

Vliv podmínek tepelného zpracování ocelí na mechanické vlastnosti

Lukáš Chrástecký

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Lukáš Chrástecký
Osobní číslo:	T21036
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv podmínek tepelného zpracování ocelí na mechanické vlastnosti

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Provedení výroby dílů s různými podmínkami tepelného zpracování.
3. Provedení měření mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BRYSON, William E. Heat treatment: master control manual. Munich : Hanser publishers, [2015], ix, 338 s. ISBN 978-1-56990-485-5.

BENEKE, Franz, Bernard NACKE a Herbert PFEIFER, ed. Handbook of thermoprocessing technologies. Volume 2, Plants, components, safety. Essen: Vulkan Verlag, [2015], xxxiii, 993 s. Edition heat processing. ISBN 978-3-8027-2976-8.

METHAROM, Sunan, ed. Heat treatment: conventional and novel applications. New York: Scitus academics, [2017], viii, 270 s. ISBN 978-1-68117-519-5.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem podmínek tepelného zpracování oceli 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12) na mechanické vlastnosti. Teoretická část práce obsahuje rozdělení, značení a charakteristiku ocelí. Soustředí se na problematiku tepelného zpracování, definici mechanických vlastností a na způsoby jejich měření. Praktická část práce podrobně popisuje zvolenou ocel, průběh tepelného zpracování vzorků a měření jejich tvrdosti podle Rockwella. Zároveň obsahuje i popis průběhu metalografické zkoušky a snímky struktury dvou odlišně zpracovaných vzorků. Praktická část dále obsahuje naměřená data a diskuzi získaných výsledků.

Klíčová slova: ocel, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, kalení, popouštění, tvrdost, vzorek.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the influence of heat treatment conditions of steel 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12) and more closely on the mechanical properties. The theoretical part consists of division, labelling and characteristics of steel. It focuses on the issue of heat treatment, the definition of mechanical properties and methods of their measurement. The practical part elaborately describes the selected steel, the heat treatment process of the samples and the measurement of their toughness according to Rockwell. Simultaneously, it also contains a description of the metallographic testing and images of the structure of two differently processed samples. The practical part also includes measured data and a discussion of the acquired results.

Keywords: steel, heat treatment, mechanical properties, hardening, tempering, hardness, sample.

Úvodem chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a připomínky během psaní této závěrečné práce a zároveň za pomoc s realizací praktické části. Rovněž bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a pomoc během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ROZDĚLENÍ, ZNAČENÍ A CHARAKTERISTIKA OCELÍ	12
1.1 ROZDĚLENÍ OCELÍ KE TVÁŘENÍ.....	12
1.1.1 Nelegované oceli.....	13
1.1.2 Legované oceli.....	13
1.2 ZNAČENÍ DLE ČSN 42 0002.....	14
1.3 ZNAČENÍ DLE ČSN EN 10027-1.....	15
1.4 ZNAČENÍ DLE ČSN EN 10027-2.....	17
1.5 CHARAKTERISTIKA OCELÍ.....	17
1.5.1 Základní orientační fyzikální vlastnosti oceli.....	17
1.5.2 Metastabilní diagram Fe-Fe ₃ C.....	18
2 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ	19
2.1 OHŘEV.....	20
2.2 VÝDRŽ (PRODLEVA).....	20
2.3 OCHLAZOVÁNÍ.....	20
2.4 AUSTENITIZACE A TRANSFORMAČNÍ DIAGRAMY.....	21
2.4.1 IRA diagram.....	21
2.4.2 ARA diagram.....	22
2.5 ŽÍHÁNÍ.....	22
2.5.1 Žíhání bez překrytalizace.....	23
2.5.2 Žíhání s překrytalizací.....	25
2.6 KALENÍ.....	26
2.6.1 Kalící prostředí.....	27
2.6.2 Martenzitické kalení.....	28
2.6.3 Bainitické kalení.....	28
2.7 POPOUŠTĚNÍ.....	28
2.7.1 Za nízkých teplot.....	29
2.7.2 Za vysokých teplot.....	29
2.8 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	29
2.8.1 Cementování.....	29
2.8.2 Nitridování.....	30
2.9 ZAŘÍZENÍ PRO TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ.....	31
2.9.1 Elektrická pec.....	31
2.9.2 Vakuová pec.....	32
2.9.3 Komorová plynová pec.....	33

3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI A METODY JEJICH MĚŘENÍ	34
3.1	DĚLENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A JEJICH ZKOUŠENÍ.....	34
3.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	35
3.2.1	Statické zkoušky tvrdosti	35
3.2.2	Dynamické zkoušky tvrdosti.....	38
4	METALOGRAFIE.....	40
4.1	PŘÍPRAVA VZORKU PRO METALOGRAFICKOU ZKOUŠKU	40
4.2	POZOROVÁNÍ VZORKU A VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	42
5	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	43
6	VÝBĚR A POPIS VZORKU PRO EXPERIMENT	44
7	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ.....	46
7.1	PODMÍNKY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	46
7.2	PRŮBĚH TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ.....	48
8	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	51
8.1	PRŮBĚH MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	51
9	METALOGRAFICKÁ ZKOUŠKA – POZOROVÁNÍ STRUKTURY.....	53
9.1	PRŮBĚH PŘÍPRAVY VZORKŮ	53
9.2	POZOROVÁNÍ STRUKTURY	55
10	NAMĚŘENÁ DATA A DISKUZE VÝSLEDKŮ	56
10.1	VZOREK BEZ TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	56
10.2	VZORKY KALENÉ DO VODY A NÁSLEDNĚ POPOUŠTĚNÉ.....	57
10.2.1	Kalící teplota 810 °C	57
10.2.2	Kalící teplota 830 °C	59
10.2.3	Kalící teplota 855 °C	60
10.2.4	Kalící teplota 880 °C	62
10.2.5	Kalící teplota 900 °C	64
10.3	VZORKY KALENÉ DO OLEJE A NÁSLEDNĚ POPOUŠTĚNÉ.....	65
10.3.1	Kalící teplota 830 °C	66
10.3.2	Kalící teplota 850 °C	68
10.3.3	Kalící teplota 870 °C	69
10.3.4	Kalící teplota 890 °C	71
10.3.5	Kalící teplota 910 °C	73
10.4	DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	74
10.5	VÝSLEDEK METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY	77
	ZÁVĚR	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ	87
SEZNAM TABULEK.....	89
SEZNAM PŘÍLOH.....	90

ÚVOD

Tepelné zpracování ocelí je klíčovým procesem v metalurgii, který má zásadní vliv na konečné mechanické vlastnosti materiálů, jako jsou pevnost, tvrdost, houževnatost či odolnost proti opotřebení. Jedná se o řízený proces, během něhož dochází k ohřevu materiálu, výdrži na dané teplotě a ochlazování určitou rychlostí. V důsledku takového pochodu dojde ke změně struktury materiálu, což vede ke změně stávajících vlastností nebo získání nových, převážně lepších vlastností.

V současné době je v průmyslu kladen velký důraz na volbu vhodných materiálů, které nejen že splňují konstrukční požadavky, ale také jejich vlastnosti splňují nároky kladené zákazníky. Nezanedbatelný vliv na volbu materiálu má pochopitelně i ekonomické hledisko. Z těchto důvodů je důležité porozumět materiálům používaných v různých aplikacích a umět z nich vytvořit materiály s vylepšenými specifickými vlastnostmi. A k tomu slouží právě tepelné zpracování. Pro získání nejlepších možných mechanických vlastností je nutné znát, jak správně zvolit podmínky tepelného zpracování.

Tato bakalářská práce se zabývá experimentální analýzou změn mechanických vlastností zvolené oceli 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12), která byla kalena a popouštěna za různých procesních podmínek. Měnila se kalící teplota, doba výdrže na kalící teplotě a chladicí médium.

Po kalení a po popouštění se provádělo měření tvrdosti Rockwellovou metodou, stupnice HRC. Z naměřených dat byl kvantitativně a graficky vyjádřen vliv podmínek tepelného zpracování zvolené oceli na konečnou tvrdost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ, ZNAČENÍ A CHARAKTERISTIKA OCELÍ

Dodnes nejdůležitějším technickým materiálem používaným v oblasti strojírenství je ocel, což je slitina železa s uhlíkem a dalšími prvky. Vzhledem ke svým mechanickým a technologickým vlastnostem se používá pro stavbu strojů, nástrojů, zařízení apod. Kvůli všestrannému využití a existenci různých modifikací tohoto materiálu, dochází k jeho rozdělení podle chemického složení či oblasti použití. [1]

1.1 Rozdělení ocelí ke tváření

Chemické složení je soubor údajů, které vyjadřuje zastoupení jednotlivých prvků, sloučenin či druhů částic v látce. Chemickým složením se zabývá analytická chemie. [2]

Dle chemického složení se rozdělují oceli na 2 kategorie:

- nelegované oceli, které neobsahují legující prvky, nebo jsou tyto prvky zastoupeny jen do mezního obsahu,
- legované oceli, které obsahují legující prvek/prvky, jejichž zastoupení je vyšší než mezní obsah (viz Tab. 1). [1], [3]

Tab. 1 Mezní obsahy legujících prvků pro rozdělení ocelí na nelegované a legované [1]

Prvek	Mezní obsah, hmotnostní podíl [%]
Mn	1,65
Si	0,5
Cu, Pb	0,4
Cr, Ni	0,3
Al, Bi, Co, Se, Te, V, W	0,1
Mo	0,08
Nb	0,06
La, Ti, Zr	0,05
B	0,0008
ostatní (s výjimkou C, P, S, N) pokaždé	0,05

Dále lze k těmto 2 kategoriím přiřadit i samostatnou kategorii korozivzdorných ocelí, jak uvádí některá literatura. Jsou to oceli s chemickým složením, které odpovídá obsahu chromu

minimálně 10,5 % a obsahu uhlíku 1,2 %. Kromě těchto prvků je zastoupen i nikl. Z hlediska vlastností se dále dělí na korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli. [3]

Podle použití oceli rozdělujeme na konstrukční a nástrojové. Z jejich názvu je již patrné jejich uplatnění v praxi. Z konstrukčních, vzhledem ke svému chemickému složení, se vyrábí nejrůznější strojní součásti a zařízení, které pracují za různých teplot, v korozních prostředích apod. Konstrukční jsou dále děleny na oceli obvyklé jakosti a ušlechtilé oceli. Nástrojové oceli jsou primárně určeny k výrobě nástrojů. Mají dobrou odolnost vůči opotřebení, z ekonomického hlediska jsou dražší. Jsou dále rozděleny na uhlíkové, slitinové a rychlořezné. [1], [3]

1.1.1 Nelegované oceli

Nelegované oceli se rozdělují podle hlavních skupin jakosti na:

- oceli obvyklých jakostí – při výrobě není potřeba speciálních opatření, nejsou určeny pro tepelné zpracování, nejsou uvedeny další zvláštní charakteristiky, kromě Si a Mn nejsou předepsány žádné další obsahy legujících prvků,
- nelegované jakostní oceli – při výrobě je kladena větší pozornost (vyšší požadavky při namáhání), není předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování, nejsou požadavky na stupeň čistoty,
- nelegované ušlechtilé oceli – při výrobě platí zvláštní podmínky výroby a zkoušení, vykazují vyšší stupeň čistoty než předešlé jakostní oceli, jsou určeny především k povrchovému kalení a zušlechťování a rovnoměrněji reagují na toto zpracování, mají přesné chemické složení. [1], [3]

1.1.2 Legované oceli

Legované oceli se rozdělují podle hlavních skupin jakosti na:

- legované jakostní oceli – slouží pro podobné účely, jako nelegované jakostní oceli, obsahují ale legující prvky nad mezním stavem kvůli použití, nejsou všeobecně určeny k povrchovému kalení a zušlechťování,
- legované ušlechtilé oceli – patří zde nástrojové, korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli, oceli na valivá ložiska a ocelové konstrukce, se speciálními fyzikálními vlastnostmi apod., mají přesně stanovené chemické složení a zvláštní podmínky výroby a zkoušení. [1], [3]

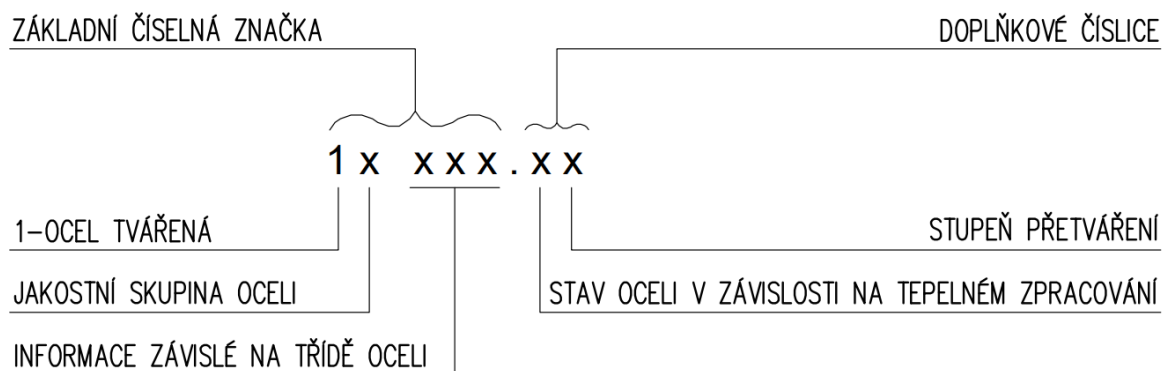
Všechny oceli podle normy mají svůj materiálový list, kde jsou uvedeny podrobnosti charakterizující danou ocel, včetně informací pro tepelné zpracování a použití. [1]

1.2 Značení dle ČSN 42 0002

Česká technická norma ČSN 42 0002 v současné době již není v platnosti a je povolena používat jen mezi tuzemskými podniky. Tato norma platila od roku 1978 do roku 2017. Plně ji nahradila evropská norma ČSN EN 10027-1. Přestože je tato norma oficiálně zrušena, je v praxi i ve vzdělávání stále hodně používána. Především proto, že je přehledná a dlouhodobým užíváním vžitá. [1], [3], [4]

Tato norma upravuje rozdělení ocelí do devíti tříd jakosti podle chemického složení. Jsou to třídy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. [1]

Kromě číselného označení jsou oceli označovány i barevně. Označují se jedním až třemi barevnými pruhy. Odděleně se hutní výrobky označují barevně na čele nebo na konci polotovaru. Barevné označování ocelí je definováno normou ČSN 42 0010, která je stále v platnosti. [1]



Obr. 1 Číselné značení ocelí ke tváření dle ČSN 42 0002 [3]

Toto číselné značení (viz Obr. 1) se skládá ze základní číselné značky a doplňkových číslic oddělené tečkou. Základní číselná značka je pětimístné číslo, která označuje základní materiál – třídu a dále dle třídy například minimální pevnost v tahu, množství uhlíku či obsah legujících prvků uvedené na pozici „Informace závislé na třídě oceli“ na Obr. 1. První doplňková číslice udává stav oceli v závislosti na tepelném zpracování, jestli je materiál žíhaný, kalený nebo jinak tepelně zpracovaný. Kromě doplňkové číslice je tepelné zpracování v materiálových listech uvedeno i slovně. Druhá doplňková číslice udává stupeň přetváření materiálu, tedy informace o válcovaných pleších a pásech. [1], [3]

Z Tab. 2 vyplývá rozdělení ocelí do tříd dle normy ČSN 42 0002, neboli význam prvního dvojčíslí. Taktéž jejich oblast použití, stupně legování a charakteristika. [3]

Tab. 2 Rozdělení ocelí do tříd [3]

Třída oceli	Oceli podle		Charakteristika ocelí
	použití	stupně legování	
10	konstrukční	nelegované	předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno
11			předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S, popř. (P+S) a dalších prvků
12			předepsaný obsah C, Mn, Si, P, popř. (P+S) i dalších prvků
13		nízkolegované	legovací prvky: Mn, Si, Mn-Si, Mn-V
14			legovací prvky: Cr, Cr-Al, Cr-Mn, Cr-Si, Cr-Mn-Si
15			legovací prvky: Mo, Mn-Mo, Cr-Mo, Cr-V, Cr-W, Mn-Cr-V, Cr-Mo-V, ...
16		legované	nízkolegované a středně legované
17	středně legované a vysokolegované		legovací prvky: Cr, Ni, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-V, Cr-Al, Cr-Ni-Mo, Cr-Ni-Ti, Cr-Mo-V, Mn-Cr-Ni, Mn-Cr-Ni, Mn-Cr-Ti, Mn-Cr-V, Cr-Ni-Mo-V, Cr-Ni-Mo-W, ...
19	nástrojové	nelegované	předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S
		legované (nízko, středně, vysoko)	legovací prvky: Cr, V, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-Si, Cr-V, Cr-W, Cr-Al, Cr-Ni-W, Cr-Si-V, Cr-Mo-V, Cr-V-W, Cr-Ni-Mo-V, ...

1.3 Značení dle ČSN EN 10027-1

Předmětem této normy je stanovení pravidel pro označování ocelí charakteristickými písmeny a čísly na evropské úrovni technické normalizace za účelem zpřehlednění a zjednodušení pojmenování ocelových materiálů. [1]

a) Stavba značek vytvořených na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností ocelí:



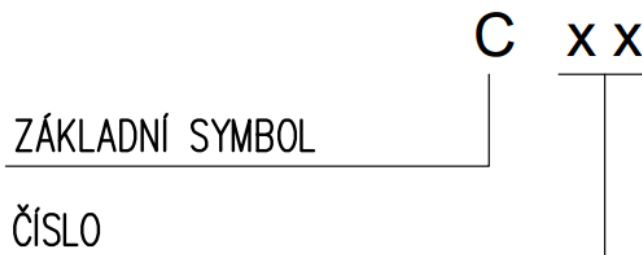
Obr. 2 Číselné značení dle bodu a) [1]

Značka se skládá ze základního symbolu, který se liší podle oblasti použití:

- S – pro ocelové konstrukce pro všeobecné použití,
- P – pro tlakové nádoby,
- L – na potrubí,
- E – na strojní součásti,
- G – na odlitky,
- další B, H, D, R, ... [1], [3]

Význam čísla ve značce se liší podle toho, jaký je základní symbol (viz Obr. 2). Vyjadřuje buď minimální mez kluzu pro nejmenší tloušťku výrobku či minimální mez pevnosti. [3]

b) Stavba značek vytvořených na základě chemického složení oceli:



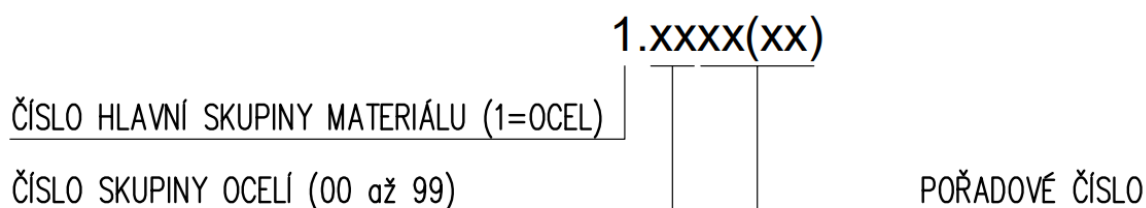
Obr. 3 Číselné značení dle bodu b) [1]

Základní symbol (C, X nebo HS) značí, jestli se jedná o nelegovanou, legovanou nebo rychlořeznou ocel. Číslo u nelegovaných ocelí značí stonásobek středního obsahu uhlíku a u legovaných, rychlořezných a některých nelegovaných ocelí je kromě stonásobku středního obsahu uhlíku uveden i obsah charakteristických legujících prvků (včetně chemických symbolů těchto prvků). [3]

V případě potřeby může být ve značení využito přídatných symbolů k detailnějšímu popisu dané oceli v jejím názvu. [3]

1.4 Značení dle ČSN EN 10027-2

Tato norma stanovuje pravidla pro systém číselného označování ocelí. Pojednává o stavbě čísel ocelí a organizaci jejich registrace, přidělování a rozšiřování. Číselné značení podle této normy platí, jako doplňková značení ke značkám ocelí podle ČSN EN 10027-1. [3]



Obr. 4 Číselné značení dle ČSN EN 10027-2 [1]

Číselná značka je složena až ze sedmi čísel (viz Obr. 4). První číslo označuje hlavní skupinu materiálu, které je odděleno od následujících čísel tečkou. Dvojčíslí značící skupinu oceli (00 až 99) odpovídá tabulkové hodnotě, kde je definováno chemické složení daného materiálu. Pořadové číslo jej ještě více podrobněji charakterizuje. V současné době se v pořadovém čísle předpokládá obsazení dvou míst. Místa v závorce (xx) jsou připravena pro budoucí použití. [1], [3]

1.5 Charakteristika ocelí

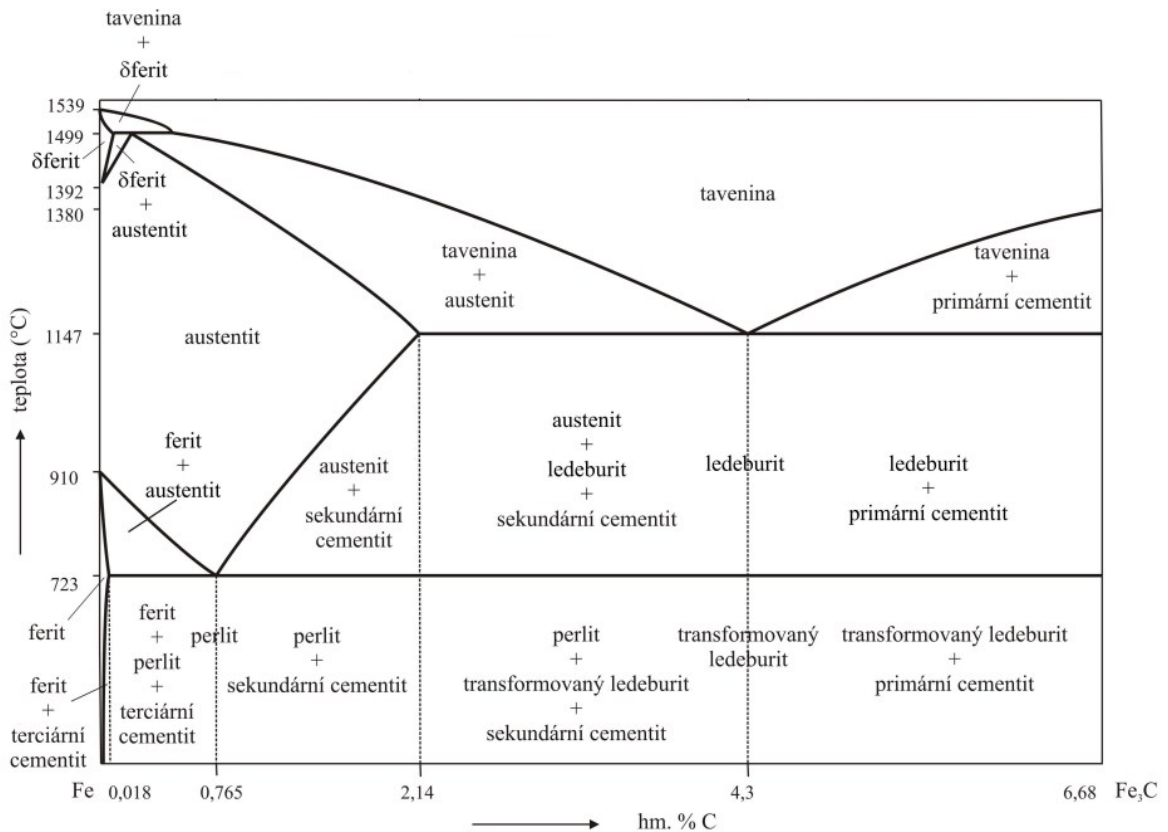
Ocel je technická slitina železa a uhlíku, jehož obsah je menší než 2,14 hm. %, a dalších prvků. Jedná se o jeden ze základních konstrukčních materiálů a zároveň o jeden z nepoužívanějších ve všech oblastech lidské činnosti. Slitiny s obsahem uhlíku větším než 2,14 hm. % se označují litiny. [1], [3]

1.5.1 Základní orientační fyzikální vlastnosti oceli

- Hustota – $\rho = 7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Teplota tavení – $t_t = 1350 \text{ až } 1450 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Měrná tepelná kapacita – $c_p = 0,461 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Tepelná vodivost – $\lambda = 47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Modul pružnosti v tahu – $E = 210 \text{ GPa}$.
- Modul pružnosti ve smyku – $G = 81 \text{ GPa}$.
- Poissonovo číslo – $\mu = 0,29$. [3]

1.5.2 Metastabilní diagram Fe-Fe₃C

Jedná se o grafické zobrazení – diagram (viz Obr. 5), který zobrazuje, v jaké fázi se nachází ocel (do 2,14 hm. % C) nebo bílá litina (nad 2,14 hm. % C), která obsahuje určitou koncentraci uhlíku (na ose x) při určité teplotě (na ose y), tlak se uvažuje jako konstantní. Tento binární diagram metastabilní soustavy a další rovnovážné diagramy mají v technické praxi velký význam. [7]



