



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	<b>Vojtěcha Š P L Í C H A L A</b>
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	<b>Vliv tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení P/M rychlořezné oceli Vanadis 30</b>
název anglicky:	Effect of heat treatment on the wear resistance of P/M high speed steel Vanadis 30

## Zásady pro vypracování:

Cíl:

Vyhodnocení odolnosti proti opotřebení po různých režimech tepelného zpracování rychlořezné P/M oceli Vanadis 30.

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:

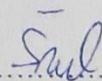
- [1] JURČI, Peter. *Nástrojové oceli ledeburitického typu*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 221 s. ISBN 978-80-01-04439-1.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4
- [3] KRAUS, Václav.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

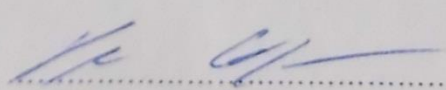
Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou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

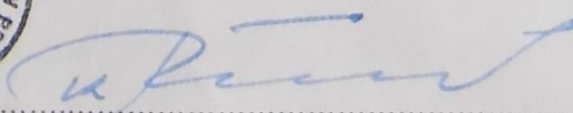
*Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 30.4.2015

  
.....  
student



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

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

### **Poděkování**

Mnohokrát děkuji Ing Janě Sobotové Ph.D za cenné rady, podněty a pomoc při vypracování této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá hodnocením odolnosti proti opotřebení rychlořezné oceli Vanadis 30 vyrobené práškovou metalurgií po různých režimech tepelného zpracování. V experimentální části je sledován vliv doby austenitizace, zmrazování a vícenásobného popouštění na odolnost proti opotřebení. K vyhodnocení bylo využito měření tvrdosti a odolnosti proti opotřebení metodou Pin on disc.

Klíčová slova: rychlořezná ocel, prášková metalurgie, tepelné zpracování, zmrazování, tvrdost, odolnost proti opotřebení

## **Abstract**

This thesis deals with the assessment of the wear resistance of high speed steel Vanadis 30 produced by powder metallurgy after different heat treatment regimes. In the experimental part is observed influence of austenitizing time, freezing and multiple tempering on wear resistance. For assessment was used hardness test and wear resistance by pin on disc method.

Keywords: high speed steel, powder metallurgy, heat treatment, freezing, hardness, wear resistance

## **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

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	6
1 ÚVOD .....	8
1.1 Rychlořezné oceli .....	8
1.2 Výroba rychlořezných ocelí .....	9
1.2.1. Klasická metalurgie .....	9
1.2.2 Prášková metalurgie .....	11
1.3 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí .....	12
1.3.1 Martenzitická přeměna .....	14
1.3.2 Zmrazování .....	16
1.4 Opotřebení materiálů .....	17
2 Experimentální část .....	20
2.1 Vanadis 30 .....	20
2.1.1 Tepelné zpracování .....	22
2.2 Mechanické zkoušky .....	23
2.2.1 Měření tvrdosti dle Rockwella .....	24
2.2.2 Měření opotřebení Pin on disc .....	25
3 Výsledky .....	28
3.1 Vliv doby austenitizace na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 .....	29
3.2 Vliv zmrazování na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 .....	33
3.3 Vliv počtu popouštění na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 .....	37
4 Závěry .....	41
Seznam použité literatury .....	42

## Seznam použitých symbolů

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Veličina</b>
RO	-	rychlořezná ocel
HRC	-	tvrdost dle Rockwella
C	-	uhlík
Cr	-	chrom
W	-	wolfram
V	-	vanad
Co	-	kobalt
Mo	-	molybden
TZ	-	tepelné zpracování
PM	-	prášková metalurgie
M	-	martenzit
M <sub>s</sub>	[°C]	teplota začátku martenzické přeměny
M <sub>f</sub>	[°C]	teplota konce martenzické přeměny
P	-	perlit
P <sub>s</sub>	[°C]	teplota začátku perlitické přeměny
P <sub>f</sub>	[°C]	teplota konce perlitické přeměny
B	-	Bainit
B <sub>s</sub>	[°C]	teplota začátku bainitické přeměny

$B_f$	$[\text{°C}]$	teplota konce bainitické přeměny
A	-	Austenit
$A_z$	-	zbytkový austenit
$v_k$ ochlazení	$[\text{°C/s}]$	kritická rychlost
$A_1$	$[\text{°C}]$	eutektoidní teplota
$\emptyset$	-	průměr



# 1 Úvod

Rychlořezné oceli patří mezi nástrojové oceli, u kterých jsou obecně kladeny vysoké požadavky na užité vlastnosti, kromě jiného na tvrdost a odolnost proti opotřebení. Je známo, že oceli své vlastnosti získávají především chemickým složením a vhodným tepelným zpracováním. Rychlořezné oceli jsou vysoce legované materiály. Základními parametry tepelného zpracování jsou podmínky austenitizace, použité kalicí prostředí a podmínky popouštění, které se liší pro různé materiály a závisí na požadavcích na výsledné vlastnosti [1].

Je známo, po kalení vždy zůstává v oceli určitý podíl zbytkového austenitu. U vysoce legovaných ocelí navíc klesá teplota martenzitické přeměny pod bod mrazu, a proto se v současné době do cyklu tepelného zpracování těchto materiálů zařazuje i zmrazování [2].

Rychlořezné oceli se v současné době vyrábí jak klasickým způsobem, tak práškovou metalurgií, která zaručuje jemnější a homogennější strukturu a s tím související lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s konvenčně vyrobenými rychlořeznými oceli. [3].

Cílem této práce je zhodnocení vlivu tepelného zpracování na odolnost proti opotřebení rychlořezné oceli Vanadis 30 vyrobené práškovou metalurgií po různých režimech tepelného zpracování.

## 1.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli (RO) jsou vysoce legované nástrojové oceli. Udrží si vysokou tvrdost ( 60 HRC ) a řezné vlastnosti až do teplot asi 650 °C [1]. Jsou především používány na řezné nástroje, při jejichž dochází ke generaci značného množství tepla.

Rychlořezné oceli obsahují 0,7 až 1,3 % uhlíku a jsou legovány wolframem, chromem, vanadem a kobaltem. Typická rychlořezná ocel má složení 0,75 % C, 4,0 % Cr, 18,0 % W a 1 % V [4]. Pro případnou úsporu se snižuje obsah W na 10 % a zvyšuje obsah V na 2 až 4 %. Pro nejvyšší výkony jsou RO legovány do 12 % Co [4]. Pomocí tepelného zpracování ( TZ ) lze u těchto materiálů získat charakteristické vlastnosti, jako jsou velká odolnost proti popouštění, vysoká tvrdost i za zvýšených teplot, velká odolnost proti opotřebení a houževnatost.

Tyto vysoce legované oceli mají obsah legujících prvků v součtu nad 20 % a každý prvek má specifické vlastnosti, které ovlivňují charakteristiky materiálu, tak i průběh a způsob tepelného zpracování. Uhlík jako základní prvek ocelí, zvyšuje tvrdost a pevnost, snižuje plastické vlastnosti a houževnatost, zvyšuje odolnost proti otěru i řezivost a ze všech prvků nejvíce snižuje teplotu začátku martenzitické přeměny. Na odolnosti proti popuštění se podílejí prvky, kterými jsou tyto oceli legovány, jako je chrom, kobalt, molybden, vanad a wolfram. Tyto prvky, až na kobalt, zvyšují prokalitelnost. Chrom zde účinně působí proti korozi. Vanad příznivě působí na řezivost nástrojů, ale při větším objemu, stejně jako wolfram, snižuje jejich houževnatost [5].

## **1.2 Výroba rychlořezných ocelí**

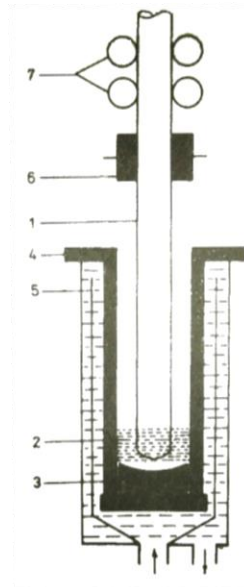
Rychlořezné oceli se v současné době vyrábějí dvěma odlišnými způsoby. Způsob výroby pak má vliv na obsah významných legujících prvků, strukturu, užité vlastnosti a cenu materiálu.

### **1.2.1 Klasická metalurgie**

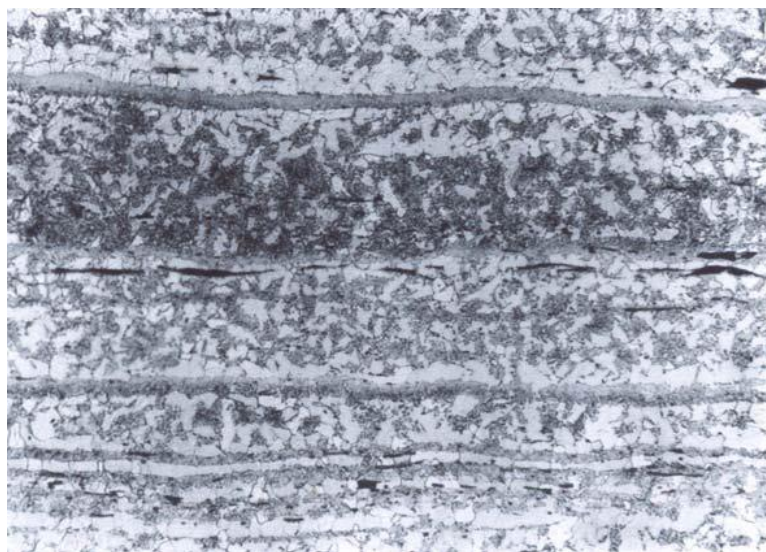
Konvenční výroba rychlořezných ocelí spočívá v těchto postupech: příprava taveniny, její odlití do stabilní formy, ztuhnutí ingotu, tváření za tepla a TZ ocelových polotovarů. V dnešních postupech se vsázka připravuje z velké části z tříděného kovového odpadu.

Tato vsázka je následně roztavena v elektrických obloukových pecích a je rafinována pro odstranění přebytečných plynů, které obsahuje tavenina. Vysokolegované oceli jsou následně elektrostruskově přetavovány (obr. 1), čímž se sníží obsah nežádoucích příměsí jako je fosfor a síra na hodnoty nižší než 0,001 %. Tato hodnota dnes představuje standart pro renomované výrobce. Podstata elektrostruskového přetavování je tavení elektrody ponořené do struskové lázně. Průchodem elektrického proudu elektrodou, struskou i tvořícím se ingotem se struska a elektroda zahřívají a dochází k odkapávání kovu z čela elektrody. Při prokapávání kovu struskou se kapky rafinují a dochází k odsíření, dezoxidaci a snížení množství nekovových vměstků. Při tomto zpracování

tuhnou malé objemy taveniny a díky tomu mají ingoty stejnoměrnou strukturu bez pórovitosti a vycezenin. Uvedený postup je používán pro eliminaci řádkovitosti (obr. 2), která u měkkých ocelí nebývá považována za vadu u tvrdých ocelí naopak ano. V tomto případě bývá karbidická řádkovitost iniciačním místem lomu. Po přetavení následuje tváření za tepla a poté žíhání na měkko pro snadnější obrábění [6,7].



