

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení

P/M ledeburitické nástrojové oceli Vanadis 6

2015

RYBÁK Tomáš



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství

**Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení
P/M ledeburitické nástrojové oceli Vanadis 6**

**Effect of heat treatment on the wear resistance of
P/M ledeburitic tool steel Vanadis 6**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: Ing. Sobotová Jana, Ph.D.

Tomáš Rybák

Praha 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	Tomáše R Y B Á K A
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení P/M ledeburitické nástrojové oceli Vanadis 6
název anglicky:	Effect of heat treatment on the wear resistance of P/M ledeburitic tool steel Vanadis 6

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Vyhodnocení odolnosti proti opotřebení po různých režimech tepelného zpracování nástrojové P/M oceli Vanadis 6

Postup:

1. Literární rešerše
2. Experimentální část
 - a. Zkoušky tvrdosti
 - b. Zkouška Pin-on-disc
3. Zhodnocení výsledků, závěry, sepsání BP

Rozsah průvodní zprávy: 30 – 40 stran
Rozsah grafických prací: dle potřeby

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

- [1] JURČI, Peter. *Nástrojové oceli ledeburitického typu*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 221 s. ISBN 978-80-01-04439-1.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4
- [3] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015
Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

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.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 30.4.2015
student



.....
Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí ústavu

.....
Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 28. dubna 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k práci.

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.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Sobotové Janě, Ph.D., za cenné rady, podněty a připomínky při zpracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na hodnocení odolnosti proti opotřebení ledeburitické nástrojové oceli Vanadis 6 vyrobené práškovou metalurgií. Experimentální materiál byl zpracován konvenčním způsobem tepelného zpracování a dále bylo také použito zmrazování při různých podmínkách. K hodnocení bylo použito měření tvrdosti a zkoušky odolnosti proti opotřebení metodou Pin on disc.

Klíčová slova: Ledeburitická nástrojová ocel, tepelné zpracování, zmrazování, tvrdost, odolnost proti opotřebení

Abstract

This bachelor degree paper is focused on the wear test of Ledeburite tool steel Vanadis 6 manufactured by powder metallurgy. The experimental material was processed by a conventional way of tempering and after that there was also used cryogenic processing under different conditions. There was applied Pin on Disc method (to perform the test of material hardness and the wear test).

Key words: Ledeburite tool steel, tempering, cryogenic processing, hardness, wear test

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	6
Úvod.....	7
1. Teoretická část.....	8
1.1. Nástrojové oceli.....	8
1.2. Vlastnosti nástrojových ocelí.....	9
1.3. Ledeburitické oceli.....	10
1.4. Tepelné zpracování ledeburitických nástrojových ocelí.....	12
1.5. Odolnost proti opotřebení ledeburitických nástrojových ocelí.....	16
2. Experimentální část.....	18
2.1. Zkoušený materiál a jeho tepelné zpracování.....	18
2.2. Metoda Pin on disc.....	19
2.2.1. Vyhodnocení drážky.....	20
2.3. Měření tvrdosti dle Rockwella.....	21
3. Výsledky a jejich diskuse.....	22
3.1. Vliv tepelného zpracování na tvrdost oceli Vanadis 6.....	22
3.2. Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení oceli Vanadis 6.....	23
3.3. Vliv doby zmrazování při teplotě -90 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6.....	25
3.4. Vliv doby zmrazování při teplotě -196 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6.....	28
3.5. Vliv teploty zmrazování po dobu 4 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6.....	31
3.6. Vliv teploty zmrazování po dobu 10 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6.....	34
4. Závěry.....	37
Seznam použité literatury.....	38

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Veličina
A ₁	°C	teplota eutektoidní přeměny ve slitinách železa
A _z	-	zbytkový austenit
C	-	Uhlík
Cr	-	Chrom
F	N	zatěžující síla
HRA, HRB, HRC	-	tvrdost podle Rockwela
HV	-	tvrdost podle Vickerse
l	m	dráha rotace kuličky
M _s	°C	teplota začátku martenzitické přeměny
M _f	°C	teplota konce martenzitické přeměny
P/M	-	prášková metalurgie
r	mm	poloměr zkušební kuličky
R	mm	poloměr vzniklé drážky na zkušebním vzorku
R _{c 0,2}	MPa	Pevnost v tlaku
Si	-	Křemík
V	-	Vanad

Úvod

Je známo, že na nástrojové oceli jsou z hlediska využití kladeny značné požadavky na jejich vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou zajišťovány chemickým složením materiálu, ale především tepelným zpracováním. Předkládaná práce navazuje na předchozí publikaci [1], ve které se autoři věnují hodnocení vlivu parametrů tepelného zpracování na vlastnosti nástrojové oceli pro práci za studena Vanadis 6, která je vyrobena práškovou metalurgií. Mezi důležité užité vlastnosti materiálu na nástroje pro tváření za studena patří kromě jiných tvrdost a odolnost proti opotřebení. U nástrojů třeba zajistit co nejdelší životnost z důvodu vysoké pořizovací ceny.

Ocel Vanadis 6 patří mezi ledeburitické oceli, které jsou charakteristické vysokým obsahem legujících prvků. Je známo, že vysoký obsah uhlíku a dalších legujících prvků snižují teplotu začátku a konce martenzitické přeměny. Z tohoto důvodu se v poslední době do cyklu tepelného zpracování těchto materiálů zařazuje i zmrazování, o kterém je známo, že přispívá k většímu uplatnění martenzitické přeměny [2].

Cílem této práce je zhodnocení vlivu tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení ledeburitické oceli Vanadis 6 vyrobené práškovou metalurgií a to po různých režimech tepelného zpracování.

1. Teoretická část

1.1. Nástrojové oceli

Nástrojové oceli představují různorodou skupinu materiálů, která se liší jak chemickým složením, tak užitnými vlastnostmi. Nástrojové oceli se rozdělují do následujících skupin [3]:

- Nelegované oceli
- Legované oceli pro práci za studena
- Legované oceli pro práci za tepla
- Rychlořezné oceli

Nelegované oceli

Nelegované nástrojové oceli se liší zejména obsahem uhlíku. Hlavní nevýhodou nelegovaných nástrojových ocelí je malá prokalitelnost [3]. Tyto oceli se používají k výrobě méně náročných nástrojů, jako jsou pilky na dřevo, ruční nástroje nebo vrtáky. Obsahují nejčastěji mezi 0,4 až 1,1 % C.

Legované oceli pro práci za studena

Legované oceli se používají k podobným účelům jako nelegované. Mají však vyšší prokalitelnost, vyšší tvrdost (60 až 64 HRC) a nižší pokles tvrdosti s teplotou. Bývají legovány Cr, W, Mo a V. Součet legujících prvků (vyjma ocelí chrómových) obvykle nepřesahuje 3 až 5 % [3]. Do této skupiny patří i ocel Vanadis 6, která je experimentálním materiálem předkládané práce.

Legované oceli pro práci za tepla

U ocelí na nástroje pro práci za tepla se požaduje vysoká otěruvzdornost a odolnost proti erozi za pracovních teplot a odolnost proti tepelné únavě. Oceli obsahují uhlík nejčastěji od 0,28 do 0,6 %. Dále jsou legovány chromem až do 5,5 %, molybdenem až do 3,0 % a vanadem až do 1,1 % [3].

Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli se vyznačují odolností proti poklesu tvrdosti až do teplot okolo 650 °C. Jedná se o ledeburitické oceli vysoce legované (bude vysvětleno dále) s obsahem uhlíku nad 0,7 % [3]. Základním legujícím prvkem je wolfram, který bývá nahrazen vanadem. Minimální množství legujících přísad v rychlořezných ocelích je nad 10 %.

1.2. Vlastnosti nástrojových ocelí

Nástrojové oceli pro práci za studena mají obecně důležité následující vlastnosti:

Tvrdot je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Je závislá především na obsahu uhlíku a na tepelném zpracování. U legovaných ocelí lze zvýšit tvrdost přísadou prvků, které tvoří s uhlíkem teplotně stabilní karbidy, zejména přísadou Cr, V, W, Mo, případně Ti [3].

Výrobce [4] uvádí, že tvrdost po tepelném zpracování ledeburitické nástrojové oceli Sverker 21 (1.2379, ČSN 19 573) o obsahu 1,55 % C; 11,3 % Cr; 0,4 % Mn a 0,8 % Mo je závislá na teplotě popouštění a podmínkách tepelného zpracování.

Například práce [5] uvádí, že výsledná tvrdost oceli Sverker 21 je 59,5 HRC po kalení dusíkem pod tlakem 5 barů a dvojnásobném popouštění 480 °C bez kryogenního zpracování.

Plastické vlastnosti a houževnatost. Závisí na matici a množství, morfologii a velikosti karbidů a na přítomnosti vměstků, případně výrobních vad. U měkčích ocelí s pevností do 1 800 MPa se zjišťuje tažnost statickou zkouškou v tahu a houževnatost zkouškou rázem v ohybu. U ocelí s vyšší pevností než 1 800 MPa je možno posuzovat plastické vlastnosti pouze podle statické zkoušky v ohybu z hodnoty pevnosti a průhybu [3]. Do této skupiny nástrojových ocelí patří také ocel Vanadis 6.