Obr. 5 Metastabilní diagram Fe-Fe₃C [6]

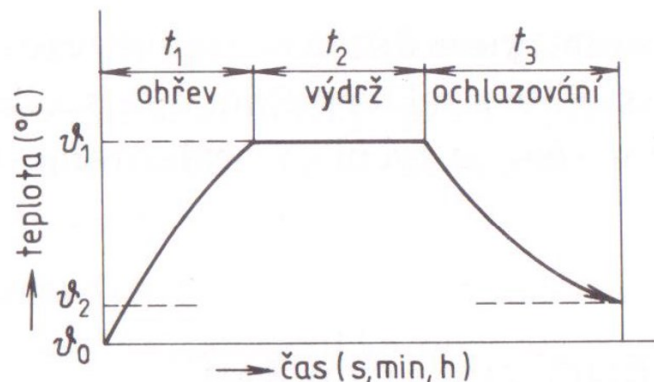
Popis základních pojmů:

- tavenina – roztavená slitina železa a uhlíku,
- ferit – intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α , obsahuje max. 0,018 hm. % C,
- δ ferit – intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ , obsahuje max. 0,1 hm. % C,
- austenit – intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ , obsahuje max. 2,14 hm. % C,
- cementit – intersticiální sloučenina Fe₃C, obsahuje 6,68 hm. % C,
- ledeburit – eutektikum, směs austenitu a cementitu,
- perlit – eutektoid, směs feritu a cementitu. [7]

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Vlastnosti kovových materiálů jsou závislé nejen na jejich chemickém složení, ale především na jejich struktuře, to znamená na množství, tvaru, velikosti a rozložení jednotlivých fází. Změnou struktury se mění stávající vlastnosti nebo se získávají vlastnosti nové např. tvrdost, houževnatost, pevnost apod. Těmito změnami se kromě změny/získání lepších vlastností docílí také zvýšení odolnosti opotřebení, zvýšení životnosti výrobku, hospodárnějšímu využití materiálu, výrobě výkonnějších strojních zařízení, výrobě produktů s nižší hmotností a v některých případech je i ekonomičtější. [1], [5], [7], [13]

Pro změnu struktury, a tím pádem změnu vlastností, se používá proces tepelného zpracování, jehož podstatou je ohřev materiálu určitou rychlostí na danou teplotu, výdrž na této teplotě (prodleva) a ochlazování určitou rychlostí na konečnou teplotu (viz Obr. 6). Někdy se tyto operace opakují vícekrát za sebou za různých podmínek. [5]



Obr. 6 Schéma průběhu tepelného zpracování [5]

Druhy tepelného zpracování:

- žíhání,
- kalení,
- popouštění,
- kombinované tepelné zpracování,
- tepelně-mechanické zpracování,
- chemicko-tepelné zpracování. [5]

2.1 Ohřev

Ohřev je prvotní krok tohoto procesu, jedná se o pochod, kterým se zvyšuje teplota tepelně zpracovávaného tělesa na požadovanou hodnotu. Důležitou roli hraje i rychlost tohoto ohřevu. Teplota má vliv z hlediska jakosti i nákladů, proto je nutné zvolit správný typ ohřevu. Obvykle se celkový ohřev skládá z více fází. Režimy ohřevu lze rozdělit do pěti skupin:

- pomalý – těleso je vloženo do studené pece, kde dochází k postupnému pomalému ohřevu a dochází k malému rozdílu teplot mezi povrchem a jádrem tělesa, nejméně produktivní typ ohřevu,
- normální – těleso je vloženo do pece, která je předehřátá na teplotu ohřevu (popřípadě i vyšší), rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem je vyšší a vzniká i vyšší pnutí, tento způsob je nejvíce využíván v komorových pecích a solných lázních,
- zrychlený (intenzivní) – teplota v peci je v době vložení tělesa do pece výrazně vyšší, než je předepsaná teplota ohřevu, vznikají velké teplotní rozdíly, ekonomický režim,
- rychlý – pec je nepřetržitě temperována na podstatně vyšší teplotu, než je teplota ohřevu, těleso se vyjme z pece po dosažení požadované teploty, při tomto režimu se tvoří nejvyšší hodnoty pnutí, nejvíce produktivní ohřev, tento způsob je možný u karuselových nebo průběžných pecí, kde je možno zabránit přehřátí tělesa,
- stupňovitý – těleso během procesu projde dvěma prostředími – předehřívacím a s vyšší teplotou, tento režim umožňuje snížit pnutí a vznik deformací při ohřevu, používá se např. u ohřevu rychlořezných ocelí na kalicí teplotu. [8]

2.2 Výdrž (prodleva)

Výdrž se nazývá udržování tepelně zpracovávaného tělesa na určité teplotě. Provádí se z důvodu vyrovnání teploty v celém průřezu tělesa, přechodu složek rozpustných při dané teplotě do tuhého roztoku, průběhu difuzních pochodů či snížení vnitřních pnutí. [8]

2.3 Ochlazování

Rychlost ochlazování je naprosto zásadní a ovlivňuje výslednou strukturu. Ochlazování může probíhat v peci, na vzduchu, v oleji či ve vodě, moderní ochlazovací prostředí jsou vodné roztoky polymerů. Intenzita ochlazování se může zvyšovat rychlostí proudění nebo přísadami, které snižují stabilitu parního polštáře, který vzniká u kapalných ochlazovacích

médií. V případě, že je neporušený, tak klesá účinnost rychlosti odvádění tepla. Rychlost ochlazování a ochlazovací prostředí se liší podle druhu tepelného zpracování. [5], [8], [10]

2.4 Austenitizace a transformační diagramy

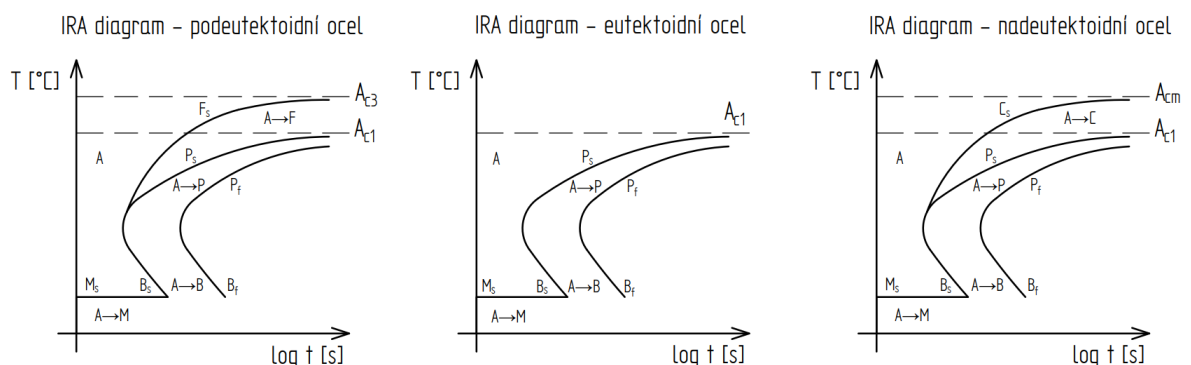
Austenitizace je základní úkon u všech překrystalizačních pochodech tepelného zpracování. Během tohoto úkonu dochází k přeměně výchozí ferito-cementické struktury na strukturu austenitu. Dochází k tomu při ohřevu, tedy za zvýšené teploty, tzv. překrystalizační teploty, která se liší podle složení oceli. Záleží, jestli je ocel podeutektoidní (do 0,765 % C), eutektoidní (0,765 % C) nebo nadeutektoidní (nad 0,765 % C), jak zobrazuje metastabilní diagram Fe-Fe₃C (viz Obr. 5). [8], [19]

Za rovnovážných podmínek dochází k austenitizaci u podeutektoidních ocelí v rozmezí teplot A_{c1} až A_{c3} , u nadeutektoidních ocelí v rozmezí teplot A_{c1} až A_{cm} . [8]

2.4.1 IRA diagram

Po úplné austenitizaci materiálu v důsledku ohřevu, se přistupuje k ochlazování. Pokud dojde k prudkému ochlazení (nad kritickou ochlazovací rychlostí) na určitou teplotu, sleduje se průběh rozpadu austenitu při této konstantní teplotě v závislosti na čase (izotermický děj). Jedná se o tzv. izotermický rozpad austenitu (IRA). [5]

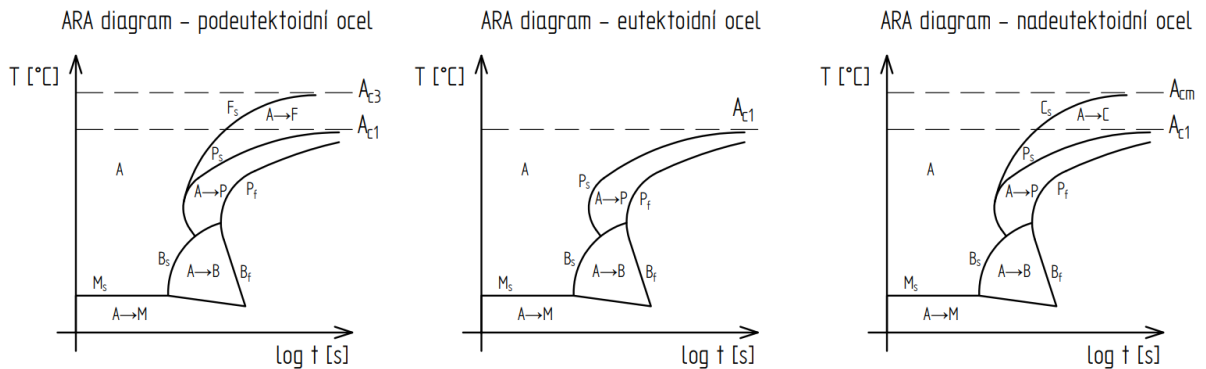
IRA diagram zobrazuje, k jakým přeměnám dojde v závislosti na rychlosti ochlazování – perlitická, bainitická, martenzitická přeměna u eutektoidní oceli, u podeutektoidní oceli ještě vznik feritu a u nadeutektoidní oceli sekundárního cementitu. [5]



Obr. 7 IRA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli

2.4.2 ARA diagram

Materiál se z austenitizační teploty ochlazuje plynule a sleduje se průběh rozpadu austenitu. Jedná se anizotermický rozpad austenitu (ARA), který je v praxi tepelného zpracování mnohem častější. [5]



Obr. 8 ARA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli

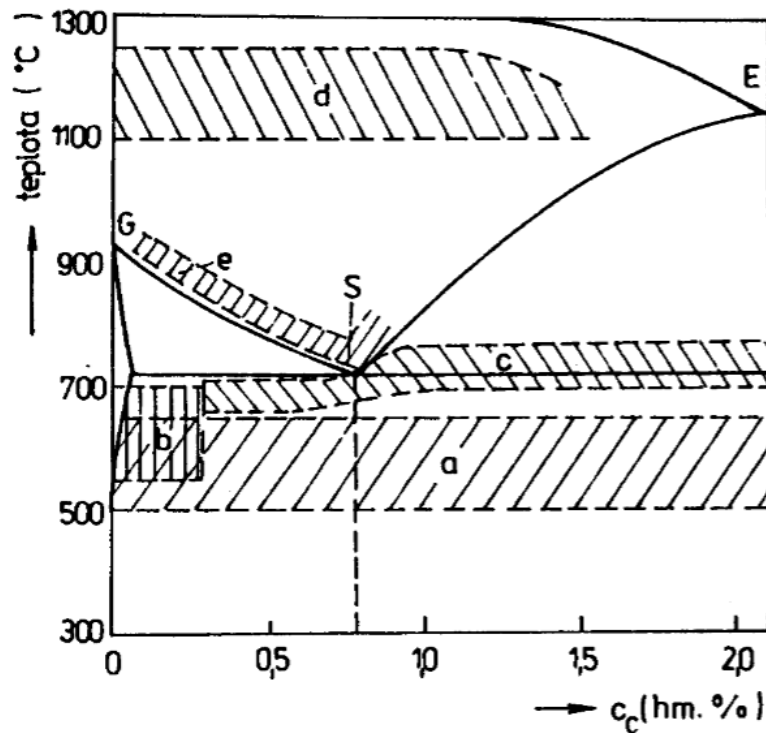
2.5 Žihání

Nejprve probíhá ohřev vsázky na žihací teplotu, podle druhu materiálu a typu žihání. Následuje prodleva na této teplotě, a nakonec zpravidla pomalé až velmi pomalé ochlazování např. v peci, na vzduchu. Cíl je získat stabilní rovnovážnou strukturu. Účel bývá různý a závisí nejen na druhu oceli, ale také na předcházejících operacích. Jedná se např. o odstranění nerovnoměrnosti struktury a zjemnění, homogenizace materiálu – vyrovnání rozdílů v chemickém složení, odstranění vnitřních pnutí apod. [7], [8], [13]

Základní dělení žihání je podle probíhajících přeměn na dvě skupiny – bez překrystalizace a s překrystalizací. Podstata žihání s překrystalizací spočívá v tom, že u oceli proběhne austenitizace a žihací teplota překročí A_{c1} , A_{c3} nebo A_{cm} , kdežto žihání bez překrystalizace prakticky nepřekročí teplotu A_{c1} . [5], [7]

Na Obr. 9 jsou zobrazeny nejčastější typy žihání v části rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C a je tak zobrazena oblast žihacích teplot. Legenda k Obr. 9:

- a – žihání ke snížení pnutí,
- b – žihání rekrystalizační,
- c – žihání naměkko,
- d – žihání homogenizační,
- e – žihání normalizační. [8]



Obr. 9 Oblast žihacích teplot v rovnovážném diagramu [8]

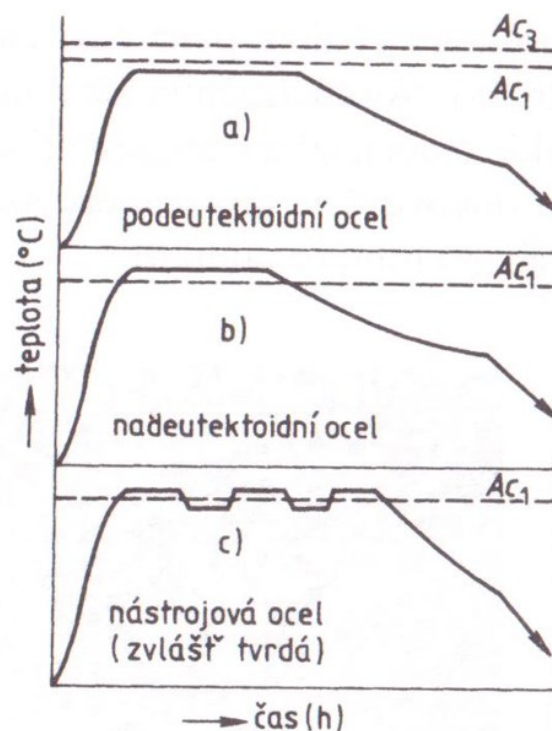
2.5.1 Žihání bez překrystalizace

a) Žihání ke stabilizaci rozměrů – žihací teplota se pohybuje kolem 120 – 160 °C, výdrž po dobu cca 200 – 500 h, dle chemického složení materiálu. Cíl je dosažení co největší stability rozměrů, zejména kalibrů a měřidel. Změnám rozměrů přesných měřidel i magnetických vlastností se zabraňuje úmyslným dlouhodobým popouštěním martenzitu a snahou o dokonalý rozpad zbytkového austenitu. K této skupině lze přiřadit i stabilizaci valivých ložisek, které se po kalení se zmrazováním dlouhodobě popouštějí na teplotu 170 – 200 °C. [8]

b) Žihání na odstranění vnitřního pnutí – žihací teplota je obvykle mezi 450 – 650 °C, předchází ji pomalý ohřev ($100 - 200 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$), výdrž na teplotě obvykle 1 – 2 h, účel je snížení vnitřních zbytkových pnutí v materiálu vzniklých při předchozích operacích např. při svařování, mechanickém opracování apod. U ocelových součástí mohou lokální zbytková napětí dosahovat výše mezi 10 MPa až hodnotami blízkými mezi kluzu při pokojové teplotě. Provádí se tak, aby nedošlo ke změně struktury a podstatné změny mechanických vlastností. U vysokolegovaných ocelí může být žihací teplota vyšší, u povrchově kalených součástí se provádí pouze při teplotách 150 – 200 °C proto, aby byla zachována získaná tvrdost. Doba a teplota tohoto procesu závisí na požadovaném stupni snížení zbytkových pnutí. [8], [9]

c) **Žihání rekrytalizační** – žihací teplota je vyšší, než je teplota rekrytalizace zpracovávaného materiálu – obvykle v rozmezí 550 – 700 °C, teplota nesmí být větší než A_{c1} , aby nedošlo k fázové přeměně a překrytalizaci. Výdrž na teplotě je poměrně krátká, cca 1 h. Cílem je dosáhnout regenerace vlastností a změn ve struktuře, které vznikly během procesu tváření za studena, tj. odstranění protažených zrn a vznik nových feritických zrn bez znaků deformace a obnovení schopnosti plastické deformace oceli. Materiály, které mají být podrobeny tváření za studena (válcování, hluboké tažení apod.) a následnému rekrytalizačnímu žihání, musí mít dobrou schopnost tváření za studena. [8], [9]

d) **Žihání naměkko** – žihací teplota je těsně pod nebo nad teplotou A_{c1} (tedy 723 °C) nebo je kolísající kolem této hranice (viz Obr. 10), výdrž na této teplotě je poměrně dlouhá 2 – 8 h i vyšší, ochlazování probíhá v peci rychlostí 50 °C·h⁻¹ na teplotu kolem 500 °C a následně se dochlazuje na vzduchu (pokud není požadavek na snížení vnitřních pnutí). Účelem je převedení laminárního perlitu na globulární. Dochází ke snížení tvrdosti a v důsledku toho roste obrobiteľnosť za studena. Současně je snaha o získání větší homogenizace struktury vhodné pro následující kalení. Používá se zejména u nástrojových ocelí a u některých konstrukčních legovaných ocelí. [5], [8], [9]



Obr. 10 Průběhy žihání naměkko [5]

2.5.2 Žihání s překrystalizací

a) Žihání normalizační – rychlý ohřev probíhá na teplotu 30 – 50 °C nad A_{c3} resp. A_{cm} , prohřátí materiálu do středu, aby vznikl homogenní austenit, ochlazování probíhá na klidném vzduchu (cca rychlostí 100 – 200 °C·h⁻¹). Účel je zejména dosažení jemnozrné a rovnoměrné struktury tvořené obvykle směsí feritu a perlitu. Používá se u odlitků, výkovků, svařenců menších rozměrů a výlisků. Konečná struktura se může lišit dle chemického složení materiálu a rozměrům výrobku. Normalizační žihání může být konečnou operací, mohou následovat ale další operace tepelného zpracování či tváření. Pokud se jedná o konečnou operaci, žihá se ještě za účelem snížení vnitřních pnutí. [5], [8], [9]

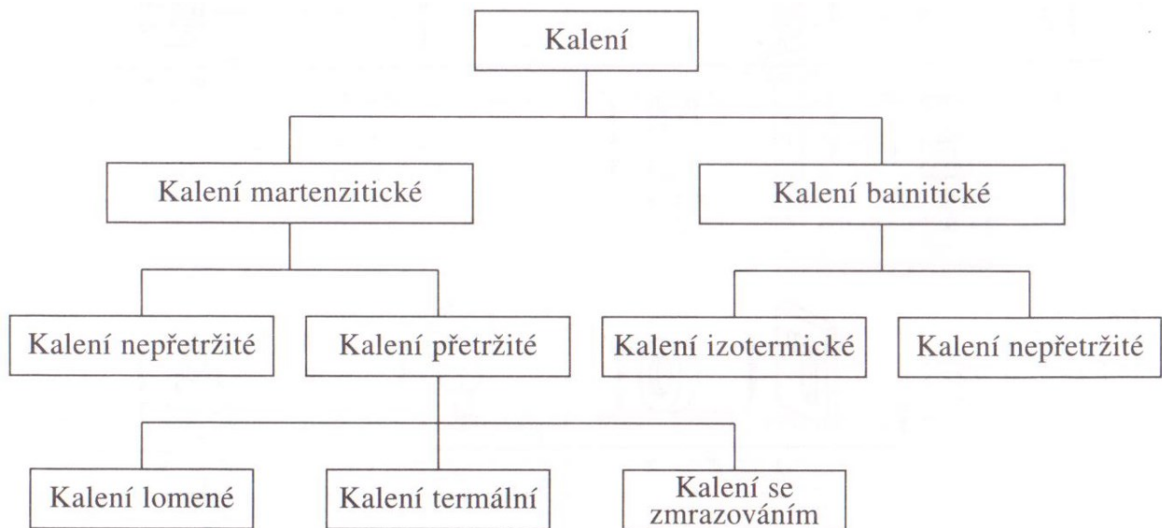
b) Žihání homogenizační – proces začíná ohřevem na teplotu výrazně vyšší než teploty A_{c3} resp. A_{cm} , rozmezí teplot se pohybuje kolem 1 000 – 1 300 °C, výdrž musí být dostatečně dlouhá (6 – 15 h), pomalé ochlazování dle tvaru odlitku/výkovku (které bývají velkých rozměrů z legovaných ocelí). V souvislosti s vysokou teplotou dochází k vyrovnání chemického složení a zrovnoměrnění struktury, dochází i ke zvýšené oxidaci a úbytku uhlíku v povrchu. Smyslem je vyrovnat co nejvíce nestejnou směs chemického složení ocelí difuzí. [8]

c) Žihání ke zvětšení zrn – austenitizace na teplotách značně vyšších než A_{c3} , kolem 950 – 1 000 °C, ochlazování probíhá zpravidla v peci. Cílem je zvětšení/zhrubnutí austenitického zrna, používá se ve speciálních případech, jako jsou ocelové plechy pro elektrotechniku, u ocelí pro cementování apod. Zlepšením hrubozrné struktury je lepší obrobiteľnosť u ocelí s nízkým obsahem uhlíku – bez úpravy jsou příliš měkké a vznikala by dlouhá tříška a nejakostný povrch při obrábění. [8]

d) Žihání izotermické – žihací teplota je těsně nad A_{c3} popř. A_{c1} , krátká doba výdrže – snaha o vznik, co nejmenšího austenitického zrna. Tímto se dosáhne nejkratších časů izotermického rozpadu. Ochlazování probíhá zrychleně pod teplotu A_{c1} (teplotu perlitické přeměny), výdrž na teplotě po dobu potřebnou k izotermické přeměně a následně k libovolnému ochlazení. Tento způsob žihání slouží k podobnému účelu jako žihání naměkko, a navíc může být ekonomičtější, jelikož žihací doby jsou kratší. Smyslem je zlepšení obrobiteľnosti, získání definovaných mechanických vlastností. Vhodné jen u výrobků malých průřezů, u nichž je možná pohotová změna teploty. [5], [8], [9]

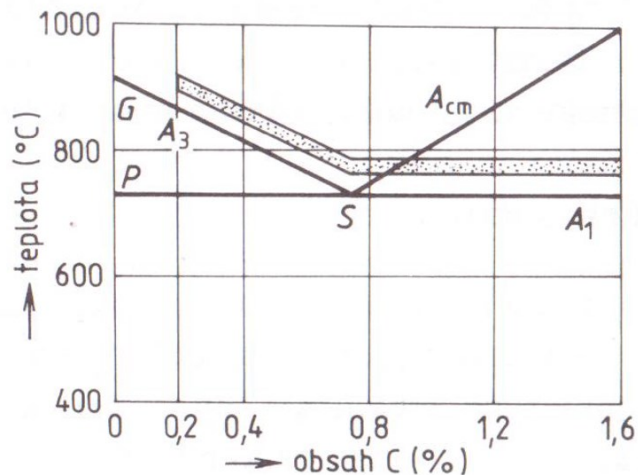
2.6 Kalení

Dalším typem tepelného zpracování je kalení, což je proces, při kterém se součást zahřeje na austenitizační teplotu, setrvá na této teplotě a chladí se rychlostí větší než kritickou. Takto rychlým ochlazením se potlačí vznik feritu a perlitu a zachovaný nestabilní austenit se přemění na bainit nebo martenzit. Účelem je zvýšení tvrdosti oceli vytvořením částečně nebo zcela nerovnovážné struktury. Primární rozdělení kalení se podle vzniklé struktury dělí na martenzitické a bainitické (viz Obr. 11). [5], [8]. [10], [13]



Obr. 11 Dělení kalení [5]