**Obr. 1** Schéma elektrostruskové pece. 1- odtavná elektroda, 2- strusková lázeň, 3- ingot, 4- měděný krystalizátor, 5- vodní chlazení, 6- elektrický kluzný kontakt, 7- podávací ústrojí [7]

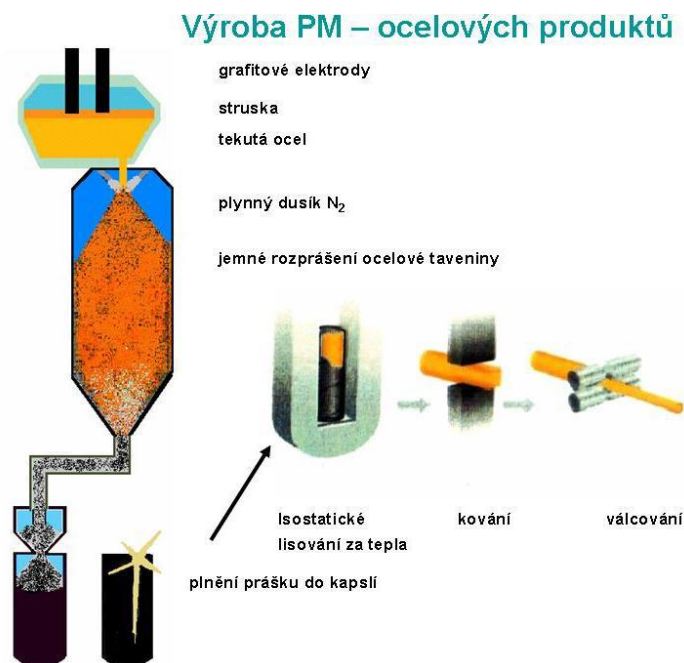


**Obr. 2** Řádkovitá feriticko-perlitická struktura v břitu dláta, Nital, zvětšeno 100 x [8]

## 1.2.2 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie ( PM ) je moderní způsob výroby materiálů. Výhodou oproti klasické metalurgii je jemnozrnnost, homogenita a možnost vyrábět materiály, které nejsou možné vyrobit konvenční metodou. Tato metoda výroby je oproti klasické dražší, ale díky dosahovaným vlastnostem materiálů může vést k nezanedbatelným úsporám [3].

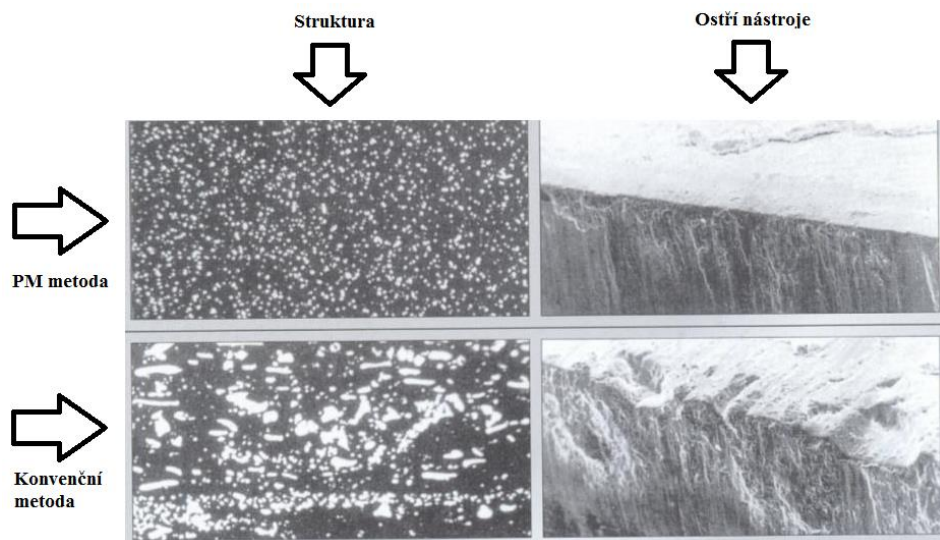
Výroba je prováděna rozprašováním vysoce čisté tekuté oceli, která je rozprašována dusíkem na drobné částičky. Díky vysoké rychlosti ochlazování prášku nedochází k velkému růstu karbidů i jejich velikosti. Tento prášek je prosíván a vakuově plněn do kapslí. Poté následuje izostatické lisování za tepla ( HIP – Hot Isostatic Pressing ) při tlaku kolem 100 MPa a teplotě 1200 °C [3]. V místech dotyku prášku za těchto podmínek vznikají nová spojení a produkt s homogenní strukturou a isotropními vlastnostmi. Po následujícím tváření jsou takto vyrobené materiály bez pórů s jemnou karbidickou strukturou. Schéma výroby ocelí PM metodou uvádí obr. 3 [3].



**Obr. 3** Postup výroby práškovou metalurgií [3]

Homogenní struktura PM ocelí, zaručuje oproti konvenčně vyráběným ocelím optimální vlastnosti při obrábění s vysokým úběrem materiálu. Další výhodou je i vyšší jakost povrchu po elektroerozivním obrábění nebo mechanickém leštění [3].

Na obr. 4 je patrná jemnozrná struktura karbidů při výrobě PM metodou, oproti tomu při výrobě klasickou metalurgií je patrná hrubší struktura, kde karbidy mohou být až 10x větší a tvořit řádkovitou strukturu. Na povrchu s jemnozrnnou strukturou (PM metoda) je viditelná větší odolnost a rovnoměrné opotřebení ostří nástroje. U klasické oceli je patrné mikroskopické vydrolení v místech shluků karbidů [3].

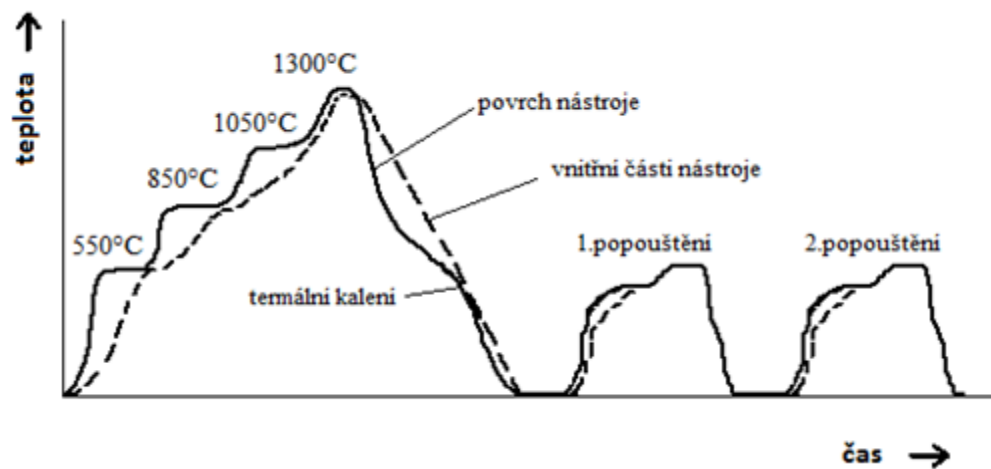


**Obr. 4** Porovnání struktury a povrchu po opotřebení při výrobě konvenční metodou a PM metodou. Zvětšeno 500x [3]

### 1.3 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

Kalící teploty RO jsou velmi vysoké 1200 °C až 1280 °C [4], volba teploty vždy záleží na požadované pevnosti a struktuře materiálu. Podmínky austenitizace vychází z velké stability karbidů obsažených ve zpracovávaném materiálu. Vzhledem k vysokým kalicím teplotám je třeba minimalizovat nežádoucí růst austenitického zrna, proto je výdrž na těchto teplotách velmi krátká, kolem 100 s [9].

Ohřev na kalící teplotu je převážně stupňovitý, pomalý v elektrické peci (do 550 °C). Následuje ohřev v izotermických solných lázních s odstupňovanou teplotou až do vyrovnání teplot v celém průřezu materiálu (obr. 4), kvůli špatné tepelné vodivosti, která je způsobena obsahem uhlíku a legujících prvků. V dnešní době nabývá na významu vakuové kalení díky svým kvalitám ve formě rychlejších procesů, jakosti povrchů zpracovaných materiálů a ekologičnosti. Tenké nástroje se kalí proudem vzduchu, větší nástroje se převážně kalí do teplého oleje nebo termálně. Po kalení se opakovaně (2-4x) popouští při teplotě okolo 560 °C na sekundární tvrdost. Struktura RO po zakalení je tvořena martenzitem, zbytkovým austenitem a nerozpuštěnými karbidy. Vysoký podíl zbytkového austenitu je dán chemickým složením těchto materiálů. Zbytkový austenit je velice stálý, a proto se používá vícenásobné popouštění. Pro jeho další snižování se při teplem zpracování používá zmrazování [9].

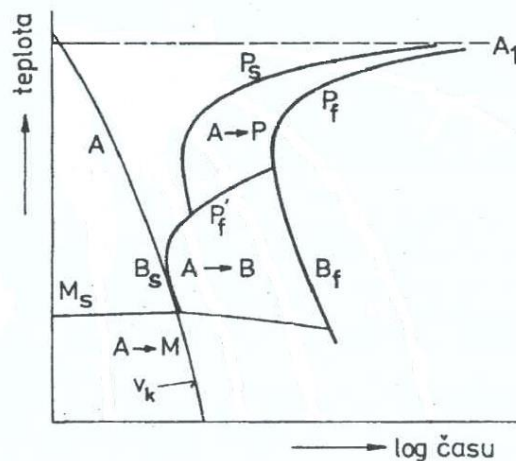


**Obr.5.** – schéma režimu tepelného zpracování rychlořezných ocelí [9]



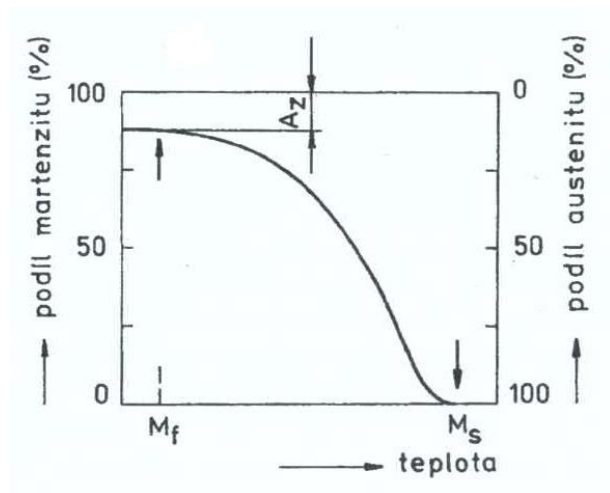
### 1.3.1 Martenzitická přeměna

Pokud je austenit ochlazen do nízkých teplot, kde není možná účinná difúze jak substitučních, tak intersticiálních prvků, mění se bezdifúzně v martenzit, tj. nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Pro vznik této nerovnovážné fáze je třeba ochladit austenitovanou ocel pod teplotu začátku martenzitické oceli ( $M_s$ ) takovou rychlostí, aby byl potlačen vznik perlitu či bainitu. Tato rychlost se nazývá kritická rychlost kalení ( $v_k$ ) (obr. 6), která závisí na složení a struktuře oceli [4].



