab. 6.2) včetně směrodatné odchylky. Naměřené hodnoty lze najít v přílohách.

Tab. 6.2 Průměrné hodnoty tvrdostí

vzorek	0	1	3	17
tvrdost HBW	551 ± 26	375 ± 8	680 ± 10	660 ± 18



Obr. 6.13 Tvrdost vzorků v závislosti na tepelném zpracování

6.3.3 Shrnutí výsledků tvrdosti

Jak již název tepelného zpracování žíhání naměkko předesílá, byla u takového vzorku, tj. vzorku 1, naměřena nejnižší tvrdost. U vzorků 3 a 17, jež prošly zušlechťením mimo pec s chlazením ventilátory jednou do 500 °C a podruhé do pokojové teploty, byly naměřeny tvrdosti takřka stejné a zároveň nejvyšší. Rozdíl hodnot stupnice Brinella není totiž tak velký, jako je tomu například u stupnice Rockwella.

6.4 Erozivní zkouška

6.4.1 Popis měření a použitá zařízení

Jako experiment na zjištění opotřebení poskytnutého materiálu byla provedena erozivní zkouška. Použito bylo sací tryskací zařízení PTZ E1 (*obr 6.14*). Jedná se o pneumatické tryskací zařízení, v němž je před tryskou upnut vzorek testovaného materiálu pomocí magnetické upínky. Nosným médiem abrazivních částic je tedy natlakovaný vzduch.



Obr. 6.14 PTZ E1

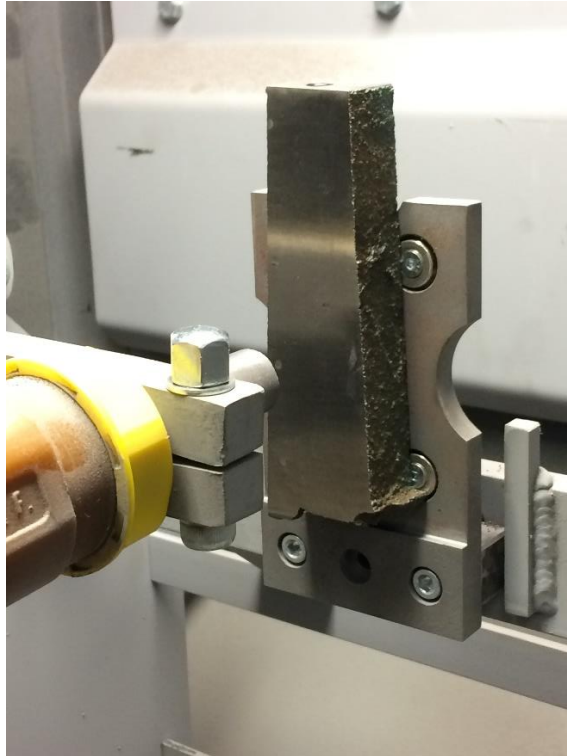


Obr. 6.15 Způsob upnutí vzorku

U tohoto experimentu se vyhodnocují výsledky na základě úbytku hmotnosti vzorků (odděleného materiálu). Je tedy nutné zvážit vzorky před tryskáním a následně po tryskání. Aby bylo možné provést vyhodnocení, bylo pro každý tepelný režim tryskáno 5 vzorků. Dále pak ještě bylo tryskáno 6 plátek konstrukční oceli S235JR, která posloužila k porovnání výsledků s chromovou litinou (poměrná odolnost proti erozivnímu opotřebení ψ_{eh}).

Nejprve bylo potřeba nastavit parametry experimentu. Zpočátku byl nastaven čas **300 s** a tlak média – vzduchu **0,5 MPa**. Průměr trysky byl neměnný – **Ø10 mm**. Proud abraziva s médiem byl namířen kolmo na tryskaný vzorek. Zkušební tryskání bylo provedeno na větším odřezku chromové litiny, protože nebylo zřejmé, kolik materiálu se „vytryská“ ven. Vzhledem k tomu, že při prvním pokusu vznikl na vzorku poměrně hluboký „kráter“, bylo rozhodnuto snížit čas na **60 s**.

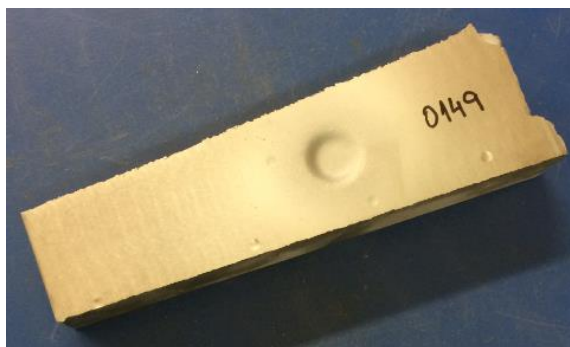
Standardně probíhá tryskání řádově v minutách až v hodinách. Nicméně bylo nutné snížit čas na kratší dobu, aby se zabránilo „protryskání“ tenkých plátek skrz celý materiál. Průběh je zaznamenán na *obr. 6.16-18*.



Obr. 6.16 Upnutý testovací vzorek



Obr. 6.17 Testovací vzorek před tryskáním



Obr. 6.18 Testovací vzorek po tryskání

Stanovené parametry experimentu jsou shrnuty v *tab. 6.3*.

Tab. 6.3 Parametry experimentu

čas [s]	úhel [°]		abrazivo	tlak média [Mpa]
60	15	90	HK F40	0,5

Jako abrazivo byl použit ostrohranný hnědý korund se zrnitostí F40, čemuž odpovídá velikost zrn v rozpětí 0,30 – 0,60 mm.

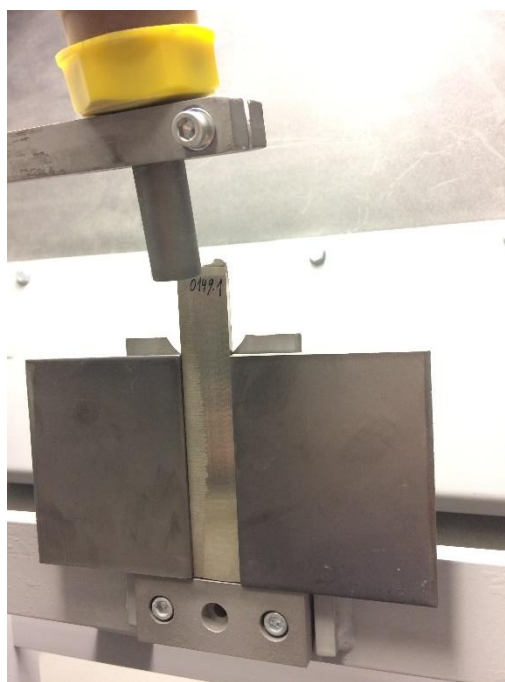


Obr. 6.19 Komora tryskacího zařízení

Experiment provedený na „tenkých plátcích“ proběhl celkem dvakrát, nejprve pro úhel tryskání 90° a pak pro úhel 15° (obr. 6.20 a obr. 6.21).



Obr. 6.20 Tryskání pod úhlem 90°



Obr. 6.21 Tryskání pod úhlem 15°

6.4.2 Výsledky měření

Již zprůměrované hodnoty hmotnostních úbytků vzorků pro odlišné úhly tryskání jsou shrnuty v tab. 6.4 a tab. 6.5. Naměřené hodnoty lze nalézt v přílohách.