Kalící teploty se pohybují nad teplotu A_{c3} u pondeutektoidních ocelí a nad teplotou A_{c1} u nadeutektoidních ocelí. Oblast teplot vhodných ke kalení je zobrazeno na Obr. 12 v rámci diagramu Fe-Fe₃C. U nadeutektoidních ocelí se nevolí teploty nad A_{cm} , jelikož zbylý cementit po ohřevu nad A_{c1} je tvrdou složkou, a tak přispívá k tvrdosti oceli po kalení. [5]



Obr. 12 Pásmo vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [5]

- Kalitelnost – je schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšené tvrdosti.
- Prokalitelnost – je schopnost oceli dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem určité tvrdosti odpovídající kalitelnosti dané oceli při 50 % martenzitu ve struktuře. Pro určení této vlastnosti se používá tzv. čelní zkouška prokalitelnosti. [5]

2.6.1 Kalicí prostředí

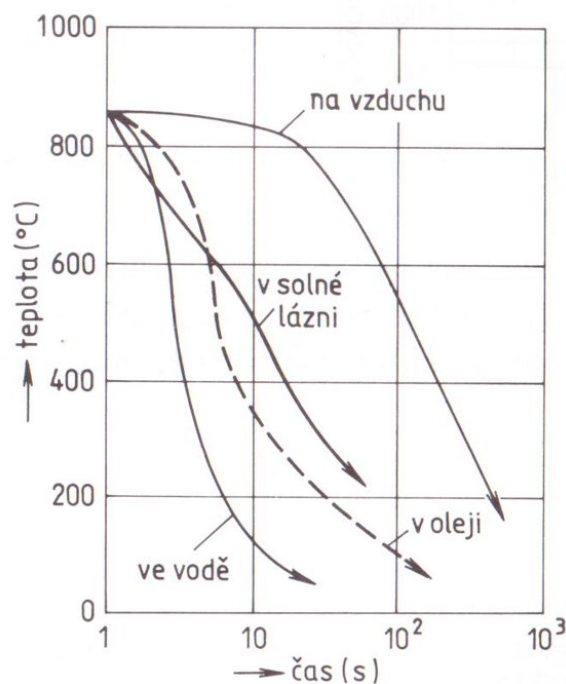
a) Voda – nejstarší a velmi účinné ochlazovací prostředí, probíhá neplynule – vzniká parní polštář, po snížení teploty je těleso obklopeno prudkým varem vody, poté intenzita ochlazování klesá, nejintenzivnější je vodní sprcha. Vznikají značná vnitřní pnutí.

b) Oleje – mírnější prostředí, podobné ochlazování ve vodě, vhodnost olejů se liší podle viskozity a tekutosti, časem olejové lázně stárnou a je třeba je vyměnit.

c) Roztavené solné lázně – vynikají plynulostí ochlazování, z počátku ochlazují velmi rychle, v oblasti martenzitické přeměny již pomaleji, to znamená, že vznikají i menší pnutí.

d) Roztavené kovové lázně – jen v některých případech, podobné solným lázním.

e) Vzduch – vhodné pro hluboce prokalitelné (samokalitelné) oceli, pro zvýšení rychlosti ochlazování se vzduch nuceně pohybuje např. za pomoci dmýchadla, malé vnitřní pnutí. [5]



Obr. 13 Průběh ochlazování v různých prostředích [5]

Na Obr. 13 lze vidět, jaký je rozdíl v rychlosti ochlazování ve středu vzorku $\Phi 10$ mm, který je kalen z teploty 850 °C ve vodě, oleji, solné lázni a na vzduchu. [5]

2.6.2 Martenzitické kalení

a) Kalení nepřetržitě – nejjednodušší a nejčastější, po ohřevu na kalící teplotu a výdrži k dosažení homogenního austenitu dochází ihned k ochlazení ve vodě, vzduchu nebo oleji až na teplotu ochlazovacího prostředí (nejméně pod M_s) a poté následuje popouštění.

b) Kalení lomené – ochlazování probíhá ve dvou studených lázních po sobě, součást se vyjme z první lázně nad teplotou M_s a vloží se na dochlazení do druhé lázně s menším chladícím účinkem, např. první se použije voda, poté se dochladí v oleji, vzniká menší pnutí.

c) Kalení termální – slouží ke snížení pnutí a deformací v kalených součástech, předmět se ochladí v solné lázni nad teplotu M_s , poté je výdrž na teplotě, aniž by došlo k bainitické přeměně a dochlazen na teplotu okolí, vzniká menší vnitřní pnutí než použití studené lázně.

d) Kalení se zmrazováním – po martenzitickém kalení následuje další chlazení až na M_f , který leží pod bodem mrazu, za účelem co největšího rozpadu austenitu na martenzit. Používá se zejména pro nadeutektoidní oceli, pro měřidla, valivá ložiska aj. [5], [8]

2.6.3 Bainitické kalení

a) Izotermické bainitické kalení – bylo odvozeno ze znalosti IRA diagramu, součást se po vyjmutí z pece ochladí v lázni na určitou teplotu do oblasti teplot přeměny austenitu na bainit, poté chladne izotermicky až za B_f , poté se dochladí na vzduchu na teplotu okolí.

b) Nepřetržitě bainitické kalení – záleží na dostatečně rychlém ochlazování po austenitizaci na kalící teplotu tak, aby se zajistil rozpad austenitu na bainit nebo směs bainitu a martenzitu, zpravidla následuje popouštění na rozdíl od izotermického kalení. [5], [8]

2.7 Popouštění

Princip popouštění je ohřev kaleného předmětu na určitou popouštěcí teplotu pod A_{c1} , výdrž na dané teplotě a následnému pomalému ochlazení podle druhu oceli. Toto vede ke vzniku více rovnovážné struktury u ocelí s martenzitickou či bainitickou strukturou. Cílem popouštění je u kalených materiálů snížit vnitřní pnutí a odstranit křehkost, která vzniká jako nechtěná vlastnost při kalení. [5], [8], [13]

Z hlediska výše popouštěcích teplot se dělí na popouštění za nízkých teplot a na popouštění za vysokých teplot. [5]

2.7.1 Za nízkých teplot

Popouštěcí teplota je do cca 350 °C. Používá se u nástrojových ocelí a louží k odstranění vnitřních pnutí po kalení, zmenšení podílu zbytkového austenitu, stabilizace rozměrů či zlepšení houževnatosti. V praxi se nazývá napouštění. [5], [8]

2.7.2 Za vysokých teplot

Provádí se při teplotě od 350 do 700 °C. Smyslem je získat strukturu s příznivějšími mechanickými vlastnostmi, především s vysokou houževnatostí při vysoké mezi kluzu a mezi únavy. Tomuto způsobu zpracování se ve spojení s kalením říká zušlechťování. [5], [8]

2.8 Chemicko-tepelné zpracování

Do problematiky chemicko-tepelné zpracování se řadí způsoby sycení povrchu ocelových materiálů za účelem změny struktury a získání různých vlastností např. žáruvzdornost, korozivzdornost, odolnost proti cyklickému namáhání a zejména odolnost proti opotřebení a zvýšení tvrdosti povrchu. Tento proces provází i změna chemického složení daného zpracovávaného tělesa. V důsledku tohoto difuzního sycení povrchu (kovy i nekovy) může docházet k rozdílným mechanickým i fyzikálně-chemickým vlastnostem mezi povrchem a jádrem, které zpravidla zůstává houževnaté. [5], [8]

Proces probíhá v pevném, kapalném nebo plynném prostředí s jedním nebo více aktivními chemickými prvky, dle daného druhu chemicko-tepelného zpracování. [11]

Objemové chemicko-tepelné zpracování se liší od povrchového tím, že dochází ke snižování některého prvku v celém objemu daného tělesa. Může se jednat o snížení množství vodíku a uhlíku. [8]

2.8.1 Cementování

Jedná se o sycení povrchu uhlíkem v tuhém, kapalném nebo plynném prostředí při teplotě nad A_{c3} . Smyslem cementování je zvýšení koncentrace tohoto prvku v povrchové vrstvě u nízkouhlíkových ocelí, které mají koncentraci do 0,3 % C, aby odpovídala koncentraci uhlíku, které obsahují podeutektoidní nebo nadeutektoidní oceli. [8]

Hloubka cementační vrstvy je obvykle 1 mm (případně 0,8 mm, zcela výjimečně 2 mm), ve správně nauhličeném povrchu by měl být obsah uhlíku 0,85 %. [8]

Po cementování musí následovat teplené zpracování – kalení. Po kalení má vzniklá povrchová vrstva vysokou tvrdost, odolnost proti otěru a únavovou pevnost. [8]

V případě, kdy se požaduje, aby některá část součásti nebyla cementována je nutno chránit tyto části před cementací pomocí past a nátěrů nebo účinnějším elektrolytickým poměděním. Nejlepší způsob ochrany je přidavek odpovídající hloubce cementování, který se poté odebere. [5]

Cementace se hojně používá u strojních součástí např. zuby ozubeného kola. Objevuje se u komponent vstřikovacích forem, především u vodících a středících prvků.

Cementační prostředí:

- pevné – nejstarší způsob, kde se suché a čisté předměty určené k cementování vloží do plechových krabic a rovnoměrně zasypou cementačním práškem a dřevěným uhlím s aktivátorem, poté se krabice uzavře a utěsni, při cementační teplotě (cca 880 – 920 °C) reaguje uhlí s kyslíkem a vzniká oxid uhelnatý, který se ve styku s povrchem rozkládá na oxid uhličitý a uhlík,
- kapalné – vhodné pro malé až střední velikostní součásti, hlavní složky jsou uhličitany alkalických kovů a karbid křemíku, u solných lázní s kyanidy při teplotách 880 – 920 °C se povrch zpracovávaného materiálu obohacuje uhlíkem (difunduje),
- plynné – moderní způsob, plynné látky obsahující uhlík (oxidy, propan-butan aj.) jsou obsaženy v atmosféře v peci. [8]

2.8.2 Nitridování

Jedná se o sycení povrchu dusíkem v kapalném nebo plynném prostředí, který reaguje se železem a dalšími úmyslně přidávanými prvky. Po této technologii není potřeba provádět žádné další tepelné zpracování, jako u cementování. [5], [11]

Hloubka nitridované vrstvy dosahuje 0,2 – 0,3 mm (ve výjimečných případech přesahuje 0,6 mm). Vzniká velmi tvrdý výrobek, jenž je dále odolnější i proti opotřebení, únavě nebo korozi. [11]

Nitridační prostředí:

- kapalné – mladší technologie než využití plynné atmosféry, provádí se v solné lázni obsahující kyanidy nebo kyanatany, podmínky nitridace pro nízkolegovanou ocel

v kapalném prostředí jsou pro představu – teplota 565 °C, čas 1,5 h, tloušťka vrstvy 0,3 mm,

- plynné – obvykle při teplotách 550 – 580 °C v peci nebo fluidní loži naplněné atmosférou s čpavkem, který se rozkládá na dusík a vodík, přičemž atomy dusíku vstupují do povrchu součásti. [11]

Pro nitridování se dále používají plazmová/iontová nebo laserová nitridace. [11]

2.9 Zařízení pro tepelné zpracování

Volba zařízení pro tepelné zpracování záleží na několika faktorech. Závisí na typu výroby – jestli se jedná o kusovou, malosériovou či hromadnou výrobu, na typu materiálu, druhu tepelného zpracování, druhu použitého zdroje tepelné energie nebo na požadavcích na jakost povrchu. Jelikož všechny druhy vyžadují ohřev, bude každé zařízení obsahovat pec. [5]

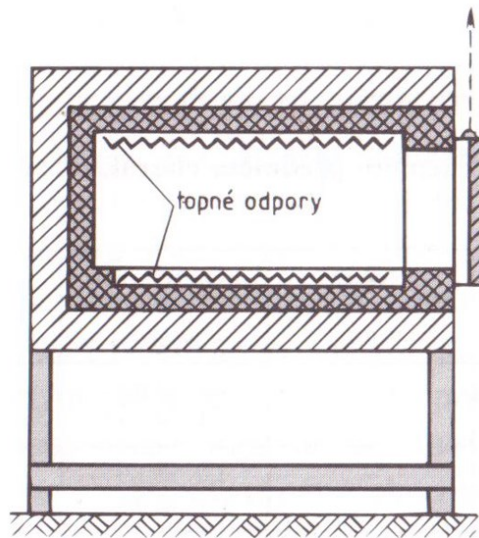
Obecně se pece rozdělují podle několika hledisek:

- druh vytápění (elektrické, palivové),
- teplotní rozsah (nízkoteplotní do 600 °C, středně teplotní od 600 – 1 100 °C, vysokoteplotní nad 1 100 °C),
- typ atmosféry (normální atmosféra, řízená atmosféra, vakuum),
- pohyb vsázky (průběžné, stabilní s přerušovaným provozem),
- technologický postup (dle druhu tepelného zpracování nebo chemicko-tepelného zpracování). [8]

Z konstrukčního hlediska existuje mnoho různých typů pecí pro tepelné a chemicko-tepelné zpracování např. komorová, šachtová, bubnová, vakuová, zvonová, elevátorová, pásová, válečková, narážecí, střásací, aj. [5], [8], [12]

2.9.1 Elektrická pec

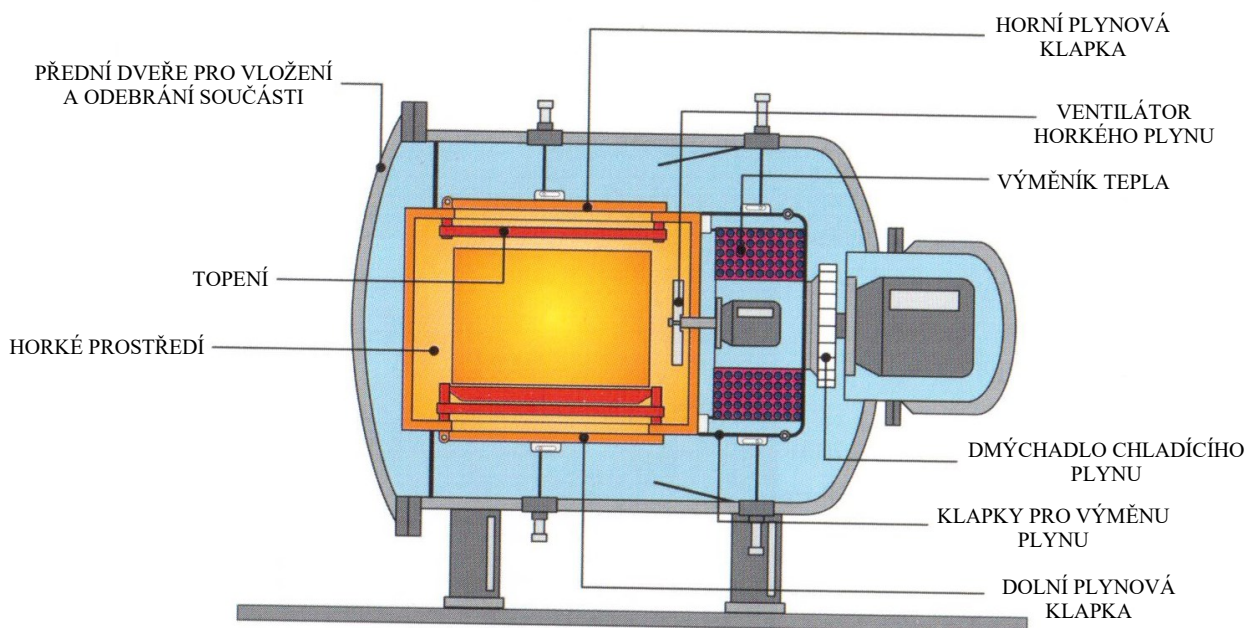
Pracuje převážně s nepřímým odporovým ohřevem. Teplo se z rozžhavených topných článků předává tepelně zpracovávanému tělesu převážně prouděním, případně sáláním. Směr sázení a uložení sázky je horizontální, během ohřevu nijak nemění svou polohu. Do této kategorie spadají i komorové pece, které mohou být temperovány jak elektrickým zdrojem, tak i spalováním topného plynu. [8]



Obr. 14 Elektrická odporová pec [5]

2.9.2 Vakuová pec

Aplikace vakuových pecí v procesu tepelné zpracování zažívá od 80. let 20. století značný pokrok. V současné době je běžnou součástí komerčních podniků. Jedním z cílů vývoje bylo dosáhnout vyšších rychlostí ochlazování při kalení za použití plynu, aby bylo možné provádět martenzitické kalení středně a nízkolegovaných ocelí. Dalším cílem bylo rozšířit možnosti zpracování u chemicko-tepelného zpracování. Mezi výhody vakuových pecí patří žádná oxidace součásti během procesu, nedochází k nauhličování/oduhličování povrchu, povrch je hladký, vysoká rovnoměrnost teploty, eliminace rozměrových změn apod. [12]



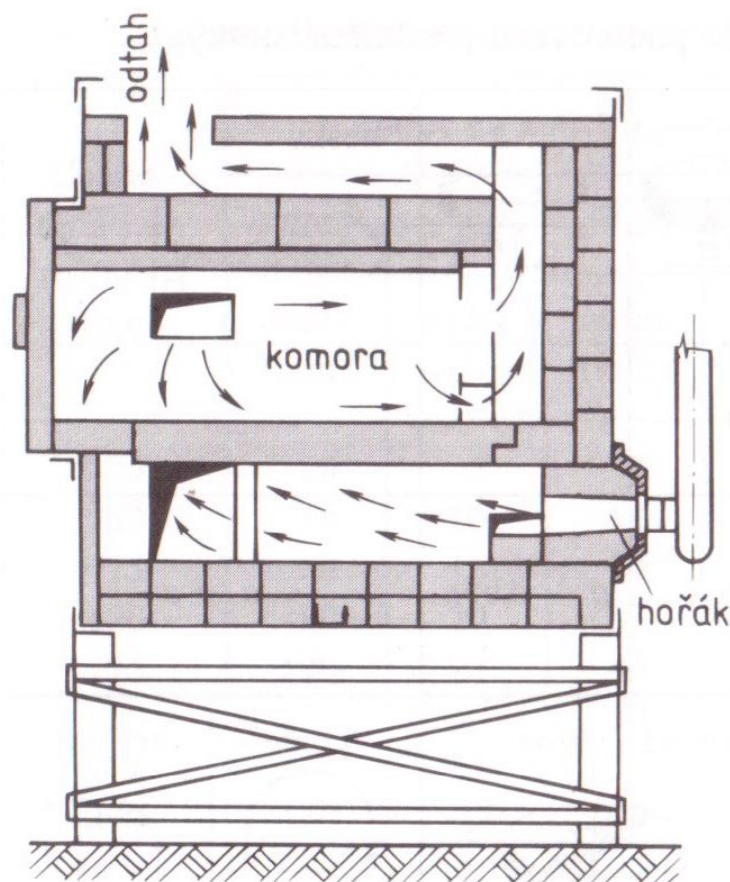
Obr. 15 Horizontální vakuová pec [12]

Absolutní vakuum není úplně technicky možné, ale ani nutné. Ve vakuových pecích se obvykle vytváří tlak mezi 10^{-1} a 10^{-6} bar. Pro kalení ocelí je naprosto dostačující tlak mezi $5 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2} bar. Pro vytvoření těchto tlaků se využívá vakuová pumpa, která je doplněna potřebnými čerpadly. [12], [19]

Výrobky z vakuových pecí slouží v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, na výrobu nástrojů, v energetice apod. [12]

2.9.3 Komorová plynová pec

Komorové pece se stavějí v několika velikostech. Plynové vytápění může být konstruováno v několika variantách. Jednak mohou spaliny vznikat a proudit přímo kolem zahříváných těles, nebo jsou vedeny mimo ně (např. muflové pece), anebo u modernějších typů se používá vytápění pomocí tzv. sálavých trubek, kde je plyn spalován ve speciálních trubkách, která zároveň slouží jako stěny pece. V případě použití speciálních trubek nedochází ke styku spalin s tělesem a může být využita ochranná atmosféra. Regulace teploty je automatická. Schéma komorové plynové pece je na Obr. 16. [5]



Obr. 16 Komorová plynová pec [5]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI A METODY JEJICH MĚŘENÍ

Mechanické vlastnosti charakterizují chování materiálů při mechanickém namáhání, tj. při působení vnějších sil. Tyto vlastnosti jsou klíčové jako vstupní data pro pevnostní analýzy a výpočty pro navrhování a dimenzování konstrukcí a strojních dílů. Zároveň slouží pro posuzování vhodnosti materiálů pro technologické účely, dále jako ukazatel kvality mezi odběratelem a výrobcem. [13], [16]

Mezi další druhy vlastností, kromě mechanických, patří fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti (hustota, délková a objemová roztažnost, elektrická a tepelná vodivost apod.) a vlastnosti technologické (obrobitelnost, svařitelnost, kalitelnost apod.). [14]

3.1 Dělení mechanických vlastností a jejich zkoušení

Jelikož jsou materiály při své funkci namáhány různými druhy namáhání, ať už tahem, tlakem, krutem, střihem či ohybem nebo jejich kombinací, musí být schopny odolávat těmto namáháním a mít určité mechanické vlastnosti, jako:

- pružnost (elasticita),
- tvárnost (plasticita),
- pevnost,
- tvrdost. [1]

Primární informace o materiálových vlastnostech poskytují zkoušky mechanických vlastností. Jejich účelem je zjistit odezvu materiálu na daný typ jejich zatěžování. Výsledky zkoušek jsou vyčísleny, a tím popisují danou vlastnost kvantitativně. [16]

Během provádění těchto zkoušek je nutno dbát na způsob a podmínky, za jakých se zkoušky provádí. Aby bylo možno navzájem výsledky zkoušek srovnávat a reprodukovat, provádí se podle předepsaných norem. Zkoušky probíhají na speciálních zkušebních přístrojích a na normalizovaných vzorcích za stanovených podmínek. [14]

Zkoušky mechanických vlastností se dělí podle:

- charakteru zatěžování – statické, dynamické,
- poškození vzorku – destruktivní, nedestruktivní,
- časového průběhu – krátkodobé, dlouhodobé,

- zjišťovaných vlastností – zkoušky pevnosti, tvrdosti apod.,
- druhu namáhání – tahové, tlakové, ohybové apod.,
- teploty zkoušení – za nízkých teplot, za vysokých teplot. [14]

3.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost je charakterizována jako odpor, který klade těleso proti vniknutí jiného (jen mírně deformovatelného) tělesa. Tvrdost materiálu závisí na jeho struktuře, zejména vazebných silách mezi atomy. Mezi tvrdostí a dalšími mechanickými vlastnostmi existují vztahy. Stupnice tvrdosti patří do skupiny stupnic referenčních hodnot, které nepředstavují žádné fyzikální veličiny udávané v jednotkách SI. Jednotka tvrdosti nepředstavuje žádnou měrnou jednotku, ale symbol konvenčního postupu měření. [15]

Podstata metod měření tvrdosti tkví ve vtláčování malého zkušebního tělíska (indentoru) do povrchu testovaného materiálu určitou silou za daných podmínek. Poté dochází k vyhodnocení velikosti stopy, která vznikla v důsledku vtláčování zkušebního tělíska (kuličky, kuželu či jehlanu). Zkušební tělísko je vyrobeno z kalené oceli, slinutého karbidu nebo diamantu. Obecně lze říci, že zkoušky tvrdosti jsou v porovnání s dalšími mechanickými zkouškami jednoduché, rychlé a jedny z nejpoužívanějších. Zkoušky se provádí na speciálních přístrojích tzv. tvrdoměrech. [16]

3.2.1 Statické zkoušky tvrdosti

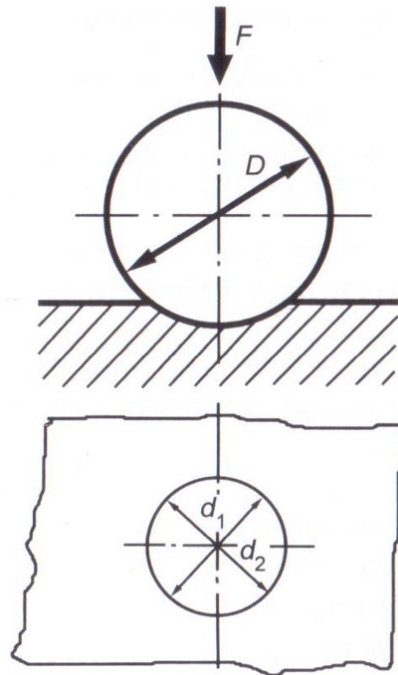
a) Vrypová zkouška podle Martense – princip této zkoušky spočívá ve vytvoření vrypu do testovaného kovového materiálu za pomoci diamantového kužele o vrcholovém úhlu 90° . Měřítkem tvrdosti [HMa] je velikost zatížení kužele, které je nutné k vytvoření vrypu určité šířky. [16]

b) Zkouška tvrdosti podle Brinella – tato zkouška se společně se zkouškami podle Rockwella a Vickerse řadí do vnikajících zkoušek, při kterých dochází k pomalému vtláčování indentoru plynule zvyšující se silou kolmo do zkoušeného povrchu. [16]