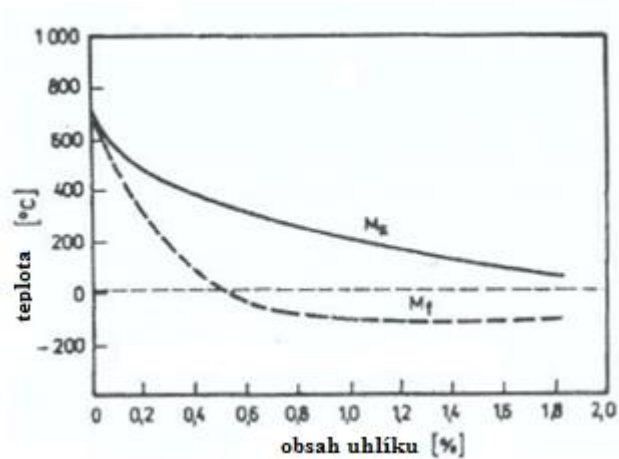
**Obr. 6** – schéma diagramu anizotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [4]

Většina ocelí má atermický (nespotřebovává ani neuvolňuje teplo) průběh martenzitické přeměny. Proto v intervalu začátku a konce martenzitické přeměny při dané teplotě vzniká určitý podíl martenzitu okamžitě. Tato přeměna může dosahovat až rychlosti zvuku v oceli. Další přeměna austenitu může pokračovat snižováním teploty až po teplotu konce martenzitické přeměny ( $M_f$ ), kde je ukončena martenzitická přeměna, avšak v ocelích zůstává zbytkový austenit ( $A_z$ ) (obr. 7) [4].



**Obr.7** – Schéma marteztické přeměny oceli [4]

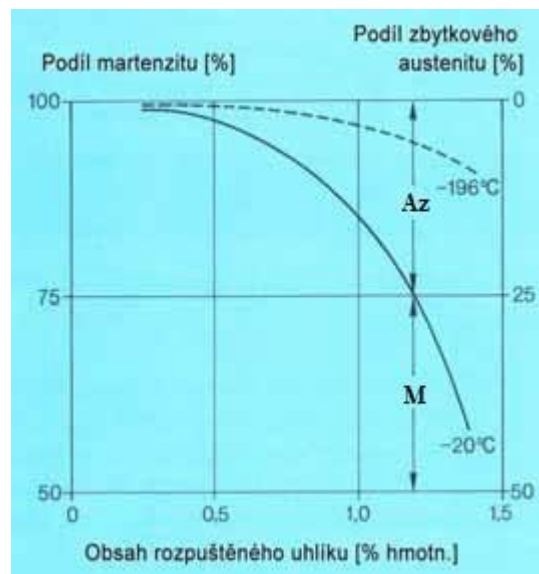
Hodnoty teplot  $M_s$  a  $M_f$  u ocelí jsou závislé na chemickém složení. Uhlík a většina legur snižují tyto teploty, od určité teploty je  $M_f$  pod bodem mrazu (obr.8). Z tohoto důvodu se u ocelí s vyšším obsahem uhlíku a legur používá několikanásobné popouštění a zmrazování, pro zmenšení obsahu  $A_z$  [4].



**Obr. 8** – vliv obsahu uhlíku v austenitu na teploty  $M_s$  a  $M_f$  uhlíkových ocelí [4]

### 1.3.2 Zmrazování

Jak již bylo uvedeno výše, materiály s vyšším obsahem uhlíku a legur mají teplotu  $M_f$  hluboko pod bodem mrazu. Proto se u těchto materiálů po kalení může použít zmrazování jako další způsob pro snížení obsahu  $A_z$  a zlepšení vlastností jako je vyšší tvrdost a větší odolnost proti opotřebení. Zmrazování má též vliv na zkrácení procesu zušlechťování a to o 15 až 20 % [2], díky čemuž se může použít menší počet popouštění. Na Obr. 9 je viditelný rozdíl v obsahu  $A_z$  mezi ochlazováním oceli na teplotu prostředí a na teplotu zkapalněného dusíku [2].



**Obr. 9** – Podíl martenzitu a zbytkového austenitu dle obsahu uhlíku v oceli [2]

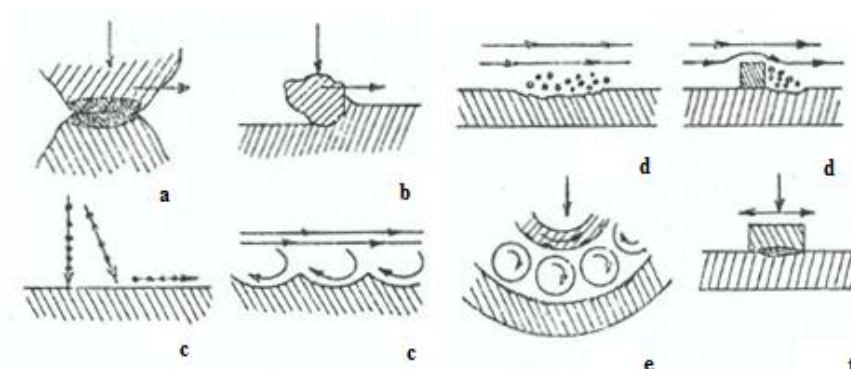
Mezi základní způsoby zmrazování ocelí patří zmrazování ponorem, zmrazování pomocí sekundární organické látky (metylcyklohexan nebo trichloretylen) a v současnosti nejpoužívanější zmrazování nástřikem kapalného dusíku do prostoru chladicího boxu. Zmrazování ponorem má v dnešní době více využití v dílenské sféře, kde se eliminuje vliv ohřevu, při kterém mohly vznikat mikrotrhliny, při lisování hřídelů do nábojů, kdy se zchladí hřídel kapalným dusíkem a náboj se ponechá při pokojové teplotě. Při zmrazování v mrazících boxech je vstřikován kapalný dusík do prostoru boxu a rozháněn ventilátory. Tyto boxy mají v současnosti dvě konstrukční řešení. První z nich je bez ohřevu pomocí topných těles. Zde je pouze regulována teplota zmrazení a následná výdrž. Ohřev na okolí

prostředí se provádí otevřením dvěří, přičemž tento způsob může zapříčinit „ojínění“ povrchu, který je následně náchylnější ke korozi nebo se ponechá materiál v boxu, dokud se nevyrovnají teploty, což může trvat až několik dní. V boxu s ohřevem je možné regulovat jak teplotou zmrazení tak i teplotu ohřevu v uzavřeném boxu a nedochází tak k nežádoucímu „ojínění“ povrchu [2].

Literatura [2] uvádí příklad zpracování RO. Kde RO o složení 0,85 % C, 6 % W, 5 % Mo, 4 % Cr, 1 % V byla kalena do oleje, 2 x popuštěna na 560 °C / 2h a 1 x popuštěna na 590 °C / 2h a bylo dosaženo konečné tvrdosti 62 HRC. Úprava zmrazováním byla provedena tak, že se materiál kalil stejným způsobem, pak okamžitě proběhlo zmrazení na teplotu -100 °C a následně proběhlo pouze jedno popouštění na 600 °C / 2 h, čímž vznikla konečná tvrdost 64 HRC. Tímto zpracováním se snížila doba cyklu a dosáhlo se lepších mechanických vlastností.

## 1.4 Opotřebení materiálů

Opotřebení materiálu je nežádoucí změna povrchu materiálu, které jsou způsobeny mechanickými účinky a mohou být doprovázeny fyzikálními, chemickými nebo elektrickými účinky. U nástrojů to může být vyštipování na funkčních hranách a částech. Literatura [4] uvádí, že 50 až 80 % všech poruch strojů a zařízení je právě způsobeno opotřebením. Podle způsobu navzájem působících médií rozdělujeme opotřebení na tyto typy (obr. 10): adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační [4].



**Obr. 10** – schéma základních mechanismů opotřebení [4]  
(a – adhezivní, b – abrazivní, c – erozivní, d –kavitační, e – únavové, f – vibrační)

- **Adhezivní opotřebení**

Vzniká při pohybu dvou těles (např. kluzné ložisko-čep ), kde příčina je nerovnost funkčních povrchů. Při jejich vzájemném pohybu dochází ke styku pouze lokálně na proměnlivém počtu míst dotyku nikoliv na celé ploše. Mezi těmito dotykovými místy působí adhezivní síly (adheze-přilnavost) [4].

- **Abrazivní opotřebení**

Je způsobeno navzájem působících povrchů nebo povrchu a abrazivního média, které se na povrchu projevují rýhováním a odřezáváním částic exponovaného tělesa. Typické případy tohoto opotřebení nalezneme u zubů lopat rypadel a mlecí části mlýnů tvrdých surovin. (kamení , uhlí). Tvrdé částice narušují funkční plochy mikrořezáním a rýhováním. Procesu mikrořezání se zúčastňuje asi jen 10 % zrn abraziva [4].

- **Erozivní opotřebení**

Je způsobeno vzájemným působením funkčního povrchu a media. Při tomto opotřebení se oddělují částičky materiálu působením částic nesených proudem kapaliny nebo vzduchu. Vyskytuje se u strojů, které pracují s médii jako je voda, vzduch nebo pára (např. hydraulické stroje, pneumatická zařízení, parní turbíny) [4].

- **Kavitační opotřebení**

Převážně se objevuje na povrchu oběžných kol čerpadel, vodních turbín, kluzných ložiscích apod. Při tomto opotřebení se oddělují částice povrchu jako následek vzniku a zanikání bublin v kapalině, při poklesu tlaku pod tlak nasycených par v místech, kde vznikají náhlé změny v rychlostech kapaliny. Kavitační bubliny se vznikají v místech zúžení profilu a naopak zanikají v místech , kde se profil rozšíří [4].

- **Únavové opotřebení**

Vzniká na bocích zubů ozubených kol, na valivých drahách a valivých elementech ložisek, kolejnicích atd. Vzniká v místech styku při valivém pohybu jiné součásti. V důsledku vyčerpání plasticity materiálu vznikají povrchové důlky (pitting), kde se šíří trhliny a vytrhávají či vydrolují se kousky součásti [4].

- **Vibrační opotřebení**

Při tomto opotřebení součásti vzájemně vykonávají tangenciální kmitavý pohyb při působení normálových zatížení, kde minimální amplituda kmitavého pohybu je 1 až 10 mm [4]. Opotřebení nalezneme u částí s hybným uložením, tak i u nehybných jako jsou nýtované nebo šroubové spoje. Vzniká při překročení meze pružnosti jednoho materiálu a pokud dojde k vzájemným posuvům povrchů. Povrchové vady způsobené tímto opotřebením mohou být koncentrátoři napětí a způsobují snížení meze únavy o 30 až 50 % [4].