Tab. 6.4 Průměrné hodnoty hm. úbytků a ψ_{eh} pro úhel 90°

Vzorek	0	1	3	17	S235JR
úbytek [g]	0,440	0,340	0,454	0,436	0,215
ψ_{eh}	0,49	0,63	0,47	0,49	-

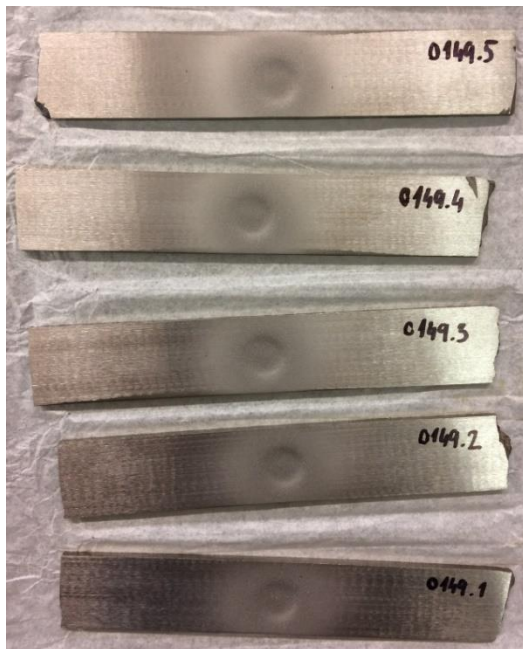
Tab. 6.5 Průměrné hodnoty hm. úbytků a ψ_{eh} pro úhel 15°

Vzorek	0	1	3	17	S235JR
úbytek [g]	0,302	0,317	0,247	0,259	0,375
ψ_{eh}	1,24	1,18	1,52	1,45	-

Na obr. 6.22-24 je možné vidět průběh tryskání vzorku 0, jež dostal označení 0149. Vzorek 1 byl označen 0150 atp. Vzorek oceli nese označení 0155. Jedná se o chronologické značení tryskaných materiálů firmou, díky níž bylo možné experiment uskutečnit.



Obr. 6.22 Vzorky 0149 (vzorek 0) před tryskáním

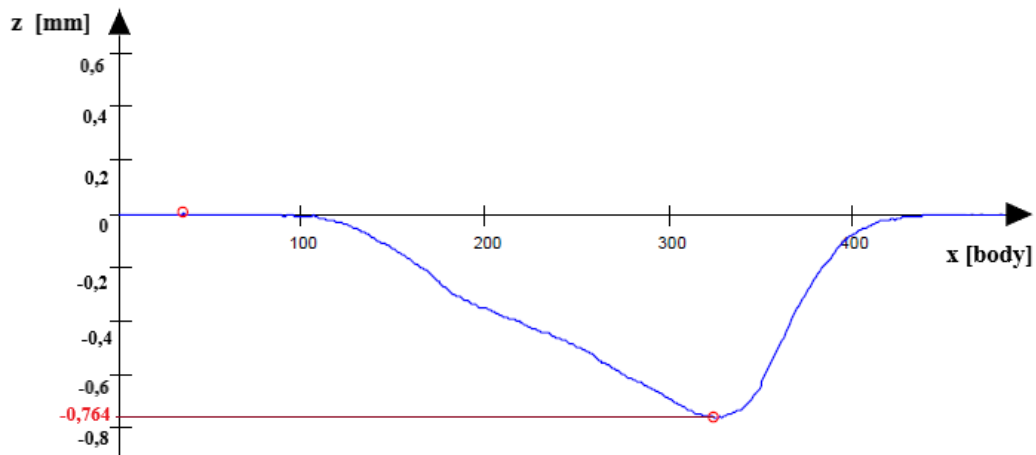


Obr. 6.23 Vzorky 0149 po tryskání – 90°



Obr. 6.24 Vzorky 0149 po tryskání – 15°

Byl také změřen tvar profilu vzniklého „kráteru“ po kolmém tryskání (obr. 6.25). Jako příklad je uveden vzorek 0149. Hloubka „kráteru“ činí 0,764 mm. Asymetrii profilu vysvětluje tryskání ve vodorovném směru. Profily zbylých vzorků je možné nalézt v přílohách.



Obr. 6.25 Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0149

6.4.3 Shrnutí výsledků erozivní zkoušky

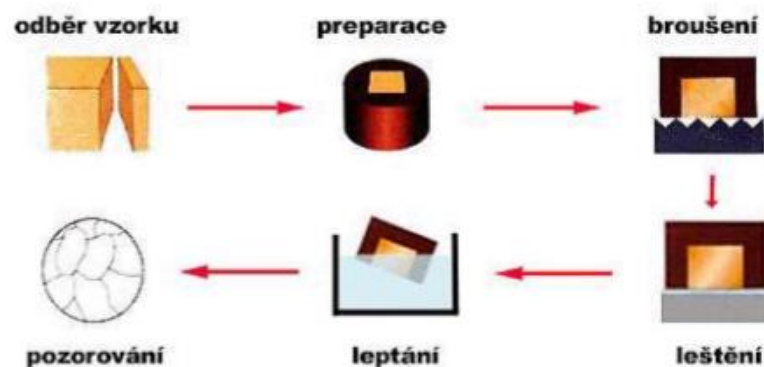
Dle [17] jsou bílé litiny o daných tepelných zpracováních odolnější proti erozivnímu opotřebení při nižších úhlech dopadu abrazivních částic, což bylo i tímto experimentem potvrzeno. Při kolmém dopadu částic došlo u žíhaného vzorku (vzorek 1) a oceli ke zpevnění materiálu, tudíž i k nejmenšímu hmotnostnímu úbytku. Naopak při dopadu abrazivních částic pod úhlem 15° si vedly nejlépe vzorky 3 a 17. Toto koresponduje s jejich zároveň nejvyšší tvrdostí. V obou případech tryskání měly tyto dva vzorky takřka stejné hodnoty hmotnostního úbytku.

6.5 Metalografie vzorků

Metalografie byla provedena za účelem přibližného popsání mikrostruktury jednotlivých vzorků.

6.5.1 Příprava vzorků pro pozorování

Vzorky pro metalografické výbrusy byly odebrány z odříznutých „patek“ z původních bloků. Dále byly vzorky preparovány. Poté následovalo broušení. Po broušení byly vzorky ještě leštěny, aby byla zajištěna vyšší kvalita povrchu. Nakonec proběhlo leptání. Bylo použito leptadlo Villela-Bain (1 g kyseliny pikrové, 5ml HCL a 95 ml ethanolu). Takto připravené vzorky byly pozorovány na světelném invertovaném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m (obr. 6.27). Postup přípravy je znázorněn na obr. 6.26.

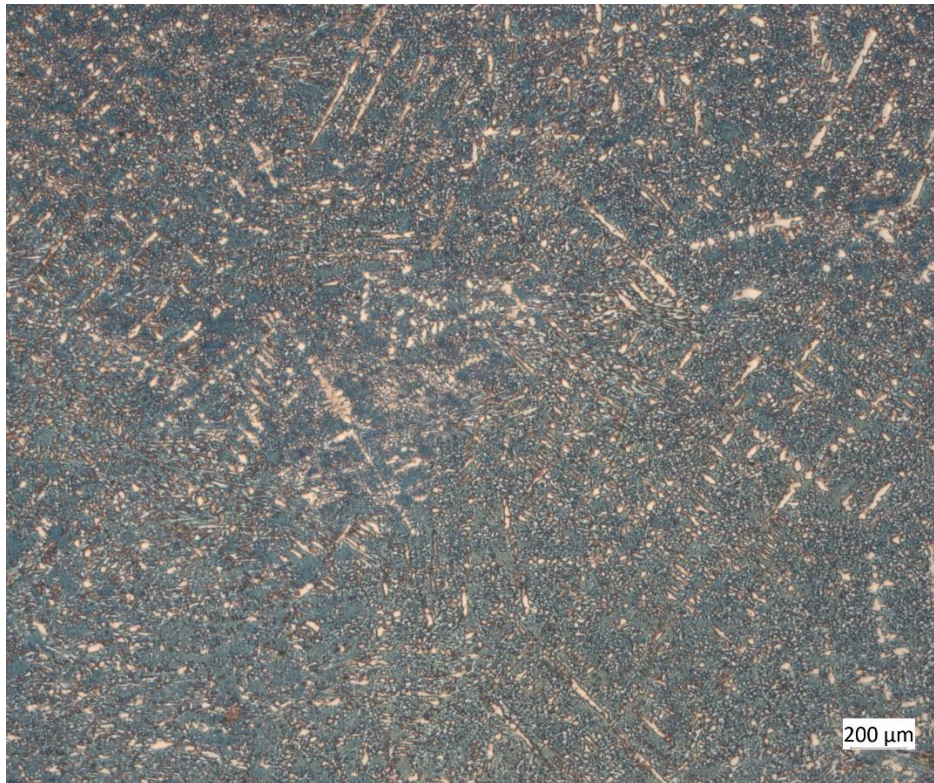


Obr. 6.26 Schéma přípravy metalografického výbrusu [27]