U této zkoušky se jako indentor používá kalená ocelová kulička o průměru D a zatlačuje se silou F . Stopa v materiálu (průměr d) se měří ve dvou na sebe kolmých směrech (viz Obr. 17). Tvrdost se vyjádří ze vztahu, ve kterém je poměr zatížení k ploše kulovitého tisku. [16]

Pokud probíhá zkouška za normálních podmínek, tak se používá kulička průměru 10 mm, zatěžující síla je 29 430 N a doba působení 10 až 15 s. Používá se zejména pro měření

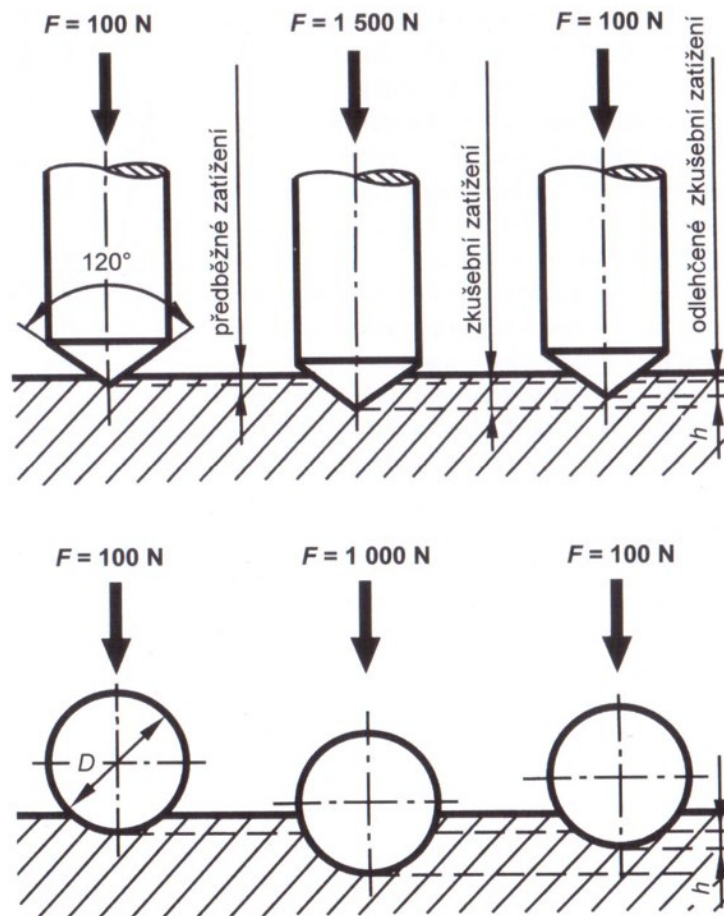
tvrdosti u materiálů s hrubou strukturou např. odlitky či výkovky s očištěným povrchem. Výsledek zkoušky je uveden číselně a písmeny HBS (pokud byl indentor ocelová kulička), nebo HBW (pokud je kulička z tvrdokovu). Tato zkouška se provádí podle normy ČSN EN ISO 6506 a provádí se na Brinellově tvrdoměru. [16], [17]



Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Brinella [16]

c) Zkouška tvrdosti podle Rockwella – vnikajícím tělískem je při této zkoušce diamantový kužel, jehož vrcholový úhel je 120° nebo ocelová kulička a měří se hloubka vtisku. Průběh zkoušky je trochu složitější. Nejprve se vnikající těleso zatíží předběžným zatížením $F_0 = 100 \text{ N}$ z důvodu pružného zotavení. Stupnice tvrdoměru se nastaví do počáteční polohy a začne se s pozvolným zvyšováním zatěžující síly na $F = 1\,500 \text{ N}$, rychlost dosažení této síly je 3 až 6 s. Poté se odlehčí opět na sílu F_0 a odečte se tvrdost na tvrdoměru. Na rozdíl od zkoušek tvrdosti podle Brinella a Vickerse se při této zkoušce neměří velikost stopy, ale tvrdost se odvozuje z hloubky vtisku h , které se dosáhlo aplikací celkového zatížení. Na Obr. 18 je znázorněn průběh zatěžování vzorku. [14], [16]

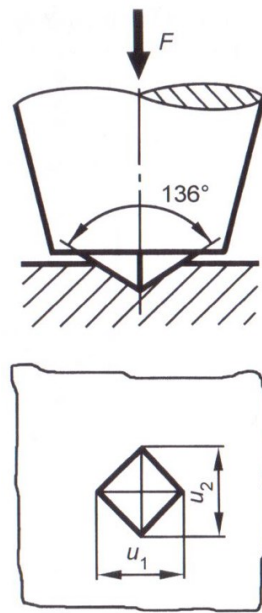
Stupnice tvrdosti se liší podle zvoleného vnikajícího tělíska a velikosti zatěžující síly a je označena několika způsoby HRC, HRB, HRA, HRN, HRT apod. Vždy se skládá z písmen HR a třetí písmeno je podle typu stupnice. Tato zkouška je nejčastěji používanou, je i přesnější než jiné metody a provádí se podle ČSN EN ISO 6508. Měření se provádí na Rockwellově tvrdoměru. [16], [17]



Obr. 18 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [16]

d) Zkouška tvrdosti podle Vickerse – vlačovaným tělískem je při této zkoušce diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° (viz Obr. 19), který vytváří stopu ve tvaru čtverce. Tvrdost je stanovena po změření středních délek úhlopříček tohoto čtverce, většinou pod mikroskopem. Hodnota tvrdosti je vyčíslena ze vztahu, jako poměr zatěžující síly ku povrchu vtisku (plášť jehlanu). Výsledná síla je doplněna písmeny HV, ale jen tehdy, pokud zkouška proběhla za normálních podmínek ($F = 294 \text{ N}$ a doba vtisku 10 až 15 s), pokud se podmínky liší uvede se za číselným vyjádřením tvrdosti kromě HV i velikost síly a doba působení. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 6507. Měření je uskutečňováno na Vickersově tvrdoměru. [16], [17]

U všech typů zkoušek je nutné dbát na dodržení podmínek měření, v případě nedodržení těchto podmínek může docházet k nepřesnostem měření a může se stát, že výsledky zkoušek nebudou odpovídat zjišťovaným skutečným vlastnostem daného vzorku. Je nutno, aby byl vzorek čistý, očištěný od mazadel. Vždy musí ležet na nepoddajné podložce, mít minimální předepsanou tloušťku a samotné měření musí být prováděno v určité vzdálenosti od okraje vzorku. [16]

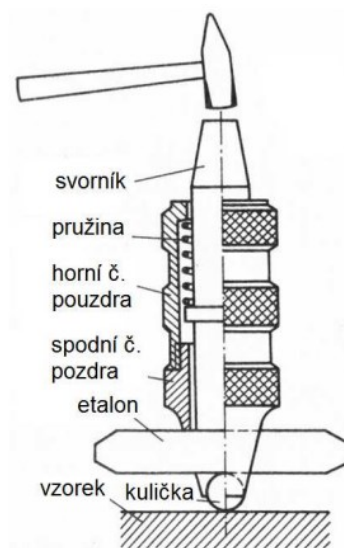


Obr. 19 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [16]

3.2.2 Dynamické zkoušky tvrdosti

a) **Poldiho kladívko a Baumannovo kladívko** – jedná se o vnikající dynamické zkoušky tvrdosti, jejichž princip spočívá působením zkušebního tělíska na vzorek rázem. Jsou podobné statickým vnikajícím zkouškám, liší se právě v charakteru zatěžování. [16]

Poldiho kladívko (viz Obr. 20) je ruční měřicí zařízení, které se přiloží ke vzorku a pomocí kladiva se udeří po svorníku. Ocelová kulička se vtlačí do vzorku pod sebou a také do etalonu nad sebou. Tvrdost se vyhodnocuje porovnáním průměrů obou vtisků a použitím speciálních tabulek. [14], [16]

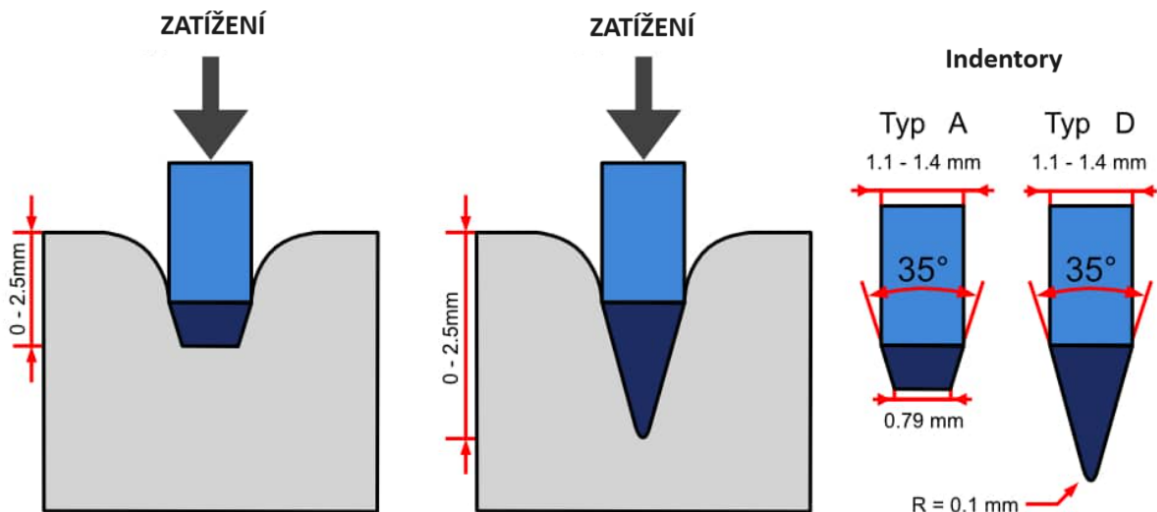


Obr. 20 Poldiho kladívko [14]

Baumannovo kladívko pracuje na stejném principu, jako Poldiho kladívko s jedním rozdílem, že není potřeba použití porovnávacího vzorku, protože rázová energie k vytvoření stopy je vyvolána pružinou. [16]

b) Metoda podle Shore – jedná se o vnikající dynamickou zkoušku, během které dochází ke vtlačování tělíska, jehož geometrie se liší podle typu zkoušky, do testovaného vzorku rázovou silou pomocí kalibrované pružiny ve směru kolmém k povrchu vzorku. Tato metoda se používá zejména na měření tvrdosti u elastomerů, pryží a některých plastů. Podle testovaného materiálu se volí vhodná stupnice, kterých se používá přibližně patnáct. Nejznámější a nejpoužívanější stupnice jsou Shore A a Shore D. [18]

U stupnice Shore A indenter tvoří kovový zkosený kužel, jehož úhel je 35° , s tupým koncem (viz Obr. 21). Tato stupnice je určena především pro měkčí pryže. Durometry se stupnicí Shore D se používají pro tvrdší polymery (např. termoplasty) a má ostrý indenter se stejným úhlem. Stupnice se liší i velikostí zatěžující síly. Velikost tvrdosti je určena podle velikosti vychýlení pružiny. Např. u stupnice Shore A platí, že každých 0,001 palce, o kterých se pružina vychýlí, odpovídá 1 stupni Shore A. [18]



Obr. 21 Typy indenterů u zkoušek tvrdosti Shore A, Shore D [18]

Dynamické zkoušky tvrdosti, do kterých se dále řadí např. Shoreho skleroskop nebo duroskop, bývají méně přesné než zkoušky statické, a proto jsou v praxi podstatně méně používány. Používají se ve výrobě jako kontrolní zkoušky. [16]

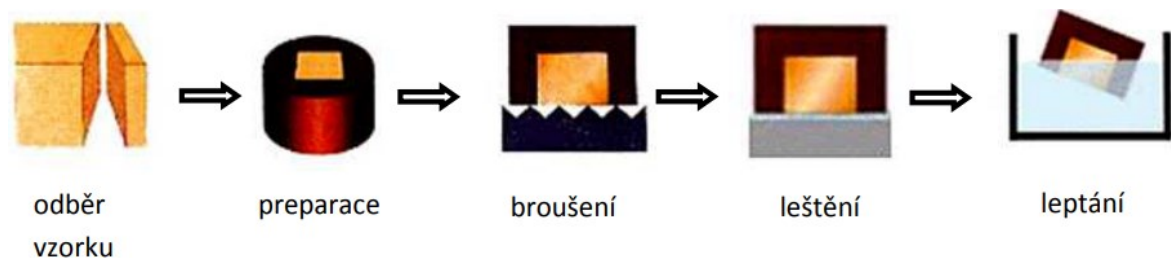
Dynamické měření tvrdosti zároveň nachází uplatnění u měření rozměrově velkých vzorků a vzorků obtížně měřitelných jinými metodami, a také tam, kde je vyžadováno přenosné řešení měřicího zařízení. [15]

4 METALOGRAFIE

Vnitřní stavbou kovů a slitin se zabývá nauka nazývaná metalografie. Vnitřní stavba kovových materiálů má přímý vliv na jejich fyzikální, mechanické a technologické vlastnosti. Cílem je zviditelnění a studium struktury kovu/slitiny pomocí optické/elektronové mikroskopie a zjištění souvislostí mezi strukturou a vlastnostmi, které zkoumaný materiál má. Zaobírá se také hledáním příčin vad. Znalost všech těchto informací je klíčová pro konstruktéry a technology, kteří rozhodují o volbě vhodného materiálu a využití jeho nejlepších vlastností. [5], [20]

4.1 Příprava vzorku pro metalografickou zkoušku

Samotnému mikroskopickému zkoumání struktury předchází příprava vzorků. Etapy přípravy mají několik fází (viz Obr. 22). Výstupem přípravy musí být vzorky dokonale rovné a hladké, aby dokázaly co nejvíce odrazit dopadající světlo u optických mikroskopů. [20]



Obr. 22 Příprava vzorku pro pozorování [20]

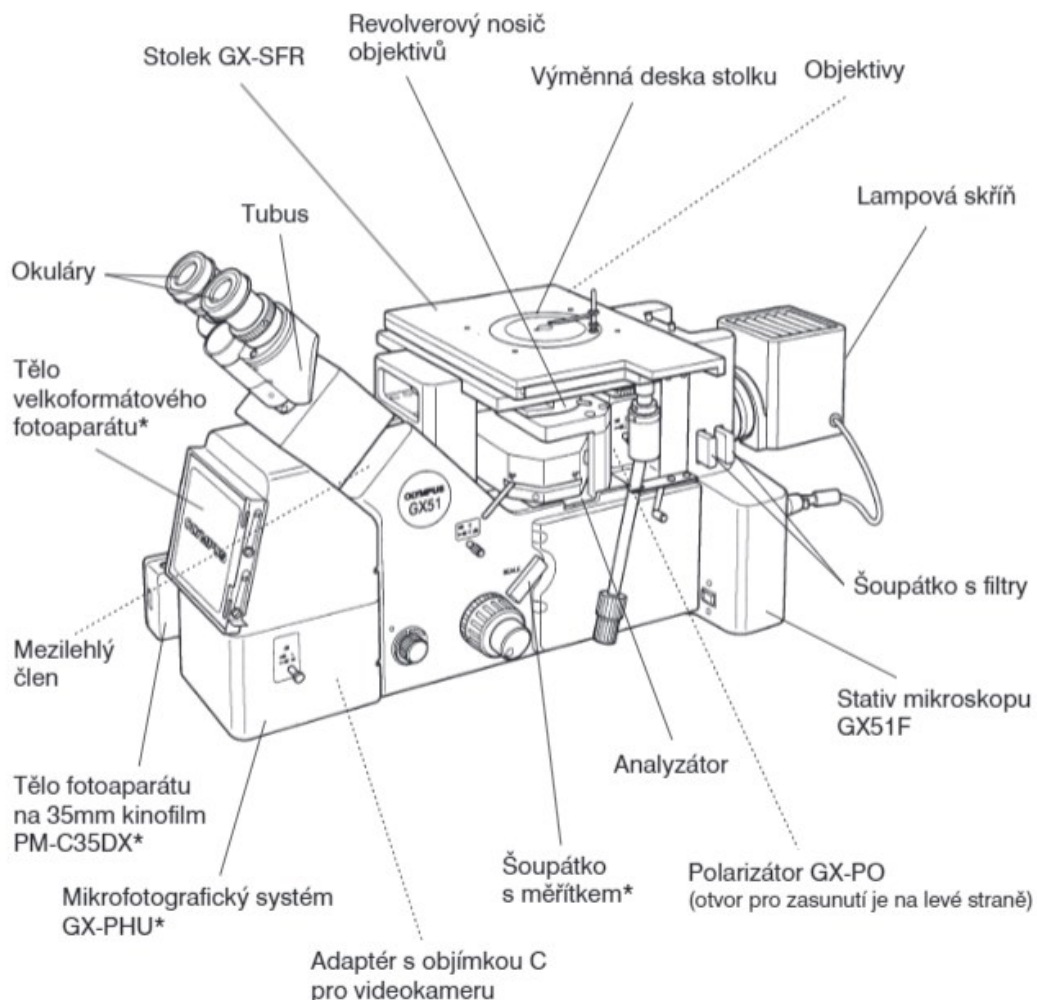
Jednotlivé kroky přípravy vzorků (metalografických výbrusů):

- 1) **Odběr vzorku** – technika odběru má velký význam na strukturu materiálu, proto je důležité dbát na způsob odběru. Vzorek musí plně charakterizovat studovaný materiál. Pro odebírání se používají metody dělení, řezání, stříhání a abrazivní rozbrušování za mokra.
- 2) **Preparace** – zalisování nebo zalití do umělé hmoty, používá se v některých případech, zejména u vzorků malých rozměrů.
- 3) **Broušení** – slouží k odstranění povrchových deformací a získání minimální povrchové nerovnosti vzorku. Používají se metalografické brusky s brusnými papíry.
- 4) **Leštění** – používá se k získání zrcadlového povrchu a vymizení rýh po posledním nejjemnějším broušení. Používá se mechanické leštění nebo speciální pasty a emulze.
- 5) **Leptání** – cílem je provedení chemické reakce se strukturními složkami za účelem zviditelnění a zvýraznění struktury pro pozorování. Používá se např. kyselina dusičná. [20]

4.2 Pozorování vzorku a vyhodnocení zkoušky

V metalografických laboratořích se užívají zejména světelné mikroskopy (viz Obr. 23), což jsou velmi přesné přístroje fungující podle fyzikálních zákonů světelné optiky. Tyto mikroskopy sice neumožňují krystalografickou definici a chemickou analýzu jednotlivých fází, ale jsou vhodné k pozorování a stanovení struktury materiálů. [16]

Světelnou mikroskopií lze kromě struktury zjistit i přibližné chemické složení, velikost, tvar i způsob rozložení jednotlivých strukturních součástí, množství, tvar i způsob vyloučení nekovových vměstků, příčiny porušení materiálu, vhodnost materiálu pro určitou aplikaci nebo jakost tepelného zpracování. Pro stanovení závěru této zkoušky je nezbytné, aby pozorovatel měl znalosti z metalografie a dokázal vyhodnotit, co je v mikroskopu vidět. [16]



Obr. 23 Inverzní metalografický mikroskop Olympus GX51 [21]

Zvětšení u mikroskopů je přibližně 50 – 1000x, v případě zvětšení menší než 20x se nejedná o mikroskopii, ale o makroskopii, jejímž cílem je přehledný obraz struktury, nikoliv tak detailní. [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V bakalářské práci byly stanoveny následující cíle:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Provedení výroby dílů s různými podmínkami tepelného zpracování.
3. Provedení měření mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Teoretická část této práce se v první kapitole soustředí na charakterizaci ocelí, jejich rozdělení a značení podle používaných norem. Hlavní část literární studie popisuje technologii a druhy tepelného zpracování. Zejména se zaměřuje na popis průběhů různých druhů žíhání a kalení. Následně obsahuje popis problematiky chemicko-tepelného zpracování ocelí a základních zařízení pro ohřev materiálů. Další kapitola se zabývá definicí mechanických vlastností a detailně popisuje způsoby měření tvrdosti a vyhodnocení těchto zkoušek. Poslední kapitola se věnuje metalografii a zkoumání materiálové struktury.

Cílem praktické části bylo provést tepelné zpracování u zvolené oceli 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12) při různých podmínkách a zkoumat vliv těchto podmínek na mechanické vlastnosti, které byly zjišťovány prostřednictvím Rockwellova tvrdoměru, stupnice HRC. Poté byla provedena diskuze výsledků získaných během experimentu. Navíc byla provedena i metalografická zkouška některých vzorků.

6 VÝBĚR A POPIS VZORKU PRO EXPERIMENT

Pro praktickou část byly zvoleny vzorky z kruhové tyče z oceli 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12). Jedná se o podeutektoidní, nízkolegovanou ocel určenou k zušlechtnění. Je vhodná k použití u velmi namáhaných strojních součástí včetně nitridovaných ozubených kol a vzhledem ke své vysoké prokalitelnosti je použitelná i pro velké výkovky. [22]

Tab. 3 Chemické složení zvolené oceli [22]

Prvek:	C	Mn	Si	Cr	V	P	S
Koncentrace [hm. %]:	0,24-0,34	0,40-0,80	0,17-0,37	2,20-2,50	0,10-0,20	max. 0,035	max. 0,035

Chemické složení zvolené oceli je uvedeno v Tab. 3. Vliv obsažených prvků na vlastnosti oceli:

- Uhlík: obsažen kolem 0,3 hm. %, základní prvek oceli, vyšší množství uhlíku zvyšuje pevnost a prokalitelnost (pro tyče zvolené oceli: $R_{mmax} = 780$ MPa), ale klesá tažnost, svařitelnost a obrobitelnost.
- Mangan: obsažen 0,4 – 0,8 hm. %, zvyšuje prokalitelnost, mez kluzu a mez pevnosti, způsobuje dezoxidaci, se sírou vytváří siřníky manganu, které snižují nežádoucí vliv síry, austenitotvorný prvek – otvírá oblast γ , neomezená rozpustnost v železe γ , v malé míře v železe α .
- Křemík: obsažen 0,17 – 0,37 hm. %, pozůstatek železné rudy, napomáhá dezoxidaci, zvyšuje pevnost a odolnost proti opotřebení, významně zvyšuje mez pevnosti, zvyšuje také žáruvzdornost a mez únavy, mírně zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popouštění, částečná rozpustnost v železe α i v železe γ , uzavírá oblast γ .
- Chrom: obsažen 2,2 – 2,5 hm. %, zvyšuje odolnost proti opotřebení, významně zvyšuje pevnost v tahu a snižuje tvorbu okují, podporuje vznik popouštěcí křehkosti, částečná rozpustnost v železe α i v železe γ . Zastoupen nad hranicí mezního obsahu.
- Vanad: obsažen 0,1 – 0,2 hm. %, zjemňuje zrno a v důsledku i strukturu, zvyšuje odolnost proti opotřebení, silně karbidotvorný, zvětšuje prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, neomezená rozpustnost v železe α , částečná v železe γ . Vanad je obsažen nad hranicí mezního obsahu (viz Tab. 1).
- Fosfor a síra: obsaženy max. 0,035 hm. %, škodlivé prvky, ve většině ocelí působí negativními vlastnostmi. [5], [23]

Technologické údaje			
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ			
normalizační žíhání	860–900 °C	ochlazovat na vzduchu	
kalení	830–880 °C	ochlazovat ve vodě (tlusté kusy)	
	850–890 °C	ochlazovat v oleji (součásti do Ø 60 mm)	
popouštění	550–650 °C	ochlazovat ve vodě (velké výkovky na vzduchu)	
žíhání na měkko	700–740 °C	ochlazovat v peci	
nitridování	490–510 °C		
teploty přeměn	$A_{c1} \sim 770 \text{ °C}$	$A_{c3} \sim 820 \text{ °C}$	$M_s \sim 370 \text{ °C}$
tvrdost nitridační vrstvy	750 HV5		
prokalitelnost	95 mm (voda)	65 mm (olej)	
povrchová tvrdost při povrchovém kalení	$\varnothing \leq 40 \text{ mm}$	49±3 HRC	
	41–100 mm	48±3 HRC	

Obr. 24 Technologické údaje pro tepelné zpracování zvolené oceli [22]

Z technologických údajů (Obr. 24) uvedených v materiálovém listě zvolené oceli vyplývá, že teploty kalení pro ochlazování ve vodě jsou 830 – 880 °C, a pro ochlazování v oleji jsou 850 – 890 °C. Popouštěcí teploty jsou 550 – 650 °C. Z těchto dat se vycházelo při volbě teplot kalení a popouštění.



Obr. 25 Ukázka dvou připravených vzorků na tepelné zpracování

Vzorky pro tepelné zpracování se nacházely v již naděleném stavu (viz Obr. 25). Průměr vzorků byl přibližně 25 mm, délka 20 mm. Bylo potřeba 40 ks vzorků, které byly následně zpracovány při různých podmínkách tepelného zpracování a 1 vzorek, který nebyl tepelně zpracován.