## 2 Experimentální část

Předložená práce navazuje na práci [11], kde byl hodnocen vliv tepelného zpracování na strukturu a mechanické vlastnosti P/M rychlořezné oceli Vanadis 30, na hodnocení odolnosti proti opotřebení jsou dále použity vzorky z uvedené práce. Bylo provedeno měření tvrdosti a odolnosti proti opotřebení metodou Pin on disc

### 2.1 Vanadis 30

Vanadis 30 je W-Mo-V-Co legovaná rychlořezná ocel vyráběna PM metodou, která má charakteristické tyto vlastnosti [10]:

- Vysoká odolnost proti opotřebení
- Velmi vysoká pevnost v tlaku při vysoké pracovní tvrdosti
- Vysoká kalitelnost
- Dobrá houževnatost
- Dobrá rozměrová stabilita při tepelném zpracování
- Velmi vysoká odolnost proti popouštění

Vanadis 30 své vlastnosti získává :

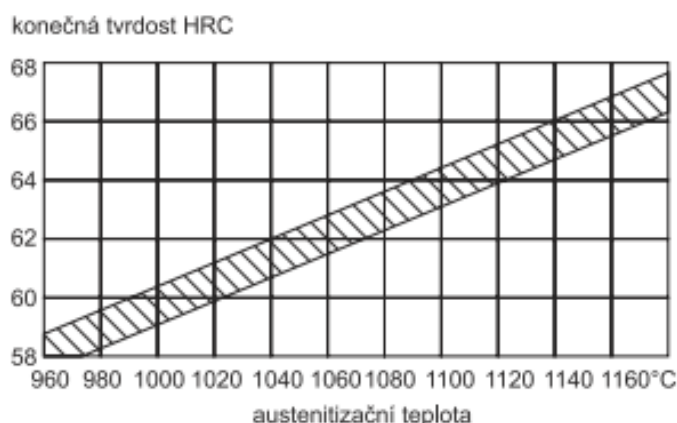
- a) výrobou práškovou metalurgií
- b) obsahem legujících prvků
- c) tepelným zpracováním

Směrné chemické složení rychlořezné oceli Vanadis 30 udává tabulka 1.

**Tab. 1** - Chemické složení rychlořezné oceli Vanadis 30 [10]

Chemické složení	C	Cr	Mo	W	V	Co
	1,28	4,2	5,0	6,4	3,1	8,5

Výrobce [10] pro kalení doporučuje předehřev na teploty v rozmezí 450 - 500 °C, austenitizační teploty 1050 - 1180 °C. Výše austenitizační teploty se volí dle požadované konečné tvrdosti viz. obr. 11 . Z obrázku je patrný očekávaný nárůst tvrdosti s rostoucí teplotou austenitizace [10].



**Obr. 11** - vliv austenitizační teploty na konečnou tvrdost materiálu Vanadis 30 [10]

Jako ochlazovací prostředí se volí solná lázeň (540 °C) nebo vakuová pec s přetlakem plynu. Pro dosažení vysoké houževnatosti je potřeba ochlazovat oblast jádra rychlostí minimálně 10 °C / s [10]. Tato rychlost platí pro ochlazování z austenitizační teploty na teplotu cca 540 °C. Po vyrovnání teplot lze ochlazovat pomaleji cca 5 °C / s. Jakmile materiál po zakalení dosáhne teploty 50 - 70 °C zahájí se popouštění [10].

Ocel Vanadis 30 se obvykle popouští 3x při teplotě 560 °C / 1h s mezi ochlazením na teplotu okolí. Po tomto zpracování nepřesáhne podíl zbytkového austenitu (dále  $A_z$ ) 1 %. Lze použít i povrchovou úpravu pro získání větší odolnosti proti opotřebení a snížení tření. Nejčastěji se používá nitridování a povlakování [10].

- **Vzorky**

Chemické složení tavby, ze které byly vyrobeny zkušební vzorky, je uvedeno v tabulce tab.2.

**Tab. 2** Chemické složení zkoumané oceli Vanadis 30 [11] a ve srovnání s katalogovým listem [10]

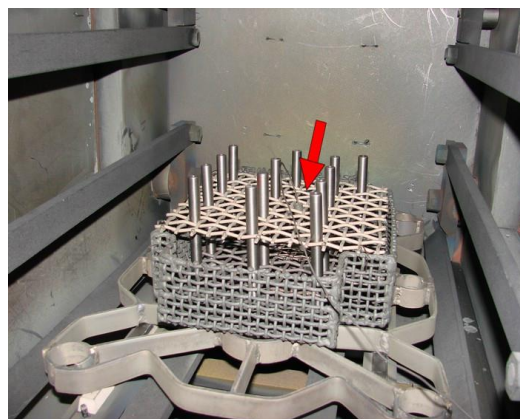
Složení [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	Co	V	Cu
tavba	1,30	0,65	0,26	0,018	0,015	3,89	4,87	6,09	8,10	3,01	0,11
dle výrobce	1,28	-	-	-	-	4,20	5,00	6,40	8,50	3,10	-

## 2.1.1 Tepelné zpracování vzorků

Tepelné zpracování bylo provedeno firmou Prikner - tepelné zpracování kovů s.r.o. vakuovou pecí s horizontálním zavážením a nuceným konvekčním ohřevem a kalením plynem s vícesměrovým prouděním od firmy TAV, model FastJet TPF- 30/30/45 (vakuová pec - obr. 12) [11].

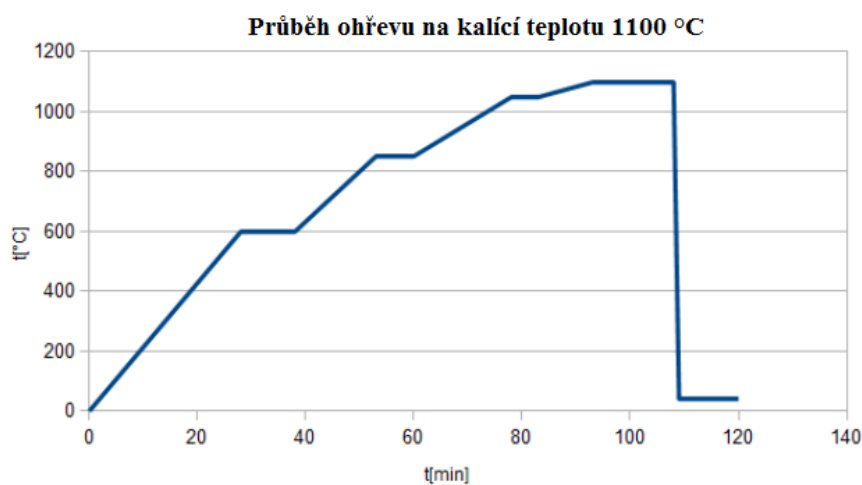


Obr. 12 - vakuová pec pro zpracování vzorků [11]



Obr. 13 - uložení vsázky v peci [11]

S ohledem na chemické složení materiálu byl zvolen čtyřstupňový ohřev na austenitizační teplotu v těchto krocích - 600, 850, 1050 °C s postupnou výdrží 10, 7 a 5 minut ( obr. 14 ). Po dosažení teploty austenitizační teploty 1100 °C byly doby výdrže jednotlivých vzorků na této teplotě 5, 15 a 30 minut. Do teploty 600 °C byl ohřev prováděn za normálního tlaku, nad touto teplotou byl tlak snížen na 50 Pa [11].



Obr. 14 - znázornění stupňovitého ohřevu na kalící teplotu 1100 °C oceli Vanadis 30 [11]

Ochlazení vsázky (kalení) bylo uskutečněno tlakováním komory na 5 barů dusíkem s jeho cirkulací pomocí ventilátorů. Vzorky byly ochlazeny na 40 °C za 13 minut, kde ochlazení na 600 °C bylo provedeno za 2 minuty. Režimy tepelného zpracování jednotlivých vzorků a jejich značení uvádí tab. 3.

**Tab. 3** - Tepelné zpracování vzorků vybraných pro austenitizační teplotu ve všech případech 1100 °C [11]

Vzorek	5K	15K	30K	5Z	5V
<b>Zpracování</b>					
<b>Výdrž na austenitizační teplotě</b>	5 min	15 min	30 min	5 min	5 min
<b>Po kalení zmrazeno</b>	-	-	-	-196°C/4h	-
<b>Popouštění</b>	3x 560°C/1h	3x 560°C/1h	3x 560°C/1h	3x 560°C/1h	4x 560°C/1h

Vzorky byly v peci uspořádány tak, aby mohly být následně 3x popuštěny společně v rámci jedné vsázky včetně vzorku 5V, který byl celkově 4x popuštěn.

Vzorek 5Z se zmrazoval v mrazicím boxu (obr. 15) pomocí tekutého dusíku. Postupné vychlazení vzorku a zmrazení bylo zabezpečeno tím, že vzorek byl po dobu 4 hodin mrazen při teplotě -196 °C ponořením v tekuté fázi dusíku.



**Obr. 15** - Box pro zmrazování vzorku [11]

## 2.2 Mechanické zkoušky

Předkládaná práce pro experiment využívá vybrané přelomené vzorky po zkoušce tříbodovým ohybem z práce [11]. Původní velikost vzorků byla  $\varnothing 10 \times 100$  mm, pro měření byla použita vždy jedna polovina takového vzorku, která byla upravena broušením protilehlých stran. Takto upravený tvar původně kruhových vzorků umožnil na jedné straně měření tvrdosti dle Rockwella a na protilehlé straně provedení zkoušky odolnosti proti opotřebení. Na obr. 16 jsou vzorky po zkoušce Pin on disc, pro kterou byly vzorky na zkoušené straně ještě leštěny.



**Obr. 16** - Vzorky z materiálu Vanadis 30 po zkoušce tříbodovým ohybem a měření odolnosti proti opotřebení. Řazeno z leva: 5K, 15K, 30K, 5Z, 5V

### 2.2.1 Měření tvrdosti dle Rockwella

Měření tvrdosti dle Rockwella je vnikací zkouška, kde indentorem je diamantový kužel vrcholovým s úhlem  $120^\circ$  a poloměrem špičky 0,2 mm. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 6508-1 [12].

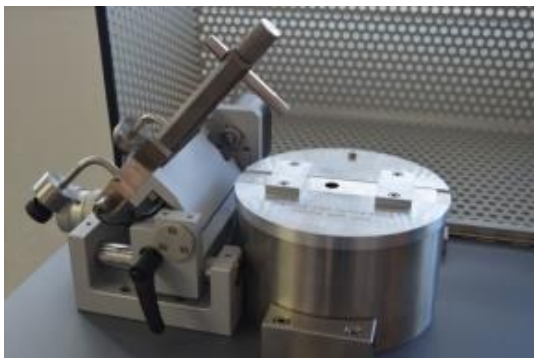
Měření bylo provedeno na stroji EMCOTEST M4C G3 (obr. 17). Na všech vzorcích bylo provedeno vždy 5 měření. Před každou sérií měření byla provedena kontrola hodnoty tvrdosti pomocí etalonu. Podmínky měření byly následující. Předzatížení 98,10 N po dobu 1 s a hlavní zatížení 1471,50 N po dobu 4 s. Z naměřených dat byla spočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka tvrdosti dle [12].



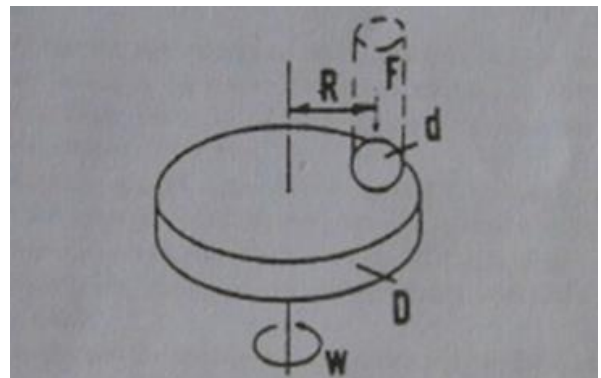
**Obr. 17** - Tvrdoměr EMCOTEST M4C G3

### 2.2.2 Měření opotřebení metodou Pin on disc

Měření metodou Pin on disc spočívá ve vykružování drážky kuličkovým tělískem „PIN“ ze zvoleného materiálu předem nastavenou silou do zkušební vzorku „Disc“ na tribometru (obr. 18). Na rameni je uchycen přípravek pro vkládání „PIN“ tělíska. Na tomto rameni je možné nastavit poloměr vykružování a definovanou zátěž, která bude působit během testu přes tělísko na zkušební vzorek. Výsledky měření jsou závislé na zkoušeném vzorku (povrchové drsnosti, tepelném zpracování, na jeho mikrostruktuře a jeho chemickém složení). Výsledky jsou též závislé na zkušebních podmínkách a těmi jsou zatížení, rychlost vykružování, celková vykroužená vzdálenost, použité tělísko „PIN“, teplota. Schéma měření je zobrazeno na obr.19 [12,13].