Obr. 6.27 Invertovaný světelný mikroskop Axio Observer D1m [28]

6.5.2 Vyhodnocení mikrostruktury



Obr. 6.28 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 25x)

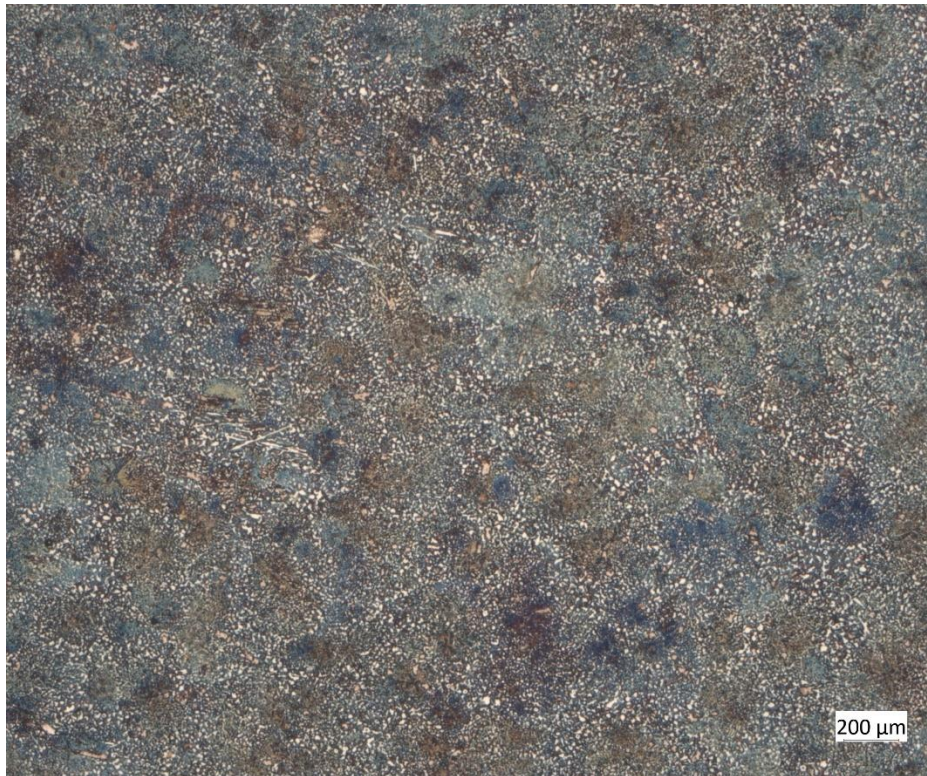


Obr. 6.29 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 100x)



Obr. 6.30 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 200x)

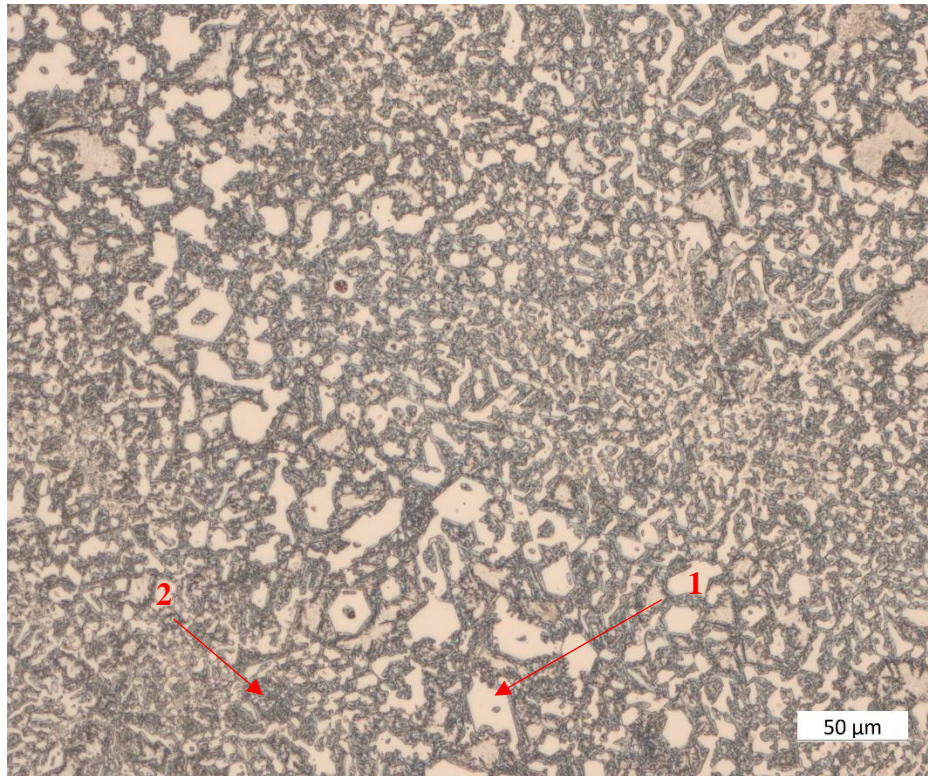
U vzorku 0 se dle chemického složení jedná o nadeutektickou chromovou bílou litinu. Základní materiál je tvořen vyšším podílem austenitu, dále perlitem, feritem, martenzitem a karbidy – sekundárními a eutektickými. Označeno na *obr. 6.30* pozicí č. 2. Pozice č. 1 označuje primární karbidy M_7C_3 v dendritickém uspořádání. Tvrdost v místě metalografického výbrusu je **585 HBW**.



Obr. 6.31 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 25x)

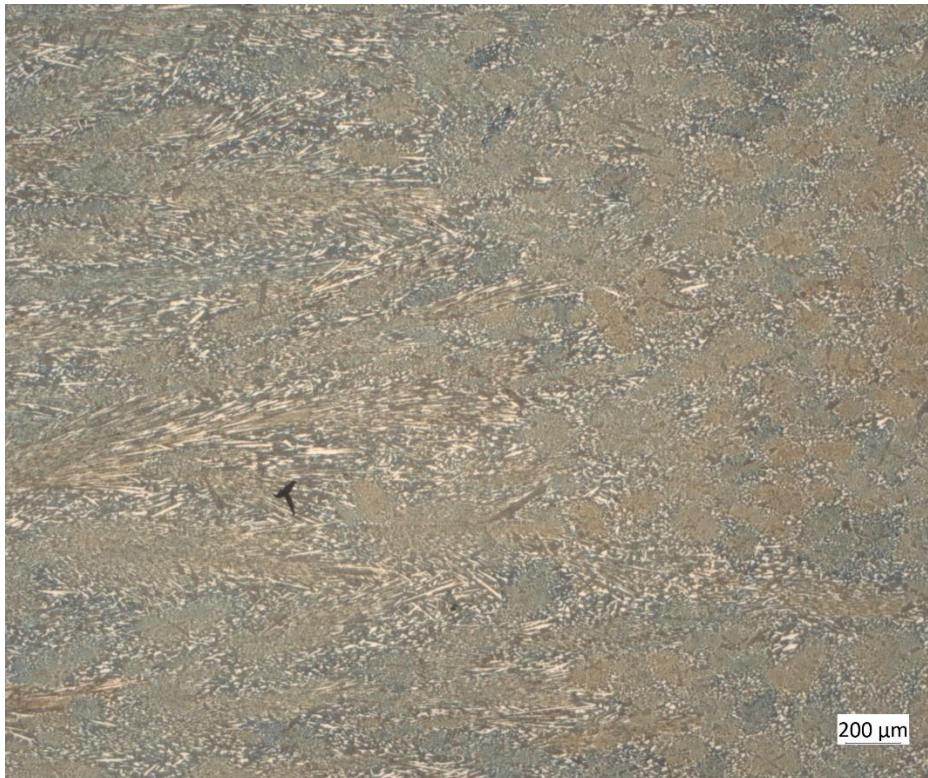


Obr. 6.32 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 100x)



Obr. 6.33 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 200x)

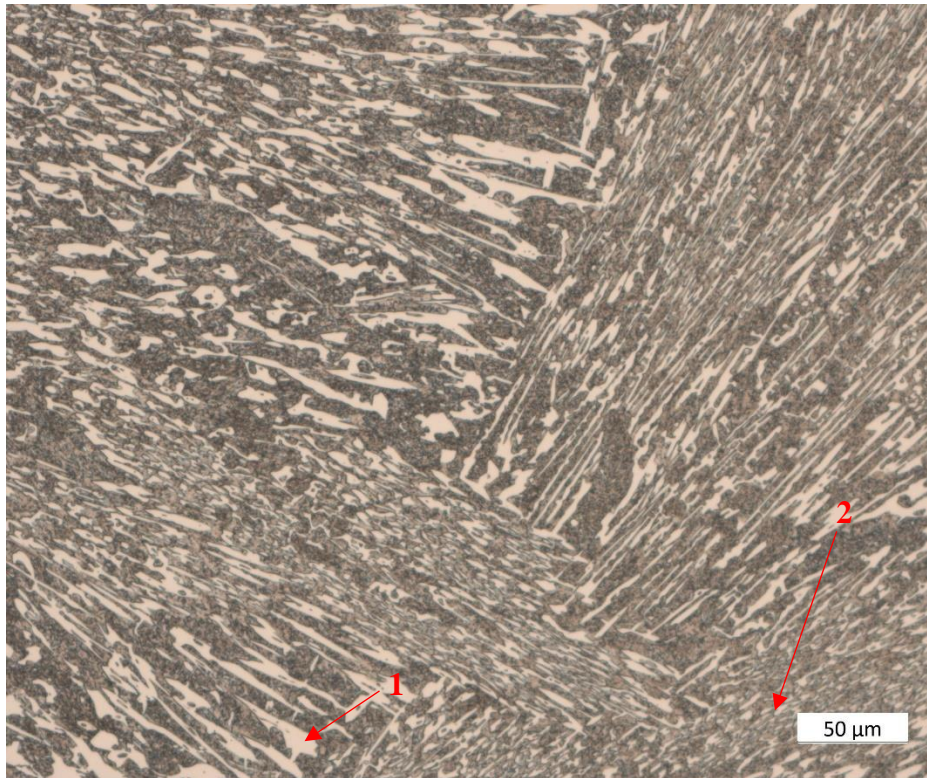
U vzorku 1 se dle chemického složení jedná o nadeutektickou chromovou bílou litinu. Základní materiál je tvořen opět vyšším podílem austenitu, dále perlitem, feritem, martenzitem a karbidy – sekundárními a eutektickými. Označeno na *obr. 6.33* pozicí č. 2. Pozice č. 1 označuje primární karbidy M_7C_3 . Tvrdost v místě metalografického výbrusu je **366 HBW**.



Obr. 6.34 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 25x)

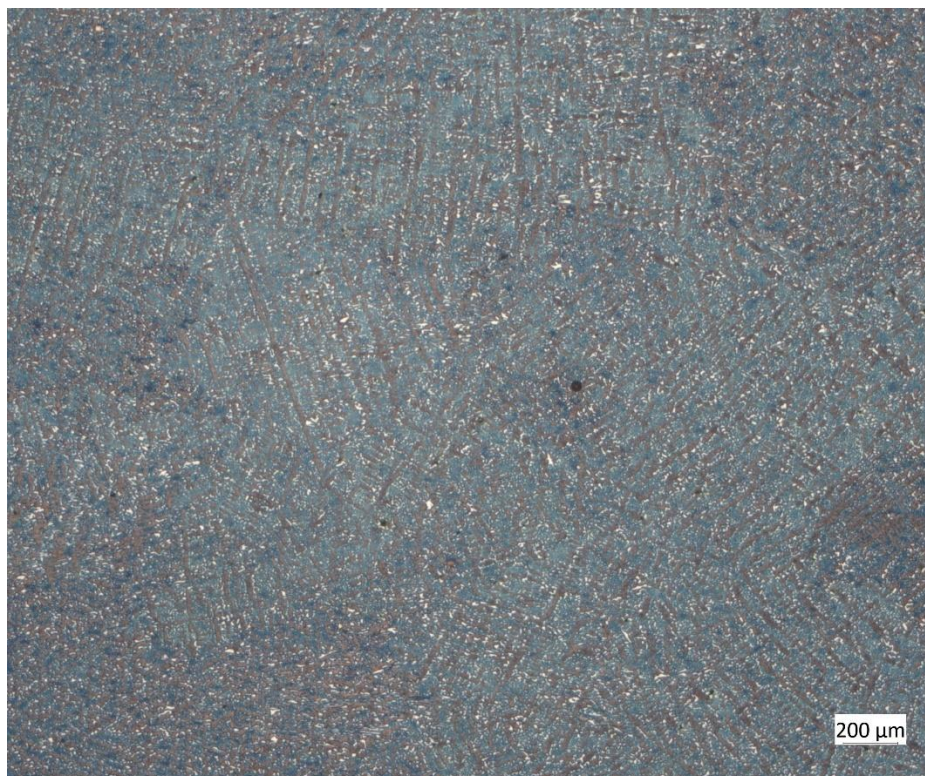


Obr. 6.35 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 100x)

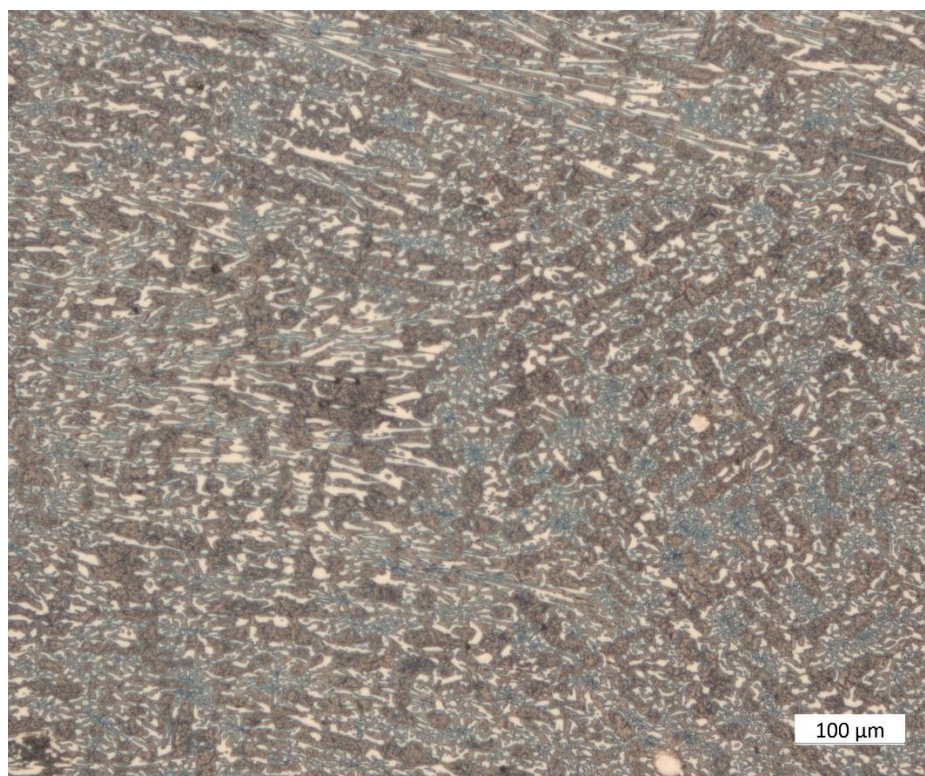


Obr. 6.36 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 200x)

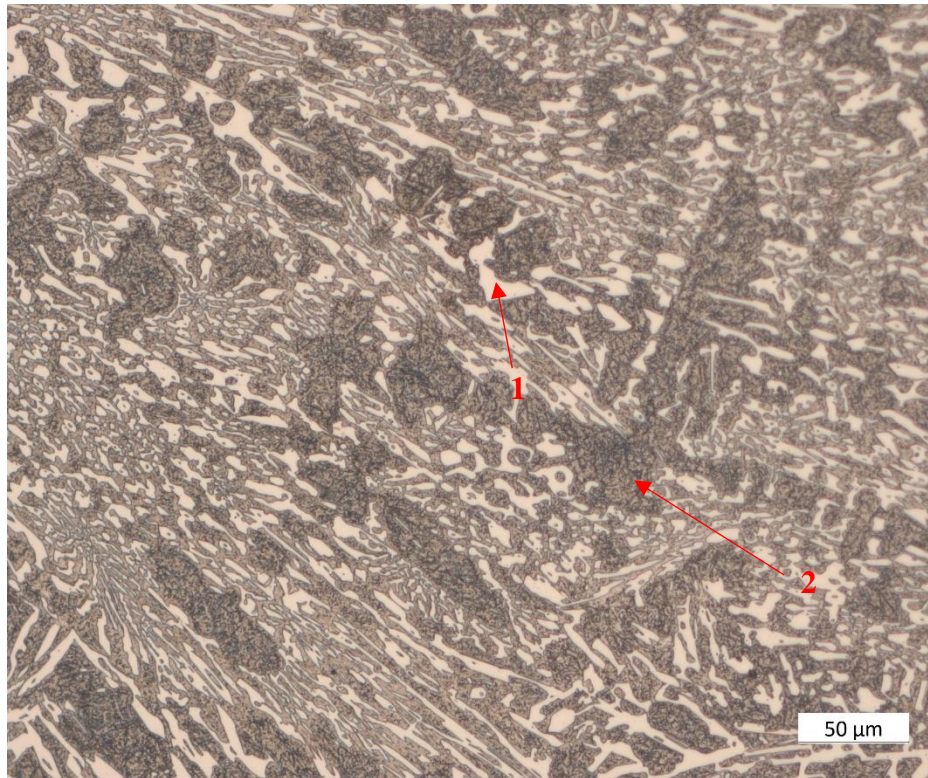
U vzorku 3 se dle chemického složení jedná o nadeutektickou chromovou bílou litinu. Základní materiál je tvořen vyšším podílem martenzitu, dále zbytkovým austenitem, perlitem, feritem a karbidy – sekundárními a eutektickými. Může být obsažen též bainit. Označeno na *obr. 6.36* pozicí č. 2. Pozice č. 1 označuje primární karbidy M_7C_3 . Tvrdost v místě metalografického výbrusu je **685 HBW**.



Obr. 6.37 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 25x)



Obr. 6.38 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 100x)

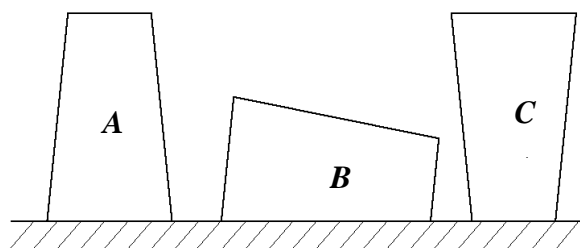


Obr. 6.39 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 200x)

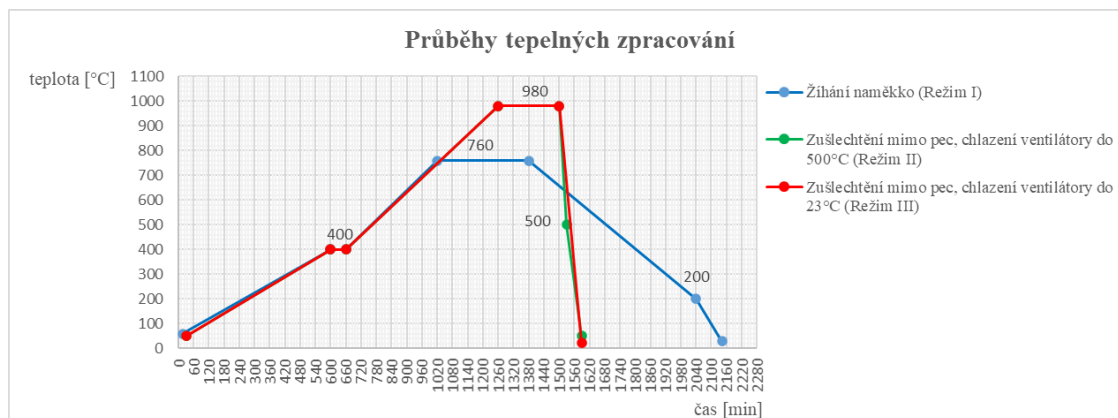
U vzorku 17 se dle chemického složení jedná tentokrát o podeutektickou chromovou bílou litinu. Původní dendrit austenitu je přeměněn na martenzit. Dále mohou být v matrici obsaženy sekundární a eutektické karbidy, perlit, ferit a bainit. Základní hmota je na *obr. 6.39* označena pozicí č. 2. Pozice č. 1 označuje opět primární karbidy M_7C_3 . Tvrdost v místě metalografického výbrusu je **665 HBW**.

7 Rozbor výsledků

Vyhodnocení bylo provedeno na 4 blocích litiny. První blok byl v litém stavu, u druhého bloku bylo provedeno žihání naměkko a třetí blok byl zušlechtěn mimo pec s chlazením ventilátory do teploty 500 °C. Poslední, čtvrtý blok byl zušlechtěn mimo pec s chlazením ventilátory do pokojové teploty (23 °C). Právě u tohoto tepelného zpracování byl předpokládán přínos v mikrostruktuře a v mechanických vlastnostech. Je nutné podotknout, že není známo, jak byly bloky při ochlazování uloženy, tj. z jaké strany byly ochlazovány. Možné způsoby orientace uložení Y-bloků jsou znázorněny na *obr. 7.1*. Průběhy tepelných zpracování jsou pro připomenutí shrnuty na *obr. 7.2*.



Obr. 7.1 Možné uložení Y-bloků



Obr. 7.2 Průběhy tepelných zpracování

Experimentálně bylo zjištěno, že tepelným režimem č. III u vzorku 17 je možné dosáhnout lepších mechanických vlastností. Ačkoliv je u vzorku 17 podíl C o 0,4 % a podíl karbidů o 4 % menší, než je u vzorku 3, tak je možné tento deficit právě díky ochlazování ventilátory do pokojové teploty dohnat. Dokazují to prakticky shodné výsledky erozivní zkoušky. Hodnoty tvrdostí se také od sebe příliš neliší. U vzorku 1 byla žiháním naměkko snížena tvrdost, a tím došlo k poklesu odolnosti vůči opotřebení. Výsledky všech 4 vzorků jsou shrnuty v *tab. 7.1*.

Tab. 7.1 Výsledky vzorků 0,1, 3 a 17

vzorek	úbytek hmotnosti [g]		Tvrdost HBW
	90°	15°	
0	0,440	0,302	551
1	0,340	0,317	375
3	0,454	0,247	680
17	0,436	0,259	660

Mikrostruktura je u vzorků 3 a 17 tvořena z velké části martenzitem a primárními karbidy M_7C_3 . Dále mohou být v matici obsaženy ferit, perlit, sekundární a eutektické karbidy a bainit. Mikrostruktura vzorků 0 a 1 je austenitická s primárními karbidy M_7C_3 . Opět je možný výskyt perlitu, feritu, ale také i martenzitu. Konkrétní složení matrice nelze kvůli nedostatečnému zvětšení vyhodnotit. Můžeme ho pouze odhadnout na základě teoretických znalostí.

8 Závěr

Byly zkoušeny vybrané vlastnosti (zkoušeny tvrdost a odolnost proti opotřebení) chromové bílé litiny EXL-1A o směrném složení 2,8-3,5 % C a 24-27 % Cr ve stavu po odlití, po žihání naměkko a po ochlazování z teploty 980 °C do teploty 500 °C a teploty místnosti.

Chemické složení odpovídá internímu předpisu slévárny. V prvních třech případech se jedná o shodné složení litinových vzorků. Ve čtvrtém případě, tj. chlazení ventilátory až do teploty místnosti, je obsah uhlíku o 0,4 % nižší.

Struktura v litém stavu je austenitická s primárními karbidy M_7C_3 . Po žihání naměkko je v matici velký podíl austenitu a opět jsou přítomny primární karbidy M_7C_3 . Po zušlechtní mimo pec je v obou případech struktura martenzitická s primárními karbidy M_7C_3 . U všech vzorků mohou být v základním materiálu přítomny perlit, ferit, sekundární a eutektické karbidy a bainit. Hodnocení struktury je pouze orientační s ohledem na hodnocení jen při malém zvětšení.

Zkoušky erozivního opotřebení, zjištěné metodou tryskání vzorků pod úhly tryskání 90° a 15°, vykazují i přes krátké expoziční doby zlepšení mechanických vlastností pro tepelné režimy II a III. U chlazení pomocí ventilátorů do teploty místnosti byl zaznamenán malý rozdíl úbytků hmotnosti v porovnání s chlazením do teploty 500 °C i přes nižší podíl C o 0,4 %.

Tvrdosti vzorků po zušlechtní mimo pec v obou případech vzrostly a hodnotami se od sebe příliš nelišily.

Na základě provedených zkoušek se dá předpokládat, že tepelné zpracování s chlazením pomocí ventilátorů na teplotu místnosti má pozitivní vliv na výslednou strukturu, jež bude obsahovat vyšší podíl martenzitu. Vzroste tím tak tvrdost a odolnost proti opotřebení. Je však nutné, aby se obsah uhlíku pohyboval u horní hranice předpisu, a byl tedy srovnatelný s ostatními vzorky.

Seznam použité literatury

- [1] BASIC CIVIL ENGINEERING. *Type of Equipment use in construction* [online]. 2015 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://basiccivilengineering.com/2015/04/type-of-equipment-use-in-construction.html>
- [2] BASIC CIVIL ENGINEERING. *Use of excavator in construction* [online]. 2015 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://basiccivilengineering.com/2015/04/use-of-excavator-in-construction.html>
- [3] RELIANCE FOUNDRY CO. LTD. *Cast Steel Production* [online]. 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-steel>
- [4] THE WORLD MATERIAL. *40Cr Steel Equivalent, Mechanical Properties & Chemical Composition* [online]. 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/40cr-steel/>
- [5] FRIES, Jiří, doc. Ing., Ph.D. *Zemní stroje* [online]. I. vydání. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2016-05-04]. ISBN 978-80-248-2567-0. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FS/ZS/TEXT/Zemni_stroje_340-0333_www.pdf
- [6] A. J. MARSHALL (SPECIAL STEELS) LTD. *Manganese steel - 6 Things You Need to Know* [online]. 2018 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://ajmarshall.com/manganese-steel-6-things-you-need-to-know/>
- [7] SLÉVÁRNA CHOMUTOV. *Abrazivzdorné odlitky* [online]. 2008 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://www.slevarnachomutov.cz/produkty-a-sluzby/odlitky/abrazivzdorne/>
- [8] MEDUNA. *Rozpouštěcí žihání* [online]. 2014 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/12-rozpousteci-zihani.html>
- [9] FIREBUG. *Koreček* [online]. 2010 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Koreček#/media/Soubor:Korecky_na_kolesovem_rypadle.PNG

- [10] RELIANCE FOUNDRY CO., LTD. *Cast Iron Types* [online]. 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-iron>
- [11] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [12] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: Vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [13] 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 [15]
- [14] ZEMĚDĚLSKÉ POTŘEBY M+S. *Zub Lehnhoff vhodný pro lopaty nakladačů a lžíce bagrů konstrukční velikost 400 F* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.eshop-zemedelske-potreby.cz/zub-lehnhoff-vhodny-pro-lopatty-nakladacu-a-lzice-bagru-konstrukcni-velikost-400f-p40122/#galleryKorečky>
- [15] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [16] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [17] SUCHÁNEK, Jan. *Erozivní opotřebení materiálů*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05532-8.
- [18] NICKEL INSTITUTE. *Ni-Hard Material Data and Applications: Material Data and Applications* [online]. 1996 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: https://www.nickelinstitute.org/media/1728/ni_hardmaterialdataandapplications_11017_.pdf

- [19] FUJIAN TIETUO MACHINERY CO.LTD. *Asphalt mixing machine (QLB-40)* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: https://amei-cheng0503.diytrade.com/sdp/885696/4/pd-4524815/5415247-1786656/asphalt_mixing_machine_QLB-40.html
- [20] PENTICTON FOUNDRY. *Ni-Hard Versus Chrome White Iron* [online]. 2017 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.pentictonfoundry.com/news/differences-between-ni-hard-and-chrome-white-iron/>
- [21] DIJKKAMP. *Ni-Hard 4* [online]. 2016 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/ni-hard-4-en-gjn-hv600/>
- [22] ČSN EN 12513. *Slévárenství – Otěruvzdorné litiny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [23] POŠTA, Josef, P. VESELÝ a M. DVOŘÁK. *Degradace strojních součástí* [online]. 2002 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: http://degradace.tf.czu.cz/Mngr_ram.htm
- [24] RÖHRIG, Klaus. *Verschleissbeständige weisse Gusseisenwerkstoffe: Eigenschaften und Anwendung*. Düsseldorf: ZGV-Zentrale für Gussverwendung, [1999].
- [25] DURAND-CHARRE, Madeleine. *Microstructure of steels and cast irons*. Springer Science & Business Media, 2004. ISBN 3-540-20963-8
- [26] MIKRONEX. *Rovinná bruska BRH 20 CNC* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://mikronex.cz/page5.html>
- [27] VŠCHT. *Metalografie I*. [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [28] FZU. *Světelný invertovaný metalografický mikroskop Zeiss Axio Observer D1m* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/sluzby/vybaveni-a-technologie/experimentalni-vybaveni/svetelny-invertovany-metalograficky-mikroskop>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Exkavátor [2]	9
Obr. 3.1 Složení pásového podvozku [5]	11
Obr. 3.2 Korečky rypadla [9]	12
Obr. 4.1 Stabilní rovnovážný diagram Fe-C [13]	14
Obr. 4.2 Vliv podílu feritu v matrici na pevnost R_m a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [11]	14
Obr. 4.3 Tepelné zpracování ADI [11]	15
Obr. 4.4 Změna struktury během izotermické výdrže [11]	16
Obr. 4.5 Zub Lehnhoff pro lopaty nakladačů a lžíce bagrů [14]	16
Obr. 4.6 Metastabilní rovnovážný diagram Fe-Fe ₃ C [13]	17
Obr. 4.7 Pohled do bubnu míchačky asfaltu [19]	18
Obr. 4.8 Mikrostruktura litiny Ni-Hard 4 [21]	19
Obr. 4.9 Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo [17]	20
Obr. 5.1 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [23]	22
Obr. 5.2 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [23]	23
Obr. 5.3 Schéma mechanismu erozivního opotřebení [23]	24
Obr. 5.4 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení [23]	25
Obr. 5.5 Schéma mechanismu únavového opotřebení [23]	25
Obr. 5.6 Schéma mechanismu vibračního opotřebení [23]	26
Obr. 6.1 Stav vzorků po dodání od slévárny	27
Obr. 6.2 Diagram stabilního systému Fe-Cr-C s vyznačenými body složení vzorků [25]	28
Obr. 6.3 Tepelné zpracování – Režim č.I	29
Obr. 6.4 Tepelné zpracování – Režim č.II	30
Obr. 6.5 Tepelné zpracování – Režim č. III	30
Obr. 6.6 Rovinná bruska Mikronex BRH 20 CNC [26]	31
Obr. 6.7 Odřezané patky	31
Obr. 6.8 Tenké plátky	32
Obr. 6.9 Rozměry vzorku	32
Obr. 6.10 Tvrdoměr HPO 300	33
Obr. 6.11 Rozložení vpichů	33
Obr. 6.12 Mikroskop Olympus DSX1000	33
Obr. 6.13 Tvrdost vzorků v závislosti na tepelném zpracování	34
Obr. 6.14 PTZ E1	35
Obr. 6.15 Způsob upnutí vzorku	35
Obr. 6.16 Upnutý testovací vzorek	36
Obr. 6.17 Testovací vzorek před tryskáním	36
Obr. 6.18 Testovací vzorek po tryskání	36
Obr. 6.19 Komora tryskacího zařízení	37
Obr. 6.20 Tryskání pod úhlem 90°	38

Obr. 6.21 Tryskání pod úhlem 15°	38
Obr. 6.22 Vzorky 0149 (vzorek 0) před tryskáním	39
Obr. 6.23 Vzorky 0149 po tryskání – 90°	39
Obr. 6.24 Vzorky 0149 po tryskání – 15°	39
Obr. 6.25 Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0149	40
Obr. 6.26 Schéma přípravy metalografického výbrusu [27]	41
Obr. 6.27 Invertovaný světelný mikroskop Axio Observer D1m [28]	41
Obr. 6.28 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 25x)	42
Obr. 6.29 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 100x)	42
Obr. 6.30 Mikrostruktura vzorku 0 (zvětšení 200x)	43
Obr. 6.31 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 25x)	44
Obr. 6.32 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 100x)	44
Obr. 6.33 Mikrostruktura vzorku 1 (zvětšení 200x)	45
Obr. 6.34 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 25x)	46
Obr. 6.35 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 100x)	46
Obr. 6.36 Mikrostruktura vzorku 3 (zvětšení 200x)	47
Obr. 6.37 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 25x)	48
Obr. 6.38 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 100x)	48
Obr. 6.39 Mikrostruktura vzorku 17 (zvětšení 200x)	49
Obr. 7.1 Možné uložení Y-bloků	50
Obr. 7.2 Průběhy tepelných zpracování	50

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Chemické složení Manganové oceli [7].....	12
Tab. 4.1 Chemické složení pro litiny s kuličkovým grafitem [12].....	14
Tab. 4.2 Příklady označování bílých otěruvzdorných litin [22].....	21
Tab. 6.1 Chemické složení chromové bílé litiny EXL-1A.....	28
Tab. 6.2 Průměrné hodnoty tvrdostí	34
Tab. 6.3 Parametry experimentu	37
Tab. 6.4 Průměrné hodnoty hm. úbytků a ψ_{eh} pro úhel 90°	38
Tab. 6.5 Průměrné hodnoty hm. úbytků a ψ_{eh} pro úhel 15°	38
Tab. 7.1 Výsledky vzorků 0,1, 3 a 17	51

Přílohy

1. Tabulky výsledků měření tvrdosti HBW
2. Tabulky výsledků erozivní zkoušky – úhel 90°
3. Tabulky výsledků erozivní zkoušky – úhel 15°
4. Profily povrchů vzorků po kolmém tryskání
5. CD-ROM: Elektronická podoba bakalářské práce
Snímky vpichů po měření tvrdosti dle Brinella
Snímky vzorků po tryskání
Snímky struktur vzorků

Příloha I

Tabulka I Měření tvrdosti – vzorek 0

vtisk	d1	d2	d_str	HBW
	mm	mm	mm	-
a	2,48	2,56	2,52	592
b	2,51	2,56	2,535	585
1	2,59	2,63	2,61	551
2	2,59	2,67	2,63	543
3	2,62	2,69	2,655	532
4	2,61	2,68	2,645	537
5	2,6	2,8	2,7	515
průměr	-	-	-	551
σ	-	-	-	26

Tabulka II Měření tvrdosti – vzorek 1

vtisk	d1	d2	d_str	HBW
	mm	mm	mm	-
a	3,15	3,2	3,175	369
b	3,18	3,2	3,19	366
1	3,15	3,23	3,19	366
2	3,07	3,18	3,125	382
3	3,04	3,21	3,125	382
4	3,01	3,2	3,105	387
5	3,08	3,22	3,15	375
průměr	-	-	-	375
σ	-	-	-	8

Tabulka III Měření tvrdosti – vzorek 3

vtisk	d1	d2	d_str	HBW
	mm	mm	mm	-
a	2,32	2,38	2,35	682
b	2,31	2,38	2,345	685
1	2,37	2,42	2,395	657
2	2,3	2,4	2,35	682
3	2,29	2,38	2,335	691
4	2,3	2,4	2,35	682
5	2,31	2,4	2,355	679
průměr	-	-	-	680
σ	-	-	-	10

Tabulka IV Měření tvrdosti – vzorek 17

vtisk	d1	d2	d_str	HBW
	mm	mm	mm	-
a	2,36	2,4	2,38	665
b	2,38	2,42	2,4	654
1	2,39	2,42	2,405	651
2	2,32	2,37	2,345	685
3	2,35	2,42	2,385	662
4	2,43	2,48	2,455	624
5	2,34	2,38	2,36	677
průměr	-	-	-	660
σ	-	-	-	18

Příloha II

"0149"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	59,49	59,05	0,44
2	59,64	59,22	0,42
3	57,83	57,37	0,46
4	57,46	57,03	0,43
5	62,33	61,88	0,45
PRŮMĚR			0,44

"0150"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	54,21	53,88	0,33
2	56	55,67	0,33
3	57,09	56,72	0,37
4	57,55	57,19	0,36
5	57,67	57,36	0,31
PRŮMĚR			0,34

"0151"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	45,6	45,15	0,45
2	41,37	40,92	0,45
3	44,63	44,19	0,44
4	46,69	46,22	0,47
5	42,93	42,47	0,46
PRŮMĚR			0,454

"0152"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	58,06	57,62	0,44
2	58,02	57,57	0,45
3	53,1	52,69	0,41
4	55,19	54,77	0,42
5	57,48	57,02	0,46
PRŮMĚR			0,436

"0155"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	73,02	72,79	0,23
2	73,04	72,83	0,21
3	71,62	71,4	0,22
4	69,95	69,74	0,21
5	68,76	68,54	0,22
6	73,06	72,86	0,2
PRŮMĚR			0,215

Příloha III

"0149"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	59,131	58,812	0,319
2	59,3161	59,0174	0,2987
3	57,4815	57,1692	0,3123
4	57,126	56,8406	0,2854
5	61,9807	61,685	0,2957
PRŮMĚR			0,30222

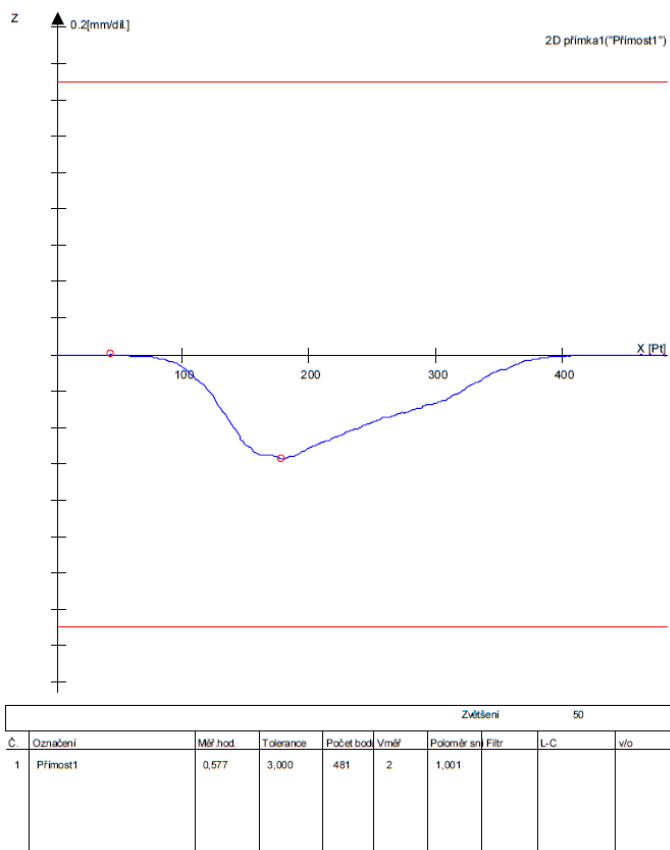
"0150"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	53,9675	53,6446	0,3229
2	55,7803	55,4684	0,3119
3	56,834	56,516	0,318
4	57,3009	56,9832	0,3177
5	57,4357	57,1193	0,3164
PRŮMĚR			0,31738

"0151"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	45,227	44,9824	0,2446
2	40,9907	40,7407	0,25
3	44,2717	44,0174	0,2543
4	46,3112	46,0688	0,2424
5	42,5464	42,3029	0,2435
PRŮMĚR			0,24696

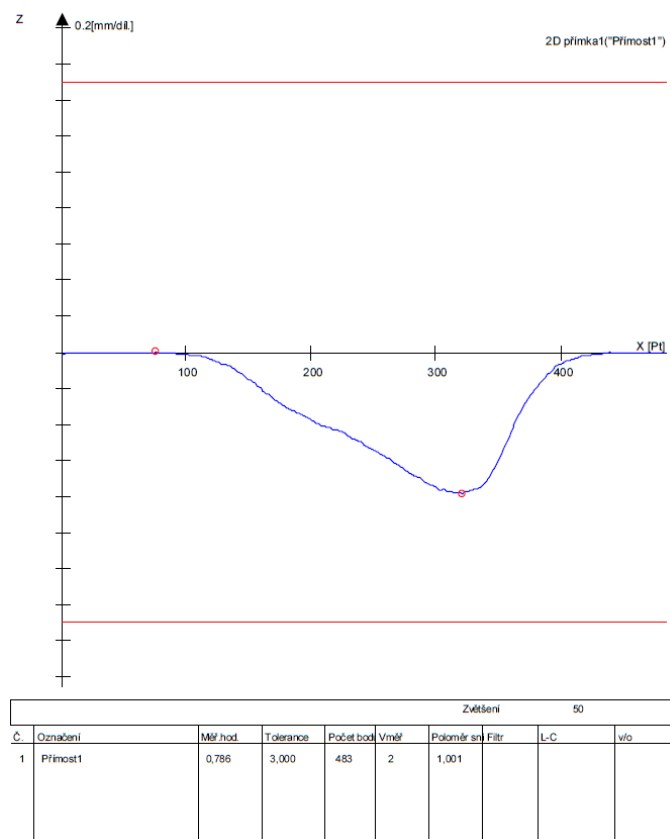
"0152"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	57,7288	57,4659	0,2629
2	57,7075	57,4467	0,2608
3	52,7809	52,5185	0,2624
4	54,8763	54,6124	0,2639
5	57,1319	56,8862	0,2457
PRŮMĚR			0,25914

"0155"	PŘED [g]	PO [g]	ROZDÍL [g]
1	72,9014	72,53	0,3714
2	72,9199	72,5564	0,3635
3	71,5129	71,1246	0,3883
4	69,8557	69,4784	0,3773
5	68,6383	68,2497	0,3886
6	72,9649	72,6029	0,362
PRŮMĚR			0,375183

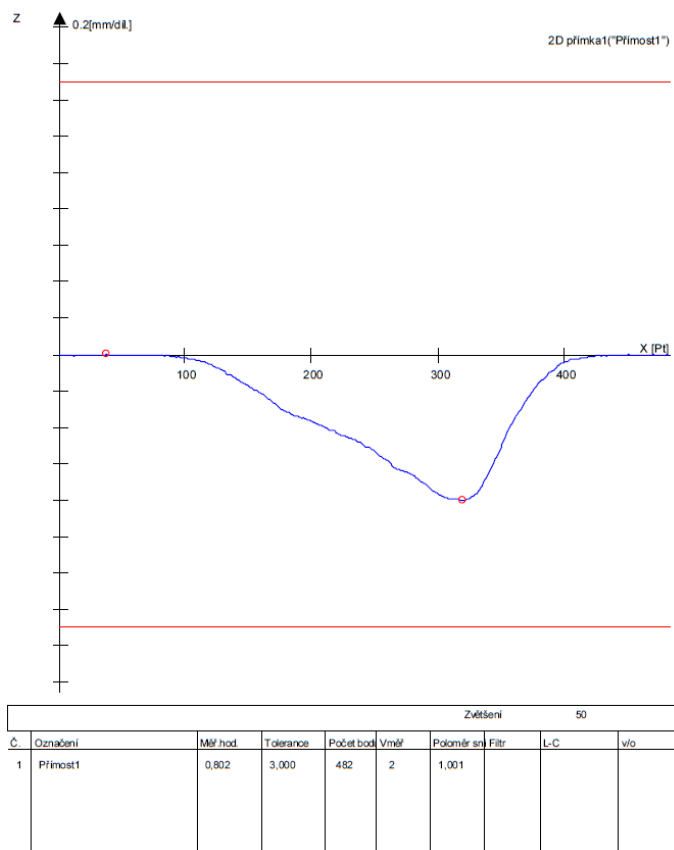
Příloha IV



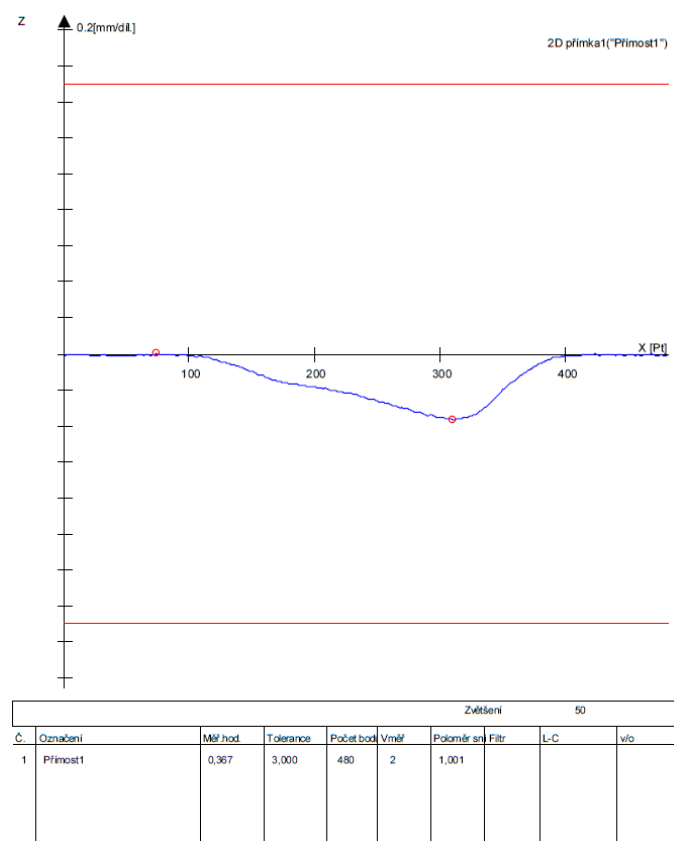
Obrázek I Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0150



Obrázek II Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0151



Obrázek III Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0152



Obrázek IV Profil povrchu po kolmém tryskání vzorku 0155