7 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ

Kalení a popouštění vzorků bylo provedeno na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC v laboratoři Ústavu výrobního inženýrství FT UTB. Ochlazování bylo u kalení provedeno do vody a oleje, u popouštění probíhalo na vzduchu.



Obr. 26 Kalící pracoviště SKM

7.1 Podmínky tepelného zpracování

Vzorky byly zpracovávány za různých kalících teplot a různých dob výdrže. Zvolené podmínky tepelného zpracování jsou uvedeny v Tab. 4 pro vzorky, které byly kaleny ve vodě a v Tab. 5 pro vzorky, které byly kaleny do oleje.

Kalící teploty byly zvoleny podle materiálového listu zvolené oceli. Byly zvoleny minimální a maximální doporučené teploty, prostřední teplota a vždy jedna teplota, která překračuje interval doporučených teplot z obou stran o 20 °C, tedy teplota menší než minimální doporučená a teplota vyšší než maximální doporučená. Tyto teploty, přesahující interval doporučených teplot, byly zvoleny se záměrem zjistit změnu vlastností zvoleného materiálu

i za hranicemi doporučených teplot, respektive jaké tvrdosti zvolená ocel dosáhne mimo doporučené kalící teploty.

Popouštěcí teplota byla pro všechny vzorky stejná, bez ohledu na kalící teplotu a dobu výdrže. Popouštěcí teplota byla zvolena 580 °C, což je teplota o 30 °C vyšší než teplota minimální doporučená a o 70 °C menší než teplota maximální doporučená.

Z hlediska doby výdrže na kalící teplotě byly stanoveny čtyři časy pro každou teplotu, a to 30, 60, 90 a 120 min. Doba výdrže na popouštěcí teplotě byla stanovena pro všechny vzorky 120 min.

Pro ochlazování při kalení se použily dvě chladící média – voda a olej s označením MOGUL TK 46, učený pro tepelné zpracování kovů a přenos tepla od firmy PARAMO, a.s.

Ochlazování při popouštění probíhalo na klidném vzduchu.

Tab. 4 Podmínky tepelného zpracování pro vzorky kalené do vody

Ocel 15 230 Cr - V						
Kalící médium	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Popouštěcí médium	Číslo vzorku
Voda	810	30	580	120	Vzduch	1
		60				2
		90				3
		120				4
	830	30				5
		60				6
		90				7
		120				8
	855	30				9
		60				10
		90				11
		120				12
	880	30				13
		60				14
		90				15
		120				16
	900	30				17
		60				18
		90				19
		120				20

Tab. 5 Podmínky tepelného zpracování pro vzorky kalené do oleje

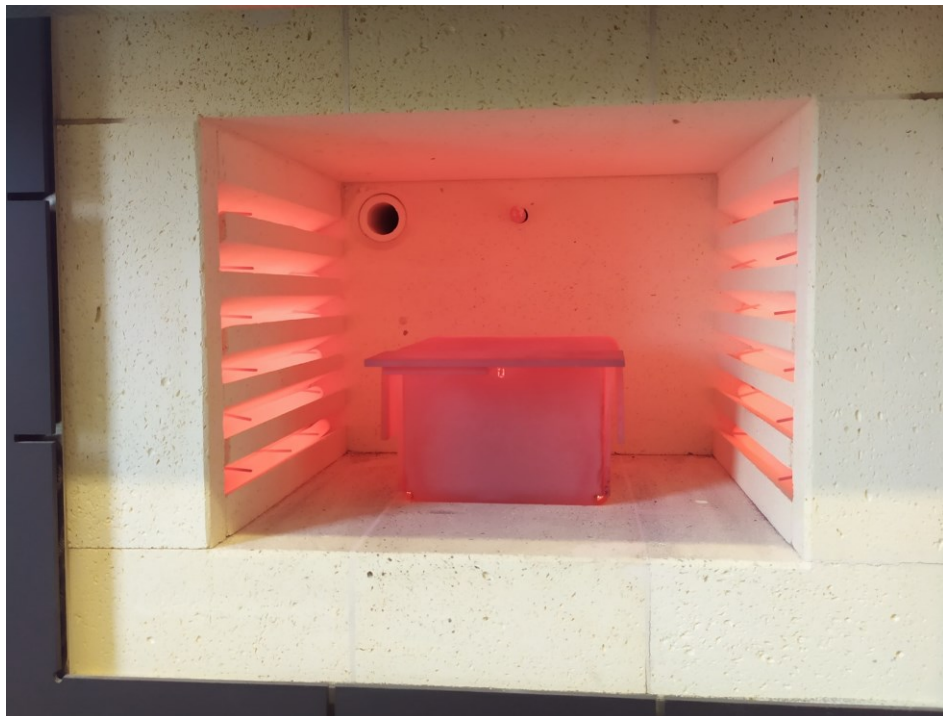
Ocel 15 230 Cr - V						
Kalící médium	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Popouštěcí médium	Číslo vzorku
Olej	830	30	580	120	Vzduch	21
		60				22
		90				23
		120				24
	850	30				25
		60				26
		90				27
		120				28
	870	30				29
		60				30
		90				31
		120				32
	890	30				33
		60				34
		90				35
		120				36
	910	30				37
		60				38
		90				39
		120				40

7.2 Průběh tepelného zpracování

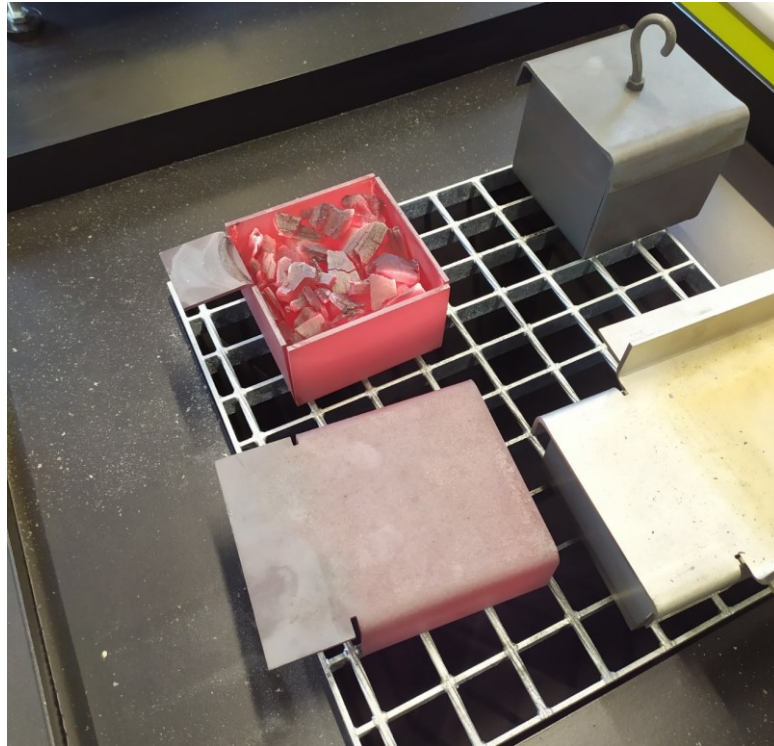
Průběh tepelného zpracování byl následující:

1. Kalící pec byla vytemperována na kalící teplotu.
2. Čtyři vzorky byly vloženy do plechové krabičky a zasypány dřevěným uhlím, aby během kalení nedocházelo k oduhličování vzorků, krabička byla uzavřena.
3. Po vytemperování pece byla krabička se vzorky vložena do pece, po vyrovnání teplot bylo spuštěno měření doby výdrže.
4. Po 30, 60 a 90 min byla krabička vyňata z pece a odebral se vždy jeden vzorek, který se ihned ochladil ve vodě, nebo v oleji. Krabička byla v co nejkratším čase uzavřena a vložena zpět do pece. Po 120 min se odebral poslední vzorek a krabička se nechala ochladit na vzduchu. Každý vzorek byl označen pořadovým číslem, aby nedošlo k promíchání.
5. Po kalení došlo k měření tvrdosti zakalených vzorků pomocí Rockwellova tvrdoměru, stupnice HRC, a zaznamenání naměřených dat.

6. Popouštěcí pec byla vytemperována na popouštěcí teplotu.
7. Vzorky byly vloženy do popouštěcí pece a po vyrovnání teplot bylo spuštěno měření doby výdrže.
8. Po 120 min byly vzorky vyňaty z pece a ochlazeny na klidném vzduchu.
9. Po popouštění došlo k měření tvrdosti zušlechtěných vzorků pomocí Rockwellova tvrdoměru, stupnice HRC, a zaznamenání naměřených dat.
10. Postup se opakoval pro další kalící teplotu a další čtyři vzorky.



Obr. 27 Plechová krabička se vzorky v kalící peci



Obr. 28 Vzorky v krabičce zasypané dřevěným uhlím po vyjmutí z pece



Obr. 29 Zakalené vzorky, vlevo ve vodě, vpravo v oleji

8 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Pro měření mechanických vlastností byla zvolena metoda měření tvrdosti podle Rockwella, stupnice HRC, podle normy ČSN EN ISO 6508. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších statických zkoušek tvrdosti. U provedení této zkoušky není potřeba úprava povrchu měřených objektů. Měření tvrdosti probíhalo ve stejné laboratoři jako tepelné zpracování.

8.1 Průběh měření tvrdosti

Měření probíhalo na tvrdoměru Rockwell HR – 150A (viz Obr. 30). Za vnikající tělísko (indentor) byl zvolen diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , stupnice HRC.

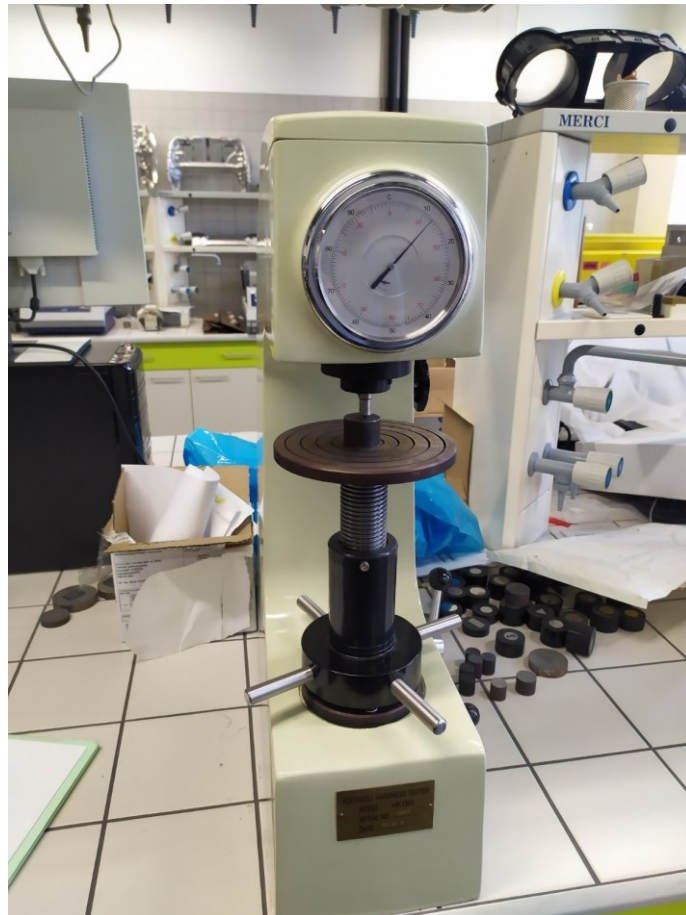
Průběh měření tvrdosti byl následující:

1. Postupně a jednotlivě se vzorky umisťovaly na posuvnou kruhovou plochu pod indentor.
2. Ručním otáčením vřetene se docílilo vtlačení indentoru do vzorku s předběžným zatížením F_0 (viz Tab. 6), což znázorňovala malá ručička na stupnici.
3. Po nastavení předběžného zatížení se vynulovala analogová stupnice.
4. Prostřednictvím páky na pravé straně tvrdoměru se spustilo nastavené přídavné zatížení F_1 . (viz Tab. 6)
5. Po 3 – 6 s se páka ručně vrátila do původního stavu, došlo k odlehčení na předběžné zatížení a odečetla se hodnota tvrdosti ze stupnice HRC. (stupnice viz Obr. 31)
6. Otáčením vřetene sjela dolů posuvná kruhová plocha a opakovalo se měření v dalším místě vzorku, celkem 10 měření pro jeden vzorek.

Tab. 6 Podmínky průběhu zkoušky podle Rockwella

Tvrdoměr:	Rockwell HR - 150A
Stupnice:	HRC
Indentor:	diamantový kužel
Předběžné zatížení F_0 [N]:	98,07
Přídavné zatížení F_1 [N]:	1373
Celkové zatížení F [N]:	1471
Rozsah použití [HRC]:	20 až 70

Tvrdost podle této metody se měřila u jednoho tepelně nezpracovaného vzorku, u všech zakalených vzorků a poté i u všech popouštěných vzorků.



Obr. 30 Tvrdoměr Rockwell HR - 150A v laboratoři



Obr. 31 Analogová stupnice použitého tvrdoměru

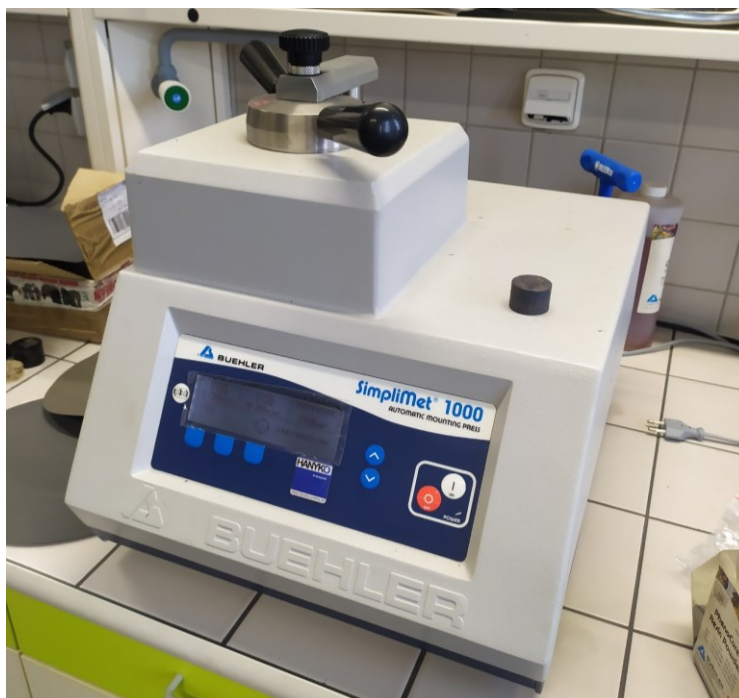
9 METALOGRAFICKÁ ZKOUŠKA – POZOROVÁNÍ STRUKTURY

Nad rámec stanovených cílů bakalářské práce byla provedena metalografická zkouška několika vzorků po tepelném zpracování. Byla provedena optická mikroskopie, během níž byla pomocí metalografického mikroskopu zkoumána struktura materiálu. Tato zkouška proběhla rovněž ve stejné laboratoři, kde bylo provedeno tepelné zpracování a měření mechanických vlastností.

9.1 Průběh přípravy vzorků

Průběh přípravy vzorků pro metalografickou zkoušku byl následující:

1. Jednotlivě se tepelně zpracované vzorky zalisovaly do umělé hmoty, aby byly snadno upnutelné do metalografické brusky. K tomu bylo použito přístroje SimpliMet 1000 od firmy Buehler (viz Obr. 32). Vzorek se vložil do tohoto přístroje a zasypal se určitým množstvím prášku s označením PhenoCure Powder od stejné firmy. Poté se lis ručně uzavřel a spustil. Vlivem zvýšené teploty a tlaku došlo k zalisování. Poté se vzorek ochlazoval určitou dobu přímo v přístroji. Nakonec se lis ručně otevřel a vyjmul se vzorek. Podmínky lisování jsou uvedeny v Tab. 7.



Obr. 32 Přístroj na zalisování vzorků Buehler SimpliMet 1000

2. Zalisované vzorky se vložily do metalografické brusky/leštičky AutoMet 250 od firmy Buehler, kde se najednou vejde až šest vzorků (viz Obr. 33). Celkem byly použity čtyři typy

brusných papírů, které se lišily v zrnitosti (hrubosti). Nejprve byl použit papír s označením P180, následně P320, P600, P1200. Pro leštění vzorků bylo použito plátno a dva typy past, nejprve 9 μm diamantová pasta a poté 3 μm diamantová pasta. Podmínky broušení jsou uvedeny v Tab. 7.



Obr. 33 Metalografická bruska/leštička Buehler AutoMet 250

Tab. 7 Zvolené nastavení u zařízení Buehler při úpravě vzorků

Pracovní podmínky zařízení Buehler			
Lis SimpliMet 1000		Bruska/leštička AutoMet 250	
Teplota [°C]:	150	Čas [min]:	10 – 20
Tlak [bar]:	290	Přítlačná síla [N]:	20
Doba ohřevu [min]:	1,5	Otáčky vzorků [ot/min]:	40
Doba chlazení [min]:	4	Otáčky brusiva [ot/min]:	100
Velikost formy [mm]:	40	Chlazení:	voda

9.2 Pozorování struktury

K pozorování struktury metalografických výbrusů byl použit inverzní stolní metalografický mikroskop DMI 3000 M od firmy Leica (na Obr. 34). Jedná se o velmi spolehlivý optický mikroskop, jenž slouží pro měření a sledování povrchů, zkoumání mikrostruktury materiálů včetně složení kompozitních materiálů. Maximální zvětšení tohoto zařízení je 1000x. Je kompatibilní s počítačem a fotoaparátem.



Obr. 34 Metalografický stolní mikroskop DMI 3000 M od firmy Leica [24]

Před samotným pozorováním struktury na mikroskopu bylo nutné z důvodu zvýraznění zrn vyleptat povrch metalografických výbrusů. Z tohoto důvodu byla na jejich povrchy nanesena kyselina po dobu 20 – 30 min. Poté byly vzorky očištěny od kyseliny a postupně vloženy na pozorovací místo mikroskopu.

10 NAMĚŘENÁ DATA A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Naměřená data byla získána ze zkoušky tvrdosti podle Rockwella, stupnice HRC. Celkem byla tvrdost zjišťována u 41 ks vzorků, z čehož bylo získáno celkem 810 naměřených hodnot. Měření každého vzorku po daném zpracování probíhalo 10x. Tento objem dat byl následně zpracován prostřednictvím tabulek a grafů. Pro vyhodnocení byly použity tyto vzorce:

- Vzorec pro výpočet průměrné hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky:

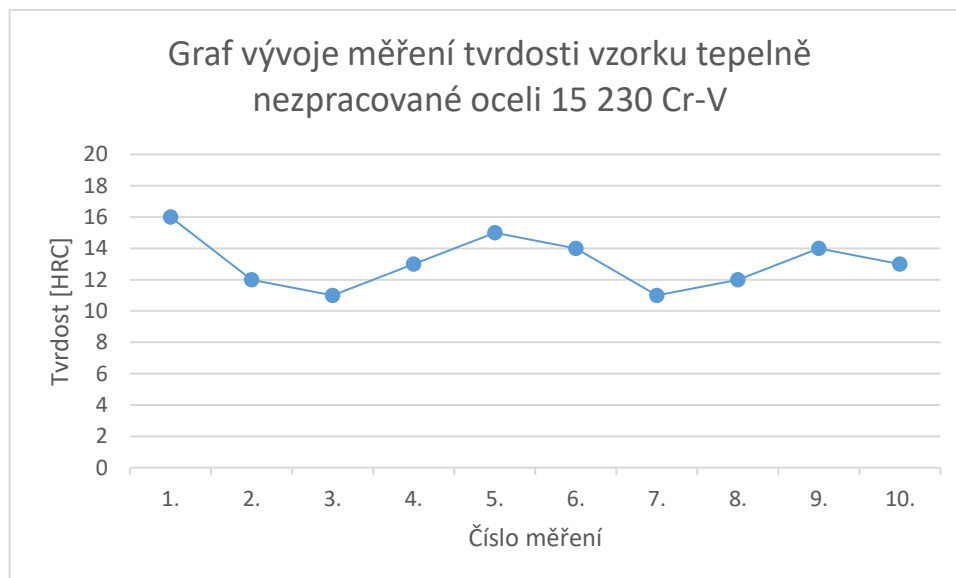
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

10.1 Vzorek bez tepelného zpracování

Tab. 8 Naměřené hodnoty tvrdosti zvolené oceli bez tepelného zpracování

Číslo měření	Tvrdost [HRC]
1.	16
2.	12
3.	11
4.	13
5.	15
6.	14
7.	11
8.	12
9.	14
10.	13
\bar{x}	13,1
σ	1,6

Z naměřených hodnot vyplývá, že průměrná tvrdost vzorku zvolené oceli bez tepelného zpracování je $\bar{x} = (13,1 \pm 1,6)$ HRC. Tato hodnota tvrdosti je poměrně nízká a v mnoha aplikacích by vzhledem k této tvrdosti byla zvolená ocel bez tepelného zpracování nevyhovující. Z Obr. 35, kde jsou vidět naměřené hodnoty tvrdosti podle čísla měření, vyplývá, že naměřená data neobsahují odlehlé hodnoty.



Obr. 35 Tvrdost zvolené oceli bez tepelného zpracování

10.2 Vzorky kalené do vody a následně popouštěné

Následující výsledky měření tvrdosti vzorků zvolené oceli kalených do vody jsou rozděleny podle velikosti kalící teploty na 5 podkapitol. Kalící teploty byly 810, 830, 855, 880, 900 °C. V každé podkapitole jsou uvedeny i výsledky měření tvrdosti popouštěných vzorků. Pro přehlednost jsou vzorky v tabulkách a grafech označeny čísly 1 – 20.

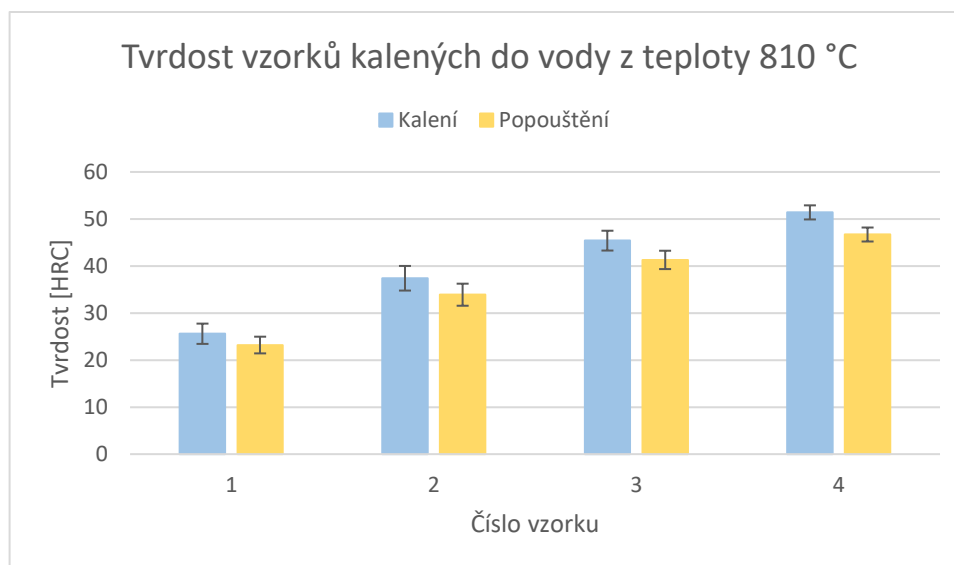
10.2.1 Kalící teplota 810 °C

Tab. 9 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 1 – 4

Číslo vzorku:	1	2	3	4
Chladící médium:	voda			
Kalící teplota [°C]:	810			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	29	36	42	52
2.	26	37	43	51
3.	24	39	48	53
4.	23	37	44	52
5.	22	35	45	51
6.	27	40	46	50
7.	27	40	46	53
8.	24	42	49	53
9.	26	34	44	51
10.	28	34	47	48
\bar{x}	25,6	37,4	45,4	51,4
σ	2,2	2,6	2,1	1,5

Tab. 10 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 1 – 4

Číslo vzorku:	1	2	3	4
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	26	33	38	49
2.	24	34	39	46
3.	22	35	44	48
4.	21	34	40	47
5.	20	32	41	46
6.	24	36	42	45
7.	24	36	42	48
8.	22	38	44	48
9.	24	31	40	46
10.	25	30	43	44
\bar{x}	23,2	33,9	41,3	46,7
σ	1,8	2,3	2,0	1,5



Obr. 36 Průměrná tvrdost vzorků č. 1 – 4 po kalení a popouštění

Kalící teplota 810 °C je o 20 °C menší než teplota minimální doporučená z materiálového listu zvolené oceli. Z výsledků měření a Obr. 36 vyplývá, že za zvolených podmínek zpracování se tvrdost zvyšuje v závislosti na době výdrže. Nejvyšší tvrdost (51,4 HRC po kalení, 46,7 HRC po popouštění) byla zjištěna u vzorku č. 4, jehož doba výdrže na kalící teplotě byla 120 min. U kaleného vzorku byl nárůst tvrdosti oproti tepelně nezpracovanému vzorku o více než 290 %. Kdežto u vzorku č. 1 byl tento nárůst pouze o 95 %. U všech vzorků došlo v důsledku popouštění k očekávanému poklesu tvrdosti průměrně o 3,7 HRC.