**Obr. 18** - Tribometr TRB-S-CE-0000



**Obr. 19** - Schéma měření - F - zátěžná síla, R - poloměr drážky, d - poloměr kuličky, D - měřený vzorek, W- rychlost vykružování [12]



Měření opotřebenění oceli Vanadis 30 probíhalo v těchto krocích:

- 1) vykružování drážky
- 2) vyhodnocování šířky drážky
- 3) výpočet opotřebenění

Výstupem tohoto měření jsou hodnoty koeficientu tření získané pomocí InstrunX softwaru, které jsou porovnatelné pouze se vzorky, které byly zkoumány při shodných hodnotách nastavení zkoušky. Hodnotky koeficientu tření nelze porovnávat s běžným součinitelem tření. V tabulce 4 jsou uvedeny podmínky zkoušky Pin on disc použité v této práci.

**Tab. 4** - parametry měření na tribometru

parametry měření		
zátěžná síla	F	5 N
délka vykružování	l	100 m
poloměr drážky	R	2 mm
poloměr kuličky - PIN - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	d	6 mm
Rychlost vykružování	W	6,4 cm/s

Na každém vzorku bylo zvoleno 5 míst na vykroužené drážce, která byla dokumentována světelným mikroskopem Neophot 32 při zvětšení 200x. Na každém snímku byla provedena vždy nejméně 3 měření šířky drážky. Šířka vykroužené drážky byla vyhodnocena pomocí softwaru Nis Elements. Z 15-ti měření byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Z naměřených hodnot šířky drážky a známých parametrů měření byla vypočtena velikost opotřebení dle vztahu (1) [12].

$$\text{opotřebení} = \frac{\pi \cdot (\text{poloměr vykružování, [mm]} \cdot (\text{šířka drážky, [mm]})^3}{6 \cdot (\text{poloměr kuličky PIN, [mm]})} [\text{mm}^3] \quad (1)$$

Pro měření opotřebení byly vybrány dvě tělíska PIN z materiálu -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (korund) a 100 Cr6 (ložisková ocel). Tělíska ze 100 Cr6 bylo nevhodné z důvodu velkého opotřebení tělíska a jeho ulpívání na zkoušeném vzorku Vanadis 30, proto byly vyhodnocovány pouze hodnoty z měření při použití tělíska z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### 3 Výsledky a jejich diskuze

Naměřené hodnoty tvrdosti RO Vanadis 30 po různých režimech tepelného zpracování uvádí tabulka 5. Na identických vzorcích byla provedena zkouška odolnosti proti opotřebení metodou Pin on disc. Výsledky měření šířky drážky a vypočtené opotřebení dle vztahu (1) jsou uvedeny v tabulce 6.

**Tab. 5** - Naměřené hodnoty tvrdosti RO Vanadis 30 po různých režimech TZ

Tvrdost dle HRC					
Vzorek	5K	15K	30K	5Z	5V
Č.měření					
1	63,75	63,08	64,13	63,2	64,25
2	63,35	63,23	64,1	62,85	63,98
3	63,6	63,2	64,08	62,9	64,08
4	63,58	63,25	64,13	63,03	63,9
5	63,5	63,3	64,08	63,03	64,08
Průměrná hodnota + směrodatná odchylka	63,56 ± 0,15	63,21 ± 0,08	64,10 ± 0,03	63,00 ± 0,14	64,06 ± 0,13

**Tab. 6** - Naměřené a vypočtené hodnoty ze zkoušky Pin on disc

Šířka drážky [mm]					
měření č.	5K	15K	30K	5Z	5V
1	0,14837	0,16882	0,15065	0,13451	0,14484
2	0,15114	0,16921	0,15161	0,13348	0,14451
3	0,15435	0,16987	0,15112	0,13230	0,14528
4	0,14544	0,15793	0,14975	0,12945	0,14051
5	0,14686	0,15670	0,14910	0,13140	0,14026
6	0,14696	0,15434	0,14932	0,13163	0,14076
7	0,13574	0,13900	0,15310	0,12534	0,12096
8	0,13858	0,13902	0,15238	0,12728	0,12093
9	0,14016	0,13894	0,15038	0,12836	0,12100
10	0,13935	0,13617	0,13008	0,13927	0,13856
11	0,13949	0,13560	0,12957	0,13965	0,13872
12	0,14034	0,13536	0,12929	0,14044	0,13845
13	0,14585	0,13739	0,13663	0,13677	0,13804
14	0,14822	0,13700	0,13691	0,13959	0,13754
15	0,15075	0,13703	0,13720	0,13937	0,13765
<b>Průměr</b>	0,1448	0,1475	0,1438	0,1339	0,1365
<b>odchylka</b>	0,0235	0,0303	0,0247	0,0127	0,0171
<b>Průměr±odchylka</b>	0,1448 ± 0,0235	0,1475 ± 0,0303	0,1438 ± 0,0247	0,1339 ± 0,0127	0,1365 ± 0,0171
<b>Opotřebení [mm<sup>3</sup>]</b>	0,000529	0,000560	0,000519	0,000419	0,000444

### **3.1 Vliv doby austenitizace na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30**

Výsledky hodnocení vlivu doby austenitizace na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 uvádí obr. 20 a 21. Z obrázku 20 je patrné, že při nejdelší sledované době austenitizace došlo k mírnému nárůstu tvrdosti ve srovnání s kratšími sledovanými časy austenitizace. Je však třeba konstatovat, že výrobce [10] dle svého materiálového listu udává tvrdost oceli  $64 \pm 1$  HRC při austenitizaci  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 3 minut a popouštění  $3 \times 560\text{ }^{\circ}\text{C} / 1\text{h}$ . Naměřené tvrdosti se pohybují v rozmezí uváděném výrobcem. Z hodnot tvrdostí není patrný přímý vliv doby austenitizace na konečnou tvrdost.

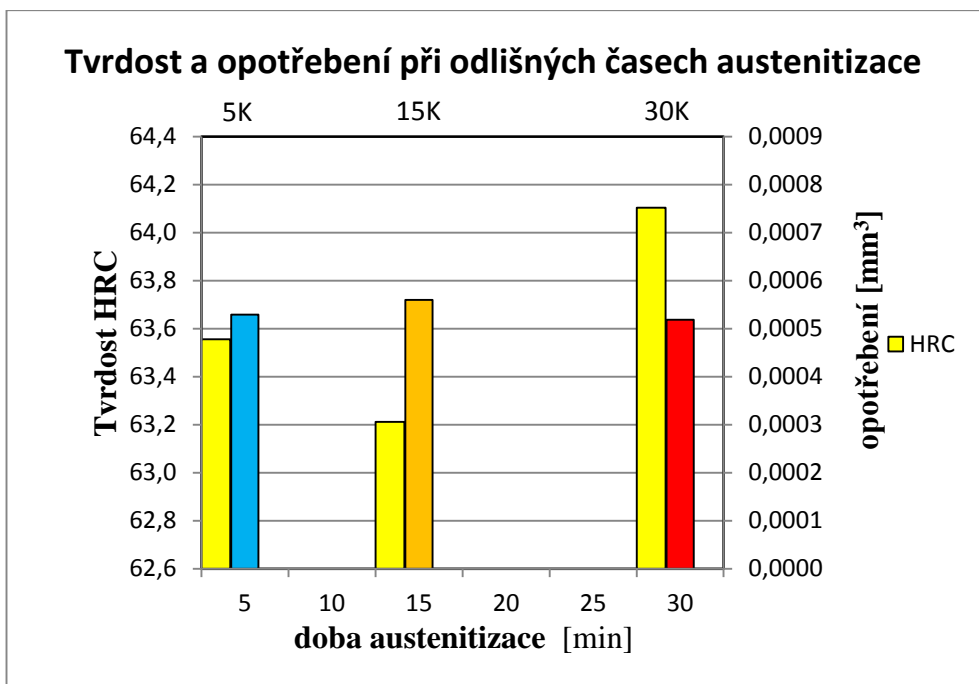
Autor práce [11] měl k dispozici větší množství vzorků a konstatuje že, kompletní tepelné zpracování s rostoucí dobou austenitizace v intervalu 5- 30 minut se neprojeví na hodnotách tvrdosti. Lze tedy konstatovat, že námi naměřené hodnoty jsou shodné.

Dalo by se předpokládat, že pro materiál s vyšší tvrdostí bude naměřeno menší opotřebení. Z obrázku 20 však tato skutečnost není patrná, hodnota opotřebení se liší minimálně. Nebyl prokázán vliv doby austenitizace na odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30.

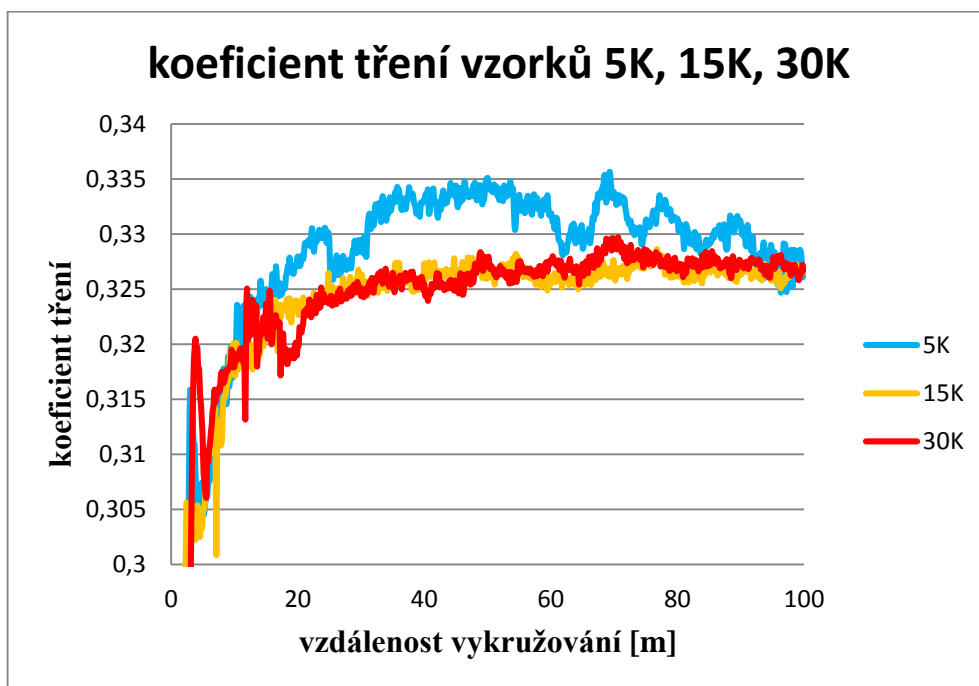
Závislosti koeficientu tření na vykroužené vzdálenosti pro sledované časy austenitizace jsou na obrázku 21. Z obrázku je patrné, že s ohledem na měřítko osy y jsou koeficienty tření v závislosti na době austenitizace pro RO Vanadis 30 srovnatelné.