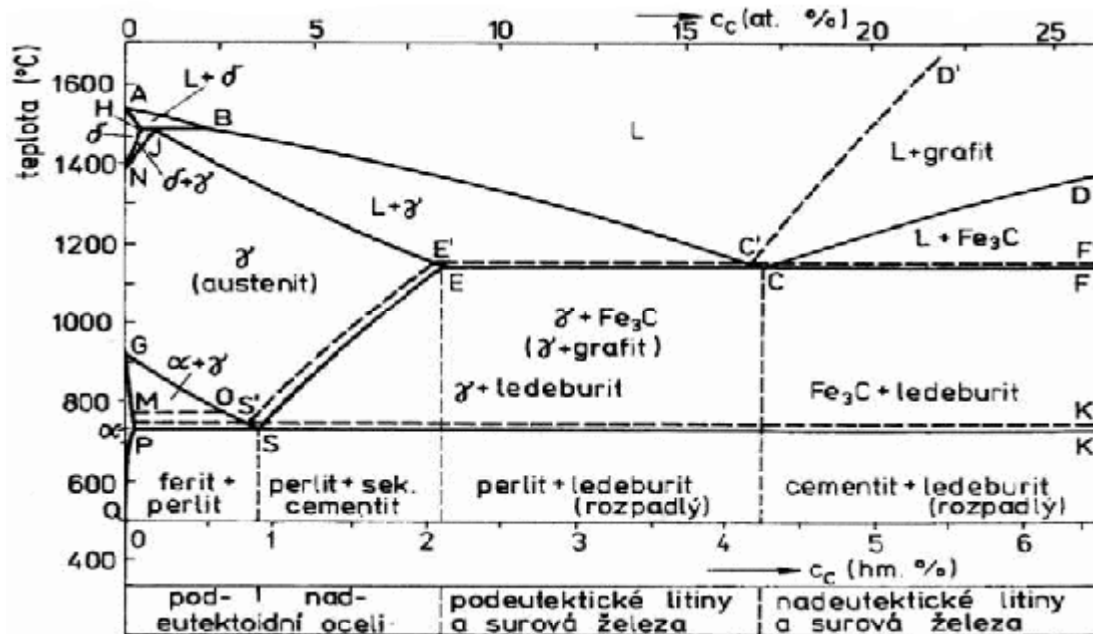
Odolnost oceli proti popouštění je důležitá zejména pro řezné nástroje, a nástroje pracující za vyšších teplot. Odolnost se posuzuje podle poklesu tvrdosti při dlouhodobém ohřevu materiálu na vyšší teploty. U nelegovaných ocelí tvrdost klesá od teploty 200 °C. Zvýšení odolnosti oceli proti popouštění se zabezpečuje legováním karbidotvornými prvky Cr, W, V, Mo a Ti [3].

Prokalitelnost je definována jako schopnost získat požadovanou tvrdost po kalení do určité hloubky. Nelegované oceli mají malou prokalitelnost, prokalitelnost zvyšují následující legující prvky Mn, Cr a Mo [3].

Rozměrová stálost je velmi důležitou vlastností u tvarových nástrojů, nástrojů na přesné obrábění a u měřidel. Rozměrové změny jsou způsobeny změnou struktury při změnách teplot [3].

1.3. Ledeburitické oceli

Z diagramu železo – karbid železa je patrné, že ledeburit, eutektická strukturní složka, se vyskytuje při obsahu uhlíku větším než 2,11 % (obr. 1). Díky legujícím prvkům dochází k rozšiřování oblasti existence feritu a naopak k zmenšování oblasti existence austenitu. Hlavními legujícími prvky, které rozšiřují oblast feritu, jsou chrom a wolfram. Právě díky těmto prvkům je možné vyrobit ocel s nižším obsahem uhlíku (menší jak 2,11 % C), v jejíž struktuře bude ledeburit. Materiály s vysokým obsahem legujících prvků a s výskytem eutektické strukturní složky již při obsahu uhlíku kolem 0,7 – 1 % C pak nazýváme ledeburitické oceli [6].



Obr. 1 – Diagram Fe-Fe₃C [7]

Struktura ledeburitických ocelí před tepelným zpracováním je tvořena dendrity tuhého roztoku feritu. Po kalení je matrice tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem. Karbidy tvoří

tvrdou složku a ovlivňují obrobitelnost, negativně řezivost a pozitivně otěruvzdornost. Na funkční vlastnosti, pevnost, má především vliv stav matrice. Pevnost matrice se zvyšuje tepelným zpracováním, přičemž zásadní vliv na pevnost a tvrdost má počet karbidů, které se při tepelném zpracování rozpustí v austenitu [6]. Ledeburitická ocel je buď vyráběna konvenčním způsobem nebo, v poslední době více se rozvíjející, práškovou metalurgií rychle ztuhlých částic (dále P/M). Oceli ledeburitického typu, vyráběné metodou P/M, mají lepší mechanické vlastnosti a vyšší houževnatost než tytéž oceli vyráběné konvenčním způsobem. Pro příklad jsou v tabulce 1 porovnány mechanické vlastnosti nástrojových ocelí ledeburitického typu vyrobených odlišným metalurgickým způsobem.

Tabulka 1 – Porovnání vlastností ledeburitických ocelí vyrobených metalurgicky odlišným způsobem [8, 9]

Způsob výroby	P/M	Konvenční
Označení	Vanadis 6	1.2080 (ČSN 19 436)
Pevnost v třibodovém ohybu [MPa]	3300-3600	800-850
Tvrdost po žíhání na měkko HB	255	250
Chemické složení [%]		
C	2,1	1,95
Cr	6,8	12
V	5,4	-
Si	1	0,1-0,6

V tabulce 1 jsou uvedeny mechanické vlastnosti a chemické složení ocelí Vanadis 6 a 1.2080. Obsah uhlíku je podobný, obsah jednotlivých legujících prvků se sice liší, ale v součtu je podobný. Z tabulky je patrné, že po žíhání na měkko mají porovnávané oceli srovnatelnou tvrdost. Pevnost v třibodovém ohybu je pro P/M ocel několikanásobně vyšší [9]. V uvedené literatuře není uvedeno tepelné zpracování, po kterém byla měřena pevnost v třibodovém ohybu.

- Výroba ledeburitických ocelí

Jak je uvedeno v předchozím odstavci, nástrojové oceli se v současné době vyrábějí dvěma způsoby. Buď klasickým způsobem, který spočívá v konvenčním metalurgickém postupu. Druhý způsob je práškovou metalurgií rychle ztuhlých částic, která se v posledních letech stala rozhodujícím směrem ve vývoji a použití vysokolegovaných ocelí ledeburitického typu. Jak již bylo uvedeno, materiály vyrobené touto technologií několikanásobně převyšují svými vlastnostmi materiály vyrobené konvenčním postupem. Tato technologie umožňuje výrobu nových typů mikro a nano materiálů, které by se klasickými metalurgickými postupy nemohly realizovat [6].

- Výroba ledeburitických ocelí konvenčním postupem

Většina kovových materiálů se vyrábí technologií, při které se uplatňuje proces tuhnutí taveniny. Primární metalurgie velkou měrou ovlivňuje homogenitu struktury a vlastnosti materiálu. Převážnou část vad, vzniklých v procesu primární krystalizace, nelze efektivně odstranit následným zpracováním (tváření za studena, tváření za tepla, tepelné zpracování) [6]. Konvenční výroba ocelí ledeburitického typu spočívá v přípravě taveniny a jejím následném odlití do stabilní formy. Ve formě ztuhne tavenina v ingot, který se dále válcuje za tepla, čímž se zlepší mechanické vlastnosti a dostane se tím požadovaný tvar polotovaru.

- Výroba ledeburitických ocelí práškovou metalurgií

Cílem práškové metalurgie rychle ztuhlých částic je překonat problémy s velkými segregacemi, vznikajícími během pomalého tuhnutí ingotů o váze několika stovek až tisíce kilogramů. Další důvod, proč se přechází na práškovou metalurgii, je zlepšení houževnatosti materiálu a možnost vyššího legování uhlíkem a vanadem [6].

1.4. Tepelné zpracování ledeburitických nástrojových ocelí

Je známo, že výsledné vlastnosti ocelí zásadním způsobem ovlivňuje použité tepelné zpracování. Tepelným zpracováním se rozumí řízené využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu s cílem získat požadované mechanické, technologické či jiné užité vlastnosti výrobků nebo polotovarů [3].

Pro ocel Vanadis 6 výrobce [9] doporučuje následující způsoby tepelného zpracování:

- Žíhání na měkko
- Žíhání na snížení vnitřního pnutí
- Kalení a popouštění
- Zmrazování

- **Žíhání na měkko**

Je známo, že žíhání na měkko se provádí za účelem snížení tvrdosti a zejména zlepšení obrobiteľnosti oceli. Požadovaných změn se dosahuje sferoidizací perlitického, popř. i sekundárního cementitu za teplot v oblasti teploty A_1 [3]. Jiný důvod provedení tohoto žíhání je u nástrojů, které je z různých důvodů nutné překalit. Je to např. z důvodu nevhodně (nebo chybně) provedeného tepelného zpracování [6]. Výrobce [9] doporučuje pro žíhání na měkko oceli Vanadis 6 prohřátí na 900 °C s následným pomalým ochlazením 10 °C/hod na teplotu 750 °C, poté volné ochlazení na vzduchu.

- **Žíhání na snížení vnitřního pnutí**

Žíhání na snížení vnitřního pnutí patří mezi žíhání bez překrystalizace, kdy teplota nepřesáhne teplotu A_1 . Cílem tohoto žíhání je odstranění vnitřních pnutí, jež vznikla v předchozích zpracováních např. při svařování, třískovém obrábění nebo nerovnoměrném ochlazení objemných odlitků a výkovek.

Nástroj z oceli Vanadis 6 se po hrubém opracování dle doporučení výrobce [9] ohřeje na teplotu 650 °C, po dosažení této hodnoty se teplota udržuje po dobu 2 hodin. Poté se pomalu ochlazuje v peci na teplotu 500 °C a následně se nechá volně zchladit na vzduchu.

· Kalení a popouštění

Kalením se označují ty způsoby tepelného zpracování, jejichž cílem je dosažení nerovnovážných stavů ocelí. Podle převažující strukturní složky se kalení rozděluje na martenzitické a bainitické, přičemž většinou je cílem kalení zajistit vznik struktury martenzitické [3].

Martenzit je nerovnovážný tuhý roztok uhlíku v železe alfa. Hodnoty teplot Martenzit start (M_s) a Martenzit finish (M_f) uhlíkových a nízkolegovaných ocelí jsou dány především chemickým složením austenitu. Uhlík a většina legujících prvků snižují teploty M_s a M_f , pokud jsou rozpuštěny v austenitu, jak je patrné z následující rovnice (1), ve které jsou koncentrace uvedeny v hmotnostním % [3]. U ledeburitických ocelí může být M_f bod bodem mrazu [3].

$$M_s [^{\circ}\text{C}] = 500 - 300 C - 35 \text{ Mn} - 20 \text{ Cr} - 15 \text{ Ni} - 10 \text{ Si} - 10 \text{ Mo} \dots (1)$$

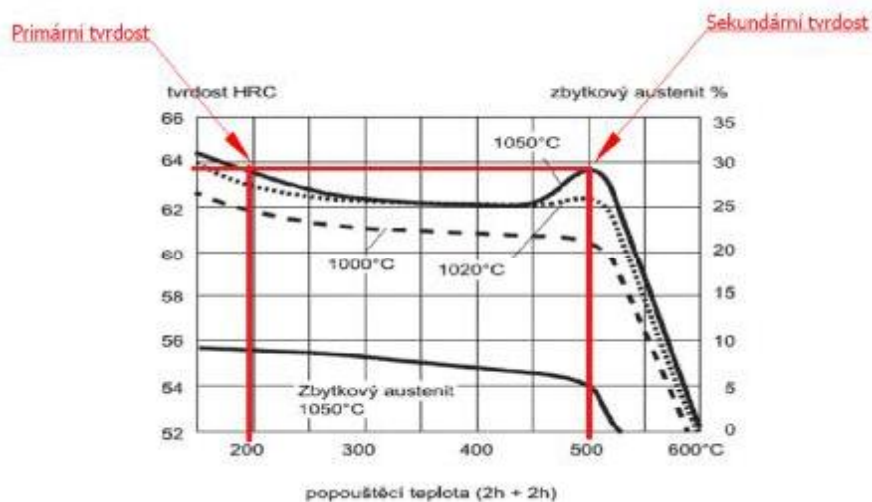
Při kalení výrobce [9] doporučuje předehřev provádět ve dvou stupních a to následovně, první v rozmezí 600 – 650 °C a druhý při teplotách 900 – 950 °C. Austenitizační teplota u materiálu Vanadis 6 leží mezi teplotami 1000 – 1150 °C. Čas potřebný k prohřátí materiálu do 1100 °C literatura [9] uvádí 30 minut. Pro teploty nad 1100 °C se čas zkracuje na 15 minut. Autor [9] varuje před oduhličením a oxidací během kalení.

Popouštění se obecně skládá z ohřevu na teploty nižší než A_1 , výdrže na teplotě (v technické praxi se většinou používá prodlevy 2 hodiny) a z následujícího ochlazování vhodnou rychlostí. Popouštění následuje zpravidla po kalení, během něhož struktury martenzitu a zbytkového austenitu procházejí změnami. Výsledná struktura je oproti té výchozí blíže termodynamické rovnováze, což se projeví na snížení vnitřní napjatosti a tedy i tvrdosti a naopak nárůstu houževnatosti a deformačních charakteristik. Tento průběh závisí na složení materiálu a teplotě popouštění. Tvrdost oceli s narůstající teplotou popouštění obvykle klesá. U vysokolegovaných ocelí se v některých případech (závisí na teplotě austenitizace) objevuje na popouštěcí křivce oblast sekundární tvrdosti [3].

Sekundární tvrdost je jev, který vede k precipitaci speciálních karbidů, které mají za následek zvýšení tvrdosti některých legovaných ocelí při popouštění okolo 500 °C. Z uvedených

důvodů se teplota popouštění volí dle požadované výsledné tvrdosti. Teplota popouštění se pak určuje podle tzv. popouštěcího diagramu [6].

Na obr. 2 je popouštěcí diagram oceli Vanadis 6, kde je patrná oblast primární a sekundární tvrdosti. Na obrázku je vyznačeno, že pro tento materiál lze dosáhnout shodných hodnot pro primární i sekundární tvrdost. Primární tvrdost při teplotě austenitizace 1050 °C a popouštění 2x180 °C je přibližně 63,8 HRC. Stejných hodnot lze dosáhnout i na sekundární tvrdosti, pro stejnou teplotu austenitizace je (popouštění 2x500 °C). Výsledné struktury materiálu po výše zmíněných tepelných zpracováních však nejsou shodné. U materiálu popouštěného na 500 °C se dosahuje větší houževnatosti a plasticity, je odolnější oproti opotřebení než materiál popouštěný na 180 °C [3].



Obr. 2 - Popouštěcí diagram pro ocel Vanadis 6 [9]

• Zmrazování

Tento způsob tepelného zpracování se provádí nejčastěji po kalení a slouží ke snížení zbytkového austenitu (A_z) v ocelích, které mají teplotu M_f pod bodem mrazu.

Autor [2] uvádí následující postup zmrazování. V první fázi proběhne ochlazení součástky nad teplotu M_s , poté následuje výdrž pro vyrovnání teploty mezi povrchem a jádrem. Ve druhé fázi

se přeměna přerušší a po vložení do mrazícího zařízení pokračuje až na výrazné snížení teploty. Přesun musí být co nejrychlejší, aby nedošlo ke stabilizaci A_z . Zmrazování má vliv na užité vlastnosti materiálu, protože A_z snižuje tvrdost. Martenzitické jehlice vzniklé před zmrazením jsou větší než během zmrazování. Struktura po kalení bývá zatížena silnou vnitřní napjatostí, a proto po celém procesu musí následovat popouštění. Při vyšších teplotách vzniká během zmrazování nad zpracovávaným materiálem parní oblak, zabraňující odvodu tepla. Dalším problémem je hrozba vzniku trhlin po příliš prudkém ochlazení [2].

Podle přeměny zbytkového austenitu je možné shrnout výhody, kterých lze dosahovat použitím technologie zmrazování:

- Vyšší tvrdost a větší odolnost vůči opotřebení
- Rozměrová stálost a odstranění vnitřního pnutí [10]

Dle výrobce [9] se materiálu Vanadis 6 po zmrazení na -70 až -80 °C s výdrží 1-3 hodiny zvýší tvrdost o ~ 1 HRC. Zmrazením po kalení si materiál udrží tvarovou stálost. Výrobky složitě tvarované se nezmráží vzhledem k možnému popraskání [9].

1.5. Odolnost proti opotřebení ledeburitických nástrojových ocelí

Opotřebení je definováno jako trvalá, nežádoucí změna povrchu materiálu součástí mechanickými účinky, které mohou být doprovázeny účinky fyzikálními, chemickými popř. elektrickými [3]. Namáhání při opotřebení může vést k povrchovým změnám, které se vyznačují jednak mikro plastickou deformací vyvolanou zatlačováním tvrdých částic do měkčího povrchu druhého členu, nebo únavovým poškozením povrchových vrstev při opakovaném namáhání, kdy dochází ke vzniku oxidů, kterými je podporována mikro plastická deformace. Podle toho, zda je opotřebení vyvoláno vzájemnou interakcí dvou funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a media, a dále pak podle mechanismu opotřebení, se rozlišují základní typy opotřebení na adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační [3].

Abrazivní opotřebení je charakteristické oddělováním částic z opotřebovávaného materiálu řezáním tvrdými částicemi, které jsou na povrchu tělesa druhého. Abrazivní opotřebení může

vznikat například oxidací vzdušným kyslíkem, intenzivní plastickou deformací a podobně [11]. Adhezní opotřebení se například projevuje rýhováním na bronzových pouzdech ložisek.

Adhezní opotřebení je charakteristické oddělováním a přemísťováním částic materiálu, kdy v průběhu vzájemných relativních pohybů kontaktních ploch dochází k těsnému přiblížení. V případě nedokonale hladkého povrchu kontaktních ploch vznikají velké kontaktní tlaky. Studené mikro spoje vznikají na plochách těsným přiblížením kontaktních ploch. Při následném relativním pohybu dochází k porušení těchto spojů. Porušení materiálu se objeví na rozhraní zpevněného a nezpevněného materiálu nikoli na původním rozhraní kontaktních ploch.

Adhezní opotřebení se vyskytuje hlavně na nedostatečně mazaných stykových plochách [12]. Adhezním opotřebením například dochází k zadření pístu ve válci motoru nebo k poškození boku ozubeného kola.

2. Experimentální část

2.1. Zkoušený materiál a jeho tepelné zpracování

Zkoušeným materiálem je Vanadis 6 Cr-Mo-V nástrojová P/M ocel pro práci za studena. Mezi charakteristické vlastnosti tohoto materiálu především patří velmi vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení, vysoká pevnost v tlaku, dobrá prokalitelnost, rozměrová stálost při kalení a odolnost proti popouštění [9]. Směrné chemické složení udává tabulka 2.

Tabulka 2 – Chemické složení oceli Vanadis 6 [9]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
2,1	1	0,4	6,8	1,5	5,4

· Zkušební vzorky

Jako zkušební vzorky byla použita zkušební tělesa po zkoušce lomové houževnatosti, která byla provedena v předchozích experimentech. Z nich byly dále nařezány vzorky 10x10x25 mm pro měření tvrdosti a zkoušku opotřebení materiálu metodou Pin on disc. Tepelné zpracování a značení vzorků uvádí tabulka 3.

Tabulka 3 – Tepelné zpracování vzorků oceli Vanadis 6

Vzorek	Austenitizace	Zmrazeno		Popouštěno
	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Výdrž [hod]	Teplota [°C]
1	1025	-90	10	2x530°C
2	1025	-196	10	2x530°C
3	1025	-196	4	2x530°C
4	1025	-	-	2x530°C
5	1025	-90	4	2x530°C

Příklad experimentálního vzorku je na obrázku 3.



Obr. 3 – Experimentální vzorek bakalářské práce

2.2. Metoda Pin on disc

Princip metody Pin on disc je následující. Na zkušební vzorek (DISC) uchycený do sklíčidla je přitlačována kulička (PIN), která je upevněna pomocí přípravku v rameni zařízení. Použité zařízení je na obrázku 4. Ve zvolené vzdálenosti od středu rotace je zatěžován PIN stanovenou silou a DISC je otáčen danou rychlostí po zvolenou délku dráhy rotace. Tělísko vytvoří na povrchu disku drážku, u které se dále analyzuje šířka [13], která se dále používá pro výpočet opotřebení.

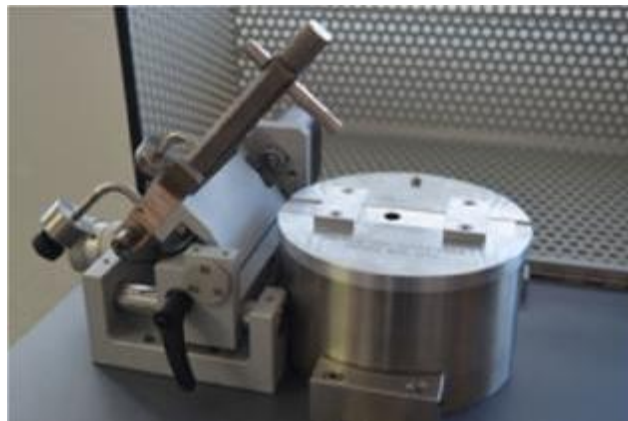
Velikost opotřebení materiálu je možné vypočítat pomocí níže uvedeného výpočtu [14]:

$$\text{Opotřebení} = \frac{\pi \cdot (\text{poloměr vykrúžování}) \cdot (\text{šířka drážky})^3}{6 \cdot (\text{poloměr kuličky})} [\text{mm}^3] \quad (2)$$

Parametry zkoušky Pin on disc provedené v rámci této práce uvádí následující tabulka 4.

Tabulka 4 – Parametry zkoušky Pin on disc

Zatěžující síla	F	5 N
Dráha rotace kuličky	l	100 m
Poloměr zkušební kuličky	r	2 mm
Poloměr vykroužené drážky	R	6 mm
Materiál kuličky	Al ₂ O ₃	



Obr. 4 – Tribometr

Šířka drážky po zkoušce Pin on disc byla vyhodnocena na světelném mikroskopu Neophot 32 pomocí software NIS Elements.

2.2.1. Vyhodnocení drážky

Všechny zkoušené vzorky byly nejprve leštěny před provedením zkoušky opotřebení metodou Pin on disc. Vzniklá drážka byla změřena a vyhodnocena pomocí světelného mikroskopu Neophot 32. Každý vzorek byl na pěti místech měřen 4x. Z naměřených dvaceti hodnot byla vypočtena průměrná hodnota šířky vzniklé drážky a také doložena směrodatná odchylka. Z této průměrné hodnoty šířky drážky byla vypočtena velikost opotřebení pomocí vztahu (2).

Výsledkem této metody jsou hodnoty koeficientu tření, srovnatelné pouze se vzorky, které byly podrobeny zkoušce za shodných podmínek. Naměřené hodnoty součinitele tření není možné porovnávat s běžným součinitelem tření.

2.3. Měření tvrdosti dle Rockwella

Na zkušebních vzorcích byla měřena tvrdost dle Rockwella metodou HRC. Tato metoda je zkouškou vnikací, kde indentor je diamantový kužel s úhlem špičky 120° a poloměrem špičky 0,2 mm. K naměření tvrdosti byl použit tvrdoměr EMCOTEST M4C G3, který je na obrázku 5. Měření proběhlo vždy na opačné straně vzorku než zkouška na opotřebení materiálu metodou Pin on disc. Před měřením jednotlivých vzorků byl proveden kontrolní vpich do etalonu. Na této měřené straně bylo provedeno 5 měření tvrdosti. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Parametry měření byly následující:

Předzatížení $98,10\text{ N} / 1\text{ s}$ a hlavní zatížení $1471,50\text{ N} / 5\text{ s}$.



Obr. 5 – Tvrdoměr EMCOTEST M4C G3

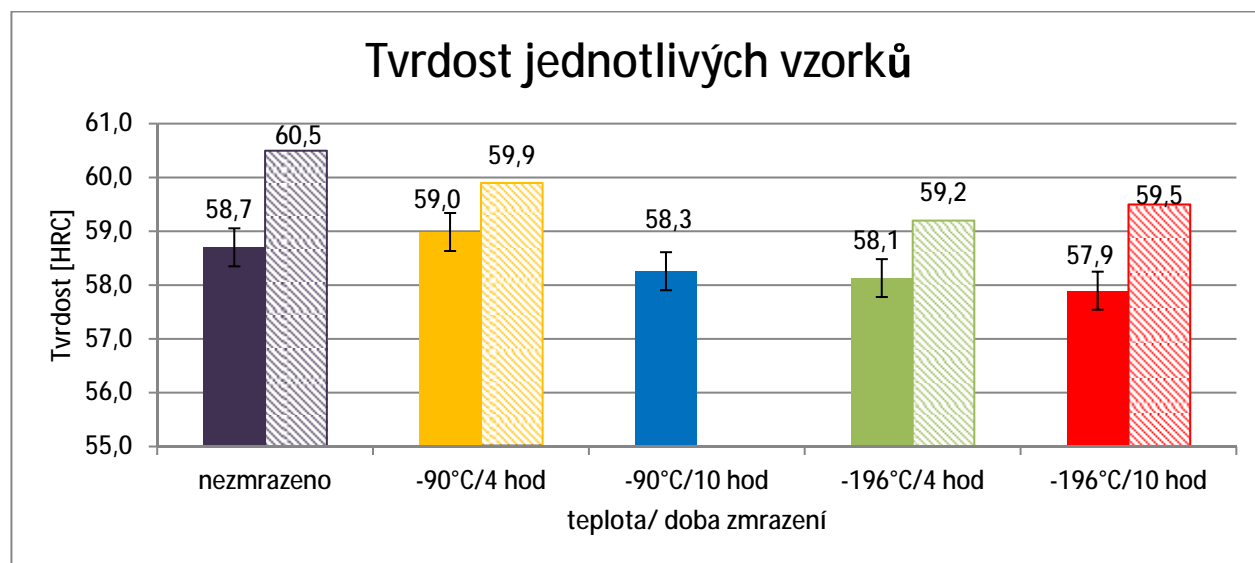
3. Výsledky a jejich diskuse

3.1. Vliv tepelného zpracování na tvrdost oceli Vanadis 6

Vliv teploty a časové výdrže zmrazování na tvrdost zkoušeného materiálu je patrný z tabulky 5. Obrázek 6 graficky znázorňuje hodnoty z tabulky 5 doplněné o porovnání s hodnotami uvedenými pro stejný materiál a odpovídající režimy tepelného zpracování v práci [1] (vyznačeno šrafovaně). Z obrázku je patrné, že hodnoty tvrdosti naměřené v této práci jsou o 1-2 HRC nižší než uvádí [1]. Lze předpokládat, že tento rozdíl je dán skutečností, že vzorky práce [1] a předpokládané práce, byly z různých šarží. Dále je nutno konstatovat, že publikace [1] využívá hodnoty měření tvrdosti pěti vzorků, zatímco v této práci je vyhodnocen pouze jeden vzorek při každém tepelném zpracování.

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty tvrdosti se směrodatnou odchylkou

Vzorek číslo	Zmrazování		Měření [HRC]							
	Teplota	Výdrž	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Odchylka	HRC
	[°C]	[hod]								
4	0	0	58,60	58,33	58,35	59,05	59,18	58,7	0,35	58,7 ± 0,35
5	-90	4	59,05	59,13	59,05	59,00	58,70	59,0	0,15	59 ± 0,15
1	-90	10	58,88	58,50	58,10	57,93	57,88	58,3	0,38	58,3 ± 0,38
3	-196	4	58,10	58,70	57,30	57,80	58,75	58,1	0,55	58,1 ± 0,55
2	-196	10	57,20	57,73	57,95	58,20	58,40	57,9	0,42	57,9 ± 0,42



Obr. 6 – Grafické znázornění tvrdosti jednotlivých zkušebních vzorků s uvedenou směrodatnou odchylkou.

Hodnoty tvrdosti oceli Vanadis 6 po různých režimech tepelného zpracování, které byly naměřeny v rámci této práce, se liší minimálně (v rozsahu 1,1 HRC) tento rozdíl odpovídá i výsledkům práce [1].

3.2. Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení oceli Vanadis 6

Výsledky měření opotřebení metodou Pin on disc uvádí tabulka 6. Dále jsou výsledky uvedeny a diskutovány podle vlivu jednotlivých parametrů tepelného zpracování.

Tabulka 6 – Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky Pin on disc

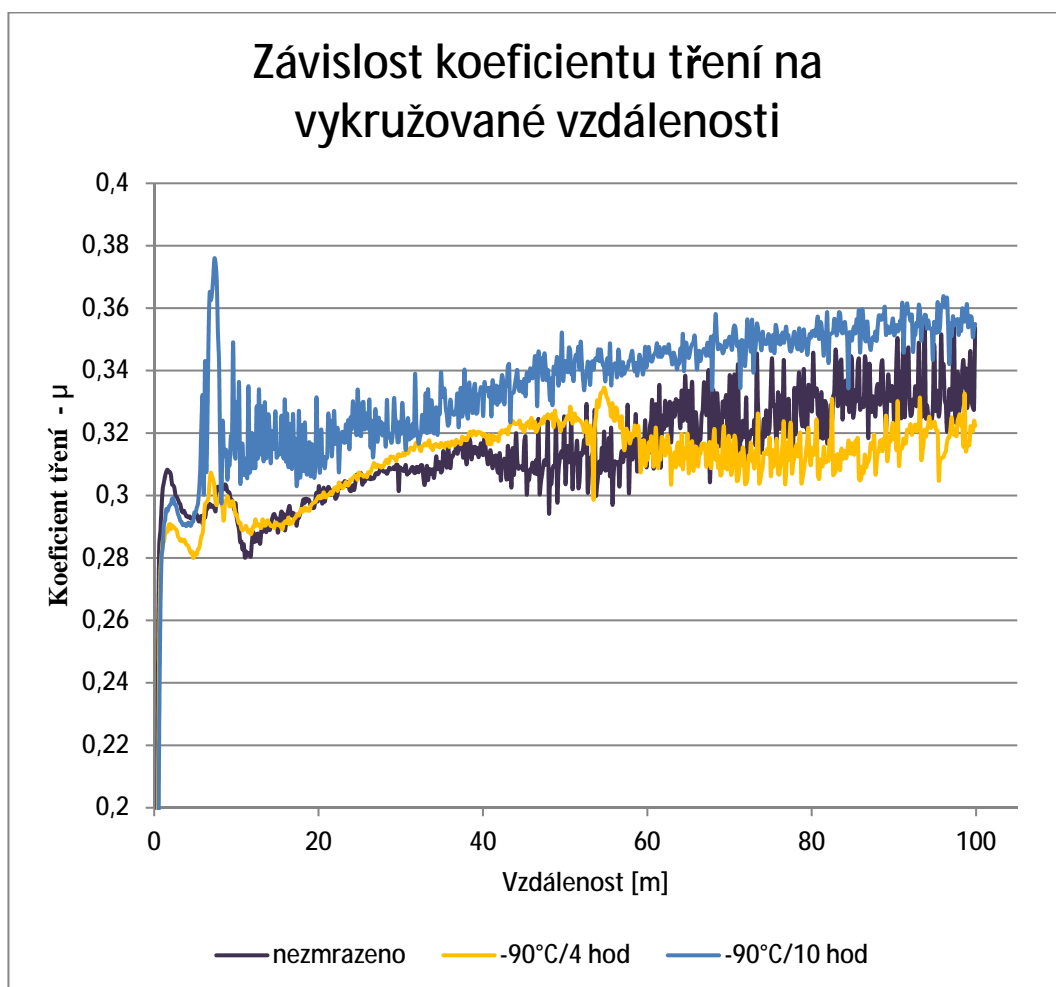
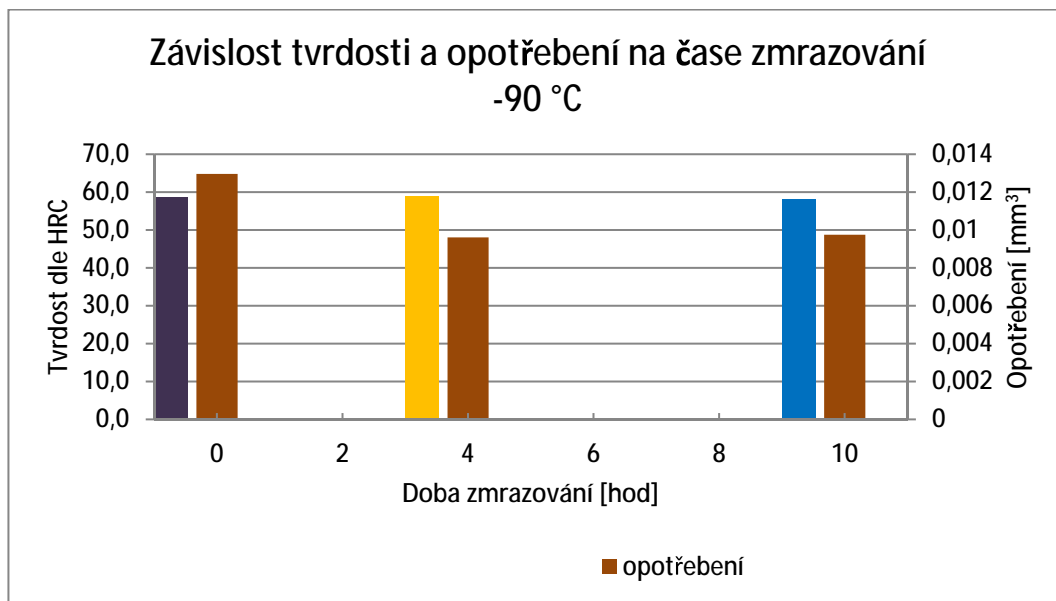
Šířka drážky d [mm]					
Číslo měření	Vzorek číslo				
	1	2	3	4	5
1	0,18107	0,11846	0,1472	0,15952	0,18118
2	0,18087	0,09765	0,13955	0,15921	0,18017
3	0,17482	0,10043	0,15341	0,15832	0,18485
4	0,17935	0,0967	0,15566	0,15921	0,18812
5	0,18014	0,1472	0,1414	0,19608	0,18562
6	0,17619	0,14128	0,13777	0,1931	0,18438
7	0,1741	0,16187	0,1351	0,19361	0,18619
8	0,17893	0,14809	0,14098	0,1931	0,18342
9	0,18499	0,16722	0,13954	0,22624	0,18987
10	0,18966	0,17781	0,13455	0,22224	0,17883
11	0,18248	0,16125	0,14483	0,21967	0,17622
12	0,18596	0,16388	0,14815	0,2188	0,18926
13	0,18261	0,15657	0,14258	0,22845	0,18301
14	0,18541	0,15731	0,15005	0,22189	0,17492
15	0,18209	0,15773	0,15005	0,22491	0,17318
16	0,18129	0,15583	0,13759	0,22447	0,18445
17	0,18758	0,13812	0,13209	0,20983	0,18232
18	0,19827	0,1319	0,1357	0,21319	0,18534
19	0,19199	0,13186	0,13966	0,20934	0,18392
20	0,19868	0,12816	0,13239	0,21155	0,18291
Průměr	0,1838	0,142	0,1419	0,2021	0,1829
Suma	0	0,0014	0,0028	0,0034	0,0004
Odchylka	0,002	0,038	0,0533	0,0587	0,0046
	$0,1838 \pm 0,002$	$0,142 \pm 0,038$	$0,1419 \pm 0,0533$	$0,2021 \pm 0,0587$	$0,1829 \pm 0,0046$
Velikost opotřebení [mm ³]	0,009753	0,004498	0,004488	0,01296	0,009611

3.3. Vliv doby zmrazování při teplotě -90 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6

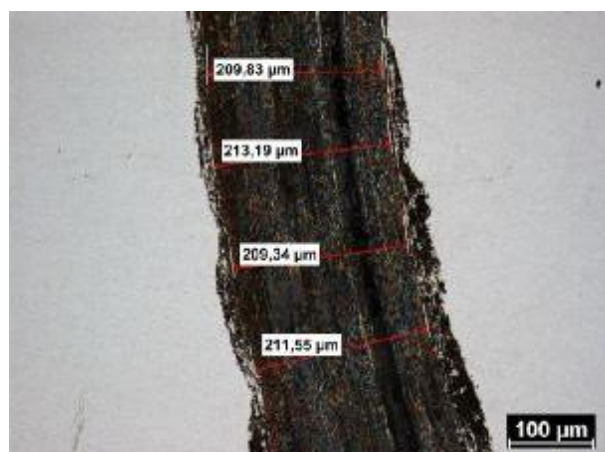
Byl hodnocen vliv doby zmrazování při teplotě -90 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6. Výsledky uvádí obrázek 7.

Z obrázku je patrné, že zmrazování neprokázalo vliv na hodnotu tvrdosti v porovnání s tepelným zpracováním bez zmrazování. Z hlediska velikosti opotřebení však lze konstatovat, že vzorky zmrazené mají menší opotřebení než vzorek zpracovaný klasickým způsobem tepelného zpracování. Velikost opotřebení vzorků po zmrazování při -90 °C se v závislosti na čase zmrazování téměř neliší. Lze konstatovat, že pro ocel Vanadis 6 byl zjištěn nárůst odolnosti proti opotřebení o 24 %, pokud bylo při tepelném zpracování zařazeno zmrazování -90 °C a to mezi kalení a popouštění. Z hlediska velikosti koeficientu tření je možné říci, že tento jev se téměř nemění při zmrazování oceli Vanadis 6 při -90 °C, protože na obrázku 7 dole je použita velmi jemná stupnice osy y. Podrobnější hodnocení koeficientu tření je nad rámec této práce.

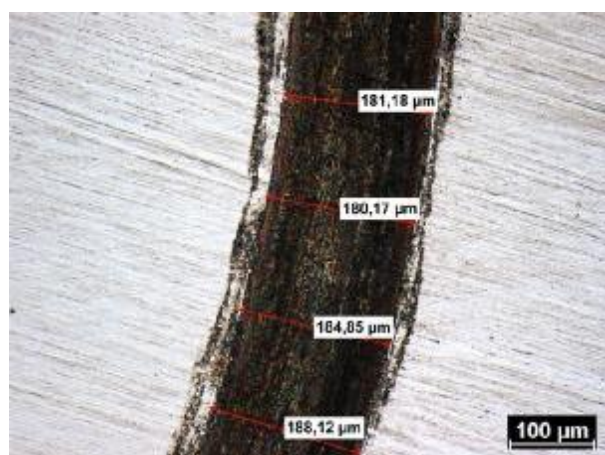
Obrázek 8 dokumentuje způsob měření šířky drážky při hodnocení vlivu doby zmrazování při teplotě -90 °C na opotřebení oceli Vanadis 6.



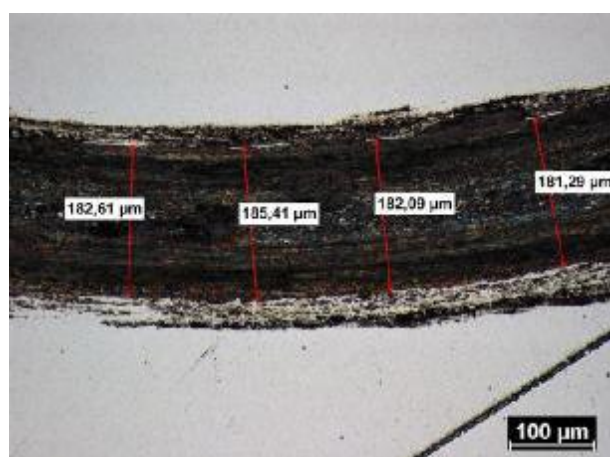
Obr. 7 – Vliv doby zmrazování při teplotě -90 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6



a) nezmrazený vzorek



b) -90 °C/4 hod



c) -90 °C/10 hod

Obr. 8 – Vliv doby zmrazování při teplotě -90 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6 – vyhodnocování drážky pomocí NisElements.

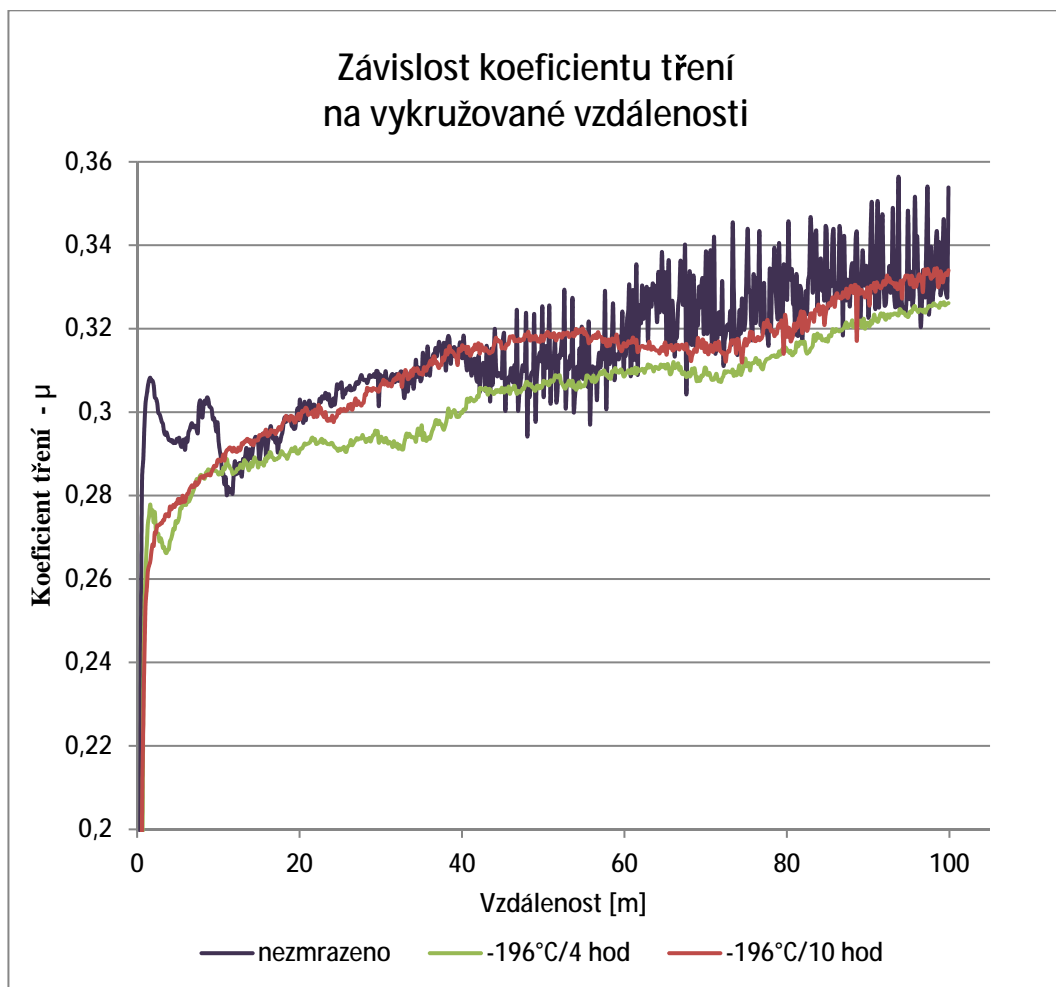
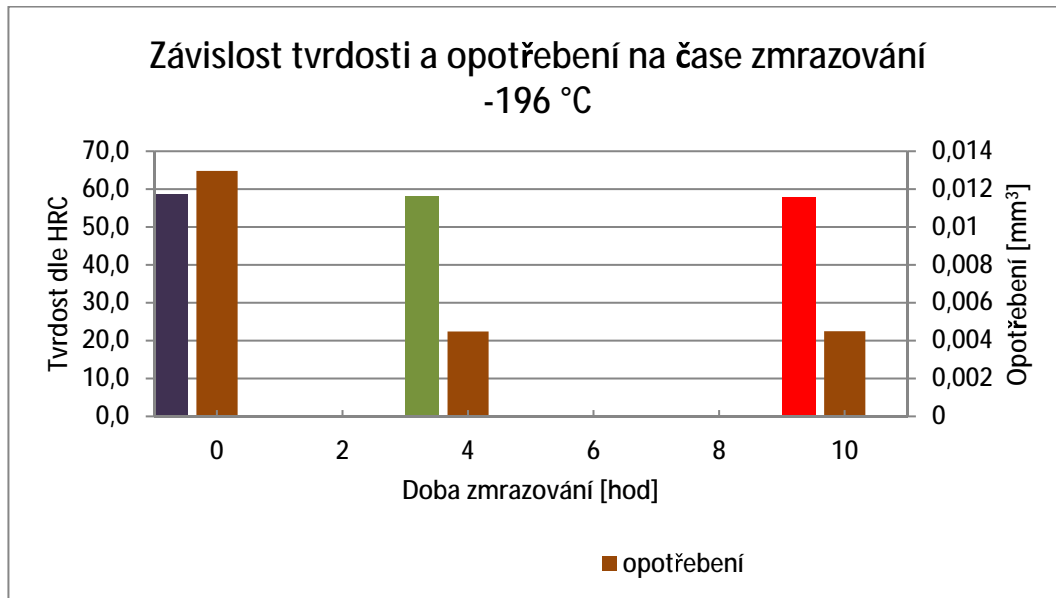
3.4. Vliv doby zmrazování při teplotě -196 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6

Výsledky hodnocení vlivu doby zmrazování při teplotě -196 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6 uvádí obrázek 9.

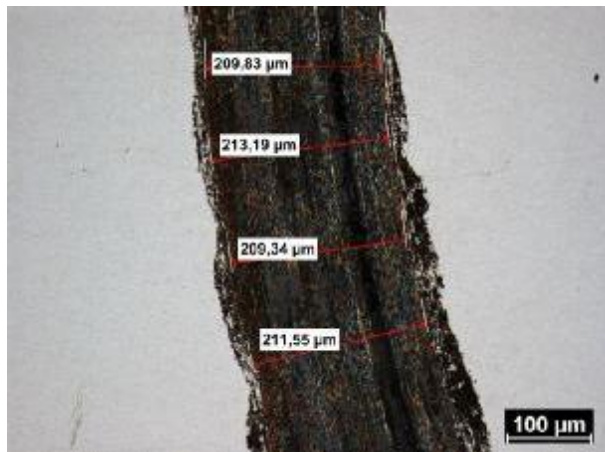
Z obrázku 9 je patrné, že zmrazování při -196 °C způsobilo mírný pokles tvrdosti v porovnání s tepelným zpracováním bez zmrazování. Což je v dobrém souladu s prací [1]. Naopak na velikost opotřebení má zmrazování při této teplotě pozitivní vliv. Zmrazené vzorky mají menší opotřebení než vzorek zpracovaný klasickým způsobem tepelného zpracování. Velikost opotřebení vzorků po zmrazování při -196 °C v závislosti na čase zmrazování je téměř stejná. Je patrné, že pro ocel Vanadis 6 byl zjištěn nárůst odolnosti proti opotřebení o 65 %, pokud bylo při tepelném zpracování zařazeno zmrazování -196 °C a to mezi kalení a popouštění.

Na obrázku 9 dole je závislost koeficientu tření na vykružované vzdálenosti tělíška (PINU) po zkušebním vzorku. Z obrázku vyplývá, že koeficient tření se téměř nemění (je použita velmi jemná stupnice osy y).

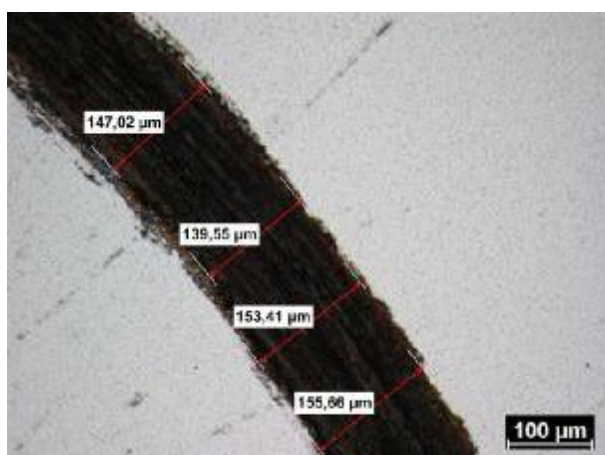
Obrázek 10 znázorňuje způsob měření šířky drážky při hodnocení vlivu doby zmrazování při teplotě -196 °C na opotřebení oceli Vanadis 6.



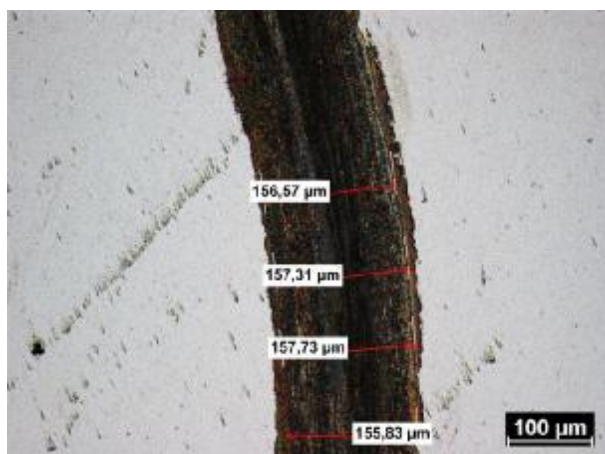
Obr. 9 – Vliv doby zmrazování při teplotě -196 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6



a) nezmražený vzorek



b) -196 °C/4 hod



c) -196 °C/10 hod

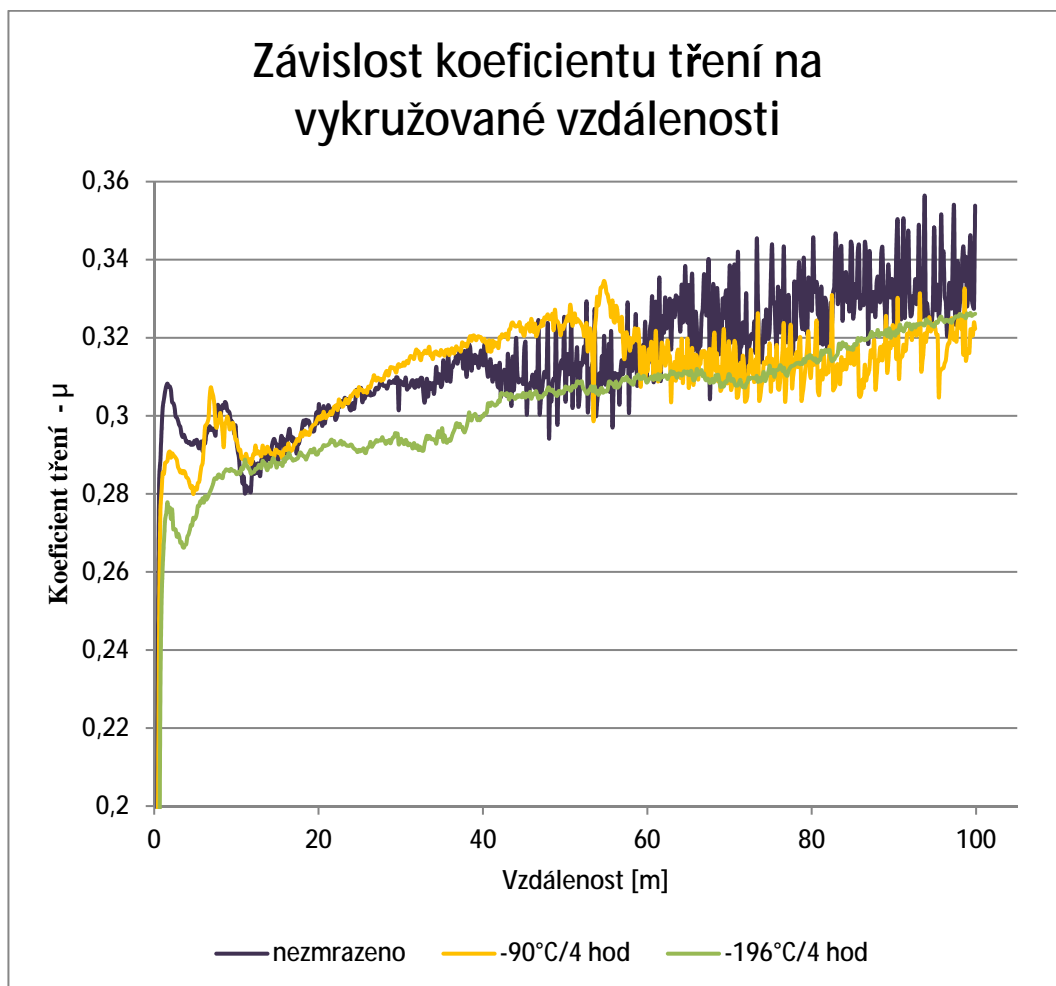
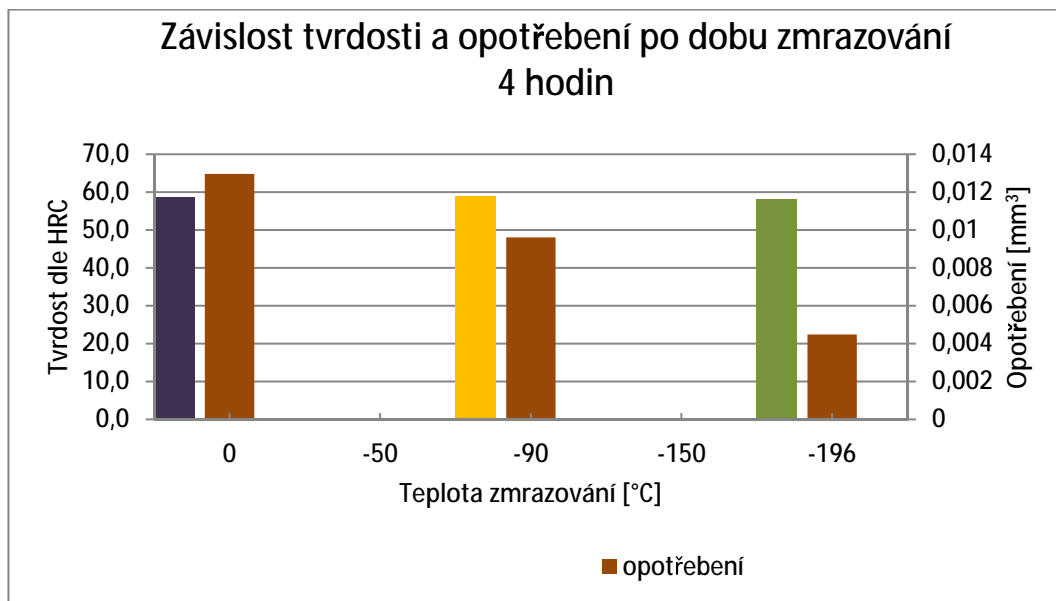
Obr. 10 – Vliv doby zmrazování při teplotě -196 °C na vlastnosti oceli Vanadis 6 – vyhodnocování drážky pomocí NisElements.

3.5. Vliv teploty zmrazování po dobu 4 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6

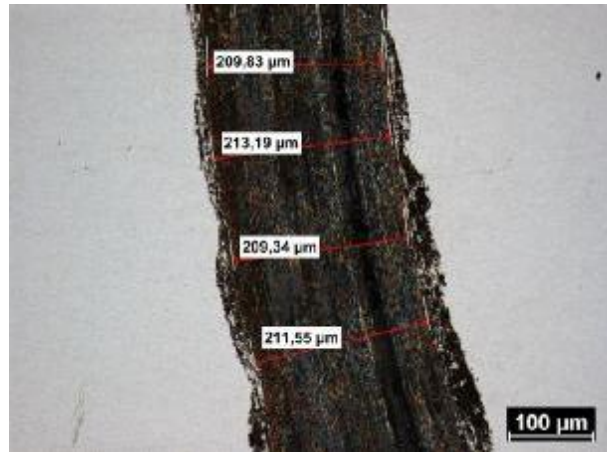
Byl hodnocen vliv teploty zmrazování po dobu 4 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6. Výsledky dokumentuje obrázek 11.

Z obrázku 11 je patrné, že zmrazování neprokázalo výrazný vliv na hodnotu tvrdosti v porovnání s tepelným zpracováním bez zmrazování. Z hlediska velikosti opotřebení je patrný pokles velikosti opotřebení s klesající teplotou zmrazování. Zmrazování při $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 4 hodiny způsobilo snížení velikosti opotřebení proti zmrazování $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 4 hodiny o 47 %. Ve shodě s předcházejícími výsledky je možné říci, že koeficient tření se pro výše zmíněné režimy tepelného zpracování téměř nemění. Na obrázku 11 dole je použita velmi jemná stupnice osy y.

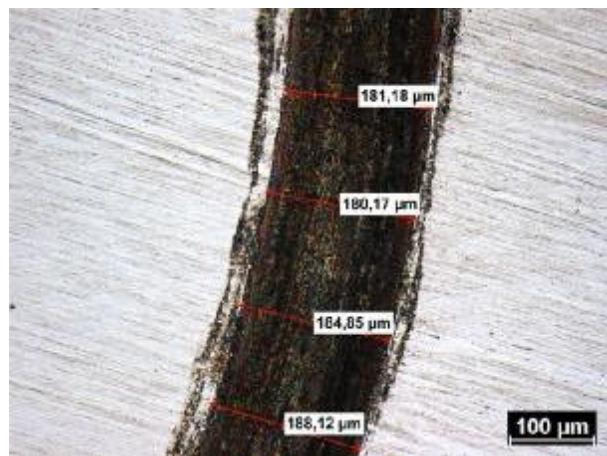
Obrázek 12 dokumentuje způsob měření šířky drážky při hodnocení vlivu teploty zmrazování po dobu 4 hodin na opotřebení oceli Vanadis 6.



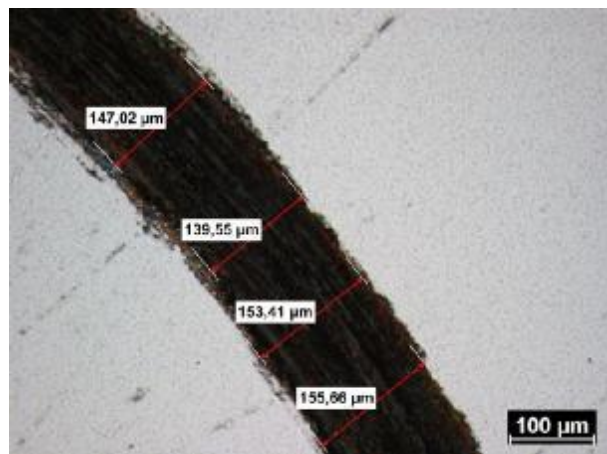
Obr. 11 – Vliv teploty zmrazování -90 °C, -196 °C/4 hod na vlastnosti oceli Vanadis 6



a) nezmrazený vzorek



b) $-90\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ hod}$



c) $-196\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ hod}$

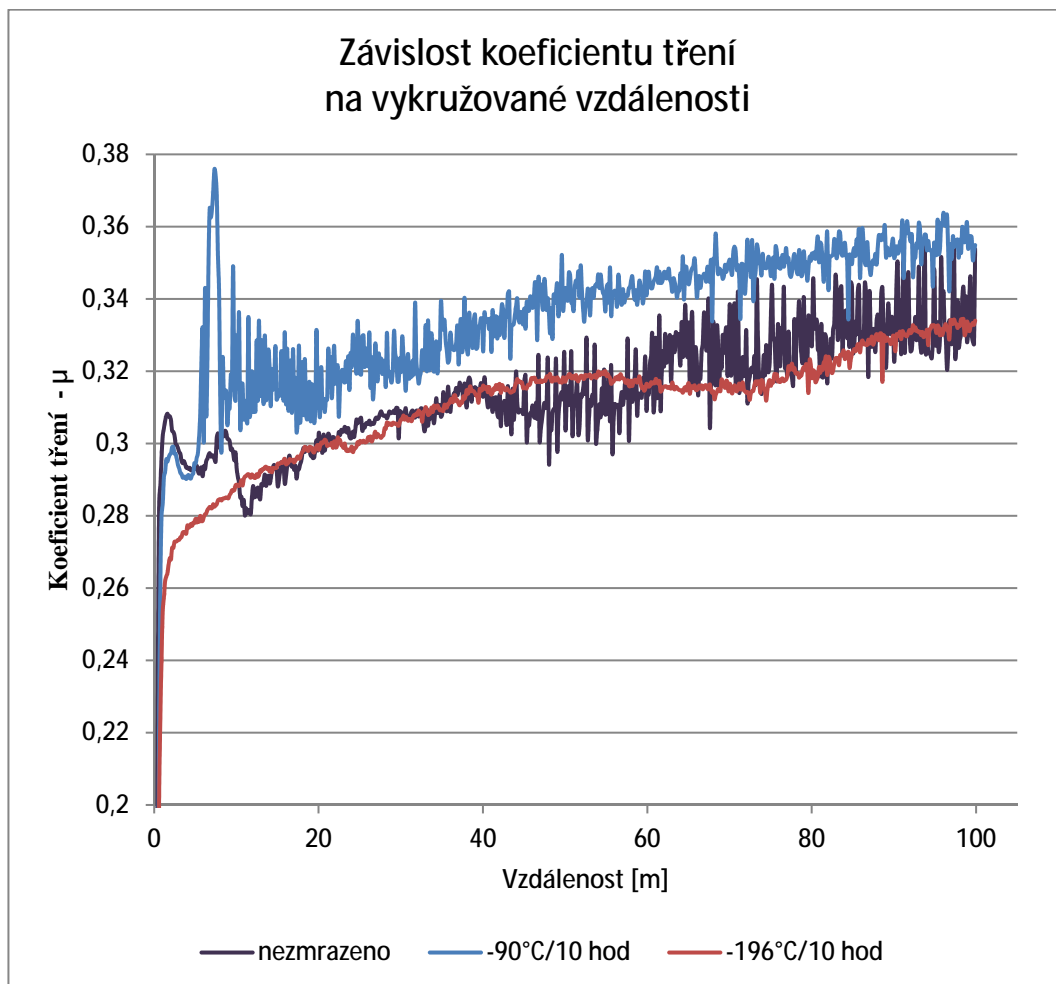
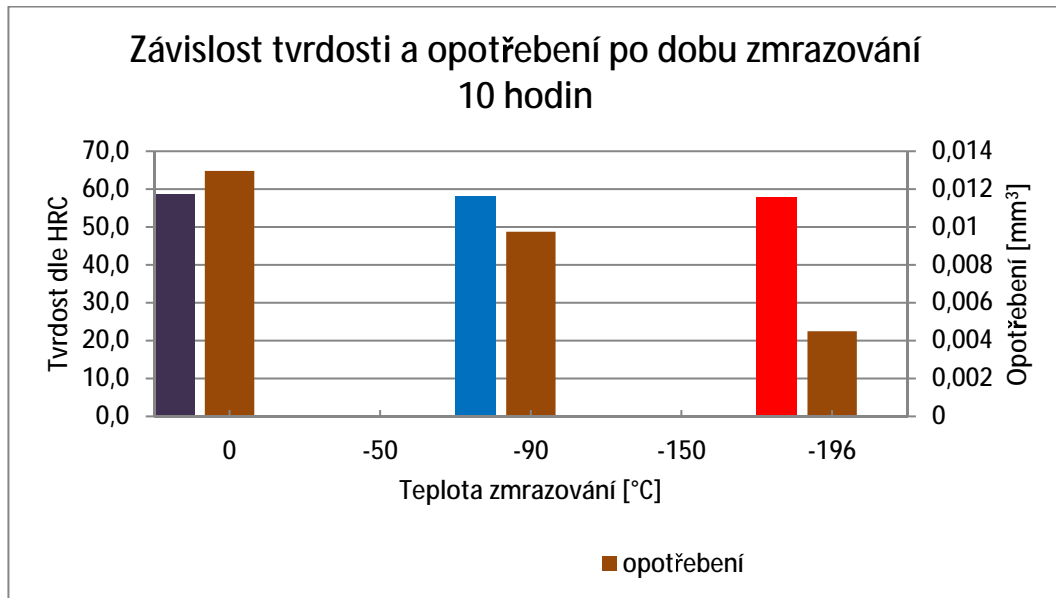
Obr. 12 – Vliv teploty zmrazování po dobu 4 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6 – vyhodnocování drážky pomocí NisElements.

3.6. Vliv teploty zmrazování po dobu 10 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6

Byl hodnocen vliv teploty zmrazování po dobu 10 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6. Výsledky dokumentuje obrázek 13.

Obrázek 13 uvádí, že výsledná tvrdost nemá vliv na tepelné zpracování se zmrazováním či bez zmrazování. Z pohledu velikosti opotřebení lze shledat, že s klesající teplotou zmrazování opotřebení klesá. Zmrazování při -196 °C / 10 hodin způsobilo snížení velikosti opotřebení proti zmrazování -90 °C / 10 hodin o 46 %. Koeficient tření je pro výše zmíněné režimy tepelného zpracování téměř shodný. Na obrázku 13 dole je použita velmi jemná stupnice osy y.

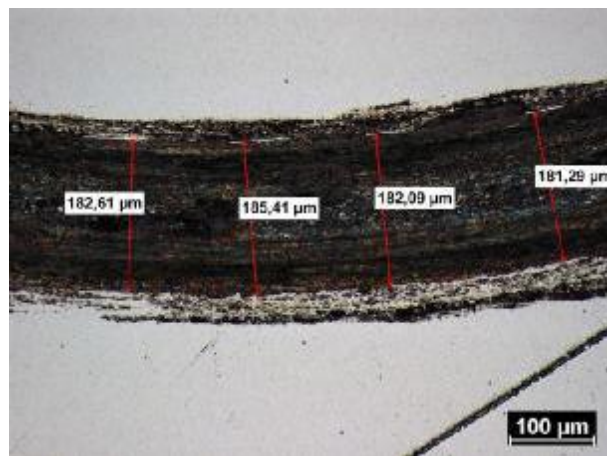
Obrázek 14 znázorňuje způsob měření šířky drážky při hodnocení vlivu doby zmrazování při teplotě -90 °C a -196 °C na opotřebení oceli Vanadis 6.



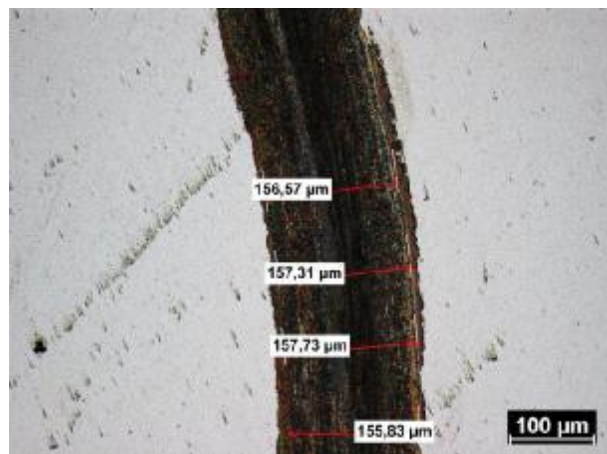
Obr. 13 – Vliv teploty zmrazování -90 °C, -196 °C/10 hod na vlastnosti oceli Vanadis 6



a) nezmražený vzorek



b) $-90\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ hod}$



c) $-196\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ hod}$

Obr. 14 – Vliv teploty zmrazování po dobu 10 hodin na vlastnosti oceli Vanadis 6 – vyhodnocování drážky pomocí NisElements.

4. Závěry

Byl hodnocen vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení ledeburitické oceli Vanadis 6 vyrobené práškovou metalurgií a to po různých režimech tepelného zpracování.

Lze konstatovat že:

- 1) Hodnoty tvrdosti oceli Vanadis 6 po sledovaných režimech tepelného zpracování se liší minimálně a to v rozsahu 1,1 HRC.
- 2) Vzorky zmrazené (-90 °C /4 nebo 10 hodin) mají menší opotřebení než vzorek zpracovaný klasickým způsobem tepelného zpracování a to o 24 %. Velikost opotřebení se v závislosti na čase zmrazování téměř neliší.
- 3) Vzorky zmrazené (-196 °C /4 nebo 10 hodin) mají menší opotřebení než vzorek zpracovaný klasickým způsobem tepelného zpracování a to o 65 %. Velikost opotřebení se v závislosti na čase zmrazování téměř neliší.
- 4) Zmrazování při -196 °C/ 4 hodiny způsobilo snížení velikosti opotřebení proti zmrazování -90 °C/ 4 hodiny o 47 %.
- 5) Zmrazování při -196 °C/ 10 hodin způsobilo snížení velikosti opotřebení proti zmrazování -90 °C/ 10 hodin o 46 %.
- 6) Nejmenší opotřebení po sledovaných režimech tepelného zpracování bylo zjištěno u vzorků, u kterých bylo zařazeno mezi kalení a popouštění zmrazování při teplotě -196°C. Velikost opotřebení nezávisí na čase zmrazování, proto lze z ekonomického hlediska doporučit pro nástroje z oceli Vanadis 6 zmrazování při teplotě -196 °C/ 4 hodiny.
- 7) Uvedené výsledky bude vhodné prověřit na větším počtu vzorků nebo na konkrétních nástrojích.

Seznam použité literatury

- [1] JURČI, Peter, Jana SOBOTOVÁ, Petra SALABOVÁ, Otakar PRIKNER, Borivoj ŠUŠTARŠIČ a Darja JENKO. *SUB-ZERO TREATMENT OF P/M VANADIS 6 LEDEBURITIC TOOL STEEL* [online]. 2013 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2013/18-2013.pdf>
- [2] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] UDDEHOLM. *SVERKER® 21* [online]. 2014 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_sverker_21_english.pdf
- [5] SALABOVÁ, Petra. *TRIBOTECHNIKA. Vliv kryogenního zpracování na vlastnosti ledeburitických nástrojových ocelí* [online]. 2013 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://docslide.net/documents/tribotechnika12013.html>
- [6] JURČI, Peter. *Nástrojové oceli ledeburitického typu*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 221 s. ISBN 978-80-01-04439-1.
- [7] *Diagram Fe-Fe₃C* [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: http://3.bp.blogspot.com/_BcZ9_qDaZ1M/TOUHiPf7_eI/AAAAAAAAAIQ/6SSULjYYPIQ/s1600/1_doc_m100a9bd8.gif
- [8] PRECIZ S.R.O. *1.2080 (X210Cr12, 19 436)* [online]. 2012 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2080
- [9] UDDEHOLM. *Vanadis 6. Vysocovýkonná-P/M-ocel na nástroje pro práci za studena* [online]. 2006 [cit. 2014-10-07]. Dostupné z: <http://www.uddeholm.cz/czech/files/vanadis-6.pdf>
- [10] SVATOŠ, Jiří. *MESSER TECHNOGAS S. R. O. Přeměna zbytkového austenitu pomocí kapalného dusíku* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv-2012/TT_231.pdf

- [11] ŠVEC, Pavol. *Konštrukčné materiály*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2010. ISBN 978-80-227-3386-1.
- [12] SKF. *Příležitosti vyvážené zlatem* [online]. 2012 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: www.techmagazin.cz/685?poslat-emailem
- [13] KŘÍŽ, Antonín. ZČU V PLZNI. *TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA PIN-ON-DISC* [online]. 2004 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf
- [14] ASTM G99-05(2010), Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010