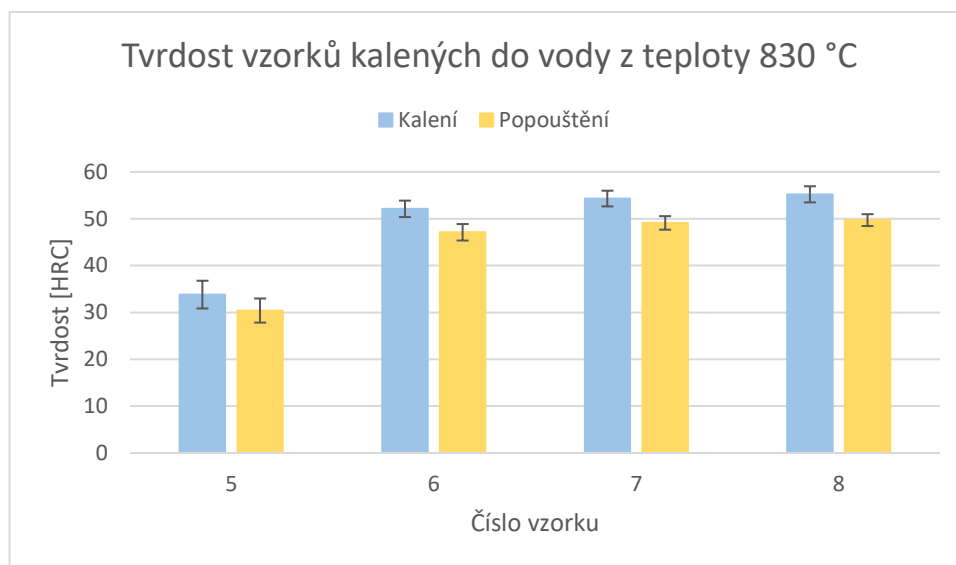
10.2.2 Kalicí teplota 830 °C

Tab. 11 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 5 – 8

Číslo vzorku:	5	6	7	8
Chladicí médium:	voda			
Kalicí teplota [°C]:	830			
Doba výdrže na kalicí teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	36	51	53	56
2.	40	50	54	54
3.	36	55	57	53
4.	32	51	54	58
5.	31	55	52	57
6.	29	53	53	54
7.	34	51	54	56
8.	32	53	57	57
9.	33	50	56	54
10.	35	52	53	53
\bar{x}	33,8	52,1	54,3	55,2
σ	3,0	1,8	1,7	1,7

Tab. 12 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 5 – 8

Číslo vzorku:	5	6	7	8
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	32	46	48	50
2.	36	45	49	49
3.	32	50	52	48
4.	29	46	49	52
5.	28	50	47	51
6.	26	48	48	49
7.	31	46	49	50
8.	29	48	51	51
9.	30	45	50	49
10.	31	47	48	48
\bar{x}	30,4	47,1	49,1	49,7
σ	2,6	1,8	1,4	1,3



Obr. 37 Průměrná tvrdość vzorků č. 5 – 8 po kalení a popouštění

Kalící teplota 830 °C je rovna minimální doporučené teplotě pro kalení do vody. Z naměřených hodnot tvrdości a Obr. 37 lze zjistit, že výsledná tvrdość vzorku č. 5 je výrazně menší než u vzorků č. 6, 7 a 8. Z toho lze usoudit, že doba výdrže na kalící teplotě 30 min, při níž byl vzorek č. 5 zpracován, je příliš krátká na dostatečnou austenitizaci materiálu. U vzorků č. 6, 7 a 8 se tvrdość v závislosti na době výdrže stále pozvolna zvyšuje, již není tak skoková, jako mezi vzorky č. 5 a 6. Nejvyšší tvrdość (55,2 HRC po kalení, 49,7 HRC po popouštění) měl vzorek č. 8, což je u kaleného vzorku nárůst o více než 320 %.

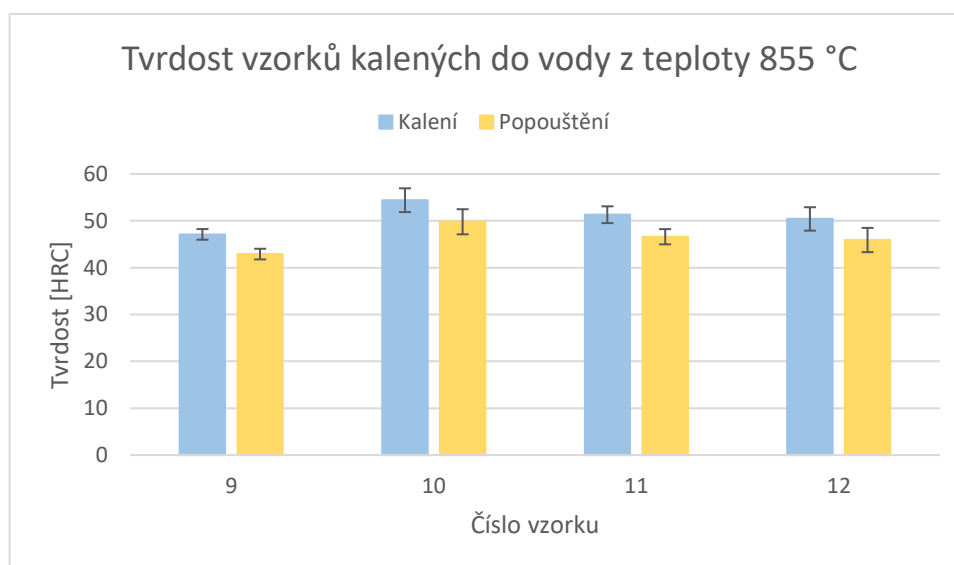
10.2.3 Kalící teplota 855 °C

Tab. 13 Naměřené hodnoty tvrdości kalených vzorků č. 9 – 12

Číslo vzorku:	9	10	11	12
Chladící médium:	voda			
Kalící teplota [°C]:	855			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdość [HRC]:			
1.	46	52	52	48
2.	48	58	53	47
3.	48	53	52	54
4.	47	54	48	48
5.	46	52	53	50
6.	45	52	51	55
7.	47	54	50	50
8.	48	55	49	51
9.	49	60	54	49
10.	47	54	51	52
\bar{x}	47,1	54,4	51,3	50,4
σ	1,1	2,5	1,8	2,5

Tab. 14 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 9 – 12

Číslo vzorku:	9	10	11	12
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	42	47	47	44
2.	45	53	48	43
3.	44	48	47	51
4.	43	49	44	43
5.	42	47	48	45
6.	41	47	48	50
7.	43	51	45	45
8.	44	52	45	46
9.	42	55	49	45
10.	43	49	45	47
\bar{x}	42,9	49,8	46,6	45,9
σ	1,1	2,7	1,6	2,6



Obr. 38 Průměrná tvrdost vzorků č. 9 – 12 po kalení a popouštění

Kalící teplota 855 °C je prostřední teplota v rozmezí doporučených teplot kalení do vody. Z naměřených hodnot a Obr. 38 vyplývá, že již neplatí, že se zvyšující se dobou výdrže na kalící teplotě roste tvrdost, jak to platilo u předchozích teplot 810 a 830 °C. Stále ale platí, že vzorek, který byl zpracováván na nejkratší době výdrže, tedy 30 min, má tvrdost nejnižší. V tomto případě se jedná o vzorek č. 9. Naopak nejvyšší tvrdosti (54,4 HRC po kalení, 49,8 HRC po popouštění) dosáhl vzorek č. 10, jehož doba výdrže na této kalící teplotě byla 60 min. Jedná se o nárůst tvrdosti o 315 % oproti tepelně nezpracovanému vzorku.

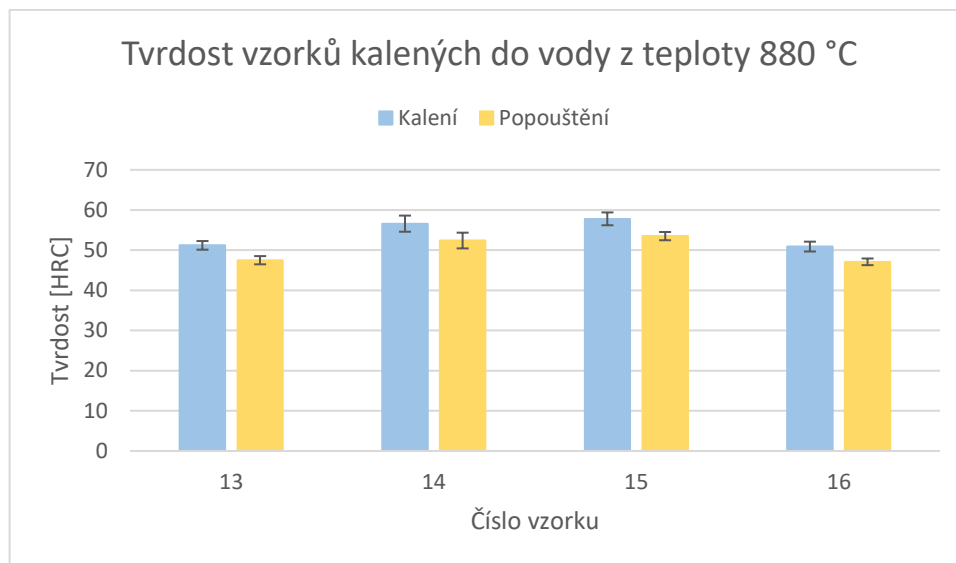
10.2.4 Kalící teplota 880 °C

Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 13 – 16

Číslo vzorku:	13	14	15	16
Chladící médium:	voda			
Kalící teplota [°C]:	880			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	52	54	59	52
2.	53	60	59	50
3.	50	54	56	52
4.	51	58	60	51
5.	52	57	58	50
6.	51	56	59	52
7.	51	55	55	51
8.	52	55	56	52
9.	49	58	59	51
10.	51	59	57	48
\bar{x}	51,2	56,6	57,8	50,9
σ	1,1	2,0	1,6	1,2

Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 13 – 16

Číslo vzorku:	13	14	15	16
Chladící médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	48	50	55	48
2.	49	55	54	46
3.	46	50	52	48
4.	47	54	55	47
5.	48	55	53	46
6.	47	52	54	48
7.	49	50	53	47
8.	48	51	52	48
9.	46	53	54	47
10.	47	54	53	46
\bar{x}	47,5	52,4	53,5	47,1
σ	1,0	2,0	1,0	0,8



Obr. 39 Průměrná tvrdost vzorků č. 13 – 16 po kalení a popouštění

Kalící teplota 880 °C je rovna maximální doporučené teplotě pro kalení do vody. Z naměřených hodnot tvrdosti a Obr. 39 vyplývá, že u této kalící teploty hraje výdrž na kalící teplotě nejmenší roli ze všech zvolených kalících teplot. Získané hodnoty tvrdosti jsou si mezi sebou nejvíce vyrovnané. Platí, že průměrná tvrdost vzorku č. 13 (51,2 HRC po kalení) je v podstatě totožná s průměrnou tvrdostí vzorku č. 16 (50,9 HRC také po kalení), i když rozdíl mezi těmito dvěma vzorky v době výdrže na kalící teplotě je 90 min. Tento rozdíl (0,3 HRC) s přehledem zahrnuje směrodatná odchylka obou průměrných hodnot. Začíná se projevovat, že 120 min je již příliš dlouhá doba výdrže při této kalící teplotě. Nejvyšší tvrdosti dosáhl vzorek č. 15 (57,8 HRC po kalení, 53,5 HRC po popouštění). Tento nárůst tvrdosti znamená u kaleného vzorku zvýšení o více než 340 % oproti vzorku tepelně neupraveném.

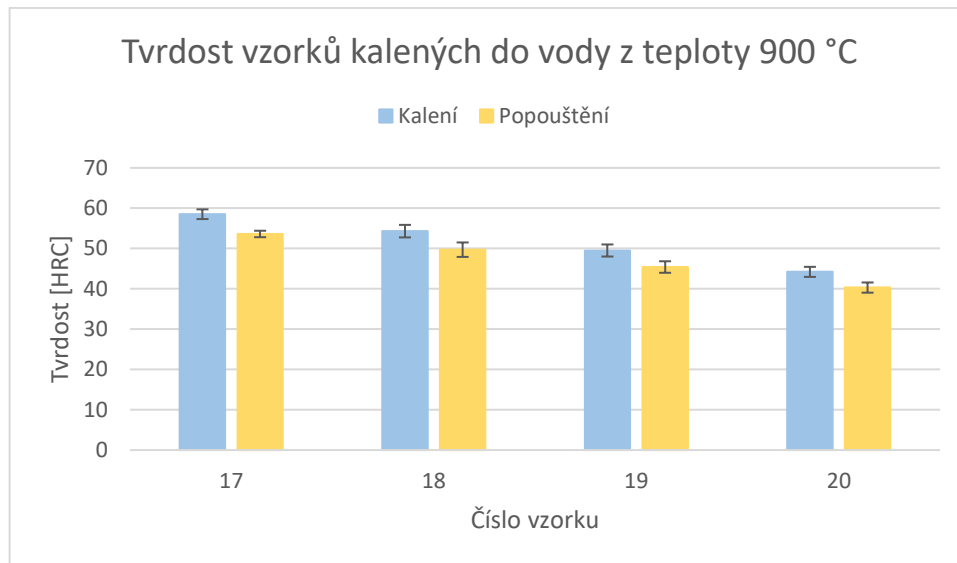
10.2.5 Kalicí teplota 900 °C

Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 17 – 20

Číslo vzorku:	17	18	19	20
Chladicí médium:	voda			
Kalicí teplota [°C]:	900			
Doba výdrže na kalicí teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	59	54	51	45
2.	60	53	50	46
3.	57	54	48	44
4.	59	54	51	46
5.	59	54	47	45
6.	56	55	51	42
7.	58	53	48	43
8.	59	52	51	44
9.	60	57	48	44
10.	58	57	50	43
\bar{x}	58,5	54,3	49,5	44,2
σ	1,2	1,6	1,5	1,2

Tab. 18 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 17 – 20

Číslo vzorku:	17	18	19	20
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	54	49	46	41
2.	53	48	45	42
3.	52	49	44	40
4.	54	51	47	42
5.	54	50	43	41
6.	54	50	46	38
7.	53	48	48	39
8.	54	47	46	40
9.	55	53	44	41
10.	53	52	45	39
\bar{x}	53,6	49,7	45,4	40,3
σ	0,8	1,8	1,4	1,3



Obr. 40 Průměrná tvrdost vzorků č. 17 – 20 po kalení a popouštění

Kalící teplota 900 °C je o 20 °C vyšší než teplota maximální doporučená z materiálového listu zvolené oceli. Z výsledků měření a Obr. 40 vyplývá, že za zvolených podmínek zpracování se tvrdost postupně snižuje v závislosti na době výdrže. Nejvyšší tvrdost byla naměřena u vzorku č. 17 (58,5 HRC po kalení, 53,6 HRC po popouštění), jehož doba výdrže na kalící teplotě byla pouze 30 min. Tato hodnota tvrdosti je úplně nejvyšší ze všech naměřených hodnot napříč všemi pěti kalícími teplotami. Lze usoudit, že při této kalící teplotě a při této době výdrže bylo dosaženo vrcholu tvrdosti, kterého lze u zvolené oceli vůbec dosáhnout za použitých podmínek zpracování. Tvrdost u tohoto kaleného vzorku činila nárůst o více než 345 % oproti tepelně nezpracovanému vzorku.

10.3 Vzorky kalené do oleje a následně popouštěné

Následující výsledky měření tvrdosti vzorků zvolené oceli kalených do oleje jsou rovněž rozděleny podle velikosti kalící teploty na 5 podkapitol, stejně jako v kapitole 10.2. Kalící teploty byly 830, 850, 870, 890, 910 °C. V každé podkapitole jsou uvedeny i výsledky měření tvrdosti popouštěných vzorků. Pro přehlednost jsou v tabulkách a grafech vzorky opatřeny čísly 21 – 40.

V komentářích výsledků se objevuje porovnání tvrdostí vzorků kalených v oleji se vzorky kalených ve vodě (z kapitoly 10.2). Vždy se jedná o porovnání výsledků získaných za použití srovnatelných kalících teplot. Vzorky kalené za mezních teplot, což jsou teploty překračující intervaly doporučených teplot o 20 °C, jsou porovnávány mezi sebou, rovněž tak vzorky kalené při minimálních, maximálních a středních doporučených teplotách.

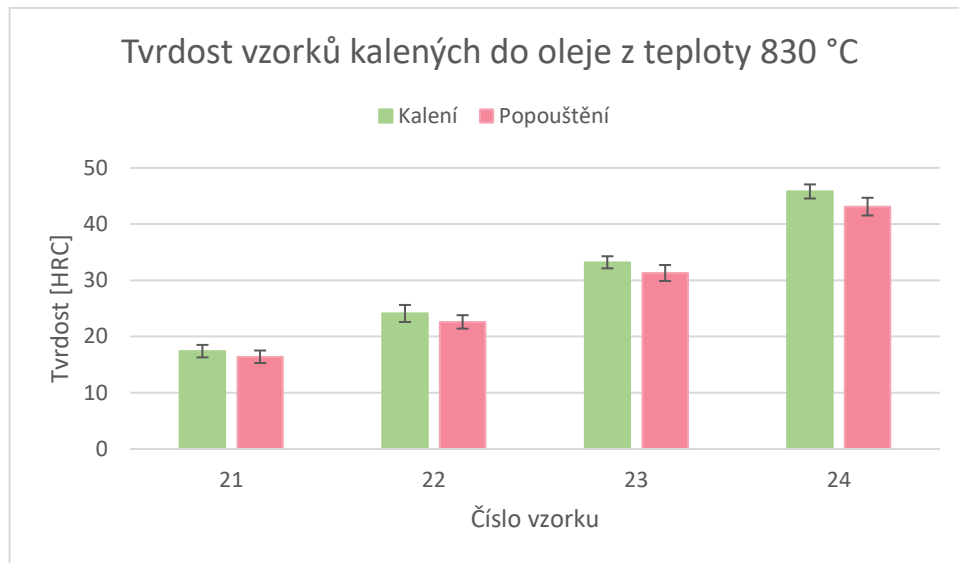
10.3.1 Kalící teplota 830 °C

Tab. 19 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 21 – 24

Číslo vzorku:	21	22	23	24
Chladící médium:	olej			
Kalící teplota [°C]:	830			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	19	22	31	47
2.	18	23	33	45
3.	17	24	34	44
4.	16	22	34	48
5.	19	26	33	46
6.	18	26	35	46
7.	18	24	32	45
8.	17	26	33	46
9.	16	23	34	47
10.	16	25	33	44
\bar{x}	17,4	24,1	33,2	45,8
σ	1,1	1,5	1,1	1,2

Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 21 – 24

Číslo vzorku:	21	22	23	24
Chladící médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	18	21	29	44
2.	17	22	31	46
3.	16	23	32	42
4.	15	21	34	45
5.	18	24	31	43
6.	17	24	33	41
7.	17	23	30	42
8.	16	24	31	43
9.	15	21	32	44
10.	15	23	30	41
\bar{x}	16,4	22,6	31,3	43,1
σ	1,1	1,2	1,4	1,6



Obr. 41 Průměrná tvrdost vzorků č. 21 – 24 po kalení a popouštění

První zvolená kalicí teplota 830 °C je o 20 °C menší než minimální doporučená teplota pro kalení do oleje z materiálového listu zvolené oceli. Z výsledků měření a Obr. 41 vyplývá, že platí stejný trend nárůstu tvrdosti vzorků v závislosti na době výdrže jako u vzorků zpracovaných při 810 °C a kalených do vody. U vzorků č. 21 – 24 je však získaná tvrdost značně nižší než u vzorků č. 1 – 4, zpracovaných za výše uvedených podmínek. Důvodem získání nižší tvrdosti je, že olej má pomalejší ochlazovací účinek než voda a vzniká tak struktura s nižší tvrdostí.

Nejvyšší tvrdosti (45,8 HRC po kalení, 43,1 HRC po pouštění) dosáhl vzorek č. 24, jehož doba výdrže na kalicí teplotě byla 120 min. Nárůst tvrdosti tohoto kaleného vzorku oproti tepelně nezpracovanému vzorku činí téměř 250 %. Kdežto u vzorku č. 21 je tento nárůst pouhých 33 %.

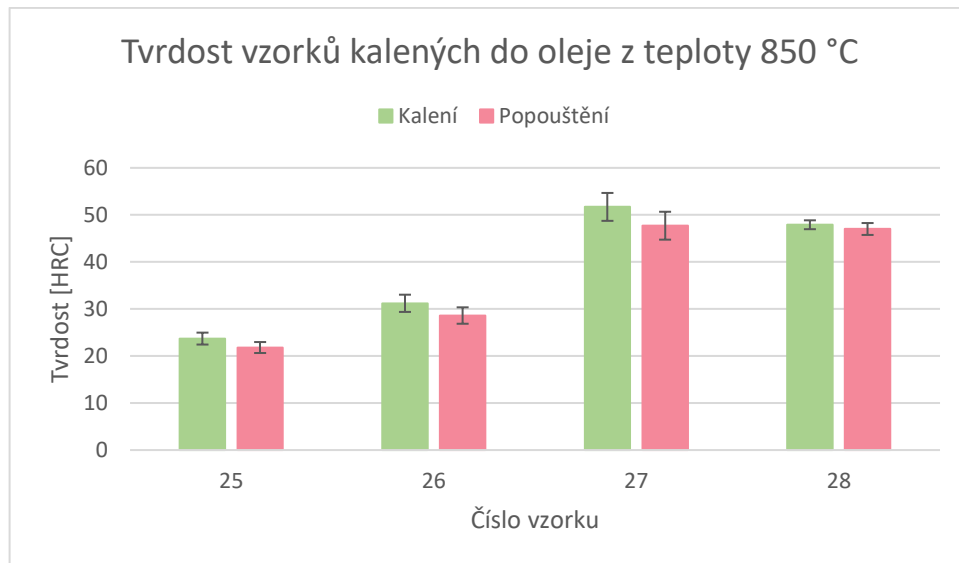
10.3.2 Kalicí teplota 850 °C

Tab. 21 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 25 – 28

Číslo vzorku:	25	26	27	28
Chladicí médium:	olej			
Kalicí teplota [°C]:	850			
Doba výdrže na kalicí teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	24	33	53	49
2.	23	31	52	50
3.	25	29	49	52
4.	23	35	49	51
5.	23	29	46	50
6.	22	31	54	51
7.	24	31	57	52
8.	25	32	51	51
9.	26	32	52	51
10.	22	29	54	52
\bar{x}	23,7	31,2	51,7	47,9
σ	1,3	1,8	3,0	0,9

Tab. 22 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 25 – 28

Číslo vzorku:	25	26	27	28
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	22	30	49	45
2.	21	28	48	46
3.	23	27	45	48
4.	24	27	45	47
5.	21	27	42	45
6.	20	28	50	47
7.	22	28	50	48
8.	23	29	47	49
9.	21	29	48	47
10.	21	33	53	48
\bar{x}	21,8	28,6	47,7	47
σ	1,2	1,7	3,0	1,3



Obr. 42 Průměrná tvrdost vzorků č. 25 – 28 po kalení a popouštění

Kalící teplota 850 °C je dolní hranicí z intervalu doporučených teplot pro kalení do oleje. U této teploty neplatí, že se získaná tvrdost zvyšuje s delší dobou výdrže, jelikož u vzorku č. 27 byla naměřena vyšší tvrdost než u vzorku č. 28, konkrétně 51,7 HRC po kalení, 47,7 HRC po popouštění. Nárůst tvrdosti představuje zvýšení o téměř 295 % u kaleného vzorku ku vzorku tepelně neupraveném. Oproti zpracování do vody a kalící teplotě 830 °C jsou tyto výsledky očekávaně nižší. Největší rozdíl je mezi vzorky č. 6 a č. 26, který je téměř 21 HRC.

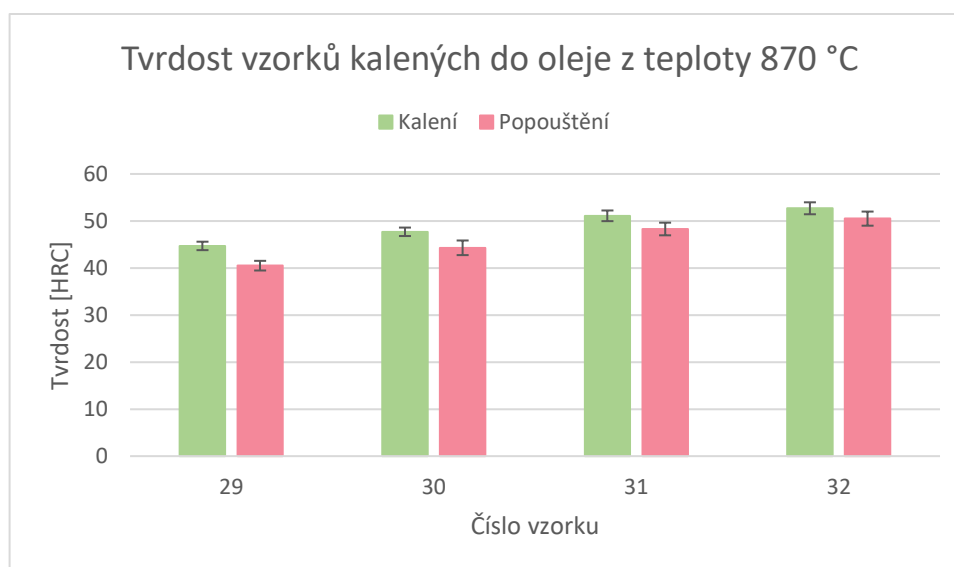
10.3.3 Kalící teplota 870 °C

Tab. 23 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 29 – 32

Číslo vzorku:	29	30	31	32
Chladící médium:	olej			
Kalící teplota [°C]:	870			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	45	47	52	53
2.	45	49	50	52
3.	44	48	50	51
4.	45	48	51	54
5.	44	47	52	51
6.	46	48	53	52
7.	45	47	49	52
8.	46	46	52	53
9.	43	49	51	54
10.	44	48	51	55
\bar{x}	44,7	47,7	51,1	52,7
σ	0,9	0,9	1,1	1,3

Tab. 24 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 29 – 32

Číslo vzorku:	29	30	31	32
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	40	43	49	51
2.	41	46	49	50
3.	40	44	47	53
4.	42	45	48	52
5.	39	43	49	48
6.	40	44	49	49
7.	41	43	45	50
8.	42	42	50	51
9.	39	46	49	52
10.	41	47	48	49
\bar{x}	40,5	44,3	48,3	50,5
σ	1,0	1,6	1,3	1,5



Obr. 43 Průměrná tvrdost vzorků č. 29 – 32 po kalení a popouštění

Kalící teplota 870 °C je střední teplota z rozsahu doporučených kalících teplot pro kalení do oleje. Z naměřených dat a Obr. 43 lze vidět, že získané průměrné hodnoty tvrdosti z jednotlivých vzorků nemají příliš velký rozptyl. Platí opět, že tvrdost postupně roste v závislosti na době výdrže. Nejvyšší tvrdosti (52,7 HRC po kalení, 50,5 HRC po popouštění) dosáhl vzorek č. 32, jenž měl nejdelší dobu výdrže (120 min). Nárůst tvrdosti kaleného vzorku činí vzhledem k tepelně nezpracovanému vzorku přibližně 300 %. Ze vzorků ochlazovaných ve vodě, kalených při střední teplotě (855 °C) měl nejvyšší nárůst

vzorek č. 10, jehož doba výdrže na kalící teplotě byla 60 min a nárůst tvrdosti byl podobný zmiňovanému vzorku č. 32, konkrétně 315 %.

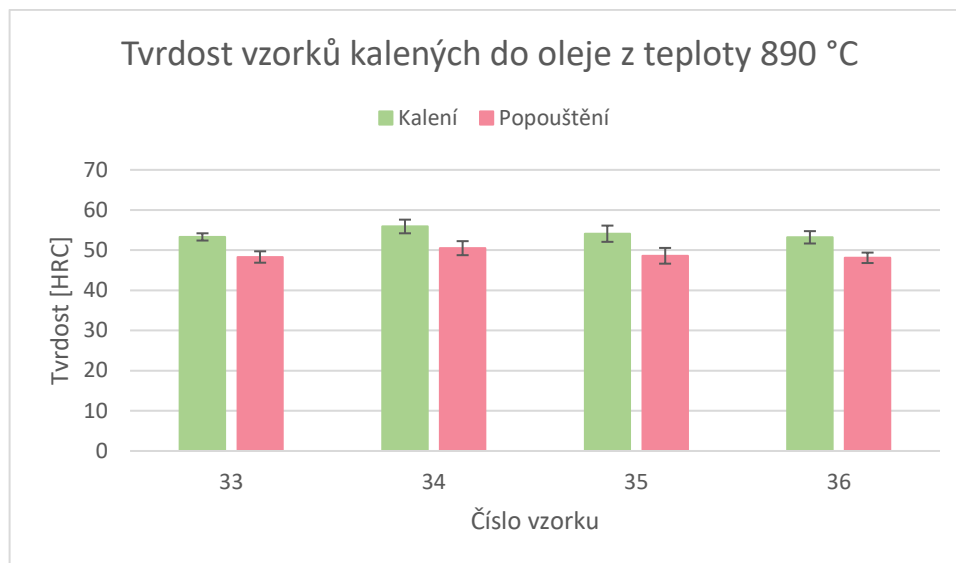
10.3.4 Kalící teplota 890 °C

Tab. 25 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 33 – 36

Číslo vzorku:	33	34	35	36
Chladící médium:	olej			
Kalící teplota [°C]:	890			
Doba výdrže na kalící teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	54	53	58	52
2.	54	58	55	54
3.	52	54	52	53
4.	53	57	57	53
5.	53	54	53	54
6.	53	57	54	57
7.	54	56	52	52
8.	55	57	53	51
9.	52	58	52	53
10.	53	55	55	53
\bar{x}	53,3	55,9	54,1	53,2
σ	0,9	1,7	2,0	1,5

Tab. 26 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 33 – 36

Číslo vzorku:	33	34	35	36
Chladící médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	51	48	51	47
2.	49	54	52	46
3.	47	49	47	48
4.	48	52	51	48
5.	46	49	48	49
6.	48	51	46	51
7.	49	50	47	47
8.	50	51	48	48
9.	47	52	47	49
10.	48	49	49	48
\bar{x}	48,3	50,5	48,6	48,1
σ	1,4	1,7	2,0	1,3



Obr. 44 Průměrná tvrdost vzorků č. 33 – 36 po kalení a popouštění

890 °C je maximální doporučená kalicí teplota pro ochlazování v oleji. Z výsledků naměřených hodnot a Obr. 44 vyplývá, že stejně jako u maximální doporučené kalicí teploty pro ochlazování ve vodě (880 °C), i zde doba výdrže na kalicí teplotě hraje nejmenší roli. Průměrné hodnoty tvrdosti vzorků č. 33 – 36 při zohlednění směrodatné odchylky si jsou mezi sebou v podstatě rovny. Především pak vzorky č. 33 a 36, i když je mezi nimi rozdíl v době výdrže 90 min, svou výslednou tvrdostí jsou si téměř přesně rovny. Vzorek č. 33 měl po kalení tvrdost 53,3 HRC a vzorek č. 36 53,2 HRC. Nejvyšší tvrdost (55,9 HRC po kalení, 50,5 HRC po pouštění) měl vzorek č. 34, jehož výdrž na kalicí teplotě byla 60 min. To jest nárůst tvrdosti u kaleného vzorku o zhruba 320 % oproti vzorku tepelně nezpracovanému. Zároveň se jedná o vzorek s nejvyšší tvrdostí, který byl ochlazován v oleji, napříč všemi pěti kalicími teplotami.

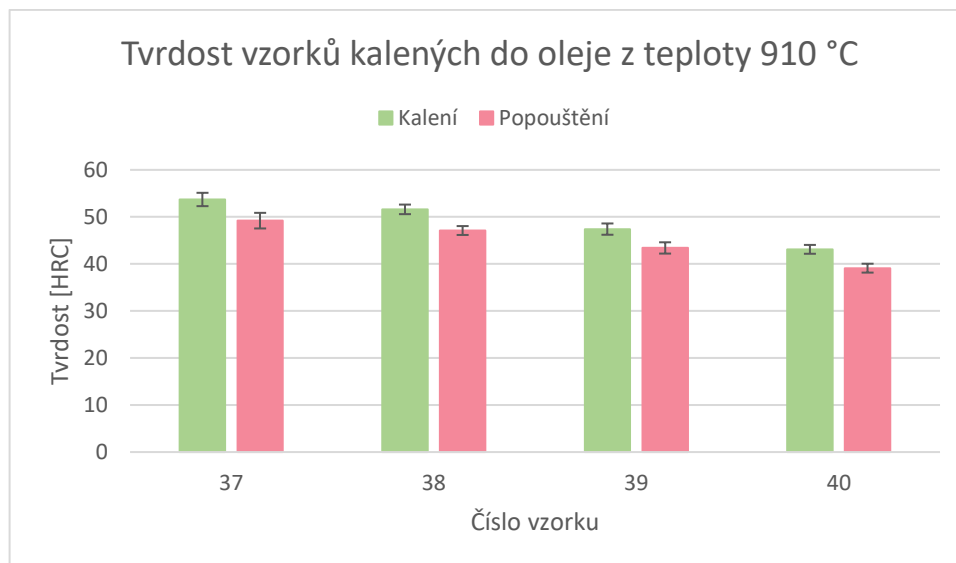
10.3.5 Kalicí teplota 910 °C

Tab. 27 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 37 – 40

Číslo vzorku:	37	38	39	40
Chladicí médium:	olej			
Kalicí teplota [°C]:	910			
Doba výdrže na kalicí teplotě [min]:	30	60	90	120
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	54	50	48	44
2.	53	52	46	43
3.	55	53	45	45
4.	53	51	47	43
5.	52	52	49	42
6.	56	52	48	42
7.	56	51	49	42
8.	53	52	47	43
9.	53	53	48	44
10.	52	50	47	43
\bar{x}	53,7	51,6	47,4	43,1
σ	1,4	1,0	1,2	0,9

Tab. 28 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 37 – 40

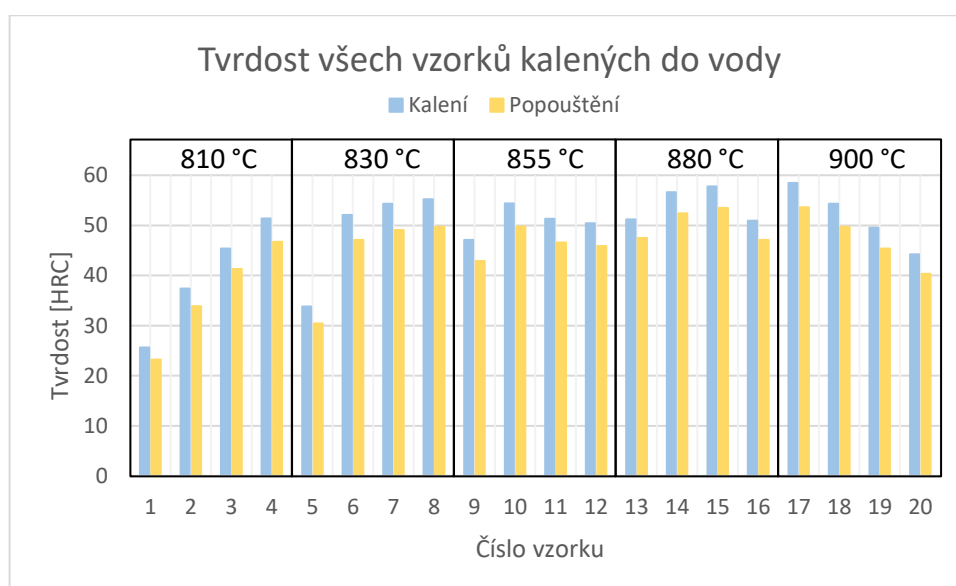
Číslo vzorku:	37	38	39	40
Chladicí médium:	vzduch			
Popouštěcí teplota [°C]:	580			
Doba výdrže na popouštěcí teplotě [min]:	120			
Číslo měření:	Naměřená tvrdost [HRC]:			
1.	49	46	44	40
2.	51	47	42	39
3.	50	48	41	38
4.	48	49	43	39
5.	47	47	45	41
6.	51	47	44	38
7.	52	46	45	38
8.	48	47	43	39
9.	49	48	44	40
10.	47	46	43	39
\bar{x}	49,2	47,1	43,4	39,1
σ	1,7	0,9	1,2	0,9



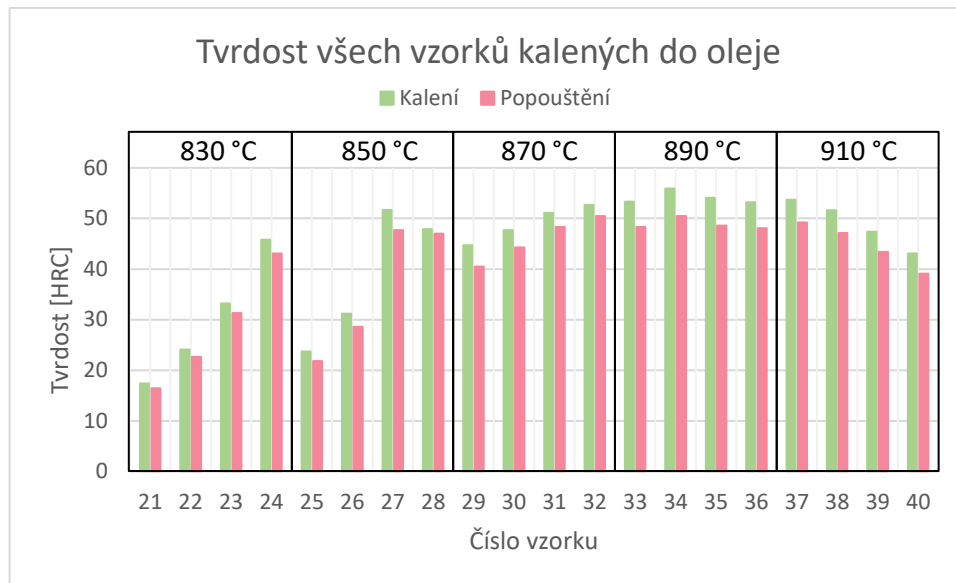
Obr. 45 Průměrná tvrdost vzorků č. 37 – 40 po kalení a popouštění

Poslední použitá kalící teplota je 910 °C, která překračuje o 20 °C maximální doporučenou teplotu pro ochlazování do oleje, kterou uvádí materiálový list. Na naměřených hodnotách a Obr. 45 lze pozorovat postupně klesající velikost tvrdosti v závislosti na době výdrže na kalící teplotě. Stejný trend byl pozorován i u vzorků kalených do vody při ekvivalentní mezní teplotě. Nejvyšší tvrdosti (53,7 HRC po kalení, 49,2 po popouštění) dosáhl vzorek č. 37, jehož doba na kalící teplotě byla pouze 30 min. Nárůst tvrdosti u kaleného vzorku ku vzorku tepelně nezpracovanému v tomto případě činil téměř 310 %.

10.4 Diskuze výsledků měření tvrdosti



Obr. 46 Průměrná tvrdost všech vzorků kalených do vody



Obr. 47 Průměrná tvrdost všech vzorků kalených do oleje

Na Obr. 46 jsou v grafu zobrazeny průměrné tvrdosti všech vzorků, které byly během procesu kalení ochlazovány ve vodě a poté byly popouštěny. Na Obr. 47 jsou uvedeny průměrné tvrdosti kalených a popouštěných vzorků, které byly ochlazovány během procesu kalení v oleji. Tyto výsledky jsou v Obr. 46 a Obr. 47 rozděleny do pěti kategorií podle kalící teploty. Z těchto grafů lze snadno pozorovat vliv velikosti kalící teploty a doby výdrže na výslednou tvrdost zvoleného materiálu. Diskuze výsledků podle jednotlivých kalících teplot jsou uvedeny v kapitole 10.2 a 10.3. Nyní následuje souhrn výsledků měření jako celku.

Nejvyšší tvrdosti, 58,5 HRC po kalení a 53,6 HRC po popouštění, z celého experimentu dosáhl vzorek č. 17, jehož kalící teplota byla za hranicí maximální doporučené kalící teploty, konkrétně 900 °C. Doba výdrže na této teplotě byla 30 min a byl ochlazen ve vodě.

V drtivé většině měly vzorky ochlazované v oleji vždy menší výslednou tvrdost než vzorky, které byly ochlazovány ve vodě. Důvodem tohoto jevu je fakt, že olej má menší ochlazovací účinek než voda a vzniká tak struktura s menší tvrdostí. Ze vzorků, které byly ochlazovány v oleji dosáhl nejvyšší tvrdosti, 55,9 HRC po kalení a 50,5 HRC po popouštění, vzorek č. 34, jehož kalící teplota byla maximální doporučená, konkrétně 890 °C, a doba výdrže 60 min. Tvrdosti 50,5 HRC po popouštění dosáhl i vzorek č. 32, který byl zpracován na střední kalící teplotě, konkrétně 870 °C, a doba výdrže činila 120 min.

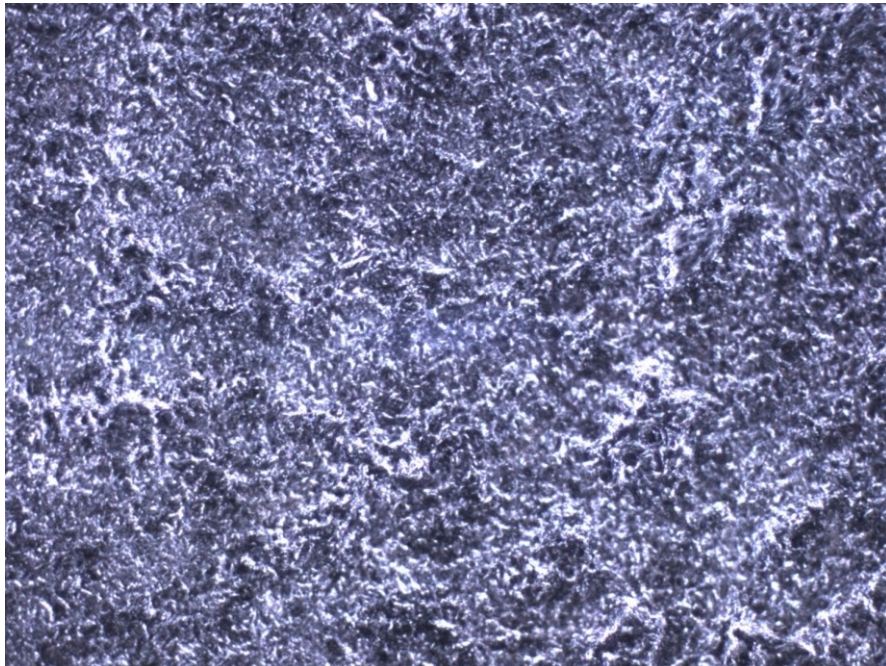
Především u nižších kalících teplot platilo, že čím delší je doba výdrže na kalící teplotě, tím větší je i výsledná tvrdost. Důvodem je, že materiál potřeboval, kvůli nižší teplotě víc času na přeměnu na austenit, aby se při ochlazování mohl přeměnit na martenzit nebo bainit.

U vyšších teplot, především u těch, které byly až za intervalem doporučených teplot, lze pozorovat, že naopak příliš velká doba výdrže na takové kalící teplotě je na škodu. Již nevznikají tak tvrdé struktury a tvrdost se postupně a významně snižuje. Důvodem je, že při tak vysoké teplotě a době výdrže dochází k hrubnutí austenitických zrn a po ochlazení, tedy rozpadu austenitu, vzniká i výsledná struktura hrubozrná, např. hrubozrný martenzit, který má horší vlastnosti. Zůstává také zvýšené množství zbytkového austenitu, a tím je právě zapříčiněn i pokles tvrdosti. Proto je důležité v praxi volit vhodné kalící teploty a adekvátní doby výdrže.

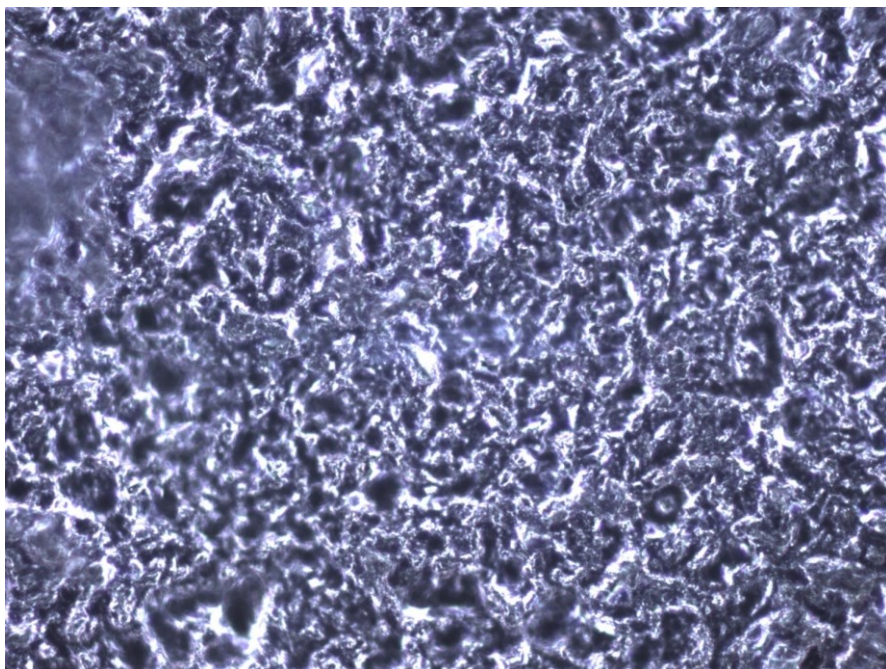
Vlivem popouštění došlo u všech vzorků k očekávanému poklesu tvrdosti. U vzorků, které byly předtím kalené do vody byl tento pokles 2,4 – 5,5 HRC, průměrný pokles 4,3 HRC. U vzorků, které byly předtím kalené do oleje byl tento pokles v rozmezí 0,9 – 5,5 HRC, průměrný pokles 3,4 HRC.

10.5 Výsledek metalografické zkoušky

Na Obr. 48 a Obr. 49 je zobrazena struktura, která byla vidět v metalografickém mikroskopu při zvětšeních 20x a 50x u vzorku č. 15. Tento vzorek byl zpracován na kalící teplotě 880 °C po dobu 90 min a ochlazen ve vodě. Po kalení byl popouštěn na teplotě 580 °C po dobu 120 min a ochlazován byl na vzduchu. Výsledná struktura je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem.

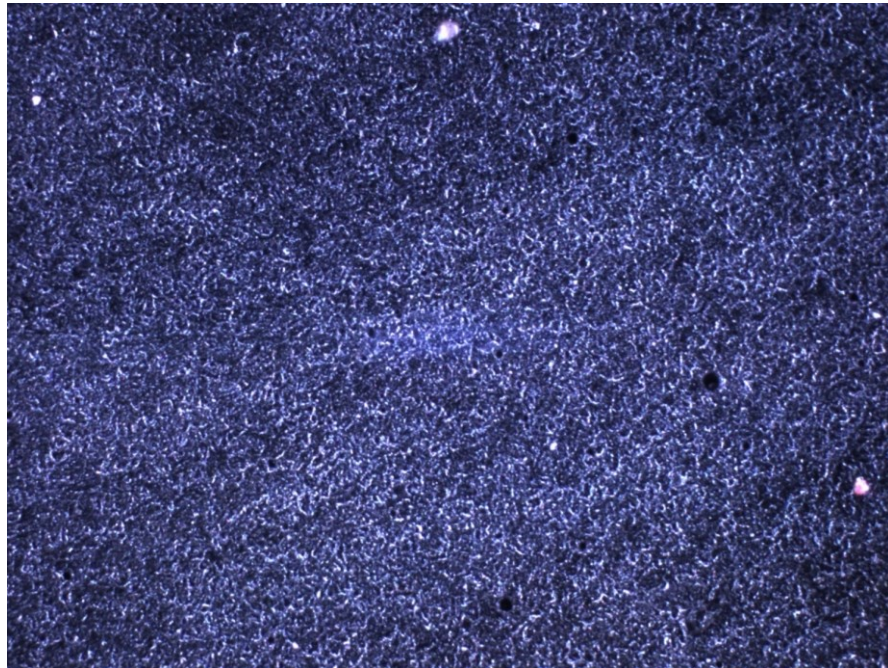


Obr. 48 Struktura vzorku č. 15 po tepelném zpracování, zvětšení 20x

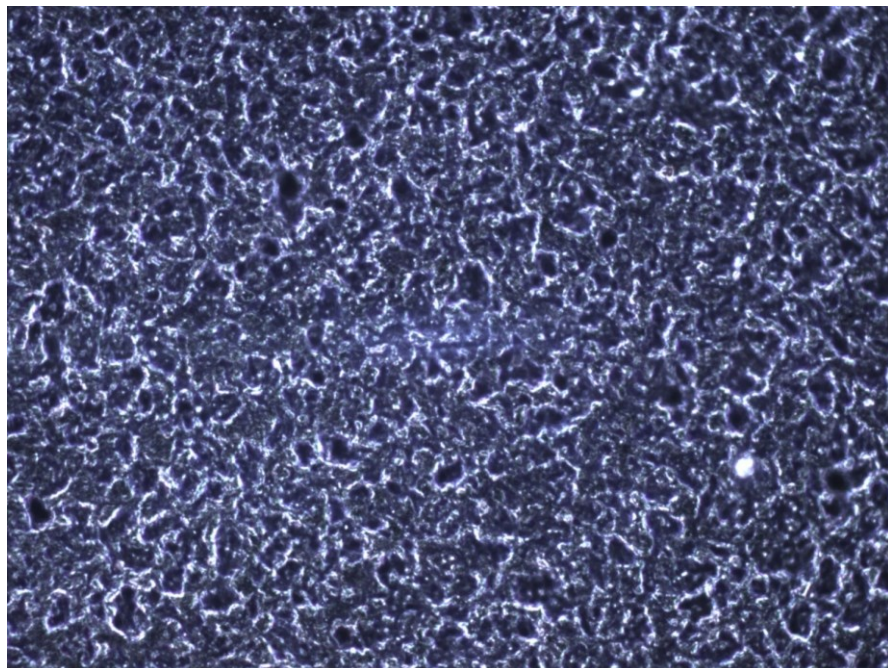


Obr. 49 Struktura vzorku č. 15 po tepelném zpracování, zvětšení 50x

Na Obr. 50 a Obr. 51 je zobrazena struktura vzorku č. 34, který byl zpracován na kalici teplotě 890 °C po dobu 60 min a ochlazován v oleji, poté byl popouštěn po dobu 120 min za teploty 580 °C a ochlazen na vzduchu. Výsledná struktura je jemnější a je tvořena bainitem, martenzitem a zbytkovým austenitem.