Obrázek 22 dokumentuje vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc na materiálu Vanadis 30 v závislosti na době austenitizace. V souladu s popisem obrázku 20 jsou naměřené hodnoty šířky drážky s rostoucí dobou austenitizace srovnatelné. Autor předložené práce si je vědom skutečnosti, že vykroužená drážka po zkoušce Pin on disc a koeficient tření mohou být podrobněji analyzovány [13], toto hodnocení je však nad rámec bakalářské práce.

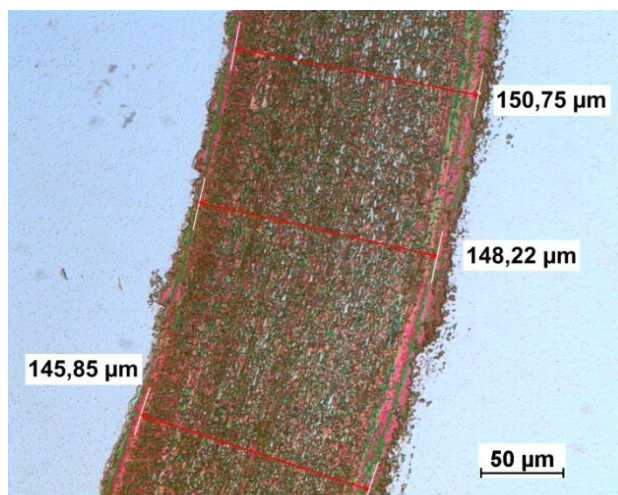
Hodnocení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení RO Vanadis 30 při narůstající době austenitizace je na obrázku 23 doplněno metalografickými snímky z práce [11]. Autor uvedené práce uvádí, že není sledována výrazná změna ve struktuře materiálu Vanadis 30 při rozdílných časech výdrže na austenitizační teplotě.



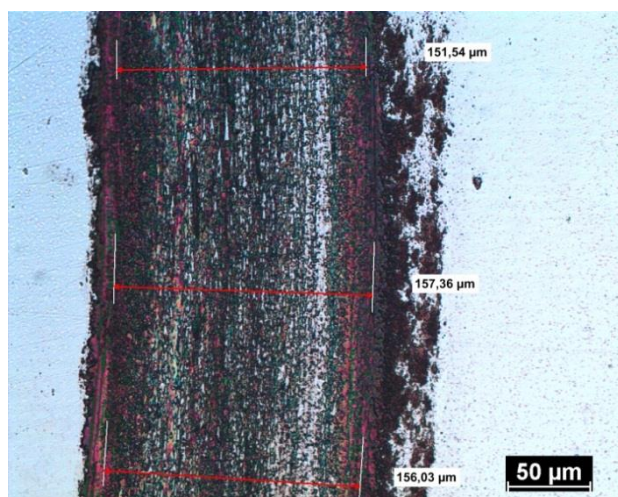
**Obr. 20** - Vliv doby austenitizace na tvrdost a velikost opotřebení RO Vanadis 30



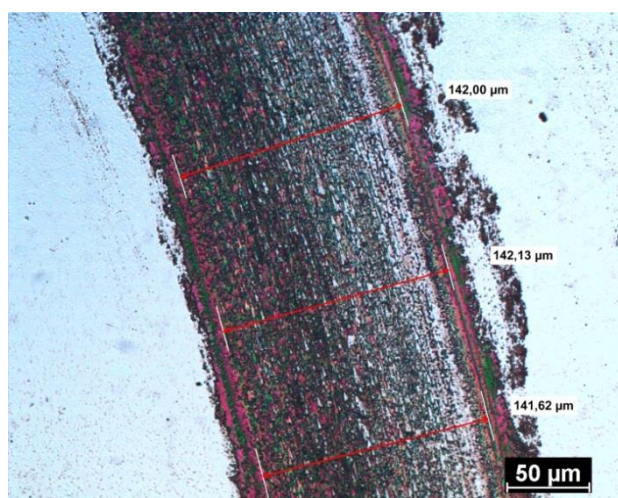
**Obr. 21** - Koeficient tření v závislosti na vykroužené dráze RO Vanadis 30 s rostoucím časem austenitizace



a) 5K - doba austenitizace 5 min



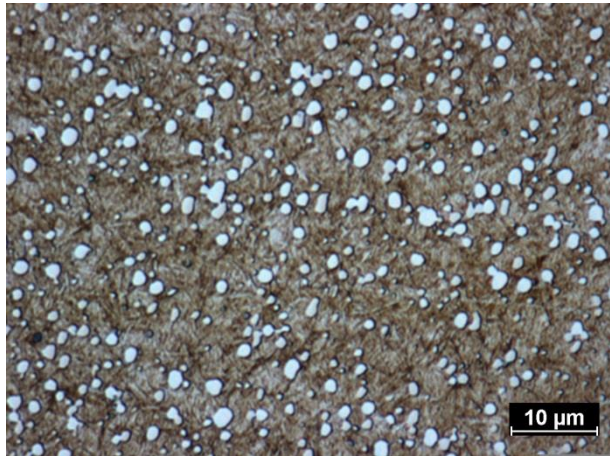
b) 15K - doba austenitizace 15 min



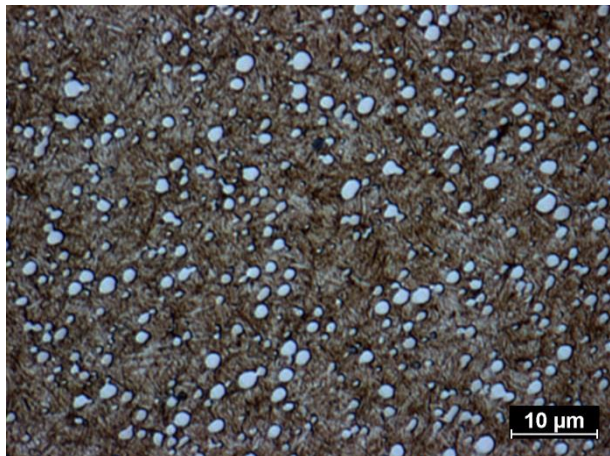
c) 30K - doba austenitizace 30 min

**Obr. 22** - Vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc pomocí NisElements viz výsledky obr. 20 a 21

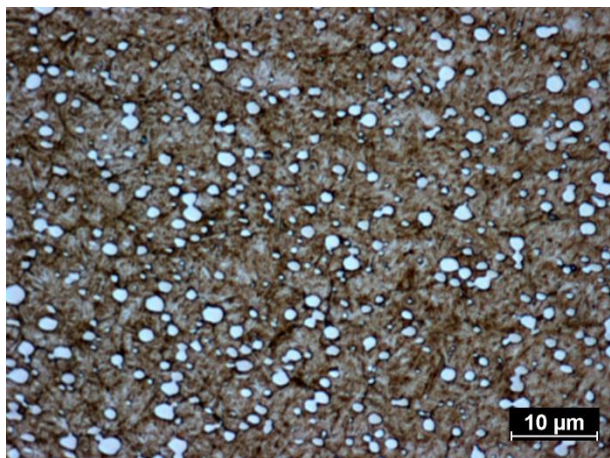




**5K** - doba austenitizace 5 min



**15K** - doba austenitizace 15 min



**30K** - doba austenitizace 30 min

**Obr. 23** - Mikrostruktura oceli Vanadis 30, 1000x zvětšeno leptadlo 2% Nital [11]

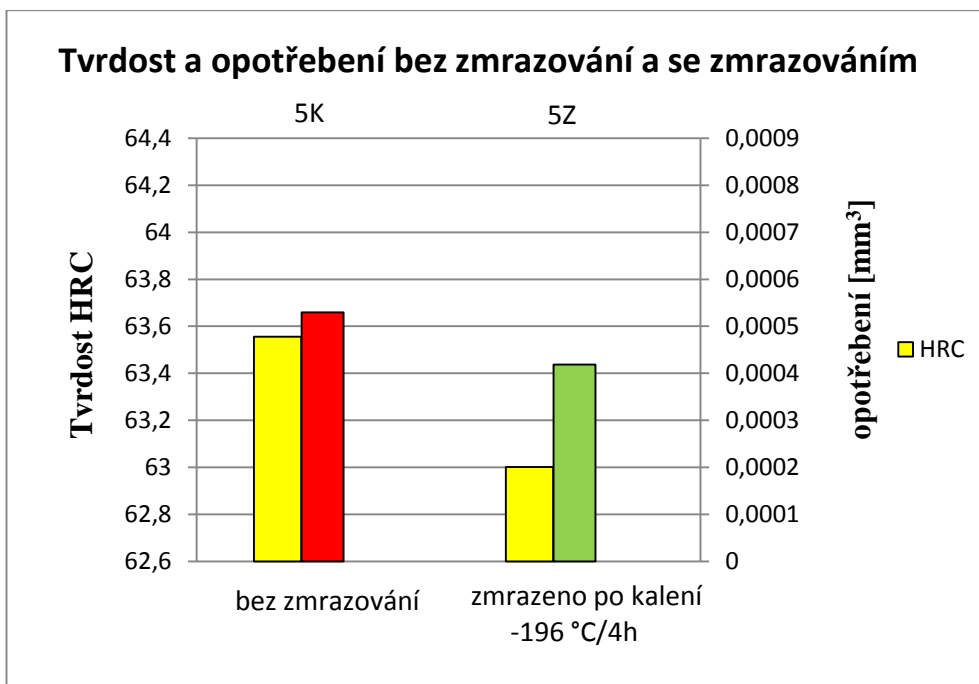
### 3.2 Vliv zmrazování na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30

Výsledky hodnocení vlivu zmrazování zařazeného mezi kalení a popouštění na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 uvádí obr. 24 a 25. Z obrázku 24 je patrný mírný pokles tvrdosti vzorku se zmrazováním oproti vzorku po klasickém TZ. Je však třeba konstatovat, že naměřené hodnoty tvrdosti se pohybují v obou případech v rozmezí  $64 \pm 1$  HRC udávaném výrobcem [10]. Autor práce [11] ve svých měřeních též uvádí mírný pokles tvrdosti materiálu Vanadis 30 po zmrazování, avšak doplňuje, že by bylo vhodné tento pokles tvrdosti dále ověřit na větším počtu vzorků. Literatura [2] totiž uvádí, že zmrazování způsobuje vyšší tvrdost. Výsledky odolnosti proti opotřebení uvedené na obrázku 24 jsou naopak v souladu s teoretickými předpoklady literatury [2], odolnost proti opotřebení oceli Vanadis 30 je v případě použití zmrazování mírně lepší než v případě TZ bez zmrazování.