Obr. 50 Struktura vzorku č. 34 po tepelném zpracování, zvětšení 20x



Obr. 51 Struktura vzorku č. 34 po tepelném zpracování, zvětšení 50x

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je členěna do dvou částí: teoretické a praktické. Teoretická část je rozdělena do čtyř kapitol, které se dále větví. V první kapitole je souhrn poznatků o rozdělení ocelí, jejich značení podle ČSN 42 0002 a současně platných evropských norem ČSN EN 10027-1 a 10027-2, dále je zde rozebrána charakteristika ocelí. Ve druhé kapitole, která je nejobsáhlejší, je podrobný popis technologie tepelného zpracování a popis jednotlivých druhů tohoto procesu, včetně zařízení používaných pro tuto operaci. Třetí kapitola se věnuje popisu mechanických vlastností a metodám měření tvrdosti, které jsou rozděleny na statické a dynamické. V poslední, čtvrté kapitole teoretické části se popisuje průběh přípravy a zkoumání metalografických výbrusů.

Praktická část práce se věnuje popisu zvoleného materiálu pro experiment, tepelné úpravě vzorků z tohoto zvoleného materiálu za různých procesních podmínek a vlivu těchto podmínek na konečnou tvrdost. Věnuje se rovněž zpracování, vyhodnocení naměřených dat a písemné diskuzi získaných výsledků, rozdělených podle kalící teploty. Nad rámec stanovených cílů této práce byla provedena i metalografická zkouška dvou odlišně tepelně zpracovaných vzorků a popsána výsledná struktura.

Jako zkušební materiál byla zvolena ocel 15 230 Cr-V (EN 1.7361; 32CrMo12). Jedná se o chrom-vanadovou konstrukční ocel, jejíž obsah uhlíku je cca 0,3 %. Používá se pro výrobu velmi namáhaných strojních součástí a velkých výkovků.

Zvolená ocel v podobě kruhové tyče průměru cca 25 mm byla již nadělena na vzorky délky cca 20 mm. Celkem bylo připraveno 41 ks vzorků, z nichž 40 ks bylo následně tepelně zpracováno kalením a popouštěním. Ochlazování po kalení probíhalo do dvou médií (vody a oleje), podle typu chladiva byly zvoleny i kalící teploty. Pro vodu kalící teploty byly 810, 830, 855, 880 a 900 °C. Pro olej kalící teploty byly 830, 850, 870, 890 a 910 °C. Za všech těchto kalících teplot se zpracovávaly čtyři vzorky, které se lišily v době výdrže. Doby výdrže na kalící teplotě byly zvoleny 30, 60, 90 a 120 min. Všechny vzorky byly po kalení následně popouštěny z důvodu získání více rovnovážné struktury, odstranění vnitřních pnutí a křehkosti materiálu na teplotě 580 °C po dobu 120 min a ochlazovány na vzduchu. Volba procesních podmínek vycházela především z materiálového listu zvolené oceli.

U všech vzorků bylo po každém zpracování provedeno měření tvrdosti na Rockwellově tvrdoměru, stupnici HRC. Z naměřených výsledků je patrné, že různé podmínky zpracování měly vliv na konečnou tvrdost po kalení a popouštění.

Nezpracovaná ocel měla průměrnou tvrdost 13,1 HRC. Vlivem tepelného zpracování se docílilo tvrdosti až 58,5 HRC po kalení, což je nárůst tvrdosti o více než 345 %. V důsledku popouštění došlo k předpokládanému ponížení tvrdosti na hodnotu 53,6 HRC. I přesto je tento nárůst téměř 310 %. V důsledku různých podmínek zpracování tvrdost vždy vzrostla na různou hodnotu, podrobně se tímto zabývá kapitola 10.4.

Z výsledků bylo zjištěno, že zvolená ocel je schopna dosahovat vysokých hodnot tvrdosti při správně zvolených podmínkách tepelného zpracování, díky své dobré prokalitelnosti. Naměřené výsledky ukazují, že vyšší tvrdost je spíše u vzorků, které byly zpracovávány při vyšších teplotách nebo i při nižších teplotách, ale s delší dobou výdrže. Pokud ale byla současně zvolená nižší kalící teplota i nižší doba výdrže docházelo k nedostatečné homogenizaci austenitu, což mělo při ochlazování za následek neúplný rozpad na martenzit nebo bainit a výslednou nižší tvrdost. Na druhou stranu ani příliš dlouhá doba výdrže na vyšší kalící teplotě či příliš vysoká kalící teplota není vhodná pro vznik tvrdé struktury, jelikož vznikají hrubší zrna austenitu při ohřevu a po ochlazení je i výsledná struktura hrubozrná.

Pokud je žádoucí, co nejtvrdší konečná struktura, tak ze získaných výsledků vyplývá, že nejvhodnější kalící teplotou jsou maximální doporučené teploty kalení z materiálového listu současně se střední dobou výdrže. U kalení s ochlazováním do vody je to teplota 880 °C s dobou výdrže 60 a 90 min. Případně teplota 900 °C s dobou výdrže 30 min. U kalení s ochlazováním do oleje je to teplota 890 °C a doba výdrže 60 min.

Z provedené metalografické zkoušky byly pořízeny snímky struktury, na nichž lze vidět martenzit se zbytkovým austenitem u vzorku ochlazeného ve vodě, jehož kalící teplota byla 880 °C a doba výdrže 90 min. Bainit, martenzit a zbytkový austenit tvoří strukturu vzorku ochlazeného v oleji, jehož kalící teplota byla 890 °C a doba výdrže 60 min.

Celkově považuji za přínos této bakalářské práce nejen získání jasných závěrů práce, ale především možnost osobně si vyzkoušet a naučit ovládat všechny použité zařízení během zpracovávání této práce a proniknout více do hloubky problematiky, která mě zajímá.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [2] HOLBA, Pavel. *Identita látek a chemické složení* [online]. 2011, 112 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <https://uach.vscht.cz/files/uzel/0028743/80xJzSvJLEmMz0ks-Sc0GAA.pdf?redirected>.
- [3] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [4] ČSN 42 0002 (420002) Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření. In: *Technor* [online]. c2020-2022 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-42-0002-420002-201985.html#>.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1 2. díl*. 4., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2013. ISBN 978-80-7183-265-2.
- [6] ŠEBESTOVÁ, Hana a Petr SCHOVÁNEK. Krystalizace ocelí a litin. In: *Anzdoc* [online]. 2024 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://adoc.pub/krystalizace-oceli-a-litin.html>.
- [7] HODIS, Zdeněk. *Materiály a technologie kovy I - přednášky*. Brno, 2010. Studijní opory. Masarykova univerzita v Brně.
- [8] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [9] TOTTEN, George E. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. 2. vydání. Portland, Oregon USA: Taylor & Francis, Taylor & Francis Group, 2007, 833 s. ISBN 9780849384554.
- [10] Rizika kalícího procesu. In: *Engineering.sk* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/4140-rizika-kaliciho-procesu>.

- [11] METHAROM, Sunan. *Heat treatment - conventional and novel applications*. New York: Scitus academics, 2017, 270 s. ISBN 978-1-68117-519-5.
- [12] BENEKE, Franz, Bernard NACKE a Herbert PFEIFER. *Handbook of thermoprocessing technologies Volume 2, Plants, components, safety*. Essen, Německo: Vulkan Verlag, 2015, 993 s. Edition heat processing. ISBN 978-3-8027-2976-8.
- [13] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály* [online]. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006 [cit. 2024-02-06]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/.
- [14] HODIS, Zdeněk. *Materiály a technologie kovy II - přednášky*. Brno, 2011. Studijní opory. Masarykova univerzita v Brně.
- [15] HERRMANN, Konrad. *Hardness Testing - Principles and Applications* [online]. ASM International, 2011, 255 s. [cit. 2024-02-13]. ISBN 978-1-61503-832-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpHTPA0004/toc?cid=kpHTPA0004>.
- [16] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 208 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [17] Test types. In: *Ametek* [online]. 2023 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.hardnesstesters.com/test-types>.
- [18] Measuring Rubber Hardness. In: *Walker Rubber Limited* [online]. 2022 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.walker-rubber.co.uk/knowledge-hub/measuring-rubber-hardness-365>.
- [19] BRYSON, William E. *Heat treatment: master control manual* [online]. Munich: Hanser publishers, 2015, 338 s. [cit. 2024-03-06]. ISBN 978-1-56990-485-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpHTMCM002/toc>
- [20] MICHNOVÁ, Lenka. *Úvod do metalografie* [online]. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015 [cit. 2024-04-18]. ISBN 978-80-86302-71-3. Dostupné z: http://vyvoj.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/15_KA3_Lenka_%20Michnova_Uvod_do_metalografie_metodicka_prirucka.pdf

- [21] *Inverzní metalografický mikroskop Olympus GX51 Návod k obsluze* [online]. Vyškov: ELSYST Engineering, 2002 [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: https://www.opticalservice.cz/download/navody/Olympus_GX51.pdf
- [22] *Materiálový list ČSN 41 5230 ocel 15 230 Cr - V.*
- [23] KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O. *Vliv prvků na vlastnosti ocelí* [online]. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.kovintrade.cz/vliv-prvku-na-vlastnosti-oceli/>
- [24] LEICA MICROSYSTEMS. *Leica DMI3000 M Inverted, Manual Microscope for Industrial Applications.* [online]. c2024 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/p/leica-dmi3000-m/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_{cm}	horní kritická teplota pro nadeutektoidní oceli
A_{c1}	dolní kritická teplota
A_{c3}	horní kritická teplota pro podeutektoidní oceli
aj.	a jiné
Al	hliník
ARA	anizotermický rozpad austenitu
apod.	a podobně
a.s.	akciová společnost
B	bor
bar	jednotka tlaku
B_f	bainit finish
Bi	bismut
C	uhlík
Co	kobalt
Cr	chrom
Cu	měď
č.	číslo
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
F	celkové zatížení silou
FT	Fakulta technologická
F_0	předběžné zatížení silou
F_1	přídavné zatížení silou
h	hodina
HBS	tvrdost podle Brinella při použití kalené kuličky

HBW	tvrdost podle Brinella při použití kuličky ze slinutých karbidů
HMa	Martensova tvrdost
hm. %	jednotka, hmotnostní procenta
HRC	tvrdost podle Rockwella při použití diamantového kužele
IRA	izotermický rozpad austenitu
ISO	mezinárodní norma
La	lantanidy
min	minuta
M _f	martenzit finish
mm	jednotka délky, milimetr
Mn	mangan
Mo	molybden
MPa	jednotka tlaku, megapascal
M _s	martenzit start
N	jednotka síly, newton
N	dusík
n	četnost měřených dat
např.	například
Nb	niob
Ni	nikl
Obr.	obrázek
ot/min	jednotka kmitočtu, otáčky/minuta
P	fosfor
Pb	olovo
R _{mmax}	maximální mez pevnosti
s	sekunda

S	síra
Si	křemík
SI	mezinárodní soustava jednotek
Se	selen
Tab.	tabulka
Te	telur
Ti	titan
tj.	to jest
tzv	tak zvaný
UTB	Univerzita Tomáše Bati
V	vanad
viz	odkaz
W	wolfram
\bar{x}	průměrná hodnota
x_i	naměřená hodnota
Zr	zirkon
μm	jednotka délky. mikrometr
σ	směrodatná odchylka
Φ	průměr
%	procento
$^{\circ}\text{C}$	jednotka teploty, stupeň Celsia
$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	jednotka rychlosti ohřevu/ochlazování, stupeň Celsia/hodina

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Číselné značení ocelí ke tváření dle ČSN 42 0002 [3]</i>	14
<i>Obr. 2 Číselné značení dle bodu a) [1]</i>	16
<i>Obr. 3 Číselné značení dle bodu b) [1]</i>	16
<i>Obr. 4 Číselné značení dle ČSN EN 10027-2 [1]</i>	17
<i>Obr. 5 Metastabilní diagram Fe-Fe₃C [6]</i>	18
<i>Obr. 6 Schéma průběhu tepelného zpracování [5]</i>	19
<i>Obr. 7 IRA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli</i>	21
<i>Obr. 8 ARA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli</i>	22
<i>Obr. 9 Oblast žíhacích teplot v rovnovážném diagramu [8]</i>	23
<i>Obr. 10 Průběhy žihání naměkko [5]</i>	24
<i>Obr. 11 Dělení kalení [5]</i>	26
<i>Obr. 12 Pásmo vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [5]</i>	26
<i>Obr. 13 Průběh ochlazování v různých prostředích [5]</i>	27
<i>Obr. 14 Elektrická odporová pec [5]</i>	32
<i>Obr. 15 Horizontální vakuová pec [12]</i>	32
<i>Obr. 16 Komorová plynová pec [5]</i>	33
<i>Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Brinella [16]</i>	36
<i>Obr. 18 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [16]</i>	37
<i>Obr. 19 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [16]</i>	38
<i>Obr. 20 Poldiho kladívko [14]</i>	38
<i>Obr. 21 Typy indentorů u zkoušek tvrdosti Shore A, Shore D [18]</i>	39
<i>Obr. 22 Příprava vzorku pro pozorování [20]</i>	40
<i>Obr. 23 Inverzní metalografický mikroskop Olympus GX51 [21]</i>	41
<i>Obr. 24 Technologické údaje pro tepelné zpracování zvolené oceli [22]</i>	45
<i>Obr. 25 Ukázka dvou připravených vzorků na tepelné zpracování</i>	45
<i>Obr. 26 Kalící pracoviště SKM</i>	46
<i>Obr. 27 Plechová krabička se vzorky v kalící peci</i>	49
<i>Obr. 28 Vzorky v krabičce zasypané dřevěným uhlím po vyjmutí z pece</i>	50
<i>Obr. 29 Zakalené vzorky, vlevo ve vodě, vpravo v oleji</i>	50
<i>Obr. 30 Tvrdoměr Rockwell HR - 150A v laboratoři</i>	52
<i>Obr. 31 Analogová stupnice použitého tvrdoměru</i>	52
<i>Obr. 32 Přístroj na zalisování vzorků Buehler SimpliMet 1000</i>	53
<i>Obr. 33 Metalografická bruska/leštička Buehler AutoMet 250</i>	54
<i>Obr. 34 Metalografický stolní mikroskop DMI 3000 M od firmy Leica [24]</i>	55

<i>Obr. 35 Tvrдость zvolené oceli bez tepelného zpracování</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36 Průměrná tvrдость vzorků č. 1 – 4 po kalení a popouštění</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 37 Průměrná tvrдость vzorků č. 5 – 8 po kalení a popouštění</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 38 Průměrná tvrдость vzorků č. 9 – 12 po kalení a popouštění</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 39 Průměrná tvrдость vzorků č. 13 – 16 po kalení a popouštění</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 40 Průměrná tvrдость vzorků č. 17 – 20 po kalení a popouštění</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 41 Průměrná tvrдость vzorků č. 21 – 24 po kalení a popouštění</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 42 Průměrná tvrдость vzorků č. 25 – 28 po kalení a popouštění</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 43 Průměrná tvrдость vzorků č. 29 – 32 po kalení a popouštění</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 44 Průměrná tvrдость vzorků č. 33 – 36 po kalení a popouštění</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 45 Průměrná tvrдость vzorků č. 37 – 40 po kalení a popouštění</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 46 Průměrná tvrдость všech vzorků kalených do vody</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 47 Průměrná tvrдость všech vzorků kalených do oleje</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 48 Struktura vzorku č. 15 po tepelném zpracování, zvětšení 20x</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 49 Struktura vzorku č. 15 po tepelném zpracování, zvětšení 50x</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 50 Struktura vzorku č. 34 po tepelném zpracování, zvětšení 20x</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 51 Struktura vzorku č. 34 po tepelném zpracování, zvětšení 50x</i>	<i>78</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Mezní obsahy legujících prvků pro rozdělení ocelí na nelegované a legované [1]..</i>	12
<i>Tab. 2 Rozdělení ocelí do tříd [3]</i>	15
<i>Tab. 3 Chemické složení zvolené oceli [22].....</i>	44
<i>Tab. 4 Podmínky tepelného zpracování pro vzorky kalené do vody.....</i>	47
<i>Tab. 5 Podmínky tepelného zpracování pro vzorky kalené do oleje.....</i>	48
<i>Tab. 6 Podmínky průběhu zkoušky podle Rockwella</i>	51
<i>Tab. 7 Zvolené nastavení u zařízení Buehler při úpravě vzorků</i>	54
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty tvrdosti zvolené oceli bez tepelného zpracování</i>	56
<i>Tab. 9 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 1 – 4</i>	57
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 1 – 4</i>	58
<i>Tab. 11 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 5 – 8</i>	59
<i>Tab. 12 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 5 – 8</i>	59
<i>Tab. 13 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 9 – 12</i>	60
<i>Tab. 14 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 9 – 12</i>	61
<i>Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 13 – 16</i>	62
<i>Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 13 – 16</i>	62
<i>Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 17 – 20</i>	64
<i>Tab. 18 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 17 – 20</i>	64
<i>Tab. 19 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 21 – 24</i>	66
<i>Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 21 – 24</i>	66
<i>Tab. 21 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 25 – 28</i>	68
<i>Tab. 22 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 25 – 28</i>	68
<i>Tab. 23 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 29 – 32</i>	69
<i>Tab. 24 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 29 – 32</i>	70
<i>Tab. 25 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 33 – 36</i>	71
<i>Tab. 26 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 33 – 36</i>	71
<i>Tab. 27 Naměřené hodnoty tvrdosti kalených vzorků č. 37 – 40</i>	73
<i>Tab. 28 Naměřené hodnoty tvrdosti popouštěných vzorků č. 37 – 40</i>	73

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list oceli 15 230 Cr-V

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST OCELI 15 230 Cr-V

ČSN 41 5230		Cr - V ocel k zušlechťování,				OCEL	
STN 41 5230		povrchovému kalení a nitridování				15 230	
Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	Cr	V	P	S	
0,24–0,34	0,40–0,80	0,17–0,37	2,20–2,50	0,10–0,20	max 0,035	max 0,035	
Polotovary							
[1] předvalky				[4] tlusté plechy válcované za tepla			
[2] tyče válcované za tepla				[5] výkovky			
[3] tenké plechy válcované za tepla				[6] bežešvé trubky tvářené za tepla			
Mechanické vlastnosti							
Polotovary	[1] [2] [5] [6]	[3]	[4]		[5]		
Rozměr t, d [mm]	–	0,80–2,80	4–10	10–40	≤ 250	250–500	
Stav	.3	.3	–		.6		
Mez kluzu R_e nebo $R_p 0,2$ [MPa] min	–	–	–		635	590	
Mez pevnosti R_m [MPa]	–	max 780	max 780		780–930		
Tažnost A_5 [%] podél min	–	–	–		12	11	
Tažnost A_5 [%] tang. min	–	–	–		10	9	
Kontrakce Z [%]	–	–	–		–	–	
Vrubová houževnatost KCU 3[J.cm ⁻²] podél min	–	–	–		49	29	
Vrubová houževnatost KCU 3[J.cm ⁻²] tang. min	–	–	–		39	24,5	
Tvrдость HB	max 197	max 225	max 225	max 230	239–285		
Modul pružnosti E [GPa]	198						
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	80						
Polotovary	[2]			[5]	[6]		
Rozměr t, d [mm]	16–40	40–100	100–250		40	–	
Stav	.7			.7		.7	
Mez kluzu R_e nebo $R_p 0,2$ [MPa] min	835	735	590		835	835	
Mez pevnosti R_m [MPa]	980–1 180	880–1 080	780–930		980–1 180	980–1 180	
Tažnost A_5 [%] podél min	12	12	12		12	12	
Kontrakce Z [%] min	45	50	50		45	–	
Vrubová houževnatost KCU 2[J.cm ⁻²] min	39	–	–		39	–	
Tvrдость HB	300–359	–	–		300–359	300–359	

Teplota [°C]	20	100	200	250	300	350	400		
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] za zvýšených teplot	830	810	735	705	660	570	470		
	590	560	515	485	455	415	375		
Fyzikální vlastnosti									
Hustota	Měrná tepelná kapacita	Teplotní součinitel roztažnosti	Tepelná vodivost	Rezistivita					
ρ [kg·m ⁻³]	c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	α [K ⁻¹]	λ_1 [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ [Ω ·m]					
7 850	–	11,8·10 ⁻⁶	43	190·10 ⁻⁹					
Odolnost proti degradačním procesům									
ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ									
Mez únavy σ_c [MPa]									
R_m [MPa]	při střídavém napětí			při mívivém napětí			při ohybu za rotace (zkuš. tyč)		
	v ohybu	tah-tlak	v krutu	v ohybu	v tahu	v krutu	hladká	vrub 2 mm	vrtání 2 mm
980	485	400	300	760	665	455	485	300	300
880	450	375	280	705	620	430	450	270	290
780	405	320	240	610	535	365	395	215	250
Technologické údaje									
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ									
normalizační žhání	860–900 °C	ochlazovat na vzduchu							
kalení	830–880 °C	ochlazovat ve vodě (tlusté kusy)							
	850–890 °C	ochlazovat v oleji (součásti do \varnothing 60 mm)							
popouštění	550–650 °C	ochlazovat ve vodě (velké výkovky na vzduchu)							
žhání na měkko	700–740 °C	ochlazovat v peci							
nitridování	490–510 °C								
teploty přeměn		$A_{c1} \sim 770$ °C	$A_{c3} \sim 820$ °C	$M_s \sim 370$ °C					
tvrdost nitridační vrstvy		750 HV5							
prokalitelnost		95 mm (voda)			65 mm (olej)				
povrchová tvrdost při povrchovém kalení		$\varnothing \leq 40$ mm			49 ± 3 HRC				
		41–100 mm			48 ± 3 HRC				
Nejnižší doporučená teplota použití ($R_m = 930$ –1 130 MPa) při namáhání									
statickém	–60 °C								
dynamickém	–40 °C (pro KCU 2 min 39 J·cm ⁻²)								
TVAŘITELNOST									
třída tvařitelnosti za tepla 1	teploty tváření 1 180–800 °C pomalu ochlazovat								
SVAŘITELNOST									
podle ČSN 05 1310 – dobrá									
OBROBITELNOST									
		soustružení, hoblování			frézování, vrtání				
stav .3	HB \leq 197	13 b			13 b				
zušl.	HB \leq 285	11 b			11 b				
zušl.	HB \leq 331	10 b			10 b				
zušl.	HB \leq 359	10 b			9 b				

Technologické údaje

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška lámavosti podle ČSN 42 0401

polotovary [3]

úhel ohybu $\alpha = 180^\circ$

průměr trnu D=4a

Použití

Na velmi namáhané zušlechtěné strojní části a na části nitridované, vč. nitridovaných ozubených kol. Vzhledem k vysoké prokalitelnosti použitelná i pro velké výkovky.

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030
elektroocel	bílá–červená–černá	035

Porovnání se zahraničními materiály

<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Německo</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Jugoslávie</i>		–		–	
č. 4738	JUS G.B9.021-89	–		–	