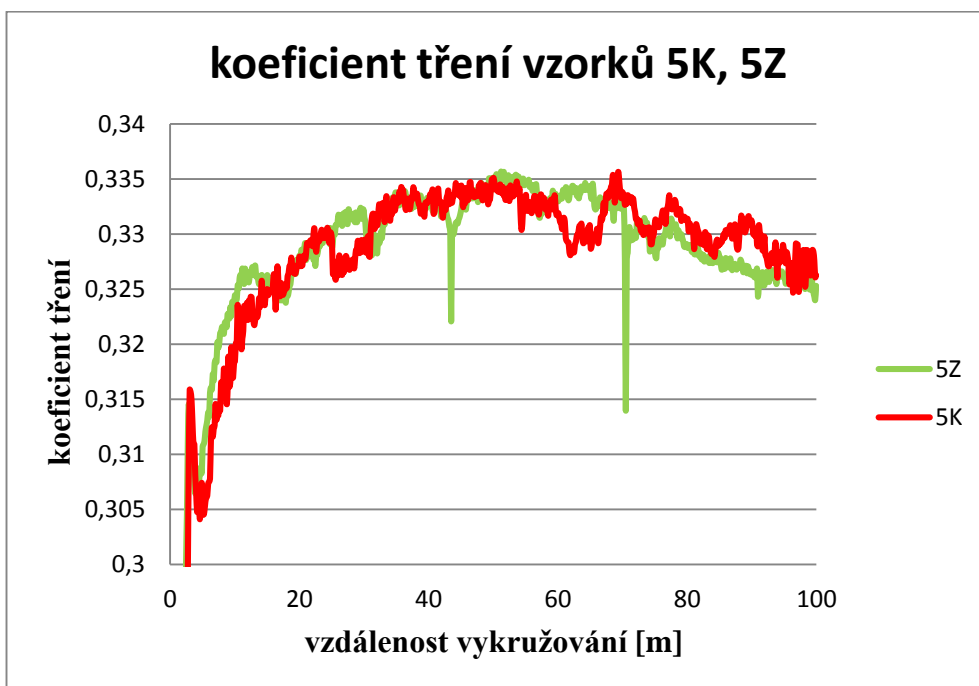
Závislosti koeficientu tření na vykroužené vzdálenosti při použití zmrazování a bez zmrazování jsou na obrázku 25. S ohledem na měřítko osy y jsou koeficienty tření, jako v předchozím případě, v závislosti na použití zmrazování pro RO Vanadis 30 srovnatelné. U vzorku se zmrazováním jsou však patrná dvě místa, kde došlo ke snížení koeficientu tření, což by mohlo být způsobeno odtržením materiálu, který ulpěl na povrchu tělíška PIN. Tato skutečnost však neměla vliv na další průběh koeficientu tření.

Na obrázku 26 je dokumentováno vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc materiálu Vanadis 30 se zmrazováním a bez zmrazování. V souladu s popisem obrázku 24 je šířka drážky v případě materiálu se zmrazováním menší než u materiálu bez zmrazování. Autor předložené práce si je vědom skutečnosti, že vykroužená drážka po zkoušce Pin on disc a koeficient tření mohou být podrobněji analyzovány [13], toto hodnocení je však nad rámec bakalářské práce.

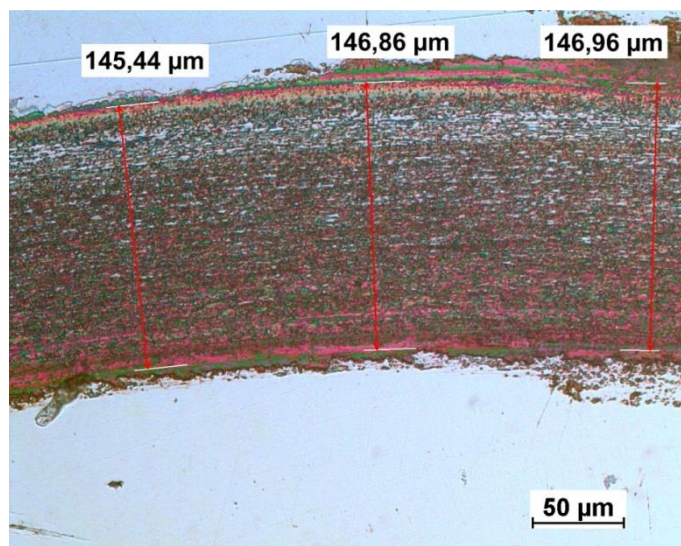
Metalografické snímky na obrázku 27 z práce [11] po zařazení zmrazování nevykazují výraznější změny ve struktuře stejně jako v předchozí kapitole.



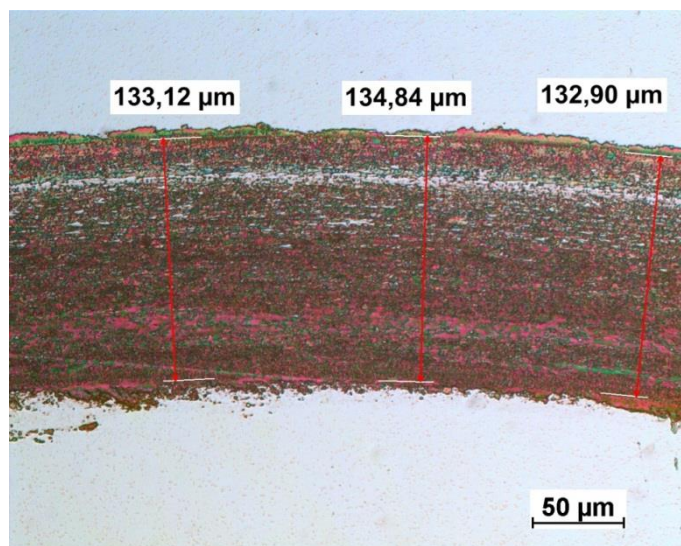
**Obr. 24** - Vliv zmrazování na tvrdost a opotřebení oceli Vanadis 30



**Obr. 25** - Koeficient tření v závislosti na vykroužené dráze RO Vanadis 30 po tepelném zpracování se zmrazováním a bez zmrazování



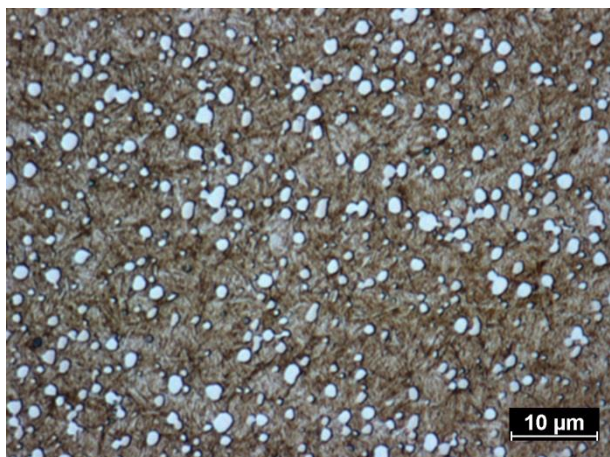
**5K** - bez zmrazování



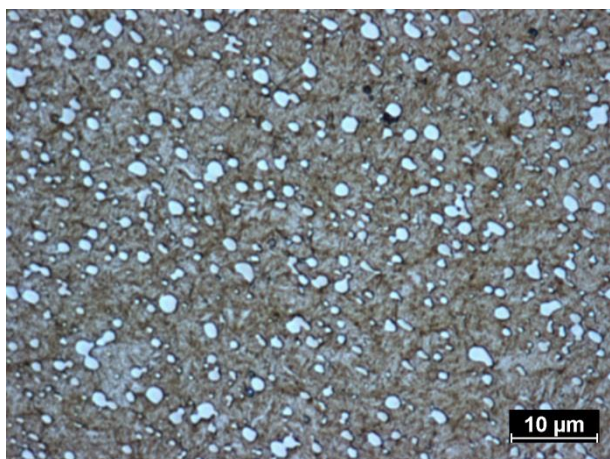
**5Z** - zmrazeno po kalení -196 °C/4h

**Obr. 26** - Vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc pomocí NisElements viz výsledky obr. 24 a 25





**5K** - bez zmrazování



**5Z** - zmrazeno po kalení -196 °C/4h

**Obr. 27** - Mikrostruktura oceli Vanadis 30, 1000x zvětšeno leptadlo 2% Nital [11]

### **3.3 Vliv počtu popouštění na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30**

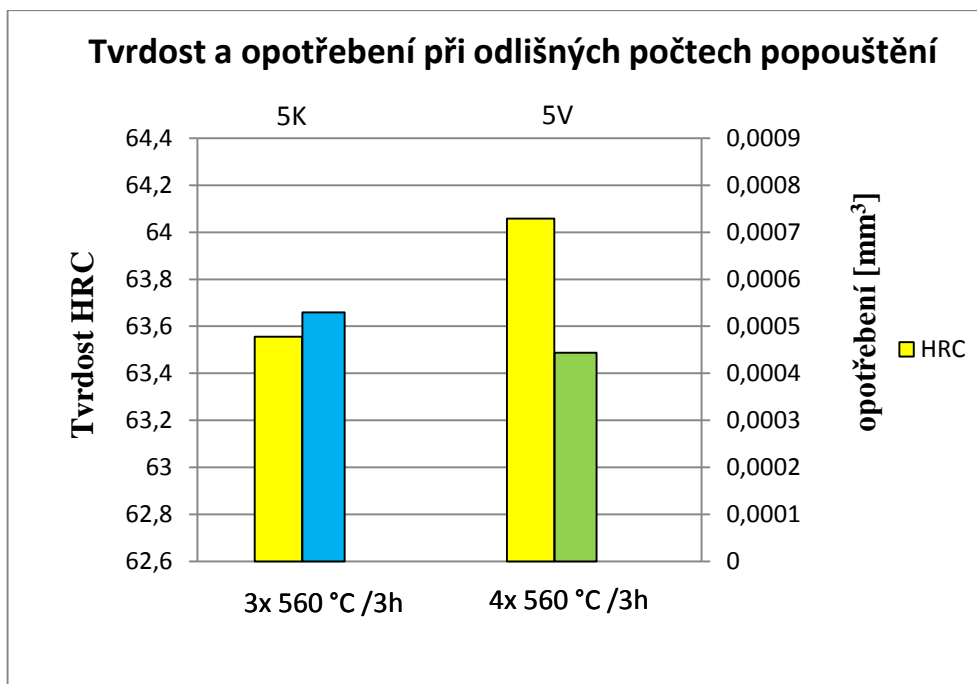
Výsledky hodnocení vlivu 3 a 4 násobného popouštění na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 uvádí obr. 28 a 29. Z obrázku 28 je patrný mírný nárůst tvrdosti po 4 násobném popouštění oproti 3 násobnému popouštění. I u těchto vzorků se však tvrdost pohybuje v mezích  $64\pm 1$  HRC udávané výrobcem [10].

V souladu s již zmíněným mírným nárůstem tvrdosti po 4 násobném popouštění bylo změřeno menší opotřebení ve srovnání se stavem po 3 násobném popouštění. Odolnost proti opotřebení po 4 násobném popouštění je téměř srovnatelná (tab. 6) s nejmenším opotřebením, které bylo naměřeno v rámci bakalářské práce a to u vzorku, který byl podroben tepelnému zpracování se zmrazováním. Autor si je vědom skutečnosti, že tyto hodnoty byly naměřeny pouze na jednom vzorku a bylo by vhodné uvedené skutečnosti ověřit na větším počtu vzorků.

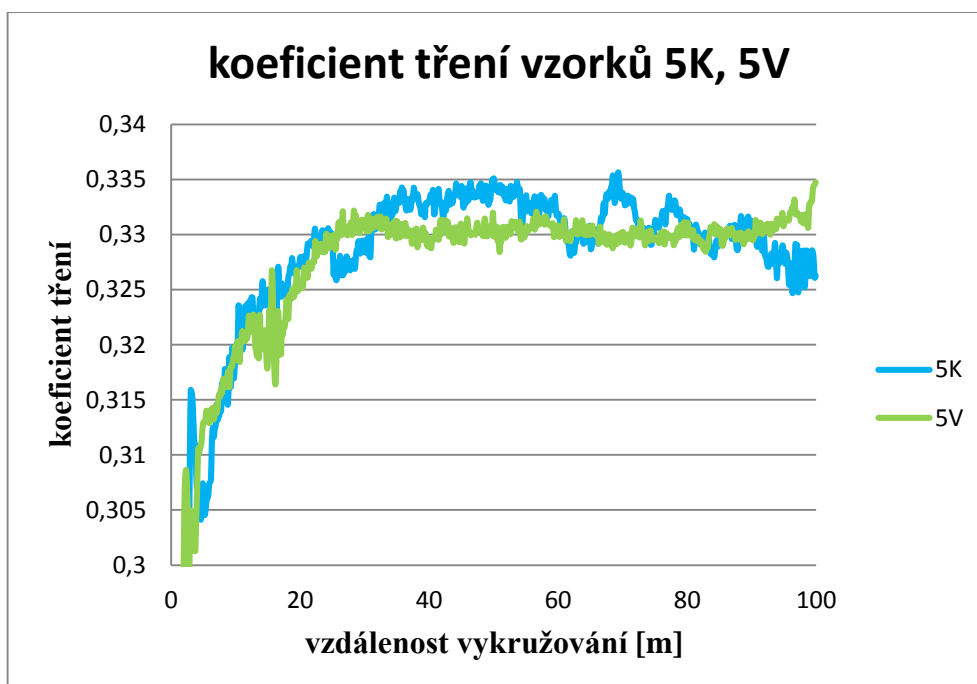
Závislosti koeficientu tření na vykroužené vzdálenosti při použití 3 a 4 násobného popouštění, zobrazené na obrázku 29, jsou jako v předchozích případech srovnatelné.

Na obrázku 30 je dokumentováno vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc na materiálu Vanadis 30 v závislosti na 3 a 4 násobném popouštění. V souladu s popisem obrázku 28 je patrný vliv 4 násobného popouštění na šířku drážky oproti stavu po 3 násobném popouštění. Autor předložené práce si je vědom skutečnosti, že vykroužená drážka po zkoušce Pin on disc a koeficient tření mohou být podrobněji analyzovány [13], toto hodnocení je však nad rámec bakalářské práce.

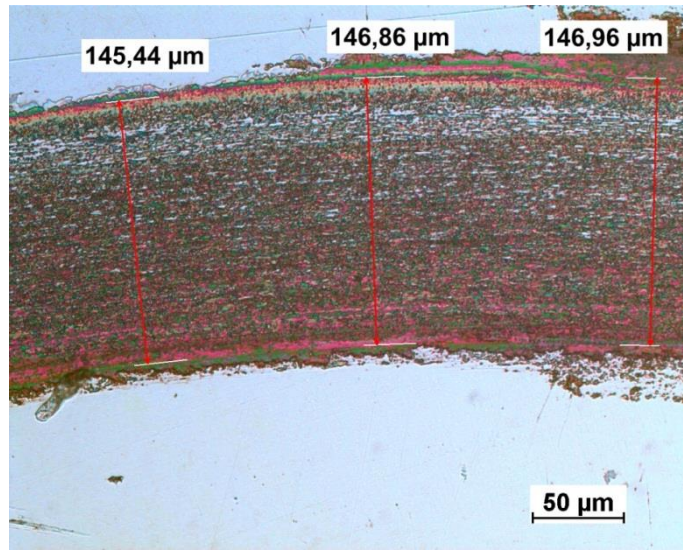
Metalografické snímky na obrázku 31 z práce [11] po 3 a 4 násobném popouštění nevykazují výraznější změny ve struktuře stejně jako v předchozích kapitolách. Tato skutečnost je způsobena výrobou práškovou metalurgií RO Vanadis 30.



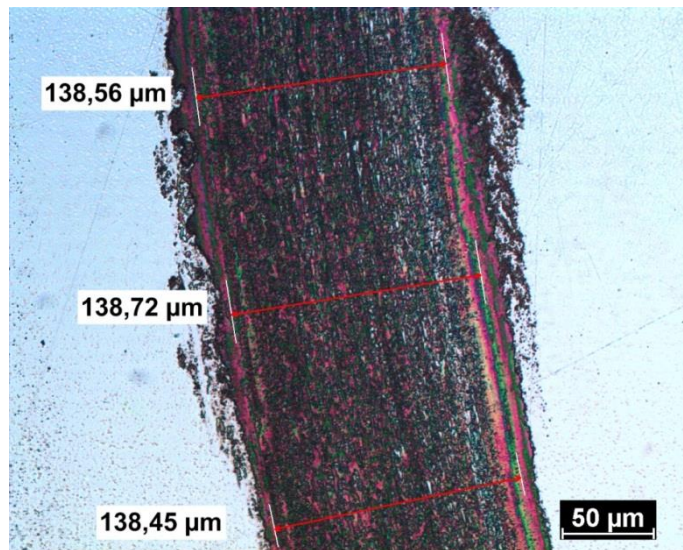
**Obr. 28** - Tvrdość a opotřebení oceli Vanadis 30 při popouštění 3x 560 °C / 3h a 4x 560 °C / 3h



**Obr. 29** - koeficient tření oceli Vanadis 30 při popouštění 3x 560 °C / 3h a 4x 560 °C / 3h



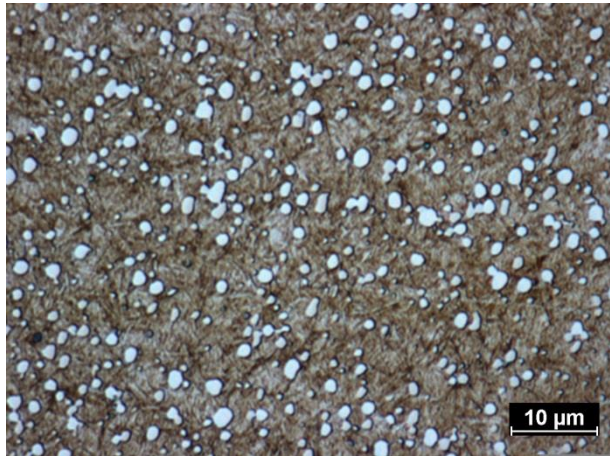
5K - popouštěno 3x 560 °C /3h



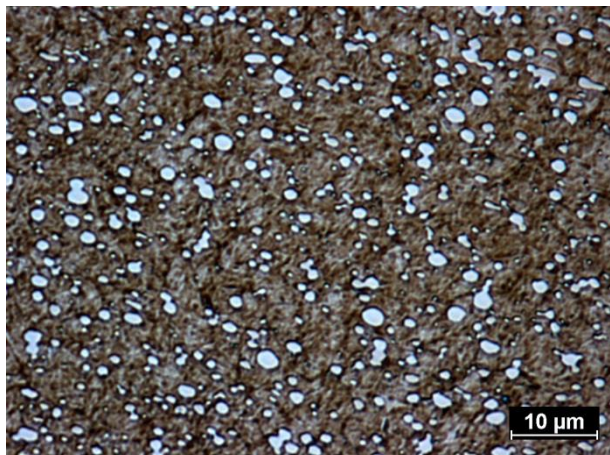
5V - popouštěno 4x 560 °C /3h

**Obr. 30** - Vyhodnocení šířky drážky po zkoušce Pin on disc pomocí NisElements viz výsledky obr. 28 a 29





**5K** - popouštěno 3x 560 °C /3h



**5V** - popouštěno 4x 560 °C /3h

**Obr. 31** - Mikrostruktura oceli Vanadis 30, 1000x zvětšeno leptadlo 2% Nital [11]

## 4 Závěry

Bylo provedeno hodnocení vlivu tepelného zpracování na tvrdost a odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30 vyrobené práškovou metalurgií po různých režimech tepelného zpracování a je možno konstatovat že:

- 1) Doba austenitizace (5 až 30 min) při teplotě 1100 °C v popuštěném stavu nemá výrazný vliv na hodnotu výsledné tvrdosti
- 2) Nebyl prokázán vliv doby austenitizace na odolnost proti opotřebení RO Vanadis 30.
- 3) Zmrazování zařazené do tepelného zpracování způsobuje mírný pokles konečné tvrdosti ve srovnání s tvrdostí materiálu po klasickém tepelném zpracování.
- 4) V souladu s teoretickými předpoklady je odolnost proti opotřebení oceli Vanadis 30 v případě použití zmrazování mírně lepší než v případě tepelného zpracování bez zmrazování.
- 5) Použití 4 násobného popouštění u oceli Vanadis 30 nezpůsobuje jednoznačné změny v hodnotách konečné tvrdosti a odolnosti proti opotřebení
- 6) Ze sledovaných stavů byla zjištěna nejlepší odolnost proti opotřebení v případě zařazení zmrazování -196 °C/4h mezi kalení a 3 násobné popouštění. Tento výsledek bude vhodné ověřit na větším počtu vzorků případně na měření životnosti skutečných nástrojů.

## Použitá literatura:

- [1] Pluhař J. a kolektiv: Nauka o materiálech, Praha 1989
- [2] Svatoš Jiří. [online] 2012 [cit. 2014-12-24] Dostupné z:  
[http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-16\\_19230.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-16_19230.html)
- [3] Bolzano [online] (nedatováno) [cit. 2014-11-24] Dostupné z:  
[http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove\\_NO/Informace\\_k\\_rychlomezny\\_metalu\\_NO.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove_NO/Informace_k_rychlomezny_metalu_NO.pdf)
- [4] Ptáček L. a kolektiv: Nauka o materiálu II., Brno CERM 2002, ISBN 80-7204-248-3
- [5] Kolektiv autorů POLDI: Nástrojové oceli POLDI a jejich použití, Kladno 1986, 1. díl
- [6] JURČÍ, Peter. Nástrojové oceli ledeburitickeho typu. Vyd. 1. Praha:  
Česke vysoké učení technické v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04439-1
- [7] MACEK, Karel, Vaclav BENEŠ, Jiří JANOVEC, Jaroslav PLUHAŘ a Petr ZUNA.  
Kovové materiály. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, ISBN 80-010-0682-4.
- [8] Ustohal V., Jan V., Ptáčková M.: Archeologia technica 12 [online] (nedatováno)  
[cit. 2014-11-24] Dostupné z:  
[http://www.starahut.com/at/at12/07\\_Radkovitost\\_struktury\\_nalezovych\\_zeleznych\\_predmetu.pdf](http://www.starahut.com/at/at12/07_Radkovitost_struktury_nalezovych_zeleznych_predmetu.pdf)
- [9] Skočovský P., Bokůvka O., Konečná R., Tillová E.: Náuka o materiáli pre obory  
strojnické, Žilinská univerzita, Žilina, 2006, ISBN 80-8070-593-3
- [10] Materialovy list k PM oceli Vanadis 30, [online] Uddeholm, 2006, [cit. 2014-12-24]  
dostupne z: <http://www.uddeholm.cz/czech/files/Vanadis-30.pdf>
- [11] Kuřík M.: Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2014
- [12] ASTM G99-05(2010), Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk  
Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010
- [13] Kříž Antonín. [online] 2004 [cit. 2015-1-6] Dostupné z:  
[http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA\\_ANALYZA\\_PIN-ON-DISC.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf)