

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Jindřich Rylich

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Jindřich Rylich
Osobní číslo: T22555
Studijní program: B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

BRYSON, William E. Heat treatment: master control manual. Munich : Hanser publishers, 2015. 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. ISBN 978-3-8027-2976-8.
METHAROM, Sunan, ed. Heat treatment: conventional and novel applications. New York: Scitus academics, 2017. ISBN 978-1-68117-519-5.

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 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(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem podmínek tepelného zpracování oceli ČSN 17 029 na mechanické vlastnosti. Teoretická část práce obsahuje rozdělení, značení a charakteristiku ocelí. Soustředí se na tepelné zpracování a její průběh, definici mechanických vlastností a na způsoby jejich měření. Praktická část práce podrobně popisuje zvolenou ocel, průběh tepelného zpracování a měření tvrdosti podle Rockwella. Dále obsahuje naměřená data a diskusi získaných výsledků.

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

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the influence of heat treatment conditions on the mechanical properties of steel ČSN 17 029. The theoretical part of the thesis includes the classification, designation, and characteristics of steels. It concentrates on heat treatment processes, the definition of mechanical properties, and the methods used for their measurement. The practical part provides a detailed description of the selected steel, the course of heat treatment, and hardness testing using the Rockwell method. It also contains the measured data and a discussion of the obtained results.

Keywords: steel, heat treatment, mechanical properties, quenching, tempering, hardness

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ROZDĚLENÍ, ZNAČENÍ A CHARAKTERISTIKA OCELÍ.....	13
1.1 ROZDĚLENÍ OCELÍ KE TVÁŘENÍ	13
1.1.1 Nelegované oceli	14
1.1.2 Legované oceli	16
1.2 ZNAČENÍ DLE ČSN 42 0002.....	16
1.2.1 Význam číselného označení	17
1.3 ZNAČENÍ DLE ČSN EN 10027-1	18
1.3.1 Značení podle použití a mechanických vlastností	19
1.3.2 Značení podle chemického složení.....	19
1.4 ZNAČENÍ DLE ČSN EN 10027-2	20
1.5 CHARAKTERISTIKA OCELÍ.....	21
1.5.1 Základní vlastnosti oceli.....	21
1.5.2 Metastabilní diagram Fe-Fe ₃ C.....	22
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	23
2.1 TYPY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	23
2.2 OHŘEV.....	23
2.2.1 Postup ohřevu	24
2.2.2 Klíčové faktory ohřevu.....	24
2.3 VÝDRŽ (PRODLEVA)	25
2.3.1 Význam výdrže v procesu	25
2.3.2 Faktory ovlivňující dobu výdrže	25
2.3.3 Výdrž v různých fázích tepelného zpracování	26
2.4 OCHLAZOVÁNÍ	26
2.4.1 Rozdělení chlazení	26
2.4.2 Chladicí média a jejich charakteristiky	27
2.4.3 Faktory ovlivňující chlazení	28
2.5 AUSTENITIZACE.....	28
2.5.1 Klíčové kroky a faktory Austenitizace	28
2.6 TRANSFORMAČNÍ DIAGRAMY	29
2.6.1 Klíčové informace v transformačních diagramech	29
2.6.2 Význam a aplikace	29
2.6.3 ARA diagramy	30
2.6.4 IRA diagramy	30
2.7 ŽÍHÁNÍ.....	30
2.7.1 Žíhání bez překrystalizace.....	31

2.7.2	Žhánání s překrystalizací	31
2.8	KALENÍ	32
2.8.1	Kalící prostředí	33
2.8.2	Martenzitické kalení	35
2.8.3	Bainitické kalení	37
2.9	POPOUŠTĚNÍ	39
2.9.1	Druhy popouštění	39
2.9.2	Technologické zásady	39
2.10	CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	40
2.10.1	Cementování	40
2.10.2	Nitridace	41
2.10.3	Další chemicko-tepelné procesy	42
3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI A METODY JEJICH MĚŘENÍ	43
3.1	DĚLENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A JEJICH ZKOUŠENÍ	43
3.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI	44
3.2.1	Statické zkoušky tvrdosti	44
3.2.2	Dynamické zkoušky tvrdosti	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
4	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	48
5	VÝBĚR MATERIÁLU A ZKUŠEBNÍHO VZORKU	49
6	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ	51
6.1	PODMÍNKY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	52
6.2	POSTUP TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	52
7	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	54
8	NAMĚŘENÉ HODNOTY	55
8.1	BEZ TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	57
8.2	VZORKY KALENÉ DO OLEJE	58
8.2.1	Kaleno na 1000 °C	58
8.2.2	Kaleno na 1025 °C	59
8.2.3	Kaleno na 1050 °C	61
8.3	VZORKY KALENÉ DO VODY	62
8.3.1	Kaleno na 1000 °C	63
8.3.2	Kaleno na 1025 °C	64
8.3.3	Kaleno na 1050 °C	66
8.4	VZORKY KALENÉ DO OLEJE SE STEJNOU VÝDRŽÍ	68
8.4.1	Doba výdrže 20 minut	68
8.4.2	Doba výdrže 40 minut	69
8.4.3	Doba výdrže 60 minut	71
8.5	VZORKY KALENÉ DO VODY SE STEJNOU VÝDRŽÍ	72

8.5.1	Doba výdrže 20 minut	72
8.5.2	Doba výdrže 40 minut	74
8.5.3	Doba výdrže 60 minut	75
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	77
	ZÁVĚR.....	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

ÚVOD

Tepelné zpracování patří mezi klíčové technologie používané při výrobě a zušlechťování kovových materiálů. Jeho hlavním cílem je dosažení požadovaných mechanických vlastností, které podmiňují funkčnost a spolehlivost finálních výrobků v praxi. Mezi nejvýznamnější metody tepelného zpracování patří zejména kalení a popouštění, jejichž vhodná kombinace umožňuje optimalizaci tvrdosti, houževnatosti a dalších vlastností kovových součástí. Vzhledem k širokému uplatnění ocelí v průmyslové výrobě je důležité znát jejich chování při různých režimech tepelného zpracování a umět předpovědět, jak konkrétní podmínky ovlivní výsledné mechanické charakteristiky. Správná volba kalicí teploty, doby výdrže a typu kalicího média má zásadní vliv na konečnou strukturu materiálu a tím i na jeho tvrdost a odolnost.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na experimentální posouzení vlivu parametrů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli 17 029. V rámci praktické části byly zhotoveny zkušební vzorky, které byly kaleny za různých teplot, výdrží a v odlišném kalicím prostředí (olej, voda). Následně byla provedena měření tvrdosti pomocí Rockwellovy metody na stupnici HRC, a to jak po samotném kalení, tak po následném popouštění.

Cílem práce bylo:

- Zpracovat přehled odborné literatury vztahující se k danému tématu.
- Realizovat výrobu zkušebních vzorků při odlišných podmínkách tepelného zpracování.
- Provést měření mechanických vlastností těchto vzorků.
- Analyzovat a vyhodnotit získané výsledky.

Teoretická část práce poskytuje základní přehled o klasifikaci ocelí, jejich označování podle platných norem, a dále se podrobně věnuje problematice tepelného zpracování, včetně chemicko-tepelných úprav. V závěru této části jsou popsány metody měření mechanických vlastností se zaměřením na tvrdost a její interpretaci.

Praktická část se soustředí na analýzu vlivu konkrétních režimů kalení a popouštění na výslednou tvrdost. Naměřené hodnoty jsou graficky zpracovány a podrobeny diskuzi, která porovnává vliv jednotlivých parametrů. Výsledkem práce je návrh optimálních podmínek tepelného zpracování dané oceli s ohledem na dosažení co nejvyšší tvrdosti při zachování technologické efektivity a strukturální stability materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ, ZNAČENÍ A CHARAKTERISTIKA OCELÍ

Ocel se v průmyslu rozděluje dle způsobu výroby a použití na oceli ke tváření a oceli na odlitky. Tyto dvě základní rozdělení jsou dány jejich strukturou, složením a vlastnostmi.

1.1 Rozdělení ocelí ke tváření

Oceli ke tváření lze rozdělit podle několika kritérií, mezi která patří chemické složení, obsah uhlíku, stupeň legování a použití.

Podle chemického složení:

- Nelegované (uhlíkové) oceli – obsahují pouze malé množství jiných prvků.
- Legované oceli – obsahují vyšší množství legujících.

Podle obsahu uhlíku (platí pro nelegované oceli):

- Nízkouhlíkové oceli ($C < 0,25 \%$).
- Středněuhlíkové oceli ($C = 0,25\text{--}0,6 \%$).
- Vysokouhlíkové oceli ($C > 0,6 \%$).

Podle stupně legování:

- Nelegované oceli – třídy 10 a 11.
- Legované oceli – třídy 12 až 19, dále se dělí na:
 - Nízkolegované oceli.
 - Střednělegované oceli.
 - Vysokolegované oceli.

Podle použití:

- Konstrukční oceli – třídy 10–17.
- Nástrojové oceli – třída 19.

Speciální oceli – zahrnují například:

- Korozi-vzdorné oceli.
- Žáruvzdorné oceli.
- Rychlořezné oceli.

Podle číselného označení dle ČSN 42 0002:

Oceli jsou označovány pětímístným číslem, které specifikuje jejich třídu a chemické složení. Kódování umožňuje přesnou identifikaci materiálu dle normy. Jako například ocel 11 500, která je třídy 11 tudíž nelegovaná a má mez pevnosti kolem 500 MPa.

Toto rozdělení poskytuje základní přehled ocelí ke tváření a jejich klasifikaci podle technických norem a praktického využití.

1.1.1 Nelegované oceli

Nelegované oceli, často označované jako uhlíkové oceli, jsou slitiny železa a uhlíku s minimálním obsahem legujících prvků. Tyto oceli se vyznačují jednoduchým chemickým složením a širokým využitím v průmyslu.

Nelegované oceli obsahují především železo (Fe) a uhlík (C), jehož množství určuje mechanické vlastnosti materiálu. Další doprovodné prvky zahrnují mangan (Mn), křemík (Si), síru (S) a fosfor (P), jejichž obsah je přísně regulován. Viz.

Tabulka 1

Hlavní vlastnosti nelegovaných ocelí zahrnují:

- Dobrá svařitelnost a tvářitelnost.
- Nižší pevnost oproti legovaným ocelím.
- Možnost tepelného zpracování pro zlepšení mechanických vlastností.
- Relativně nízká odolnost proti korozi.

Nelegované oceli nacházejí široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích, například:

- Strojírenství – výroba konstrukčních prvků, rámů a nosníků.
- Automobilový průmysl – části podvozků a karoserií.
- Stavebnictví – výroba výztužných tyčí a profilů.
- Výroba nástrojů – méně náročné součásti, jako jsou šrouby a hřebíky.

V rámci českých a evropských norem jsou nelegované oceli rozděleny do několika tříd:

Třída 10 – základní konstrukční oceli.

Třída 11 – kvalitnější konstrukční oceli s lepšími mechanickými vlastnostmi.

Toto rozdělení umožňuje efektivní volbu materiálu podle konkrétních požadavků na pevnost, svařitelnost a další technologické vlastnosti. [9]

Tabulka 1 Mezní hodnoty pro legované a nelegované oceli

Prvek		Mezní hodnoty Hmotnostní podíl v %
Al	hliník	0,30
B	bor	0,0008
Bi	bismut	0,10
Co	kobalt	0,30
Cr	chrom	0,30
Cu	měď	0,40
La	lantanidy (každý)	0,10
Mn	mangan	1,65 ^{a)}
Mo	molybden	0,08
Nb	niob	0,06
Ni	nikl	0,30
Pb	olovo	0,40
Se	selen	0,10
Si	křemík	0,60
Te	telur	0,10
Ti	titan	0,05
V	vanad	0,10
W	wolfram	0,30
Zr	zirkon	0,05
Jiné prvky (mimo uhlík, fosfor, síra, dusík), (každý)		0,10

^{a)} Pokud je pro obsah manganu uvedena pouze nejvyšší hodnota, platí jako mezní obsah 1,80 % a pravidlo 70 % (viz 3.1.2) neplatí

(zdroj:[7])

1.1.2 Legované oceli

Legované oceli obsahují vyšší množství legujících prvků, které zlepšují jejich mechanické a fyzikální vlastnosti.

Hlavní legující prvky v legovaných ocelích zahrnují:

- Chrom (Cr) – zvyšuje tvrdost, pevnost a odolnost proti korozi.
- Nikl (Ni) – zlepšuje houževnatost a korozní odolnost.
- Molybden (Mo) – zvyšuje pevnost a tepelnou odolnost.
- Vanad (V) – zlepšuje odolnost proti opotřebení a zpevňuje strukturu.
- Wolfram (W) – zvyšuje odolnost proti vysokým teplotám.

Díky těmto přísadám mají legované oceli vyšší pevnost, lepší odolnost proti opotřebení a korozi než nelegované oceli.

Legované oceli se široce využívají v různých průmyslových odvětvích:

- Letecký a automobilový průmysl – výroba vysoce namáhaných součástí
- Strojírenství – výroba ozubených kol, hřídelí a nástrojů
- Energetický průmysl – komponenty pro turbíny a kotle

Legované oceli jsou rozděleny do tříd 12 až 19, které odpovídají jejich složení a použití:

- Třída 12–14 – nízkolegované konstrukční oceli.
- Třída 15–16 – střednělegované oceli s vyšší pevností.
- Třída 17–19 – vysokolegované oceli, včetně nerezových a žáruvzdorných materiálů.

[9]

1.2 Značení dle ČSN 42 0002

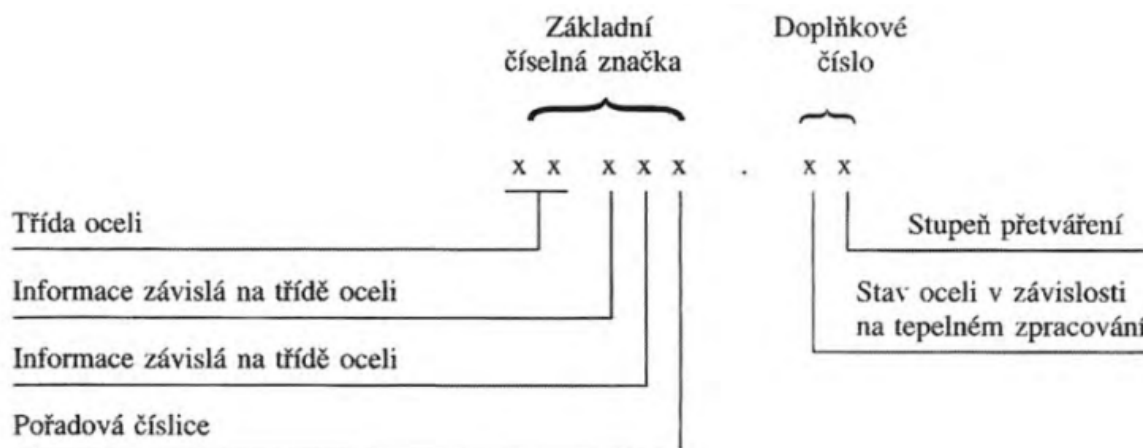
Tato evropská norma definuje termín "ocel" a dělí jakosti ocelí na základě:

- Chemického složení: Nelegované, korozivzdorné a ostatní legované oceli.
- Hlavních tříd jakosti: Oceli nelegované, korozivzdorné a další legované oceli definované jejich vlastnostmi nebo účelem použití.[7]

Označování ocelí podle normy ČSN 42 0002 se řídí číselným systémem, který umožňuje přesnou identifikaci materiálu. Tento systém byl vytvořen za účelem sjednocení značení ocelí v českém průmyslu a jeho sladění s evropskými a mezinárodními normami. Jeho hlavní výhodou je jednoznačnost označení, která minimalizuje chyby při výběru materiálu a usnadňuje komunikaci mezi výrobcí, dodavateli a uživateli ocelí. Oproti jiným metodám poskytuje systém ČSN 42 0002 strukturovaný a systematický přístup ke kategorizaci materiálů, což zjednodušuje jejich identifikaci a použití. Tento systém využívá pětimístné číslo na základě jejich složení a mechanických vlastností. Oproti jiným metodám, jako je označování podle norem ISO nebo ASTM, poskytuje systém ČSN 42 0002 jednoznačné číselné kódy, které usnadňují identifikaci materiálů na první pohled.

1.2.1 Význam číselného označení

Číselné značení ocelí podle ČSN 42 0002 umožňuje systematické třídění a jednoduché určení chemického složení a mechanických vlastností dané oceli. Struktura číselného označení je následující:



Obrázek 1 Schéma číselného značení

(zdroj:[9])

První číslice (skupina materiálů) – udává, že se jedná o ocel ke tváření

Druhá číslice (třída oceli) – rozlišuje nelegované a legované oceli:

- 0–2: Nelegované oceli.
- 3–9: Legované oceli.

Třetí číslice – určuje specifické vlastnosti, např. zaručenou pevnost nebo chemické složení.

Čtvrtá a pátá číslice – určují podrobnosti o pevnosti a dalších vlastnostech oceli.

Doplňkové číslice

První doplňková číslice označuje stav oceli daný tepelným zpracováním.

Druhá doplňková číslice označuje stupeň přetváření válcovaných ocelových plechů a pásů.

Kromě základního pětimístního čísla se v některých případech používají další doplňkové znaky, které mohou označovat zvláštní vlastnosti materiálu, například:

- Písmeno 'A' – zaručená jemnozrnná struktura
- Písmeno 'H' – vhodnost pro zušlechťování
- Písmeno 'G' – ocel určená pro odlitky

Tyto doplňky umožňují ještě přesnější kategorizaci materiálů a jejich použití ve specifických aplikacích.

Příklad značení:

11 373 – Nelegovaná konstrukční ocel, svařitelnost zaručená.

17 240 – Korozivzdorná ocel s vysokým obsahem chromu.

15 320H – Legovaná ocel vhodná pro zušlechťování.

22 140G – Ocel určená pro odlitky.

ČSN 42 0002 je kompatibilní s evropskými normami EN a mezinárodními normami ISO, což usnadňuje přechod mezi různými standardy v globálním obchodu a výrobě. Díky této kompatibilitě mohou být oceli označené podle ČSN snadno přiřazeny ke svým ekvivalentům v jiných normách, což je výhodné zejména při exportu nebo při používání materiálů z různých zemí. Díky jednoznačnému značení lze předejít chybám při výběru materiálu, což je klíčové pro konstrukci a výrobu vysoce namáhaných součástí.

1.3 Značení dle ČSN EN 10027-1

Norma ČSN EN 10027-1 zavádí v evropském prostoru systém symbolického názvového značení ocelí, který využívá kombinaci písmen a číslic pro vyjádření hlavních charakteristik oceli.

Tento systém je navržen tak, aby byl přehledný, srozumitelný a kompatibilní s ostatními evropskými i mezinárodními normami, jako jsou například ISO 4948 nebo německé normy DIN, což umožňuje snadné porovnání a převod mezi různými systémy značení používanými v různých zemích.

Existují dva hlavní přístupy značení:

- Značení dle použití a mechanických vlastností.
- Značení dle chemického složení.

1.3.1 Značení podle použití a mechanických vlastností

Používá se pro oceli, jejichž klasifikace vychází z meze kluzu nebo jiných mechanických parametrů.

Písmeno na začátku označuje určení oceli:

S – konstrukční ocel

P – ocel pro tlakové nádoby

L – ocel pro potrubí

E – ocel pro strojní součásti

G – ocel pro odlitky

Číslo udává minimální mez kluzu v MPa:

Například S355 znamená konstrukční ocel s mezí kluzu 355 MPa

Další znaky mohou označovat:

J2, JR, J0 – houževnatost při dané teplotě

+N, +AR, +M – způsob tepelného zpracování (normalizace, válcování za tepla apod.)

1.3.2 Značení podle chemického složení

Tento způsob se používá především pro legované a nerezové oceli:

CXX – uhlíková ocel, např. C45 označuje nelegovanou ocel s obsahem cca 0,45 % C

X... – označuje legovanou ocel, kde je ≥ 5 % legujících prvků

X10CrNi18-8:

10 = přibližný obsah uhlíku v setinách procenta (0,10 %)

CrNi = hlavní legující prvky (chrom, nikl)

18-8 = přibližné procentuální zastoupení těchto prvků

Tento systém značení je důležitý nástroj pro jednotnou klasifikaci a identifikaci ocelí v evropském průmyslu. Díky jeho zavedení dochází ke snazšímu obchodování, navrhování i zpracování ocelových materiálů v mezinárodním měřítku.

1.4 Značení dle ČSN EN 10027-2

Norma ČSN EN 10027-2 definuje **číselný systém značení ocelí**, který slouží k jednotné klasifikaci ocelí na evropské úrovni pomocí sedmimístného číselného kódu. Tento systém je doplňkem k symbolickému systému uvedenému v ČSN EN 10027-1 a často se používá v technické dokumentaci, materiálových listech a databázích.

1.4.1 Struktura číselného označení

Číselné značení ocelí podle EN 10027-2 má následující strukturu:

Číslice 1–6 – šestimístné základní číslo, které jednoznačně identifikuje konkrétní druh oceli.

Sedmá číslice – kontrolní číslice (tzv. "check digit"), vypočítaná podle specifického algoritmu pro ověření správnosti označení.

Příklad číselného označení: **1.0038** odpovídá oceli S235JR dle EN 10027-1.

Kód se uvádí ve formátu **X.XXXX**, kde **X** je první číslice označující materiálovou skupinu:

1.xxxx – oceli

2.xxxx – neželezné kovy

Příklady značení:

- **1.0038** – nelegovaná konstrukční ocel (S235JR)
- **1.4301** – korozivzdorná austenitická ocel (X5CrNi18-10)
- **1.7225** – legovaná konstrukční ocel (42CrMo4)

1.4.2 Využití číselného systému:

Umožňuje rychlou a jednoznačnou identifikaci materiálu v databázích, výkresech a technické dokumentaci. Slouží jako mezinárodně uznávaný identifikátor, zejména v případech, kdy může docházet k jazykovým nebo terminologickým nejasnostem.

Tento systém se často používá společně se symbolickým značením dle ČSN EN 10027-1, čímž se zajišťuje maximální přehlednost a spolehlivost identifikace ocelí v rámci evropského i světového průmyslu

1.5 Charakteristika ocelí

Ocel je materiál, jehož hmotnostní podíl železa je větší než kteréhokoliv jiného prvku, obsah uhlíku je všeobecně menší než 2 % a obsahuje další prvky. Omezený počet chromových ocelí může obsahovat více než 2 % uhlíku, ale 2 % je obvyklá mezní hranice mezi ocelí a litinou. Ocel má v průmyslu dnes již nenahraditelnou roli, díky jejím vlastnostem a možnostem použití.[7]

1.5.1 Základní vlastnosti oceli

Ocel je charakteristická následujícími vlastnostmi:

Tvárností za tepla i za studena – umožňuje širokou škálu technologických procesů.

Možností tepelného zpracování – jako je kalení, popouštění či žhání.

Variabilitou mechanických vlastností – od měkkých po velmi tvrdé oceli.

Možností legování – přídavky prvků jako Cr, Ni, Mo zvyšují korozní odolnost a pevnost.

Dobrou obrobitelností a svařitelností – zejména u nelegovaných konstrukčních ocelí

Tabulka 2 Vlastnosti oceli

Vlastnost	Hodnota
Hustota	cca 7 850 kg/m ³
Teplota tavení	1 420–1 530 °C
Součinitel tepelné roztažnosti	11–13 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Tepelná vodivost	40–60 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

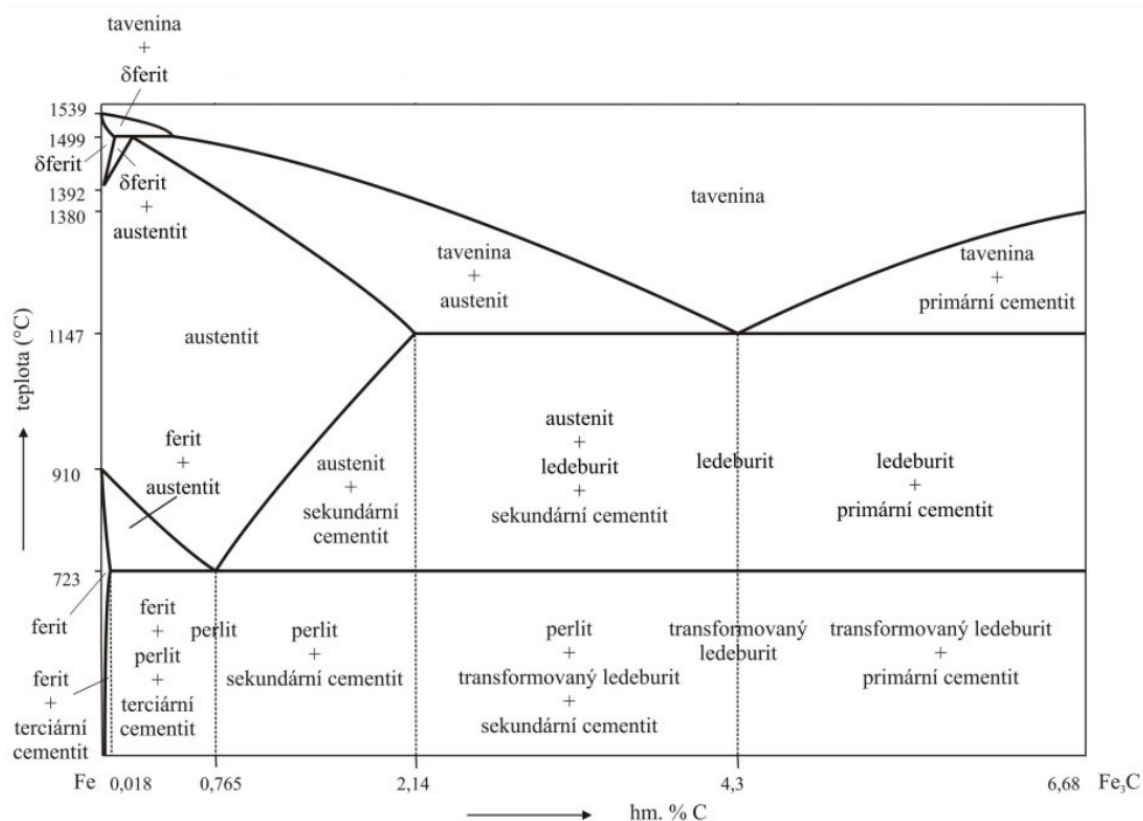
Vlastnost	Hodnota
Měrná tepelná kapacita	460–500 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Elektrická vodivost	5–8 MS/m
Modul pružnosti v tahu (E)	cca 210 GPa

(zdroj: vlastní)

Uvedené hodnoty se mohou lišit v závislosti na chemickém složení, struktuře a tepelném zpracování konkrétní oceli.

1.5.2 Metastabilní diagram Fe-Fe₃C

Metastabilní diagram Fe-Fe₃C je grafické zobrazení, určující strukturu slitiny podle teploty (na ose y) a podle množství vyskytujícího se uhlíku (na ose x) tlak je uvažován konstantní.



Obrázek 2 Metastabilní diagram FeFe₃C

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování je proces zahrnující ohřívání a ochlazování kovů za účelem změny jejich vlastností, jako je tvrdost, pevnost nebo houževnatost.

Hlavními aplikacemi jsou zlepšení odolnosti materiálů, jejich pevnosti a prodloužení životnosti. Tepelné zpracování zahrnuje vědecké procesy, které jsou přesné a vyžadují dodržování osvědčených postupů. Proces zahrnuje klíčové změny v krystalické struktuře kovů, zejména u oceli (austenit, martenzit, bainit). Obsahuje různé teplotní kroky, jako je ohřev, prodleva nebo výdrž na dané teplotě a chlazení, pro dosažení požadovaných vlastností.

2.1 Typy tepelného zpracování

Žíhání: Zjemňuje materiál, uvolňuje vnitřní napětí a připravuje kov pro další zpracování.

Normalizace: Zlepšuje strukturu a zvyšuje homogenní vlastnosti kovu.

Kalení: Rychlé ochlazení, které zvyšuje tvrdost, ale může vést k vyššímu pnutí.

Popouštění: Následuje po kalení a snižuje křehkost kovu.

Kryogenní zpracování: Proces využívající extrémně nízké teploty ke stabilizaci mikrostruktury a zvýšení odolnosti.

Chemicko-tepelné zpracování: Jedná se o soubor procesů ovlivňující materiál nejen za pomoci tepla, ale i za pomoci změny chemické struktury materiálu.

2.2 Ohřev

Ohřev je prvním krokem v procesu tepelného zpracování kovů a hraje klíčovou roli při přípravě materiálu na další fáze, jako je kalení, žíhání nebo popouštění. Umožňuje kovu dosáhnout požadovaných teplot, při kterých dochází ke změnám v mikrostruktuře (např. přeměna na austenit u oceli).

2.2.1 Postup ohřevu

První fáze: Nízkoteplotní ohřev

Materiál je zahříván na střední teploty, typicky kolem 300–600 °C, aby se uvolnila vnitřní pnutí a zamezilo riziku deformací. Tento krok je zvláště důležitý u složitých dílů nebo u materiálů s vysokou náchylností k tepelnému šoku.

Druhá fáze: Vyrovnávací fáze

Materiál je udržován na střední teplotě po určitou dobu, aby se zajistilo rovnoměrné zahřátí celého objemu. Tato fáze nemusí být vždy součástí dané operace, jelikož existují technologie, které cílí na nepoměr teplot mezi jádrem a povrchem jako je např. povrchové kalení.

Konečná fáze: Zahřátí na kritickou teplotu

Materiál je zahříván na specifickou kritickou teplotu (např. kolem 700–1000 °C u ocelí), která odpovídá přeměně mikrostruktury (austenitizace). Tato kritická teplota se označuje také jako bod rekrystalizace.

2.2.2 Klíčové faktory ohřevu

Při procesu ohřevu je důležité dbát na dané faktory pro dosažení správných výsledků.

Rychlost ohřevu:

Příliš rychlý ohřev může vést k praskání nebo deformaci. Doporučuje se postupné zvyšování teploty.

Vnitřní pnutí:

Jedná se o napětí v materiálu vzniklé vlivem nerovnoměrného zahřívání součástí.

Držení teploty:

Dostatečná doba na vyrovnání teplot zajišťuje stabilitu procesu.

Velikost a tvar materiálu:

Velké nebo složitě tvarované díly vyžadují pomalejší a rovnoměrnější ohřev.

Typ materiálu:

Různé materiály mají různé kritické teploty a odolnost vůči tepelným změnám.

Monitorování teploty:

Pro měření lze použít teplotní čidla nebo sondy.

Minimalizace oxidace:

Oxidace se nejčastěji redukuje pomocí ochranných atmosfér nebo nátěrů.

2.3 Výdrž (prodleva)

Výdrž (neboli setrvalá doba při určité teplotě) je klíčovou součástí tepelného zpracování. Správné nastavení doby výdrže umožňuje dosažení rovnoměrných vlastností v celém materiálu a ovlivňuje konečné mechanické a mikrostrukturní vlastnosti kovu.

2.3.1 Význam výdrže v procesu

Rovnoměrné ohřátí materiálu:

Doba výdrže umožňuje materiálu dosáhnout teplotní rovnováhy v celém objemu, což je zásadní pro větší nebo složitě tvarované díly.

Transformace mikrostruktury:

Výdrž při kritických teplotách (např. austenitizace) umožňuje transformaci krystalické struktury, jako je přeměna na austenit u ocelí.

Minimalizace vnitřního pnutí:

Udržení materiálu na střední teplotě před rychlým chlazením (např. kalením) pomáhá redukovat pnutí a riziko deformací.

2.3.2 Faktory ovlivňující dobu výdrže

Velikost a tvar dílu:

Větší nebo složitější díly vyžadují delší dobu pro dosažení rovnovážné teploty.

Typ materiálu:

Oceli s vysokým obsahem uhlíku nebo legur potřebují delší výdrž, aby mohlo dojít k úplné transformaci mikrostruktury.

Účel tepelného zpracování:

Výdrž se liší podle cíle procesu: tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, hloubka požadované mikrostruktury apod.

2.3.3 Výdrž v různých fázích tepelného zpracování

Při ohřevu:

Rovnoměrné zahřátí před dosažením kritické teploty (např. 600–800 °C) minimalizuje riziko tepelného šoku a deformací. Tato fáze je klíčová pro vyrovnání teplot uvnitř dílu.

Při austenitizaci:

Doba výdrže závisí na materiálu a účelu, obvykle v rozsahu 10–30 minut na každý palec (25 mm) tloušťky dílu. Cílem je dosažení homogenní austenitické struktury.

Při popouštění:

Výdrž při nižší teplotě (150–600 °C) umožňuje snížení vnitřního pnutí a zvýšení houževnatosti. Opakované cykly popouštění zlepšují stabilitu a odolnost proti deformacím.

Při kryogenním zpracování:

Výdrž při extrémně nízkých teplotách (-196 °C) stabilizuje mikrostrukturu a snižuje zbytkový austenit.

2.4 Ochlazování

Chlazení je klíčovým krokem v tepelném zpracování, který následuje po ohřevu a transformacích mikrostruktury. Typ a rychlost chlazení zásadně ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu, jako je tvrdost, houževnatost nebo odolnost proti opotřebení.

2.4.1 Rozdělení chlazení

- **Podle poměru teploty a času:**

Rychlé chlazení:

Materiál je ochlazován vysokou rychlostí pomocí média, jako je voda, olej nebo plyn.

Cílem je dosažení tvrdé mikrostruktury (např. martenzitu).

Pomalé chlazení:

Materiál se ochlazuje v peci nebo na vzduchu, což umožňuje pomalejší změny teplot.

Používá se u procesů, jako je žihání, kdy je žádoucí nižší tvrdost a lepší zpracovatelnost.

Kryogenní chlazení:

Ochlazování na extrémně nízké teploty (např. $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ pomocí kapalného dusíku) stabilizuje mikrostrukturu a redukuje zbytkový austenit.

- **Podle typu technologie**

Kalení:

Rychlé ochlazení z kritické teploty (obvykle austenitizační teploty).

Výsledkem je martenzitická struktura, která zvyšuje tvrdost a pevnost materiálu.

Popouštění po kalení:

Kalený materiál je znovu zahřát na nižší teplotu a poté pomalu ochlazen, což snižuje křehkost a vnitřní pnutí.

Izotermické chlazení:

Materiál se rychle ochladí na meziteplotu (např. pro vytvoření bainitu) a následně se udržuje, dokud nedojde k dokončení transformace mikrostruktury.

Kontrolované chlazení:

Používá se k omezení deformací nebo praskání u složitě tvarovaných dílů.

2.4.2 Chladicí média a jejich charakteristiky

Voda:

Nejrychlejší médium, které poskytuje intenzivní chlazení.

Vhodné pro jednoduché tvary, ale může způsobit praskání nebo deformaci kvůli nerovnoměrnému ochlazování.

Olej:

Poskytuje mírnější chlazení než voda a snižuje riziko deformací.

Používá se u legovaných ocelí a u materiálů citlivých na rychlé změny teplot.

Vzduch:

Nejpomalejší médium, vhodné pro materiály, které vyžadují rovnoměrné a šetrné ochlazování. Typické pro vzduchem kalitelné oceli.

Kapalný dusík nebo suchý led:

Používá se v kryogenních procesech k dosažení extrémně nízkých teplot.

Stabilizuje strukturu a odstraňuje zbytkový austenit.

2.4.3 Faktory ovlivňující chlazení

Velikost a tvar dílu:

Větší a složitější díly vyžadují rovnoměrné chlazení, aby se minimalizovalo riziko deformací.

Typ materiálu:

Materiály s vysokým obsahem uhlíku nebo legur mohou být citlivější na rychlé chlazení.

Teplota a vlastnosti média:

Vyšší teploty média vedou k mírnějšímu chlazení, zatímco nízké teploty podporují intenzivnější ochlazování.

Rizika spojená s chlazením:

- Praskání: Při rychlém ochlazení dochází k vysokým vnitřním napětím.
- Deformace: Nerovnoměrné chlazení může způsobit zkřivení nebo změnu tvaru dílu.
- Oxidace: Při chlazení v otevřené atmosféře může dojít k povrchové oxidaci nebo vzniku okují.

2.5 Austenitizace

Austenitizace je proces zahřátí oceli na teplotu, při které se mikrostruktura oceli mění na austenit, což je klíčová fáze v tepelném zpracování. Tento proces probíhá při kritických teplotách, které závisí na chemickém složení oceli.

2.5.1 Klíčové kroky a faktory Austenitizace

Teplota:

Austenitizace probíhá nad kritickou teplotou (A_{c1}), obvykle v rozmezí 700–950 °C, v závislosti na obsahu uhlíku a legur.

Příliš nízká teplota vede k neúplné transformaci, zatímco příliš vysoká způsobuje zhrubnutí zrna.

Doba výdrže:

Ocel se drží na austenitizační teplotě dostatečně dlouho, aby došlo k úplné transformaci mikrostruktury na austenit.

Delší výdrž může vést k negativním efektům, jako je ztráta pevnosti vlivem difuze uhlíku.

Mikrostruktura:

Austenit je vysokoteplotní fáze železa, která má tvárnou a rovnoměrnou strukturu, což je klíčové pro následné procesy, jako je kalení.

2.6 Transformační diagramy

Transformační diagramy ARA (Anizotermická Rozpouštěcí Analýza) nebo IRA (Izotermická Rozpouštěcí Analýza) znázorňují teplotní a časovou závislost transformací oceli při ochlazování nebo držení na konstantní teplotě.

2.6.1 Klíčové informace v transformačních diagramech

Kritické čáry:

Linie označující počátek a konec transformace (např. start a konec přeměny na martenzit).

Časová osa:

Udává dobu potřebnou pro různé fáze transformace při konkrétní teplotě.

Fázové oblasti:

Rozdělení diagramu podle fází (austenit, bainit, perlit, martenzit).

2.6.2 Význam a aplikace

Optimalizace tepelného zpracování:

Diagramy pomáhají určit správné parametry kalení a popouštění.

Predikce vlastností:

Na základě transformací lze odhadnout mechanické vlastnosti, jako je tvrdost, houževnatost nebo pevnost.

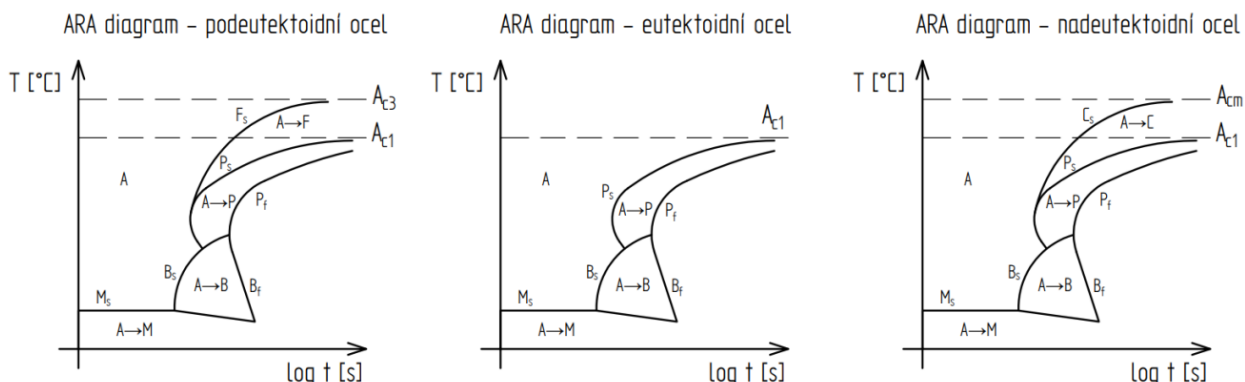
Minimalizace defektů:

Umožňují vyhnout se nežádoucím strukturám, které by mohly oslabit materiál.

2.6.3 ARA diagramy

Popisují přeměny austenitu při kontinuálním ochlazování.

Používají se k určení optimální rychlosti chlazení, aby se zabránilo nežádoucím transformacím, jako je vznik perlitu nebo bainitu místo martenzitu.

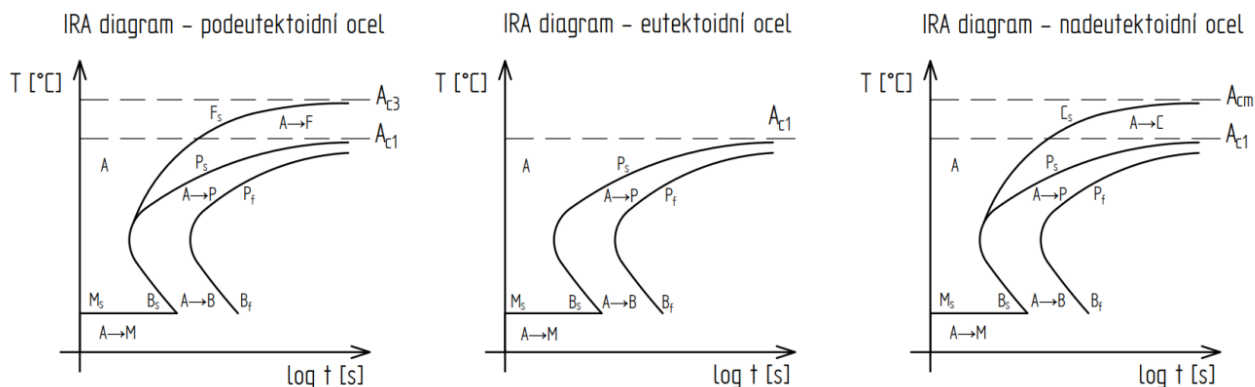


Obrázek 3 ARA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli

2.6.4 IRA diagramy

Zobrazují izotermické přeměny austenitu při konstantní teplotě.

Slouží k pochopení, jak dlouho musí být materiál držen na dané teplotě, aby se dosáhlo specifické fáze, jako je bainit nebo ferit.



Obrázek 4 IRA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli

2.7 Žihání

Žihání je základní metoda tepelného zpracování kovových materiálů, zejména ocelí. Tento proces zahrnuje ohřev materiálu na definovanou teplotu, výdrž při této teplotě a následné řízené ochlazení. Cílem žihání je úprava vnitřní struktury materiálu s ohledem na odstranění vnitřního pnutí, zlepšení obrobitelnosti, zjemnění zrna nebo homogenizaci chemického složení.

Výběr vhodného typu žíhání závisí na konkrétní aplikaci, požadovaných vlastnostech, chemickém složení materiálu a předchozím technologickém postupu. Správné nastavení teploty, doby výdrže a způsobu ochlazování je zásadní pro dosažení požadovaných strukturálních změn.

Žíhání lze rozdělit podle toho, zda během procesu dochází k překrystalizaci, nebo nikoliv.

2.7.1 Žíhání bez překrystalizace

Do této kategorie spadají způsoby žíhání, při nichž nedochází k úplné změně krystalické mřížky, ale pouze k úpravám vnitřní struktury, napětí nebo velikosti a tvaru fází.

Žíhání na měkko

Provádí se pod teplotou A_1 (680–750 °C) s cílem zlepšit obrobiteľnost a snížit tvrdost materiálu. Dochází k postupné sferoidizaci cementitu, což vede ke vzniku globulárního perlitu. Ochlazení je velmi pomalé, často v peci.

Žíhání ke snížení vnitřního pnutí

Tento typ žíhání slouží k odstranění zbytkových napětí, která vznikají při svařování, obrábění nebo lití. Teplota se pohybuje mezi 500 a 650 °C, bez překročení kritických teplot. Mikrostruktura se během procesu výrazně nemění, avšak vnitřní napětí se výrazně redukuje.

2.7.2 Žíhání s překrystalizací

Tato skupina zahrnuje procesy, při nichž dochází k tvorbě nové krystalické struktury (například přeměna deformačně zpevněné struktury na rovnovážnou).

Rekrystalizační žíhání

Používá se pro odstranění deformačního zpevnění vzniklého při tváření za studena. Teplota žíhání se obvykle pohybuje mezi 500 a 700 °C v závislosti na druhu oceli a stupni předchozí deformace. Dochází k tvorbě nových zrn bez předchozích vnitřních napětí.

Normalizační žíhání

Cílem je dosažení jemnozrnné a rovnoměrné struktury. Ocel se zahřívá nad teplotu kritické přeměny (A_3 u hypoeutektoidních nebo A_1 u hypereutektoidních ocelí), následně se ochlazuje na vzduchu. V průběhu ochlazování dochází k úplné nebo částečné překrystalizaci.

Homogenizační žíhání

Slouží ke snížení chemické nehomogenity po odlévání, zejména u legovaných ocelí a litin. Provádí se při vysokých teplotách (1000–1200 °C) s dlouhou dobou výdrže, přičemž dochází k difúznímu vyrovnání koncentrací a k částečné rekonstrukci struktury.

2.8 Kalení

Kalení je tepelný proces sloužící ke zvýšení tvrdosti a pevnosti oceli. Tento postup spočívá v ohřevu materiálu nad horní kritickou teplotu, výdrži na této teplotě a následném prudkém ochlazení (kalení) v chladicím médiu, čímž se zajišťuje vznik tvrdé martenzitické nebo bainitické struktury.

Podeutektoidní oceli: Kalení probíhá při ohřevu nad teplotu A_3 (cca 800–850 °C).

Nadeutektoidní oceli: Kalení se provádí při teplotách mezi A_1 a A_{cm} , obvykle kolem 750–800 °C, aby se předešlo vzniku hrubého cementitu na hranicích zrn.

Přesné teploty se volí podle složení oceli a požadovaných vlastností.

Proces kalení funguje na stejném principu ohřev, výdrž, ochlazení, kdy ohřev na kalicí teplotu musí být rovnoměrný, často ve více zónách, aby se zabránilo přehřátí povrchu. Výdrž na kalicí teplotě, nutná k úplné přeměně austenitické struktury. Ochlazení rychlé, kdy volba média ovlivňuje tvrdost i deformaci:

Důležitá vlastnost při kalení je kalitelnost, která udává schopnost oceli dosahovat požadovaných vlastností i v hloubce průřezu. Závisí především na chemickém složení (obsahu legujících prvků) a velikosti zrna. Vyjadřuje se např. pomocí Jominyho zkoušky, kde se hodnotí tvrdost v různých vzdálenostech od čela zakaleného vzorku.

Jelikož kalení je proces kdy za malého časového intervalu dochází k drastickým změnám v mikrostruktuře materiálu, mohou vznikat různé komplikace jako jsou:

Deformace a vnitřní pnutí – vznikají při nerovnoměrném ochlazení.

Praskání materiálu – při příliš rychlém ochlazení nebo nevhodném složení.

Oxidace povrchu – zabraňuje se tomu pomocí kalení s ochranou atmosférou (např. vakuové kalení).

2.8.1 Kalicí prostředí

Volba kalicího prostředí (média) je klíčovým faktorem ovlivňujícím průběh ochlazení během kalení, a tím i výsledné mechanické vlastnosti a vnitřní napětí v materiálu. Každé médium má odlišnou intenzitu ochlazování, která se volí podle typu oceli, požadované tvrdosti, tvaru součásti a rizika deformací nebo praskání.

Kalicí média lze rozdělit na:

a) Voda

- Nejběžnější a nejdostupnější médium s vysokou intenzitou ochlazování.
- Vhodná pro nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, které mají nižší kritickou rychlost ochlazení.
- Vysoká účinnost chlazení (zejména mezi 300–600 °C).
- Nízké náklady.
- Vysoké riziko deformací a praskání kvůli tepelným šokům.
- Možnost vroucího filmu na povrchu (tzv. Leidenfrostův jev), který zpomaluje chlazení.
- Korozivní působení na součásti.

b) Olej

- Organické médium s nižší intenzitou chlazení než voda. Teplota olejové lázně bývá kolem 40–80 °C.
- Vhodný pro legované oceli a součásti s vyšší citlivostí na pnutí.
- Mírnější a rovnoměrnější ochlazení než ve vodě.
- Nižší riziko deformací.
- Nižší reaktivita s povrchem (nižší oxidace).
- Nižší chladicí schopnost → nutnost použít legovanou ocel.
- Hořlavost a tvorba par při vyšších teplotách.
- Vyšší náklady než voda.

c) Vzduch

- Přirozené nebo nucené chlazení na vzduchu bez ponoru.
- U ocelí s vysokou kalitelností (např. vysoce legované nástrojové oceli).
- Minimální vnitřní pnutí, žádné deformace.
- Není potřeba chladicí lázeň.
- Nízká intenzita chlazení – nevhodné pro nelegované a nízkolegované oceli.
- Dlouhá doba chlazení.

d) Solné lázně

- Roztavené anorganické soli (např. NaNO_3 , KNO_3) používané při teplotách 150–500 °C.
- Používají se u tzv. izotermického kalení nebo ke zlepšení rozložení teploty a snížení pnutí.
- Rovnoměrný přenos tepla.
- Ochrana povrchu před oxidací (pokud se používá inertní atmosféra).
- Umožňuje kalení s výdrží (např. bainitické kalení).
- Agresivita solí vůči zařízení (koroze, nutnost čištění).
- Potřeba řízené manipulace kvůli bezpečnosti.

e) Polymerní roztoky

- Vodné roztoky polymerních látek (např. polyalkylenglykol), které umožňují nastavitelnou rychlost ochlazení.
- V moderních provozech, kde je potřeba variabilita chlazení mezi vodou a olejem.
- Možnost přizpůsobit ochlazování podle potřeby.
- Nižší riziko praskání než voda.
- Dobrá kontrola procesu.
- Vyšší pořizovací náklady.
- Nutnost pravidelné údržby roztoku.

f) Plynné médium (např. dusík, hélium, argon)

- Používá se zejména při vakuovém kalení, kde je chlazení realizováno inertním plynem.
- Vysokolegované oceli, nástroje, přesné součásti.
- Extrémně nízká oxidace povrchu.
- Výborná kontrola deformací.
- Vysoká investiční i provozní náročnost.
- Omezené chladicí schopnosti.

Tabulka 3 Porovnání kalících prostředí

Médium	Rychlost	Vhodné pro
Voda	Velmi vysoká	Nelegované a nízkolegované oceli
Olej	Střední	Legované oceli
Vzduch	Nízká	Vysokolegované oceli
Solné lázně	Řízená	Citlivé díly, izotermické kalení
Polymery	Nastavitelná	Univerzální použití
Plyn (N₂)	Nízká/střední	Vakuové kalení, nástroje

(zdroj: vlastní)

2.8.2 Martenzitické kalení

Martenzitické kalení je nejčastější formou kalení, jejímž cílem je dosažení tvrdé a odolné martenzitické struktury v oceli. Tento způsob kalení je založen na rychlém ochlazení austenitické fáze, které zabrání difúzní přeměně na perlit nebo bainit.

Při ohřevu dochází k transformaci struktury oceli na austenit. Po rychlém ochlazení nestačí uhlík difundovat do krystalové mřížky a vzniká přesycený, tvrdý a křehký martenzit. Ten je zodpovědný za výrazné zvýšení tvrdosti a pevnosti materiálu, ale zároveň zvyšuje jeho křehkost.

Aby vznikl martenzit, musí být překročena tzv. kritická rychlost ochlazení – nejnižší rychlost, při níž se zcela potlačí vznik perlitu nebo bainitu.

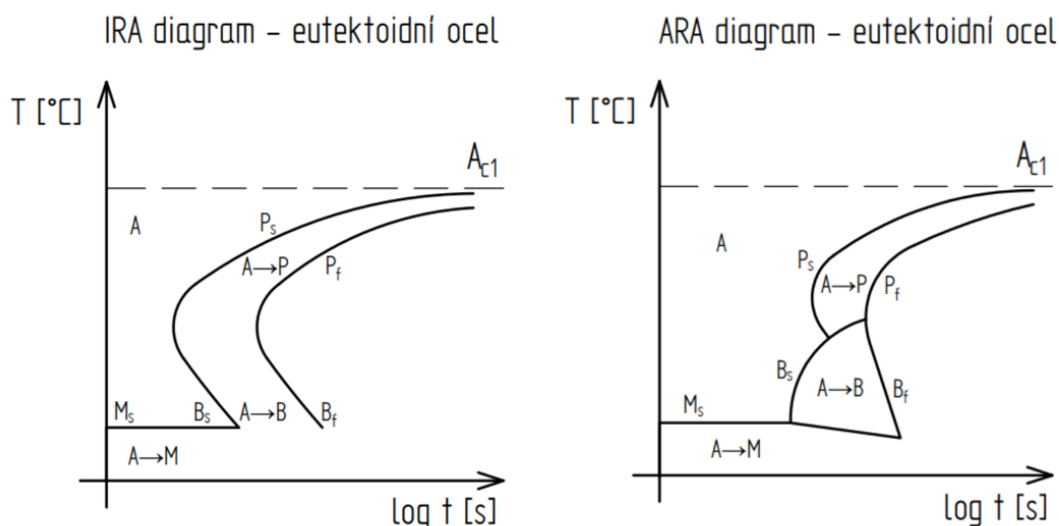
Martenzit je metastabilní fázi s velmi vysokou tvrdostí, ale také výraznou křehkostí, proto se kalení často kombinuje s popouštěním.

Chladicí médium bývá voda, olej, polymer, případně vzduch (u vysoce legovaných ocelí).

Martenzit vzniká bez difúze – tzv. displazivní přeměnou, kdy dojde k přeskupení atomů ve struktuře. Přeměna je téměř okamžitá a začíná při teplotě M_s (martenzit start) a končí při M_f (martenzit finish). M_f se běžně nachází pod bodem mrazu, a proto pokud se nepoužívá kalení s podchlazením se na tuto hodnotu v praxi nedostává.

M_s teplota: teplota, při které začíná přeměna austenitu na martenzit.

M_f teplota: teplota, při které je přeměna dokončena.



Obrázek 5 Ira a Ara diagram eutektoidní oceli

Jedná se o rychlý a efektivní proces při správné volbě parametrů. Vhodné pro nástroje, ložiska, formy a vysoce zatěžované strojní součásti. S možností přesného řízení výsledné tvrdosti v kombinaci s popouštěním. Za předpokladu dobré kalitelnosti (Omezená hloubka zakalení u nelegovaných ocelí).

2.8.3 Bainitické kalení

Bainitické kalení je alternativní metoda tepelného zpracování, při níž dochází k přeměně austenitu na bainit – strukturu ležící mezi perlitem a martenzitem. Tento způsob kalení umožňuje získat vyšší houževnatost při zachování relativně vysoké tvrdosti, čímž se eliminuje potřeba následného popouštění.

Ocel se nejprve ohřeje na teplotu nad kritický bod, aby se vytvořil austenit. Následně se ochladí na specifickou izotermickou teplotu (typicky mezi 250–500 °C), kde se drží konstantní teplota po dostatečnou dobu, než dojde k přeměně austenitu na bainit. Na rozdíl od martenzitického kalení je přeměna difuzní, ale velmi rychlá.

Bainitická struktura se dá dělit na:

- Horní bainit (350–500 °C): jemně rozvrstvená struktura feritu a cementitu. Tvrdost nižší, ale vyšší houževnatost.
- Dolní bainit (250–350 °C): jemnější struktura, vyšší tvrdost, ale stále lepší houževnatost než martenzit.

Mezi přední výhody bainitického kalení oproti kalení martenzitickému je, nižší vnitřní pnutí. Menší deformace součástí díky nižší teplotní změně.

Avšak nevýhody spojené s tímto tepelným zpracováním jsou, delší doba držení v izotermické oblasti (v řádu minut až hodin). Vyšší nároky na přesné řízení teploty a časového průběhu. Nutnost vhodné legované oceli s dostatečnou kalitelností.

Bainitické kalení se používá pro díly, u kterých je vyžadována, vyšší houževnatost než u běžně zakalených součástí, stabilní rozměry (např. ozubená kola, pružné součásti, železniční komponenty), zároveň však dobrá pevnost a odolnost proti opotřebení.

Tabulka 4 Porovnání bainitického a martenzitického kalení

Vlastnost	Bainitické kalení	Martenzitické kalení
Tvrdost	Nižší než martenzit	Vyšší
Houževnatost	Vyšší	Nižší (před popouštěním)
Vnitřní napětí	Nižší	Vysoké
Potřeba popouštění	Není nutná	Téměř vždy nutná
Rozměrová stálost	Vysoká	Nižší

(zdroj: vlastní)

Bainitické kalení je moderní metoda s velkým potenciálem pro vysoce namáhané a houževnaté součásti, u kterých nelze akceptovat deformace, křehkost ani potřebu dodatečných tepelných úprav.

2.9 Popouštění

Popouštění je tepelná úprava, která následuje po kalení, především martenzitickém. Jejím cílem je snížit vnitřní pnutí, zvýšit houževnatost a zlepšit rozměrovou stabilitu materiálu, při současném zachování dostatečné tvrdosti. Proces probíhá ohřevem zakalené oceli na teplotu nižší, než je kritická teplota (A_1), následovanou výdrží a volným ochlazením.

Při kalení vzniká martenzit – tvrdá, avšak velmi křehká struktura s vysokým vnitřním napětím. Popouštění umožňuje přeměnu části martenzitu na stabilnější fáze (např. ferit, cementit), čímž se zvyšuje houževnatost a snižuje křehkost. Rychlost a rozsah těchto přeměn závisí na teplotě a době popouštění.

2.9.1 Druhy popouštění

Popouštění se podle teplotního rozsahu dělí na tři základní typy:

a) Nízkoteplotní popouštění (150–250 °C)

Používá se k odstranění vnitřního pnutí při zachování maximální tvrdosti. Vhodné např. pro řezné nástroje a měřidla, kde je prioritou tvrdost.

Strukturou je popuštěný martenzit. Tvrdost je zachována téměř na úrovni zakaleného stavu. Houževnatost je mírně zvýšená. Výdrž bývá obvykle 1–2 hodiny.

b) Střednėteplotní popouštění (250–450 °C)

Kompromis mezi tvrdostí a houževnatostí. Používá se např. u pružin, nástrojů nebo tvářecích válců. Ve struktuře začíná precipitace karbidů, to vede ke zlepšení houževnatosti. Tvrdost je částečně snížena. Houževnatost je výrazně zvýšena. Výdrž bývá 1–2 hodiny dle tloušťky a typu oceli.

c) Vysokoteplotní popouštění (450–650 °C)

Zajišťuje výrazné snížení napětí a zvýšení houževnatosti. Běžně se používá při zušlechťování. Struktura po této operaci je sorbit, jemně rozptýlené karbidy ve feritické mřížce. Tvrdost je podstatně nižší, ale stále dostatečná. Houževnatost je vysoká. Výdrž bývá až 1–3 hodiny podle materiálu.

2.9.2 Technologické zásady

Popouštění by mělo následovat bezprostředně po kalení, aby se zabránilo prasknutí vlivem vnitřního napětí.

Při některých teplotách (zejména 300–400 °C) může dojít ke snížení houževnatosti – tzv. popouštěcí křehkosti. Tento jev je způsoben segregací nečistot (např. fosforu, antimonu) na hranicích zrn. Riziko lze omezit rychlým ochlazením po výdrži.

Teplota i doba výdrže musí být voleny podle typu oceli, rozměrů součástí a požadovaných vlastností.

Pro dosažení optimální kombinace vlastností je vhodné zvážit vícestupňové popouštění.

Popouštění je klíčovým nástrojem pro finální doladění vlastností zakalených součástí. Správně provedený popouštěcí proces zajišťuje dlouhou životnost, bezpečnost a funkčnost komponent i při dynamickém nebo rázovém zatížení.

2.10 Chemicko-tepelné zpracování

2.2 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování je kombinace tepelné úpravy a změny chemického složení povrchové vrstvy materiálu prostřednictvím difuze atomů z okolního prostředí. Cílem je vytvořit povrchovou vrstvu s odlišnými vlastnostmi (tvrdost, odolnost vůči opotřebení, korozní odolnost) než má jádro materiálu.

Chemicko-tepelné zpracování umožňuje výrazně zvýšit užité vlastnosti součástí prostřednictvím modifikace jejich povrchové vrstvy bez negativního ovlivnění houževnatosti jádra. Výběr metody závisí na požadovaných vlastnostech, konstrukčním materiálu a charakteru namáhání součástí.

Typickými metodami chemicko-tepelného zpracování jsou cementování, nitridace, karbonitridace, kyanidace a boronizace.

2.10.1 Cementování

Cementování je proces, při němž dochází k nasycování povrchu oceli uhlíkem při vysokých teplotách (850–950 °C) v aktivní uhlíkové atmosféře. Při cementování difundují atomy uhlíku z prostředí do povrchových vrstev oceli. Výsledkem je vznik uhlíkem obohacené vrstvy na povrchu, zatímco jádro zůstává beze změny.

Po cementaci následuje obvykle kalení a popouštění pro dosažení požadovaných vlastností.

Během cementování se mohou používat různé typy prostředí, které potom působí na materiál.

Podle skupenství je lze dělit na:

- Pevné v podobě práškového cementování.
- Kapalné většinou jakožto solné lázně.
- Plynné směsi CO, CH₄, N₂ atd.

Doba cementování bývá několik hodin v rozmezí 2–20 h. Hloubka cementační vrstvy je 0,2–2 mm podle požadavku.

Předními vlastnostmi cementování je následně vysoká tvrdost povrchu (~60–65 HRC), vysoká odolnost proti opotřebení, zachování houževnatého jádra.

Cementování se využívá u součástí vystavených vysokému opotřebení, např. ozubená kola, hřídele, pístní čepy, vačky.

2.10.2 Nitridace

Nitridace je proces, při němž se povrch oceli nasycuje dusíkem při nižších teplotách než u cementace (500–580 °C). Dusík reaguje s prvky obsaženými v oceli (např. Al, Cr, Mo) za vzniku velmi tvrdých nitridů.

Difuze atomárního dusíku do povrchových vrstev. Vytváří tvrdé nitridy, které zvyšují odolnost proti opotřebení a únavě. Proces běžně probíhá v amoniaku (NH₃) jako nosič dusíku v plynném procesu. Nebo jakožto plazmová nitridace (iontová nitridace) s řízenou ionizací dusíku. Doba procesu se pohybuje okolo 10–100 hodin a hloubka nitridační vrstvy je 0,1–0,7 mm.

Mezi hlavní výhody patří velmi vysoká povrchová tvrdost (~1000–1200 HV), výborná rozměrová stálost (minimální deformace), zvýšená odolnost proti opotřebení a korozi.

Nitridace se uplatňuje u vysoce zatěžovaných součástí, jako jsou hřídele, klikové hřídele, pístní kroužky, formy pro vstřikování plastů.

2.10.3 Další chemicko-tepelné procesy

Karbonitridace:

Kombinované nasycování uhlíkem a dusíkem. Nižší teplota než cementace (750–880 °C). Vyšší tvrdost povrchu a lepší odolnost proti opotřebení.

Boronizace:

Nasycování povrchu bórem. Vznik tvrdých vrstev boridů (extrémně vysoká tvrdost, nad 1500 HV). Vysoká odolnost proti opotřebení a korozi.

Kyanidace:

Ocel se nasycuje uhlíkem a dusíkem z kyanidových solí při teplotách 850–880 °C. Vzniká tvrdá povrchová vrstva s dobrou odolností proti opotřebení. Historicky rozšířená, dnes částečně nahrazená ekologičtějšími a bezpečnějšími metodami.

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI A METODY JEJICH MĚŘENÍ

Mechanické vlastnosti materiálů popisují jejich chování při působení vnějších sil. Určují způsobilost materiálu přenášet zatížení, odolávat deformaci a zajišťovat funkčnost výrobků během jejich životnosti.

Měření mechanických vlastností umožňuje správnou volbu materiálu pro konkrétní aplikaci a kontrolu kvality výroby. V praxi se používají standardizované zkušební metody, které umožňují srovnatelné hodnocení.

Mezi hlavní mechanické vlastnosti materiálů patří zejména:

- **Pevnost v tahu** – schopnost materiálu odolávat silám působícím ve směru prodloužení.
- **Mez kluzu** – napětí, při němž materiál začíná trvale deformovat bez dalšího zvyšování zatížení.
- **Tvrdost** – odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa nebo proti opotřebení.
- **Houževnatost** – schopnost materiálu absorbovat energii před porušením.
- **Únavová pevnost** – odolnost proti porušení při opakovaném cyklickém zatěžování.
- **Tvárnost** – schopnost materiálu plasticky se deformovat bez porušení.

Každá z těchto vlastností má vlastní specifickou metodu měření, jejíž volba závisí na typu materiálu, požadované přesnosti a účelu zkoušky.

3.1 Dělení mechanických vlastností a jejich zkoušení

Mechanické vlastnosti materiálů lze rozdělit podle charakteru zatěžování a výsledného chování materiálu.

Základní skupiny mechanických vlastností:

Statické vlastnosti

Posuzují materiál při pomalém zatěžování, například pevnost v tahu, mez kluzu, tvrdost a tažnost.

Dynamické vlastnosti

Popisují chování materiálu při rychlém zatěžování, například houževnatost a únavová pevnost.

Technologické vlastnosti

Určují vhodnost materiálu pro technologické operace, například svařitelnost, obrobitelnost nebo tváritelnost.

Metody zkoušení:

Statické zkoušky

Provádějí se za pomalého a rovnoměrného zatížení (např. tahová zkouška, statická zkouška tvrdosti).

Dynamické zkoušky

Vyhodnocují odezvu materiálu na rychlé, nárazové nebo opakované zatížení (např. rázová zkouška, únavové zkoušky).

Správný výběr typu zkoušky závisí na požadovaných vlastnostech materiálu a způsobu jeho zatěžování v praxi.

3.2 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejčastěji používané metody hodnocení mechanických vlastností, protože jsou rychlé, jednoduché a nevyžadují destrukci zkoušeného vzorku. Tvrdost materiálu vyjadřuje jeho odpor proti vniknutí cizího tělesa nebo proti trvalé deformaci. Tvrdost závisí na pevnosti, struktuře a typu materiálu.

Zkoušky tvrdosti se rozdělují na statické a dynamické podle způsobu zatěžování.

3.2.1 Statické zkoušky tvrdosti

Při statických zkouškách tvrdosti se zatěžovací síla působí pomalu a rovnoměrně, přičemž se hodnotí velikost nebo hloubka vtisku, který zůstane v materiálu po odebrání zatížení.

Brinellova metoda (HB)

Brinellova zkouška spočívá ve vtlačení ocelové nebo tvrdokovové kuličky do povrchu zkušebního materiálu konstantní silou po stanovenou dobu. Po odebrání zatížení se měří průměr vzniklého vtisku. Tato metoda se využívá především pro měkčí a středně tvrdé kovy, jako jsou oceli, litiny a slitiny neželezných kovů. Výhodou je jednoduchost a robustnost, nevýhodou větší velikost vtisku, což omezuje použití na tenké materiály nebo povrchové vrstvy.

Vickersova metoda (HV)

Vickersova metoda používá diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který se vtlačuje do povrchu materiálu. Po zatížení se opticky změří délky diagonál čtvercového vtisku. Tato metoda je velmi univerzální – vhodná jak pro měkké, tak i velmi tvrdé materiály, a to včetně tenkých vrstev, svarů nebo mikroskopických oblastí. Hlavní nevýhodou je vyšší náročnost na kvalitu povrchu a optické vyhodnocení.

Rockwellova metoda (HR)

Rockwellova metoda měří tvrdost na základě hloubky vtisku po zatížení diamantovým kuželem nebo ocelovou kuličkou. Používá různé stupnice (např. HRC, HRB) podle typu zkušebního tělesa a zatížení. Její výhodou je jednoduchost, rychlost a absence potřeby optického měření, proto se hojně využívá v sériové výrobě. Může být, ale ovlivněna strukturou, velikostí a tvarem zkušebního tělesa.

Každá ze statických metod má své výhody i omezení a volí se s ohledem na typ materiálu, požadovanou přesnost a podmínky měření. Brinellova metoda je vhodná pro měkké materiály, Vickersova pro velmi tvrdé nebo jemné části, zatímco Rockwellova se uplatňuje tam, kde je požadováno rychlé a jednoduché měření.

3.2.2 Dynamické zkoušky tvrdosti

Dynamické zkoušky tvrdosti vyhodnocují odpor materiálu proti rychlému nebo nárazovému zatížení. Na rozdíl od statických metod, které pracují s pomalým vtlačováním, se u dynamických zkoušek sleduje reakce materiálu při nárazu, například výška odskoku nebo změna rychlosti zkušebního tělesa. Tyto metody jsou rychlé, nenáročné na přípravu a často se používají v provozních podmínkách, kde není možné odebírat vzorky nebo provádět laboratorní zkoušky.

Shoreova metoda (HS)

Při této zkoušce padá z výšky standardizovaný trn na povrch zkoušeného materiálu. Měří se výška jeho odskoku, která je úměrná tvrdosti materiálu. Metoda je jednoduchá a rychlá, nejčastěji se používá pro měkké materiály, jako jsou plasty, guma nebo měkké slitiny. Nehodí se pro velmi tvrdé kovy.

Leebova metoda (HL)

Leebova zkouška vychází z principu měření změny rychlosti zkušebního tělíska před dopadem a po odrazu od povrchu materiálu. Z rozdílu rychlostí se určí relativní tvrdost. Výhodou je možnost použití přenosných přístrojů, což umožňuje měřit tvrdost přímo na velkých, těžkých nebo již nainstalovaných součástech bez nutnosti jejich demontáže. Metoda se využívá především u kovových materiálů a strojních součástí v terénu nebo výrobě.

Dynamické zkoušky jsou vhodné tam, kde je potřeba rychlé, orientační a neinvazivní měření tvrdosti. Nejsou tak přesné jako statické metody, ale mají výhodu jednoduchého použití, zejména při kontrole rozměrných dílů v provozu. Výsledky lze srovnávat s tradičními stupnicemi (např. HB, HV) pomocí převodních tabulek, ale s jistou tolerancí.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato bakalářská práce si kladla za cíl splnit následující úkoly:

1. Zpracovat přehled odborné literatury vztahující se k danému tématu.
2. Realizovat výrobu zkušebních vzorků při odlišných podmínkách tepelného zpracování.
3. Provést měření mechanických vlastností těchto vzorků.
4. Analyzovat a vyhodnotit získané výsledky.

V teoretické části se první kapitola zaměřuje na popis a klasifikaci ocelí, včetně jejich označování dle příslušných norem. Stěžejní část práce se věnuje problematice tepelného zpracování, přičemž detailně rozebírá jednotlivé typy žíhání a kalení. Dále se soustředí na chemicko-tepelné úpravy ocelí. Finální kapitola se věnuje mechanickým vlastnostem, zejména metodám měření tvrdosti a interpretaci výsledků těchto zkoušek.

V praktické části bylo cílem provést tepelné zpracování oceli 17 029 za různých podmínek a zkoumat, jak působí na výsledné vlastnosti. Přesněji se jednalo o tvrdost měřenou pomocí Rockwellova tvrdoměru, s výsledky zaneseny na stupnici HRC.

5 VÝBĚR MATERIÁLU A ZKUŠEBNÍHO VZORKU

Zkoumaným materiálem v této práci byla vybrána ocel ČSN 17 029. Jedná se o korozivzdornou chromovou ocel s vysokým obsahem uhlíku, která v zakaleném stavu dosahuje vysoké tvrdosti a dobré odolnosti proti opotřebení. Díky těmto vlastnostem je ideální pro výrobu přesných a vysoce namáhaných nástrojů, jako jsou nože, nůžky, chirurgické nástroje, měřidla či břitvy vah. Má dobrou obrobiteľnosť a je vhodná pro tvárnenie za tepla, nicméně její svařitelnost je omezená. Odolnost proti korozi je výrazná především po vyleštění povrchu, což ji činí vhodnou i pro použití v prostředí s vyšší vlhkostí nebo kontaktem s potravinami.[25]

Tabulka 5 Chemické složení oceli 17 029 v hm%

C	Mn	Si	Cr	P	S
0,40–0,50	max 0,90	max 0,70	14,0–16,0	max 0,040	max 0,035

Chemické složení uvedené v Tabulka 5 uvádí distribuci prvků v oceli. Jednotlivé prvky potom mají na ocel následující vlivy:

- **Uhlík:** důležitý prvek oceli, v koncentraci 0,4–0,5 hm % výrazně ovlivňuje pevnost a tvrdost oceli. Tento obsah uhlíku zajišťuje vznik martenzitické struktury při kalení, což vede k vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Na druhé straně však může docházet k určitému snížení houževnatosti a tvárnosti, protože vyšší obsah uhlíku zpevňuje strukturu, což zároveň ztěžuje její deformaci. Uhlík také přispívá k zvýšení mezní pevnosti a únavové odolnosti oceli, což ji činí vhodnou pro aplikace vyžadující vysokou mechanickou pevnost. V této koncentraci uhlík poskytuje oceli vyvážený poměr mezi tvrdostí a houževnatostí, což je ideální pro širokou škálu aplikací.
- **Mangan:** při koncentraci do 0,9 hm % plní mangan v oceli především funkci dezoxidace a odsíření, kdy váže síru do stabilního mangansulfidu (MnS), čímž zabraňuje vzniku škodlivého železného sulfidu, který by mohl způsobovat praskání při tepelném zpracování. Zároveň mírně zvyšuje pevnost, tvrdost a kalitelnost oceli, aniž by výrazně negativně ovlivňoval její houževnatost nebo tažnost. V této koncentraci přispívá i ke zlepšení obrobiteľnosti, protože částice MnS usnadňují třískové obrábění.
- **Křemík:** v koncentraci do 0,7 hm % se v oceli využívá především jako dezoxidační prvek, který váže zbytkový kyslík a tím přispívá k vyšší čistotě a kvalitě kovové

struktury. V tomto množství také mírně zvyšuje pevnost, tvrdost a mez kluzu, aniž by negativně ovlivňoval houževnatost nebo tvárnost oceli. Při těchto nízkých koncentracích navíc zlepšuje tepelnou stabilitu a přispívá k rovnoměrné struktuře po tepelném zpracování.

- **Chrom:** v koncentraci 14–16 hm % výrazně zvyšuje **korozní odolnost** oceli díky tvorbě stabilní a kompaktní pasivační vrstvy oxidu chromitého na jejím povrchu. Tato vrstva zabraňuje pronikání kyslíku a jiných korozivních látek do kovové struktury. Současně chrom přispívá ke **zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a kalitelnosti** oceli a zlepšuje její **tepelnou a chemickou stabilitu**. V této koncentraci už výrazně ovlivňuje strukturu oceli a podporuje vznik martenzitické či feritické fáze v závislosti na ostatních složkách a způsobu tepelného zpracování. Celkově tedy chrom v tomto množství významně zlepšuje mechanické i chemické vlastnosti oceli.
- **Fosfor a síra:** jsou obecně velmi škodlivé prvky, a proto je snaha mít jejich koncentraci co nejnižší.

[9] [11] [12] [25] [26]

Zkušební vzorky byly vyrobeny z tyče kruhového průřezu o průměru 20 mm a zkráceny na délku 20 mm.

V materiálovém listu [Příloha 1] jsou uvedeny doporučené rozsahy teplot a médium pro optimální kalení. Konkrétně se jedná o $(1000 \div 1050)^\circ\text{C}$ chlazení do oleje. A dále jsou tam uvedeny teplotní a časový rozsah pro popouštění, který je $(150 \div 200)^\circ\text{C}$ s výdrží na teplotě $(15 \div 30)$ minut.

6 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ

Tepelné zpracování probíhalo na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, Fakultě technologické. Na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC ochlazování v rámci kalení bylo provedeno do oleje a do vody. Následné popouštění bylo prováděno na vzduchu.



Obrázek 6 Kalící pracoviště s přípravkem na ohřev vzorků

6.1 Podmínky tepelného zpracování

Zkoumané vzorky byly zpracovány za různých teplot, různé doby výdrže a různého kalícího média. Jednotlivé teploty a doby jsou uvedeny v Tabulka 7 a Tabulka 9. Zkoumalo se 10 vzorků pro každé podmínky.

Zvolené teploty byly vybrány pomocí materiálového listu uveden v Příloze 1. Byly zvoleny 3 teploty, maximální, minimální a střední z daného rozmezí stanovené materiálovým listem. Tyto teploty byly zvoleny se záměrem vypořádat rozdíly mezi kritickými hodnotami a střední teplotou, která by měla být nejvíce optimální v daném rozsahu. Dále se experimentovalo s dobou výdrže na kalící teplotě, za účelem zjištění optimálních podmínek. Na rozdíl od teploty materiálový list nespecifikoval krajní meze doby výdrže. Proto se v této práci budou zkoumat 3 různé doby. První je 20 minut, druhá 40 minut a třetí 60 minut, pro každou teplotu a každé chladicí médium. V materiálovém listu se doporučuje jako kalící médium pouze olej, avšak tato práce se bude zabývat i vodou a jak působí na výsledné vlastnosti.

Při popouštění byly zvoleny jedny podmínky stávající se ze stejné teploty a stejné doby výdrže. Popouštěcí teplota byla zvolena 180 °C, což byla střední teplota z doporučeného rozsahu a doba výdrže 20 min, která byla také střední hodnotou z doporučeného rozsahu.

6.2 Postup tepelného zpracování

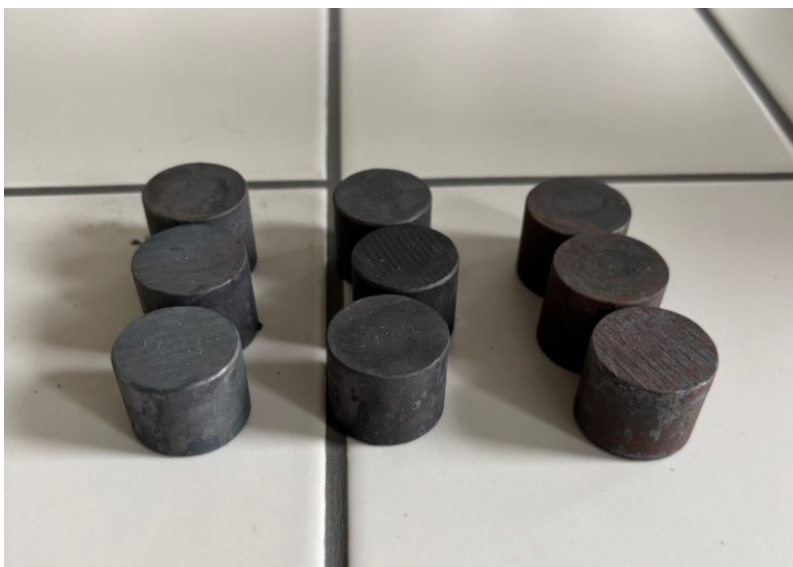
Postup práce byl následovný:

1. Pec spolu s přípravkem, byla vyhřáta na kalící teplotu 1000/1025/1050 °C
2. Vzorky, které se uložili do přípravku s uhlím, aby se zabránilo oduhličení, se vložili do pece.
3. Následně se vydrželo na teplotě 20/40/60 minut
4. Přípravek se vyjmul z pece, aby se z něj mohl vyextrahovat vzorek
5. Vzorek se zakalil do oleje/vody
6. Vzorek se očistil a označil číslem
7. Označené vzorky se změřili pomocí Rockwellova tvrdoměru
8. Popouštěcí pec se vyhřála na teplotu 180 °C
9. Vzorky byly v peci popouštěny po dobu 20 minut

10. Po vyjmutí z pece byly chlazeny na vzduchu
11. Zušlechtěné vzorky byly následně změřeny pomocí Rockwellova tvrdoměru
12. Postup se opakoval pro všechny zbývající vzorky



Obrázek 7 Vzorek před kalením



Obrázek 8 Měřené vzorky

Na Obrázek 8 jsou vidět měřené vzorky. Vlevo jsou vzorky bez tepelného zpracování, uprostřed zakalené do oleje a vpravo zakalené do vody.

7 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

K posouzení mechanických vlastností byla použita metoda měření tvrdosti podle Rockwella, konkrétně stupnice HRC, v souladu s normou ČSN EN ISO 6508. Tato metoda patří mezi nejrozšířenější statické zkoušky tvrdosti a její výhodou je, že nevyžaduje speciální úpravu povrchu zkušebních těles. Tvrdost byla měřena ve stejné laboratoři, kde probíhalo i tepelné zpracování.



Obrázek 9 Tvrdoměr



Obrázek 10 Štítek tvrdoměru

8 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Naměřené hodnoty byly zjištěny pomocí zkoušky tvrdosti dle Rockwella, stupnice HRC. Celkem bylo provedeno 10 měření pro každý vzorek a dohromady naměřeno 370 hodnot. Tyto hodnoty byly následně uspořádány do tabulek a grafů. Při zpracování těchto hodnot byly použity následující vzorce:

- Vzorec pro výpočet průměrné hodnoty

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

- Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky

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

Tabulka 6 Naměřené hodnoty po kalení do oleje

Kalení										
17029										
Bez tep. zprac.		1000 °C			1025 °C			1050 °C		
0		Olej	Olej	Olej	Olej	Olej	Olej	Olej	Olej	Olej
0		20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min
0		HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
1	19	57	63	61	58	63	55	62	60	54
2	17	56	64	62	59	61	54	61	60	53
3	21	55	65	61	60	62	58	60	59	52
4	20	54	62	60	60	60	58	63	59	54
5	21	53	64	62	59	62	57	62	58	56
6	20	55	61	63	60	63	56	60	60	55
7	19	54	64	61	59	62	57	63	59	54
8	20	56	63	62	58	63	58	61	58	52
9	20	54	62	60	60	61	56	62	60	53
10	19	54	61	60	59	64	57	60	61	56
$\bar{x}$	19,60	54,80	62,90	61,20	59,20	62,10	56,60	61,40	59,40	53,90
σ	1,17	1,23	1,37	1,03	0,79	1,20	1,35	1,17	0,97	1,45

Tabulka 7 Naměřené hodnoty po pouštění zakalených vzorků do oleje

Popouštění olej 180 °C 20 min

17029										
Bez tep. zprac.		Popouštění 1000 °C			Popouštění 1025 °C			Popouštění 1050 °C		
0		20	40	60	20	40	60	20	40	60
0		min			min			min		
0		HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
1	19	52	58	58	55	59	53	58	57	50
2	17	51	59	58	56	58	52	57	56	49
3	21	53	59	57	56	58	53	59	58	51
4	20	52	58	56	57	57	54	58	57	50
5	21	52	60	57	56	56	56	58	56	49
6	20	51	61	58	57	59	52	59	55	48
7	19	53	60	59	55	60	53	57	56	50
8	20	50	62	58	58	58	51	58	57	50
9	20	51	59	58	55	57	50	59	58	51
10	19	51	58	59	56	58	51	58	57	51
$\bar{x}$	19,60	51,60	59,40	57,80	56,10	58,00	52,50	58,10	56,70	49,90
σ	1,17	0,97	1,35	0,92	0,99	1,15	1,72	0,74	0,95	0,99

Tabulka 8 Naměřené hodnoty po kalení do vody

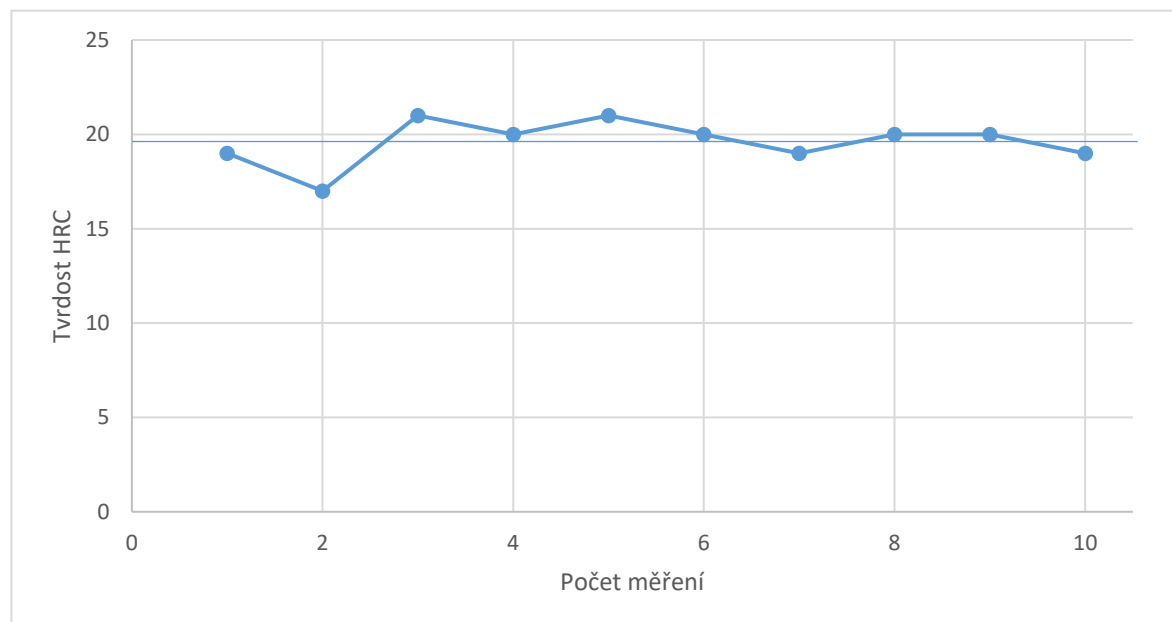
Kalení

17029										
Bez tep. zprac.		1000 °C			1025 °C			1050 °C		
0		Voda	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
0		20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min	20 min	40 min	60 min
0		HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
1	19	52	55	58	58	58	56	60	57	55
2	17	51	56	59	58	58	55	61	58	54
3	21	52	55	60	59	62	52	59	56	53
4	20	53	56	61	60	61	58	58	59	52
5	21	52	54	60	61	59	52	60	58	55
6	20	51	53	58	60	60	54	62	57	54
7	19	52	54	59	59	59	56	61	56	52
8	20	53	55	59	58	61	55	60	57	53
9	20	55	54	60	59	60	53	59	56	51
10	19	50	56	60	60	59	54	58	56	50
$\bar{x}$	19,60	52,10	54,80	59,40	59,20	59,70	54,50	59,80	57,00	52,90
σ	1,17	1,37	1,03	0,97	1,03	1,34	1,90	1,32	1,05	1,66

Tabulka 9 Naměřené hodnoty po pouštění zakalených vzorků do vody

Popouštění 180 °C 20 min										
17029										
Bez tep. zprac.		Popouštění 1000 °C			Popouštění 1025 °C			Popouštění 1050 °C		
0		20	40	60	20	40	60	20	40	60
0		min			min			min		
0		HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC	HRC
1	19	51	53	56	56	57	52	56	55	50
2	17	50	52	57	57	57	51	55	54	49
3	21	50	54	58	58	56	51	56	54	48
4	20	51	51	56	54	55	52	56	55	48
5	21	49	56	55	55	58	53	57	56	49
6	20	50	55	57	56	58	50	58	58	50
7	19	51	54	57	57	57	54	55	58	51
8	20	50	52	58	55	57	53	54	52	50
9	20	49	52	56	59	58	51	57	52	52
10	19	52	51	58	56	58	52	57	54	50
$\bar{x}$	19,60	50,30	53,00	56,80	56,30	57,10	51,90	56,10	54,80	49,70
σ	1,17	0,95	1,70	1,03	1,49	0,99	1,20	1,20	2,10	1,25

8.1 Bez tepelného zpracování



Obrázek 11 Naměřené hodnoty bez tepelného zpracování

Z naměřených hodnot vyplývá, že hodnota tvrdosti podle HRC materiálu v nezakaleném stavu je $\bar{x} = (19,6 \pm 1,17)$ HRC. Z Obrázek 11 můžeme vidět, že měření bylo konzistentní a nedocházelo zde k žádným hrubým chybám.

8.2 Vzorky kalené do oleje

Následující kapitola, zabývající se vzorků zakalených do oleje, je rozdělena do tří podkapitol zaměřené na jednotlivé teploty.

8.2.1 Kaleno na 1000 °C

Hodnoty uvedené v Tabulka 6 a Tabulka 7 byly následně vyobrazeny v Obrázek 12 a Obrázek 13. V obrázku se porovnávají průměrné hodnoty tvrdosti se směrodatnou odchylkou uvedenou v podobě chybové úsečky.

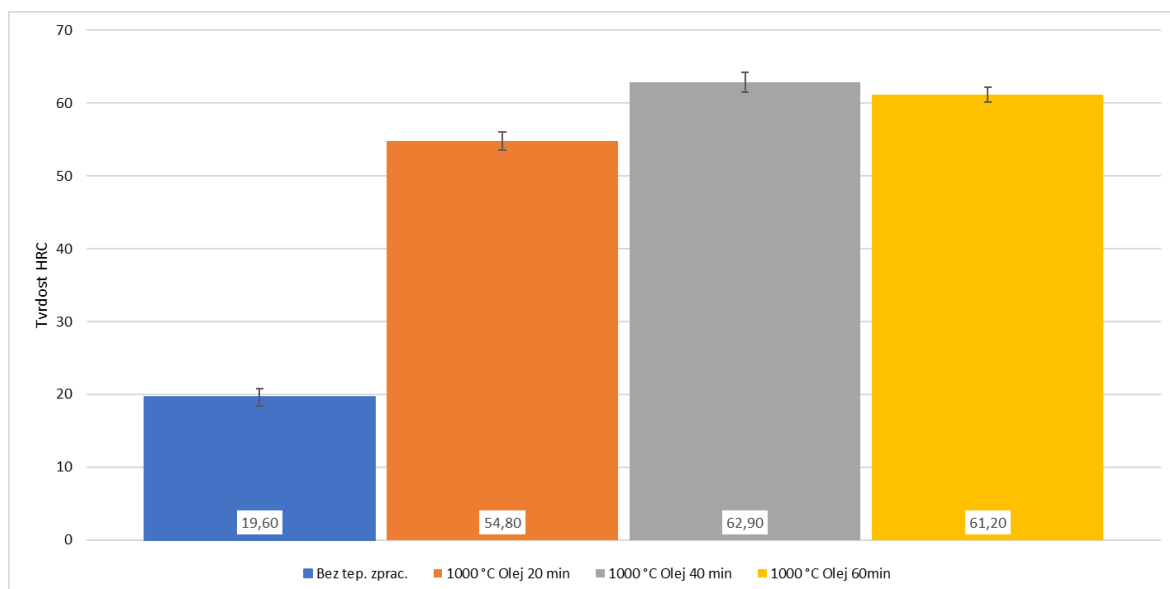
V této sérii grafů byly hodnoceny hodnoty tvrdosti po kalení v oleji při teplotě 1000 °C a následném popouštění. První sloupec v každém z grafů slouží pouze pro porovnání a není dále hodnocen. Zbývající tři sloupce odpovídají výdržím na kalicí teplotě v délce 20, 40 a 60 minut.

Při kalení bylo nejvyšší tvrdosti dosaženo u vzorku s výdrží 40 minut, kdy byla naměřena hodnota 62,9 HRC. Vzorek s výdrží 60 minut vykazoval mírně nižší tvrdost 61,2 HRC, zatímco nejnižší tvrdosti dosáhl vzorek s výdrží 20 minut, a to 54,8 HRC.

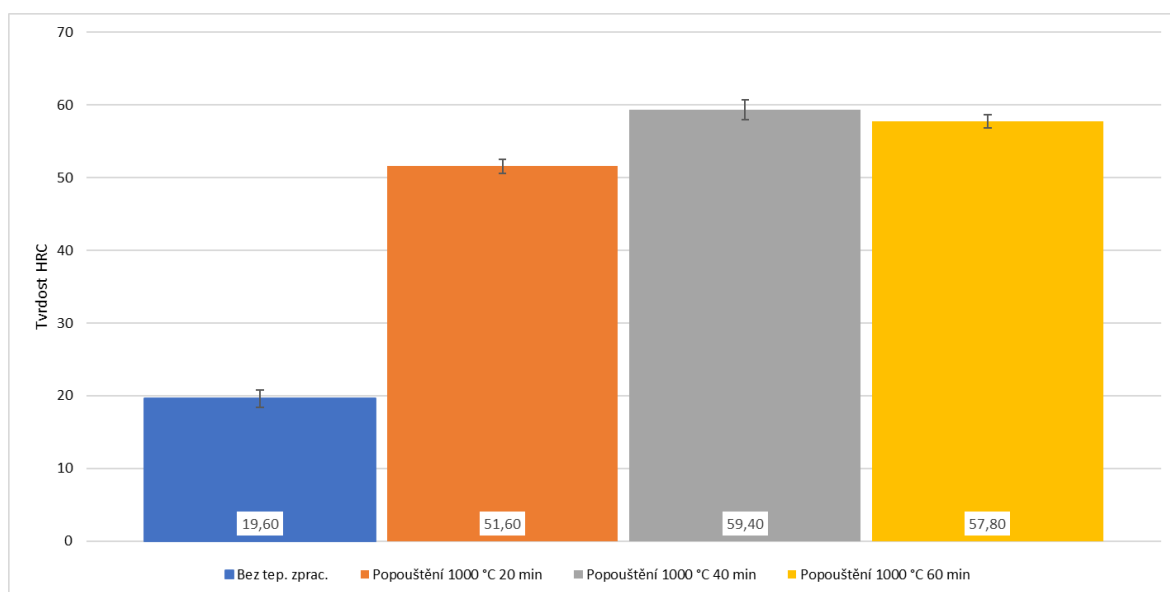
Po popuštění došlo k očekávanému snížení tvrdosti ve všech případech. U vzorku s výdrží 40 minut byla naměřena hodnota 59,4 HRC, což stále představuje vysokou tvrdost vhodnou pro praktické použití. Tvrdost vzorku s výdrží 60 minut klesla na 57,8 HRC, zatímco u výdrže 20 minut byla tvrdost po popuštění nejnižší – 51,6 HRC.

Při porovnání hodnot před a po popuštění vyplývá, že se tvrdost snížila přibližně o 3 až 4 HRC. Tento pokles je považován za přijatelný vzhledem k tomu, že výsledné hodnoty se stále nacházejí v oblasti vhodné pro praktické využití. Tvrdost v rozmezí okolo 60 HRC je v kontextu použití této oceli považována za adekvátní.

Vzorky s výdrží 20 minut na kalicí teplotě vykazovaly nejnižší tvrdost jak před, tak i po popuštění. Naměřené hodnoty byly minimálně o 6 HRC nižší než u ostatních vzorků. Z toho lze usuzovat, že výdrž 20 minut nebyla při kalicí teplotě 1000 °C dostatečně dlouhá k tomu, aby v materiálu došlo k úplné rekrytalizaci. Tato nedostatečná přeměna struktury se projevila negativně na výsledné tvrdosti.



Obrázek 12 Kaleno do oleje 1000 °C



Obrázek 13 Kaleno do oleje 1000 °C, popouštěno

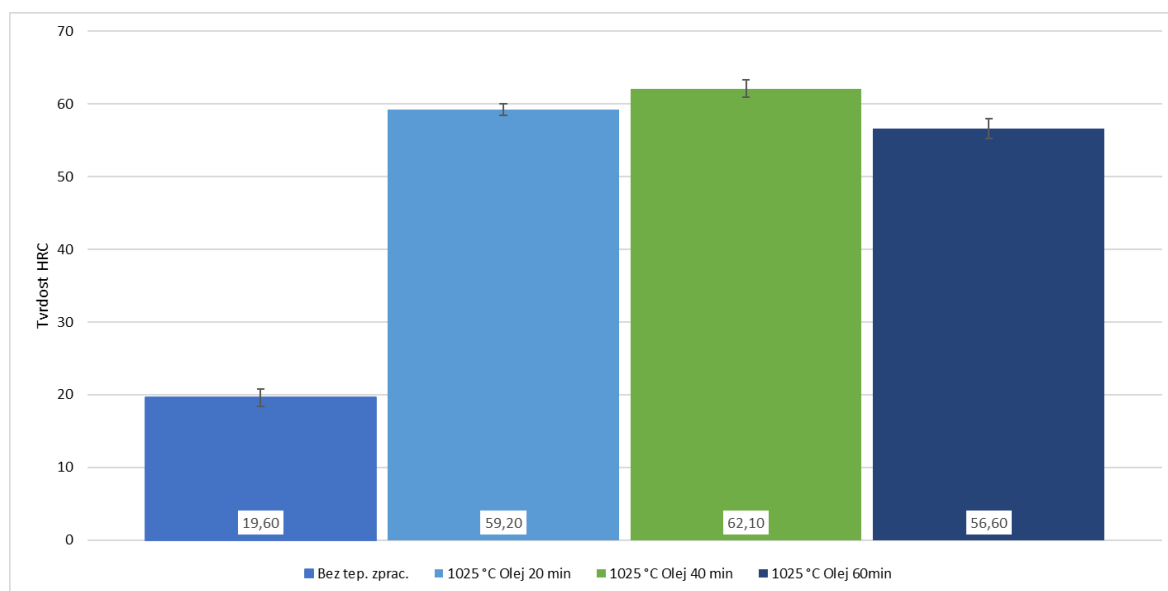
8.2.2 Kaleno na 1025 °C

V Obrázek 14 a Obrázek 15 jsou znázorněny hodnoty tvrdosti po kalení v oleji a následném popouštění při různých délkách výdrže na kalici teplotě 1025 °C. První sloupec, sloužící k porovnání, není dále hodnocen. Zbývající tři sloupce odpovídají výdržím 20, 40 a 60 minut.

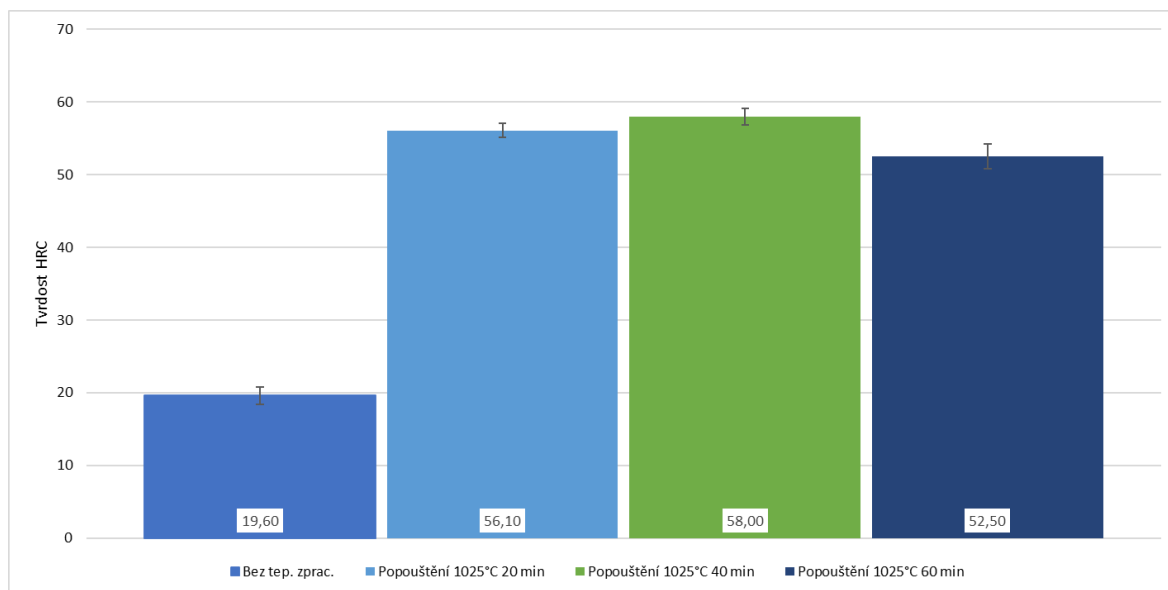
Na Obrázku 14 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti po samotném kalení v oleji. Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo při výdrži 40 minut, kdy byla naměřena hodnota 62,1 HRC. Při výdrži 20 minut byla dosažena tvrdost 59,2 HRC, což je považováno za optimální hodnotu v rámci této série. Naopak při výdrži 60 minut došlo k výraznému poklesu tvrdosti na 56,6 HRC.

Nižší hodnota tvrdosti při delší výdrži je pravděpodobně způsobena nadměrnou dobou ohřevu na teplotě 1025 °C, během níž došlo k úplné přeměně struktury na austenit. Prodloužená výdrž zároveň umožnila růst austenitických zrn, což mělo negativní vliv na výslednou tvrdost materiálu.

Obrázek 15 znázorňuje výsledné hodnoty tvrdosti po popuštění kalených vzorků. I zde bylo nejvyšší tvrdosti dosaženo při výdrži 40 minut, konkrétně 58,0 HRC. U vzorku s výdrží 20 minut byla po popuštění naměřena hodnota 56,1 HRC, zatímco u výdrže 60 minut došlo k dalšímu poklesu tvrdosti na 52,5 HRC. Trend pozorovaný po kalení tak zůstává zachován i po popuštění, přičemž negativní vliv nadměrné výdrže na výslednou tvrdost je stále patrný.



Obrázek 14 Kaleno do oleje 1025 °C



Obrázek 15 Kaleno do oleje 1025 °C, popuštěno

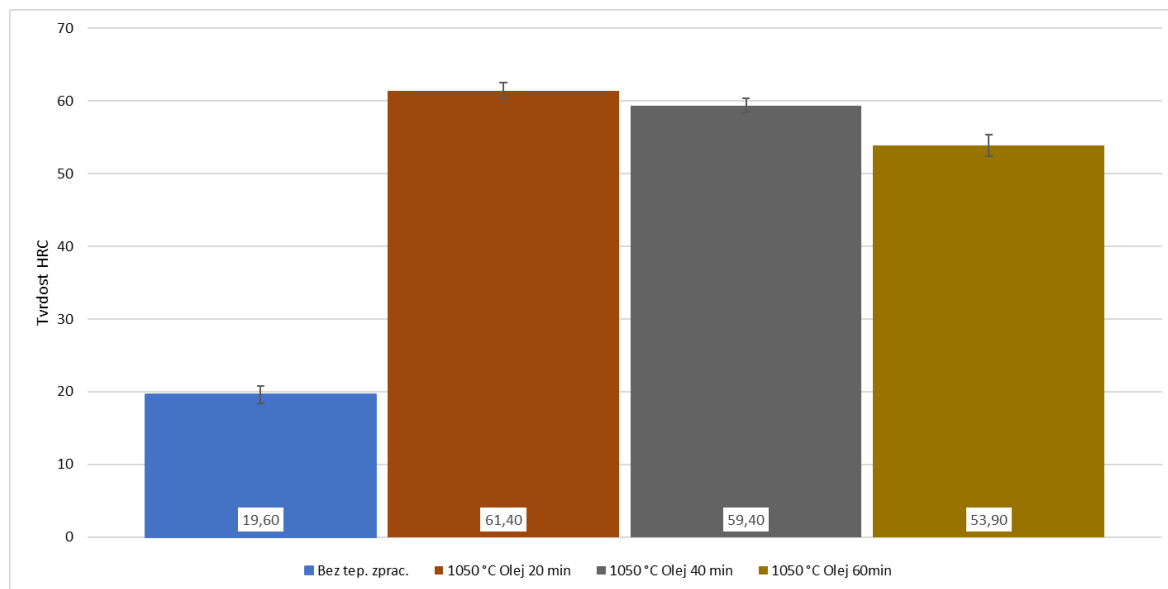
8.2.3 Kaleno na 1050 °C

Ve třetí sérii obrázků, Obrázek 16 a Obrázek 17, byly vyhodnoceny výsledky tvrdosti po kalení v oleji při teplotě 1050 °C a následném popuštění. První sloupec v každém z obrázků slouží pouze k orientačnímu porovnání a není dále hodnocen. Zbývající tři sloupce odpovídají výdržím na kalici teplotě v délce 20, 40 a 60 minut.

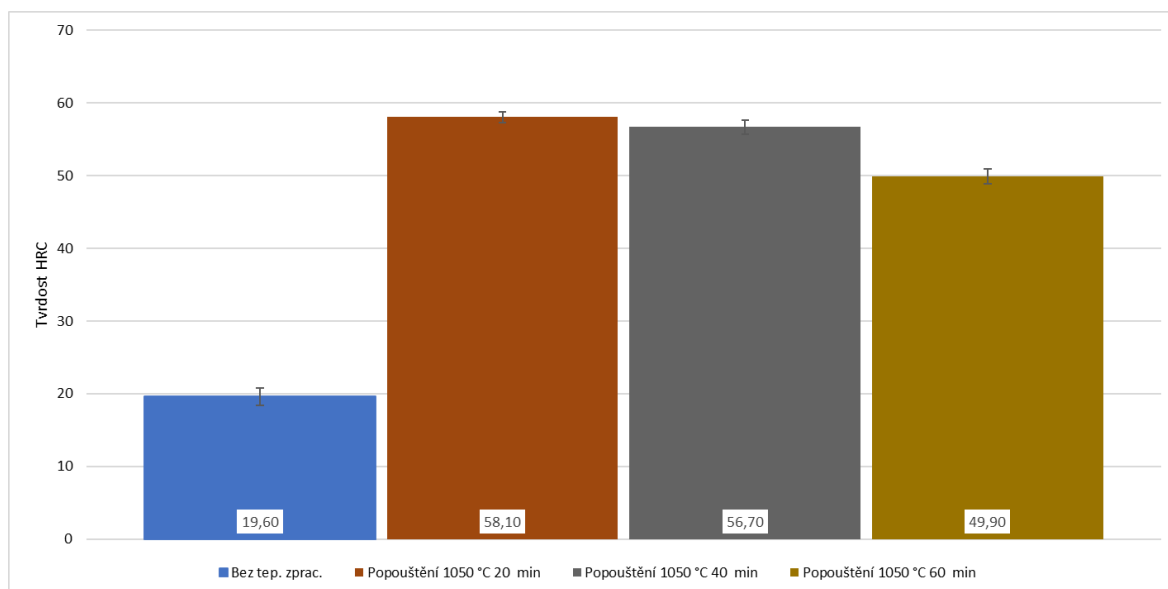
Při kalení bylo nejvyšší tvrdosti dosaženo u vzorku s výdrží 20 minut, konkrétně 61,4 HRC. Následoval vzorek s výdrží 40 minut s hodnotou 59,4 HRC. Nejnižší tvrdost byla naměřena u výdrže 60 minut, a to 53,9 HRC, což představuje výrazný pokles oproti kratším výdržím.

Po popuštění došlo, stejně jako v předchozích sériích, ke snížení tvrdosti. U vzorku s výdrží 20 minut klesla tvrdost na 58,1 HRC, u 40 minut byla naměřena hodnota 56,7 HRC a nejnižší tvrdost 49,9 HRC byla opět zaznamenána u vzorku s výdrží 60 minut. Při srovnání hodnot před a po popuštění lze konstatovat, že se tvrdost snížila přibližně o 2 až 4 HRC, což je v souladu s předpoklady a hodnotami pozorovanými v předchozích sériích. Výsledné tvrdosti se stále pohybují v oblasti vhodné pro použití dané oceli, ačkoli u delší výdrže již došlo k výraznějšímu poklesu.

Na základě výsledků lze usuzovat, že výdrž 20 minut při teplotě 1050 °C vedla k dosažení nejvyšší tvrdosti a představuje v tomto případě nejvhodnější variantu. Delší výdrže pravděpodobně způsobily nežádoucí růst austenitických zrn, což se negativně projevilo na konečných hodnotách tvrdosti, zejména u výdrže 60 minut, kde byl zaznamenán nejvýraznější pokles.



Obrázek 16 Kaleno do oleje 1050 °C



Obrázek 17 Kaleno do oleje 1050 °C, popouštěno

8.3 Vzorky kalené do vody

Tato kapitola se podobně jako předchozí zabývá vzorky kalnými do vody za různých podmínek.

8.3.1 Kaleno na 1000 °C

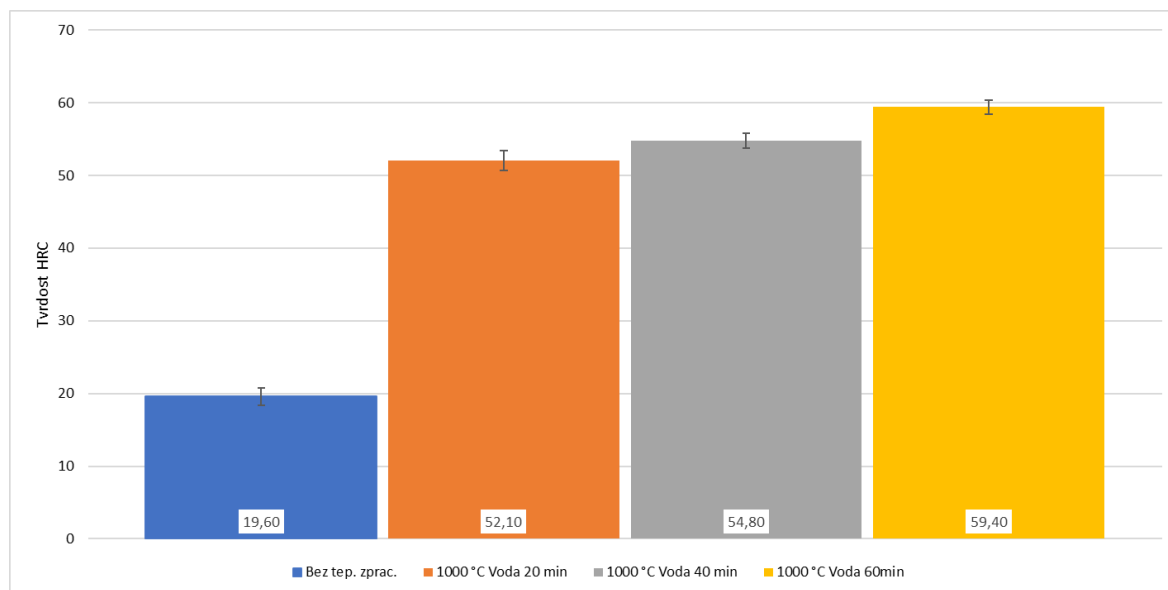
V Obrázek 18 a Obrázek 19 byly sledovány výsledky tvrdosti po kalení do vody při teplotě 1000 °C a následném popouštění. První sloupec v každém z obrázků opět slouží pouze pro srovnání a není dále hodnocen. Zbývající tři sloupce odpovídají výdržím 20, 40 a 60 minut na kalicí teplotě.

Nejvyšší tvrdosti po kalení bylo dosaženo u vzorku s výdrží 60 minut, a to s naměřenou hodnotou 59,4 HRC. Vzorek s výdrží 40 minut dosáhl tvrdosti 54,8 HRC a nejnižší tvrdost byla zaznamenána u vzorku s výdrží 20 minut, konkrétně 52,1 HRC.

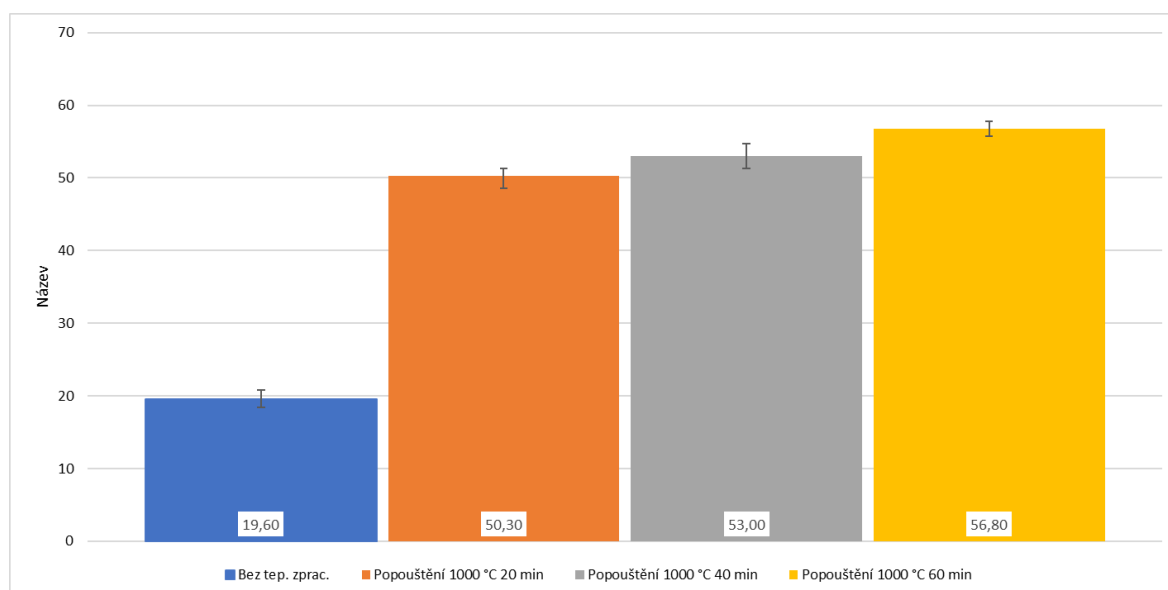
Po popuštění došlo ke snížení tvrdosti u všech vzorků. U výdrže 60 minut byla tvrdost 56,8 HRC, u výdrže 40 minut 53,0 HRC a u nejkratší výdrže 20 minut byla po popuštění naměřena hodnota 50,3 HRC.

Z výsledků vyplývá, že s prodlužující se dobou výdrže docházelo ke zvyšování tvrdosti, což naznačuje, že při teplotě 1000 °C nebyla výdrž 20 minut dostatečná pro úplný rozklad struktury a dosažení potřebné přeměny na austenit. Delší výdrž umožnila úplnější transformaci a zajištění vyšší tvrdosti po zakalení, přičemž pokles tvrdosti po popuštění zůstal v přijatelných mezích (přibližně 2–3 HRC).

Na rozdíl od první série, kde bylo kaleno do oleje při stejné teplotě 1000 °C, byly v této sérii při kalení do vody obecně dosaženy nižší hodnoty tvrdosti, zejména při kratších výdržích. Zatímco při výdrži 40 minut bylo po kalení do oleje naměřeno 62,9 HRC, při kalení do vody za stejných podmínek činila tvrdost pouze 54,8 HRC. Podobně u výdrže 20 minut byl rozdíl přibližně 8 HRC ve prospěch oleje. Výraznějšímu přiblížení hodnot došlo až při výdrži 60 minut, kde rozdíl činil 1,8 HRC. To naznačuje, že při nižších výdržích dochází při kalení do vody k méně efektivnímu rozkladu struktury na austenit, a tedy k nižší výsledné tvrdosti. Zároveň je možné, že rychlejší ochlazení ve vodě u krátkých výdrží nezajišťuje optimální průběh transformací ve struktuře materiálu. Vyšší tvrdosti bylo při kalení do oleje dosaženo pravděpodobně díky pomalejšímu ochlazení, které umožnilo stabilnější průběh martenzitické přeměny a zároveň přispělo k jemnější mikrostruktuře.



Obrázek 18 Kaleno do vody 1000 °C



Obrázek 19 Kaleno do vody 1000 °C, popuštěno

8.3.2 Kaleno na 1025 °C

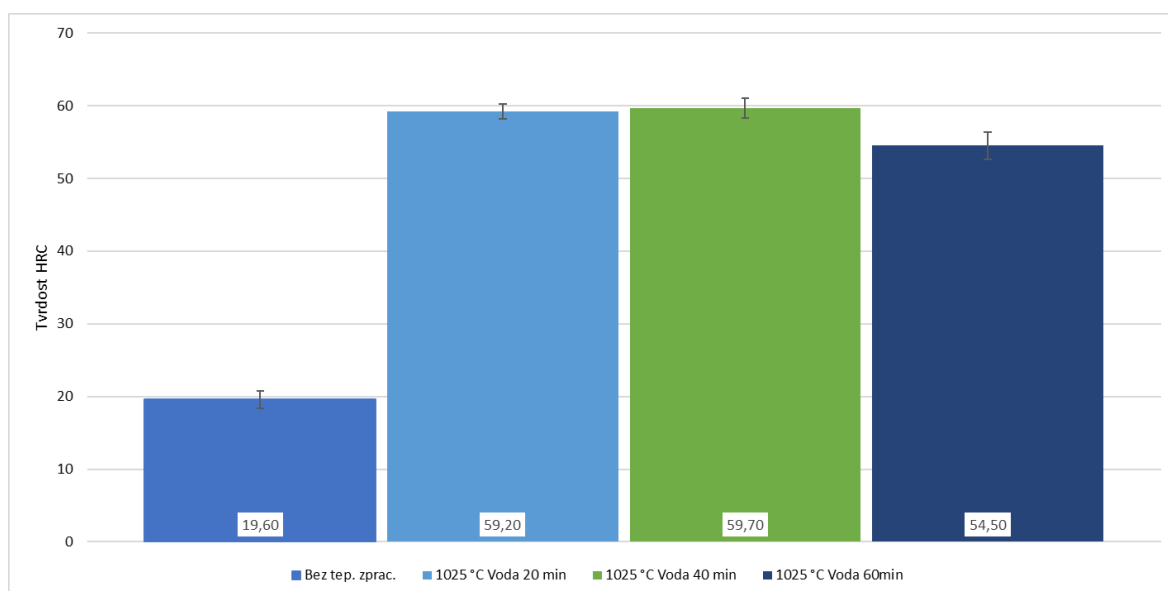
V Obrázek 20 a Obrázek 21 byly hodnoceny hodnoty tvrdosti po kalení do vody při teplotě 1025 °C a následném popouštění. První sloupec slouží pouze k porovnání a není dále zohledňován. Hodnocené sloupce odpovídají výdržím 20, 40 a 60 minut na kalicí teplotě.

Nejvyšší tvrdosti po kalení bylo dosaženo při výdrži 40 minut, konkrétně 59,7 HRC. Hodnota 59,2 HRC byla naměřena u výdrže 20 minut, což značí velmi podobný výsledek. Nejnižší tvrdosti, 54,5 HRC, bylo dosaženo u výdrže 60 minut.

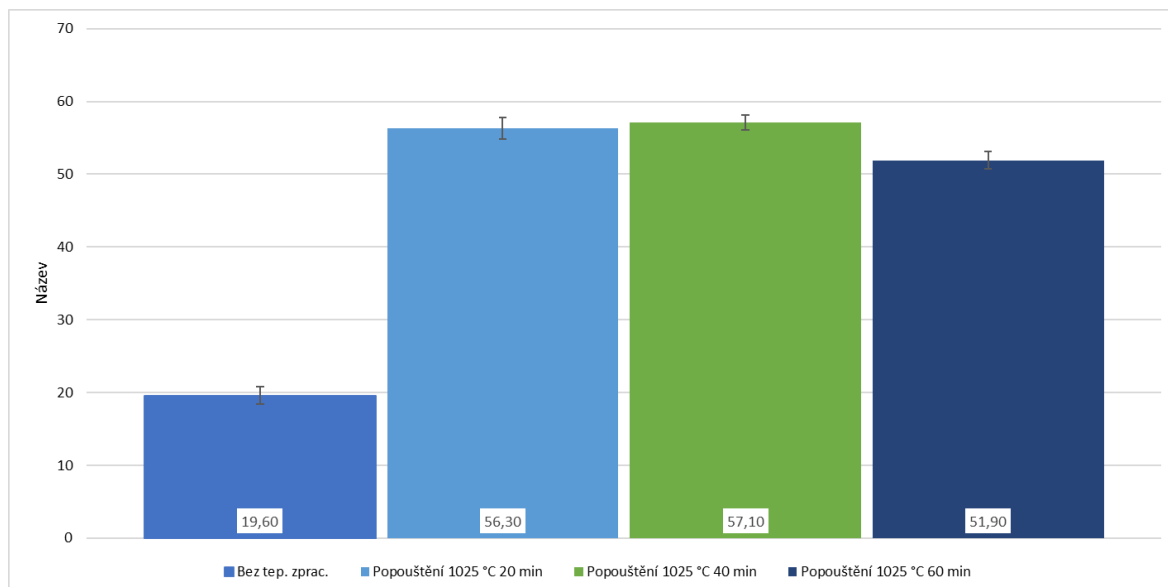
Po popuštění byly zaznamenány hodnoty 57,1 HRC (40 minut), 56,3 HRC (20 minut) a 51,9 HRC (60 minut). Ve všech případech došlo ke snížení tvrdosti o přibližně 2 až 3 HRC, což je v souladu s předpoklady a odpovídá výsledkům z předchozích sérií.

Z výsledků je patrné, že výdrže 20 a 40 minut vedly k podobné a vyhovující úrovni tvrdosti, zatímco delší výdrž 60 minut způsobila pokles, pravděpodobně v důsledku růstu zrn a negativního ovlivnění struktury při delším ohřevu.

Ve srovnání s druhou sérií kalenou do oleje při stejné teplotě 1025 °C byly v případě kalení do vody dosaženy mírně nižší hodnoty tvrdosti. Zatímco při výdrži 40 minut činila tvrdost po kalení do oleje 62,1 HRC, u kalení do vody byla zaznamenána hodnota 59,7 HRC. Naproti tomu u výdrže 20 minut byla zde shoda, zatímco rozdíl u 60 minut činil přibližně 2 HRC ve prospěch oleje. Tyto výsledky potvrzují, že olej jako kalicí prostředí při této teplotě poskytuje stabilnější výsledky tvrdosti, pravděpodobně díky mírnějšímu ochlazení, které snižuje riziko vzniku vnitřních napětí a podporuje jemnější mikrostrukturu. Naproti tomu voda, i když velmi účinná z hlediska rychlosti ochlazování, může způsobovat nepříznivé změny v mikrostruktuře, což má za následek pokles tvrdosti.



Obrázek 20 Kaleno do vody 1025 °C



Obrázek 21 Kaleno do vody 1025 °C, popuštěno

8.3.3 Kaleno na 1050 °C

V Obrázek 22 Obrázek 23 byly hodnoceny výsledky tvrdosti po kalení do vody při teplotě 1050 °C a následném popouštění. První sloupec každého obrázku slouží opět pouze k orientačnímu porovnání a není dále hodnocen. Sledují se sloupce odpovídající výdržím 20, 40 a 60 minut na kalicí teplotě.

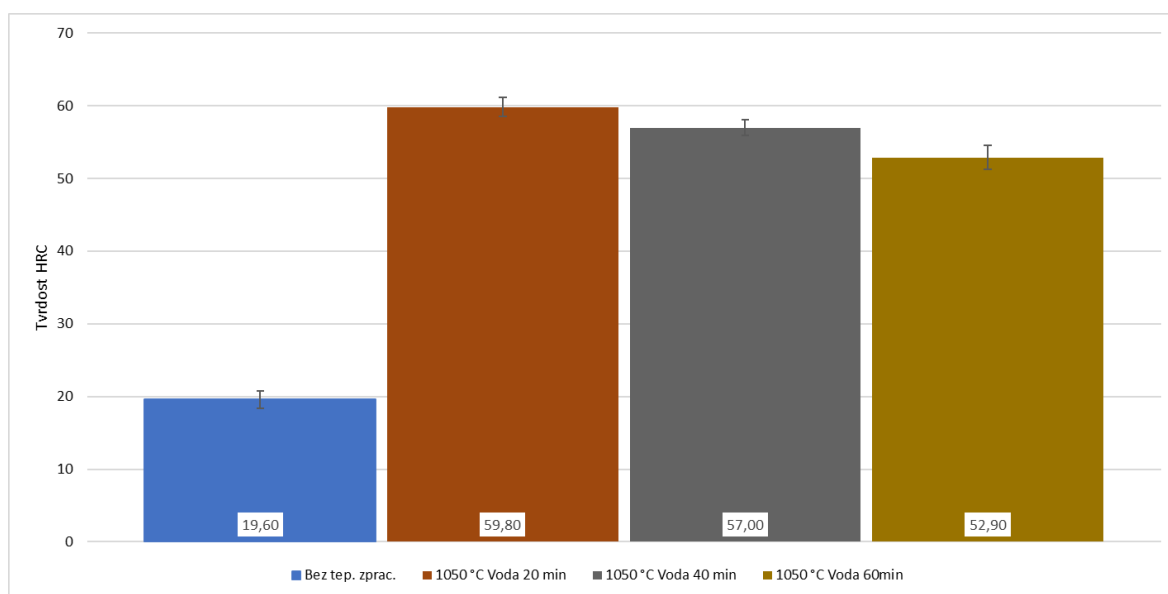
Nejvyšší tvrdosti po kalení bylo dosaženo při výdrži 20 minut, kdy byla naměřena hodnota 59,8 HRC. U vzorku s výdrží 40 minut činila tvrdost 57,0 HRC a nejnižší hodnoty bylo dosaženo při 60 minutách, kdy činila pouze 52,9 HRC.

Po popouštění došlo ke snížení tvrdosti u všech tří vzorků. U výdrže 20 minut byla naměřena tvrdost 56,1 HRC, u výdrže 40 minut 54,8 HRC a u výdrže 60 minut 49,7 HRC. Pokles tvrdosti se ve všech případech pohyboval přibližně mezi 3–4 HRC, což odpovídá předpokládanému chování materiálu při tomto typu tepelného zpracování.

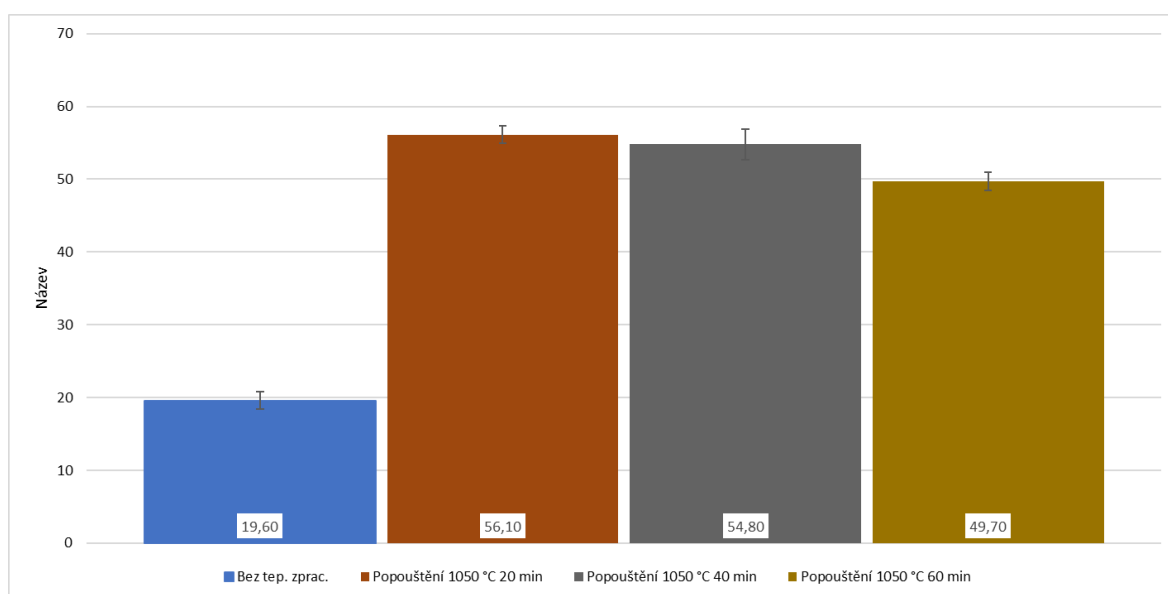
Z výsledků vyplývá, že při této teplotě byla nejpriznivější výdrž 20 minut. Delší výdrže vedly ke zhoršení mechanických vlastností, což lze přičíst zejména růstu zrn způsobenému prodlouženým pobytem v oblasti austenitizační teploty. Výdrž 60 minut se opět ukazuje jako nevhodná, protože vede k výraznému poklesu tvrdosti.

Ve srovnání s třetí sérií kalenou do oleje při stejné teplotě 1050 °C byly při kalení do vody dosaženy srovnatelné až mírně nižší hodnoty tvrdosti. Například při výdrži 20 minut byla tvrdost po kalení do oleje 61,4 HRC, zatímco po kalení do vody 59,8 HRC. Rozdíl 1,6

HRC je zde zanedbatelný. Výraznější rozdíly se projeví při výdržích 40 a 60 minut, kdy olej poskytl vyšší tvrdosti (59,4 HRC a 53,9 HRC oproti 57,0 HRC a 52,9 HRC). Tyto výsledky potvrzují trend pozorovaný i u předchozích teplot, že olej jako kalicí prostředí poskytuje konzistentnější a vyšší tvrdosti zejména při delších výdržích. Vysvětlením je především mírnější průběh ochlazování, který zpomaluje růst zrn a podporuje tvorbu jemnější mikrostruktury s vyšší tvrdostí.



Obrázek 22 Kaleno do vody 1050 °C



Obrázek 23 Kaleno do vody 1050 °C, popouštěno

8.4 Vzorky kalené do oleje se stejnou výdrží

V této kapitole jsou porovnávány výsledky tvrdosti dosažené při konstantní době výdrže 20 minut na kalicí teplotě, přičemž byla měněna pouze teplota kalení. Kalení probíhalo do oleje, a následně bylo provedeno popouštění.

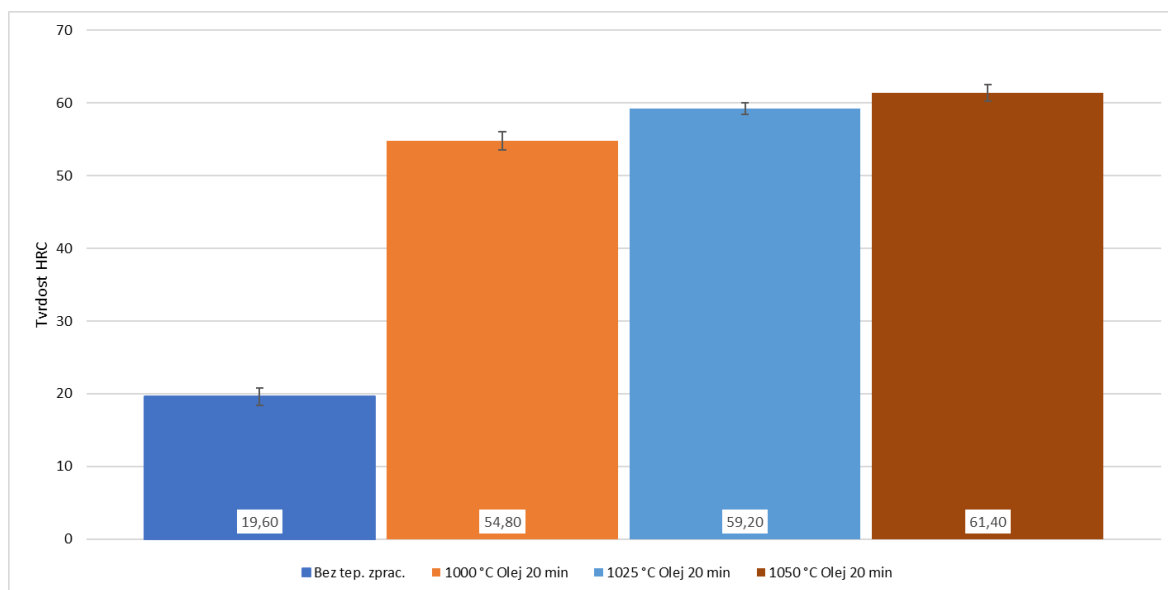
8.4.1 Doba výdrže 20 minut

Tato kapitola se zabývá porovnáním dosažené tvrdosti při výdrži 20 minut na kalicí teplotě, kdy se měnila pouze samotná teplota kalení. Hodnoty jsou přehledně znázorněny v Obrázek 24 a Obrázek 25.

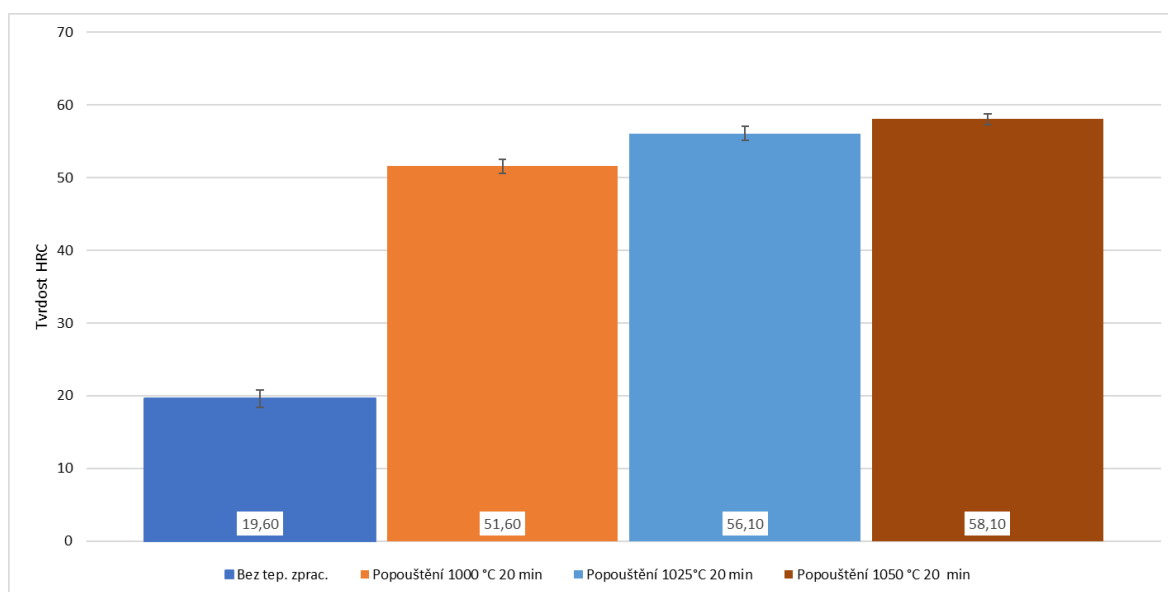
Při kalení do oleje dosahovala tvrdost vzorku při teplotě 1000 °C hodnoty 54,8 HRC. Při zvýšení teploty na 1025 °C se tvrdost zvýšila na 59,2 HRC, a nejvyšší tvrdosti 61,4 HRC bylo dosaženo při teplotě 1050 °C. Z těchto hodnot je patrné, že s rostoucí kalicí teplotou dochází k nárůstu tvrdosti, což je v souladu s předpokladem, že vyšší teplota umožňuje úplnější přeměnu struktury na austenit.

Po popouštění došlo ke snížení tvrdosti ve všech třech případech. U teploty 1000 °C byla tvrdost 51,6 HRC, při 1025 °C činila 56,1 HRC a při 1050 °C byla naměřena hodnota 58,1 HRC. I po popouštění tedy zůstává patrný trend nárůstu tvrdosti s rostoucí teplotou kalení.

Z uvedených výsledků vyplývá, že při konstantní výdrži 20 minut má zvyšující se teplota kalení pozitivní vliv na výslednou tvrdost materiálu. Vyšší teploty podporují úplnou přeměnu struktury na austenit, čímž se vytvářejí příznivější podmínky pro vznik jemnozrné martenzitické struktury během kalení. Tento efekt se příznivě projevil i po popouštění, kdy byl zachován obecný trend rostoucí tvrdosti s teplotou kalení. Zároveň je patrné, že pokles tvrdosti po popouštění zůstává v rozmezí přibližně 3–4 HRC, což lze považovat za standardní a akceptovatelný pokles v rámci této technologie.



Obrázek 24 Kaleno do oleje po výdrži 20 min



Obrázek 25 Kaleno a popouštění do oleje po výdrži 20 min

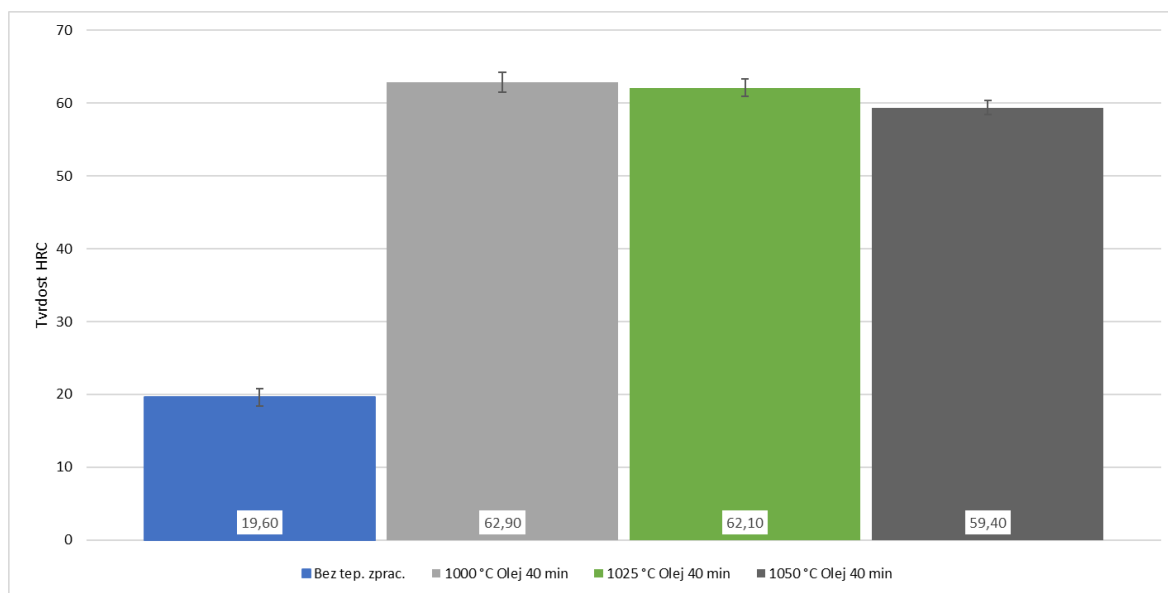
8.4.2 Doba výdrže 40 minut

Tato kapitola se zabývá porovnáním dosažené tvrdosti při výdrži 40 minut na kalicí teplotě, kdy se měnila pouze samotná teplota kalení. Hodnoty jsou přehledně znázorněny v Obrázek 26 a Obrázek 27.

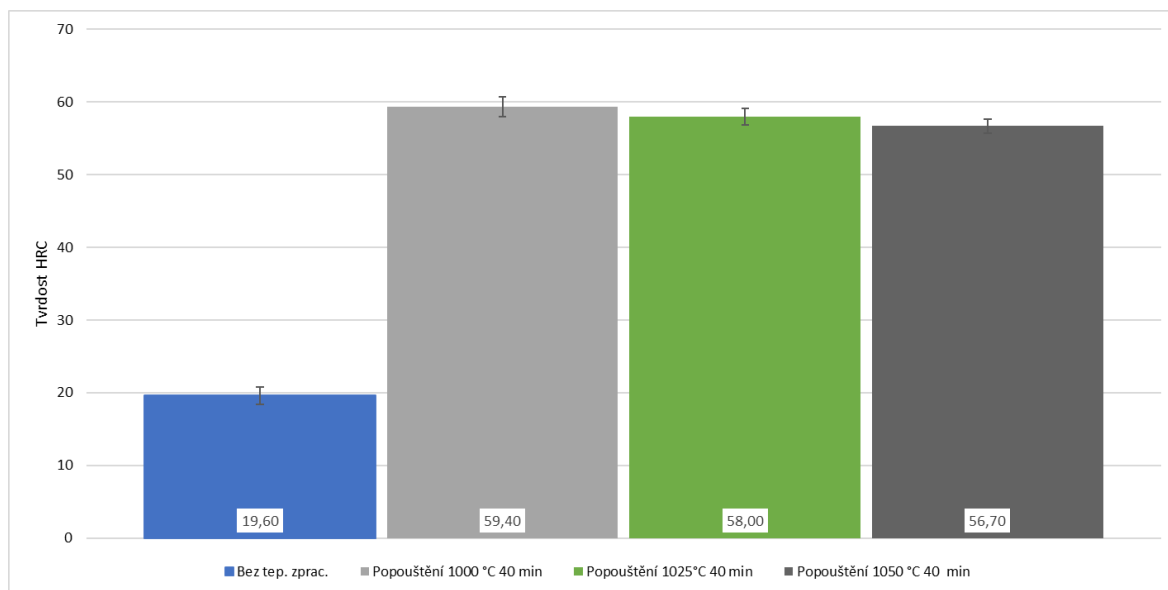
Nejvyšší tvrdosti po kalení bylo dosaženo při teplotě 1000 °C, kdy činila 62,9 HRC. Při zvýšení teploty na 1025 °C došlo k mírnému poklesu na 62,1 HRC, a při 1050 °C byla

zaznamenána hodnota 59,4 HRC. Přestože rozdíly mezi prvními dvěma hodnotami jsou malé, je patrné, že zvýšení teploty kalení nad 1000 °C již nemá pozitivní vliv na tvrdost – naopak může docházet k počátku degradace mikrostruktury vlivem růstu zrna.

Po popouštění byl ve všech případech zaznamenán pokles tvrdosti přibližně o 3 HRC. Při teplotě 1000 °C činila tvrdost 59,4 HRC, při 1025 °C 58,0 HRC a při 1050 °C klesla na 56,7 HRC. Výsledky potvrzují, že nižší teplota kalení v kombinaci s delší výdrží poskytuje nejlepší mechanické vlastnosti. Zvýšení teploty na 1050 °C při této výdrži již přináší horší výsledky, což může souviset s nepříznivým vývojem mikrostruktury, zejména růstem austenitických zrn.



Obrázek 26 Kaleno do oleje po výdrži 40 min



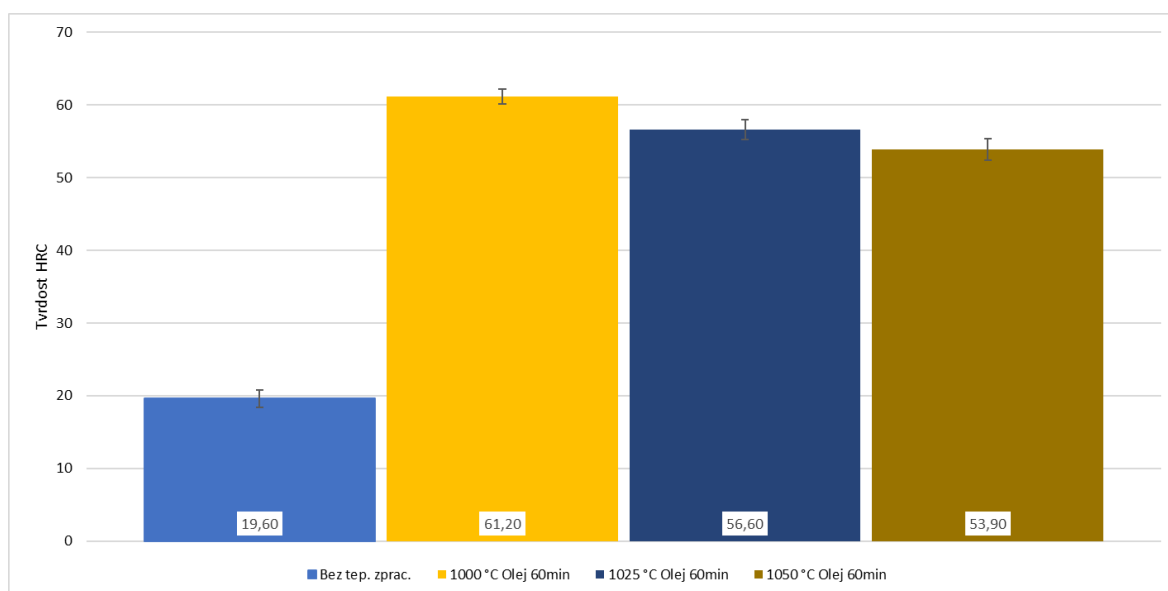
Obrázek 27 Kaleno a popouštění do oleje po výdrži 40 min

8.4.3 Doba výdrže 60 minut

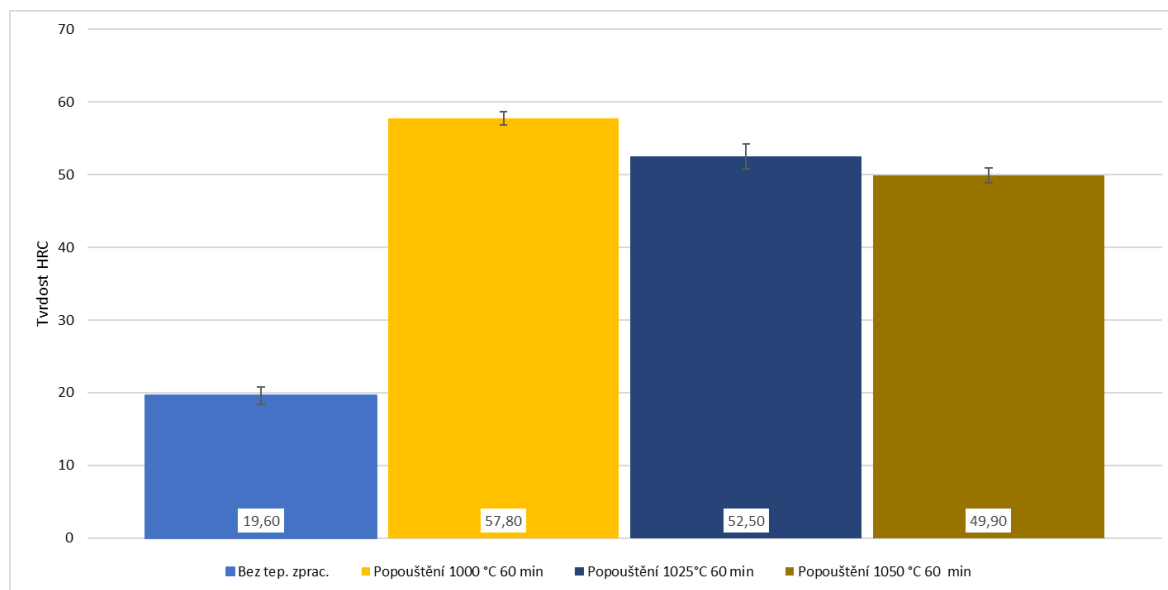
Tato kapitola se věnuje porovnání hodnot tvrdosti při konstantní výdrži 60 minut na kalicí teplotě. Měněna byla pouze teplota kalení, přičemž kalení probíhalo do oleje a následovalo popouštění. Výsledky jsou graficky zpracovány v Obrázek 28 a Obrázek 29.

Po kalení dosáhla nejvyšší tvrdost vzorek kalený při teplotě 1000 °C, a to 61,2 HRC. Při teplotě 1025 °C došlo k poklesu na 56,6 HRC a při teplotě 1050 °C byla naměřena nejnižší hodnota této série, konkrétně 53,9 HRC. Výsledky ukazují, že při delší době výdrže se zvyšování teploty kalení neprojevilo pozitivně, naopak vedlo k významnému poklesu tvrdosti. Pravděpodobným důvodem je nadměrný růst zrna vlivem dlouhodobého působení vysoké teploty, což má negativní vliv na konečné mechanické vlastnosti materiálu.

Po popouštění byl pozorován další pokles tvrdosti. Při teplotě 1000 °C činila tvrdost 57,8 HRC, při 1025 °C klesla na 52,5 HRC a při 1050 °C na 49,9 HRC. V tomto případě již dochází k výraznému úbytku tvrdosti, zejména u vyšších teplot kalení. Lze tedy konstatovat, že výdrž 60 minut je pro tuto ocel při teplotách nad 1000 °C nevhodná, protože dochází k degradaci struktury a k prudkému zhoršení mechanických vlastností.



Obrázek 28 Kaleno do oleje po výdrži 60 min



Obrázek 29 Kaleno a popouštění do oleje po výdrž 60 min

8.5 Vzorky kalené do vody se stejnou výdrží

Tato kapitola se zabývá vzorky kalenými do vody se společnou výdrží na kalící teplotě, pro vzájemné porovnání hodnot a vyhodnocení výsledků.

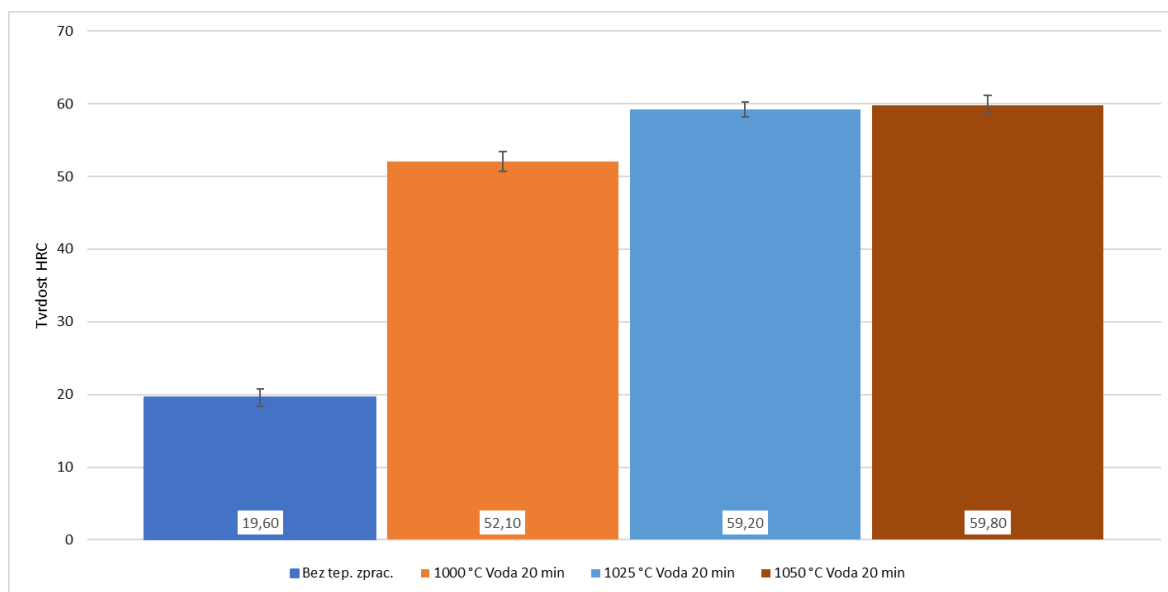
8.5.1 Doba výdrže 20 minut

Tato kapitola se zabývá porovnáním tvrdosti dosažené při konstantní výdrží 20 minut na kalící teplotě, kdy bylo jako kalící médium použito **voda**. Po kalení následovalo popouštění. Výsledky jsou zpracovány v Obrázek 30 a Obrázek 31.

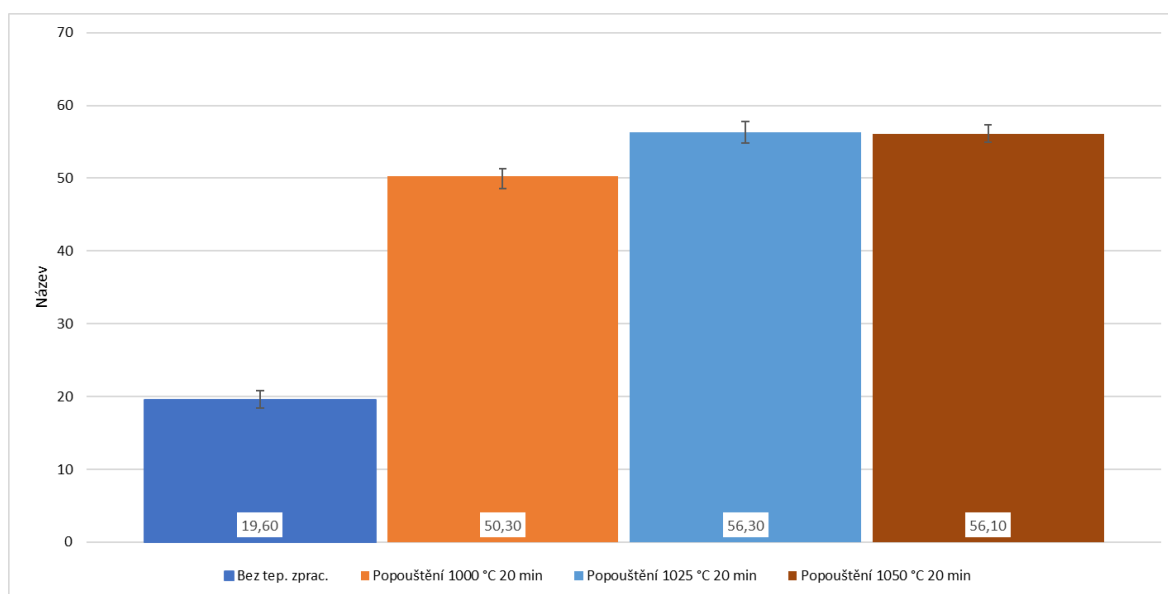
Při kalení na teplotu 1000 °C byla dosažena tvrdost 52,1 HRC. Při zvýšení teploty na 1025 °C došlo ke znatelnému nárůstu tvrdosti na 59,2 HRC. Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo při kalení na 1050 °C, kdy byla naměřena hodnota 59,8 HRC. Ve srovnání s olejem jsou hodnoty dosažené při kalení do vody o něco nižší, avšak trend rostoucí tvrdosti s teplotou kalení byl zachován.

Po popouštění došlo ke standardnímu poklesu tvrdosti. Při kalení na 1000 °C byla po popouštění naměřena hodnota 50,3 HRC, při 1025 °C činila tvrdost 56,3 HRC a při 1050 °C dosáhla 56,1 HRC. Rozdíly oproti hodnotám po kalení se pohybovaly opět v rozmezí 2–3 HRC.

Z výsledků je patrné, že i při konstantní výdrži 20 minut má zvyšující se kalicí teplota pozitivní vliv na dosaženou tvrdost. Kalení do vody je díky své vyšší intenzitě ochlazování schopno poskytnout dostatečně tvrdou martenzitickou strukturu, přesto však nejsou výsledky tak stabilní jako při kalení do oleje. I přes vyšší účinnost vody může docházet k nepříznivému ovlivnění mikrostruktury, zejména vlivem vyšších vnitřních napětí, což se může odrazit ve větší rozptýlenosti výsledků



Obrázek 30 Kaleno do vody po výdrži 20 min



Obrázek 31 Kaleno a popouštění do vody po výdrži 20 min

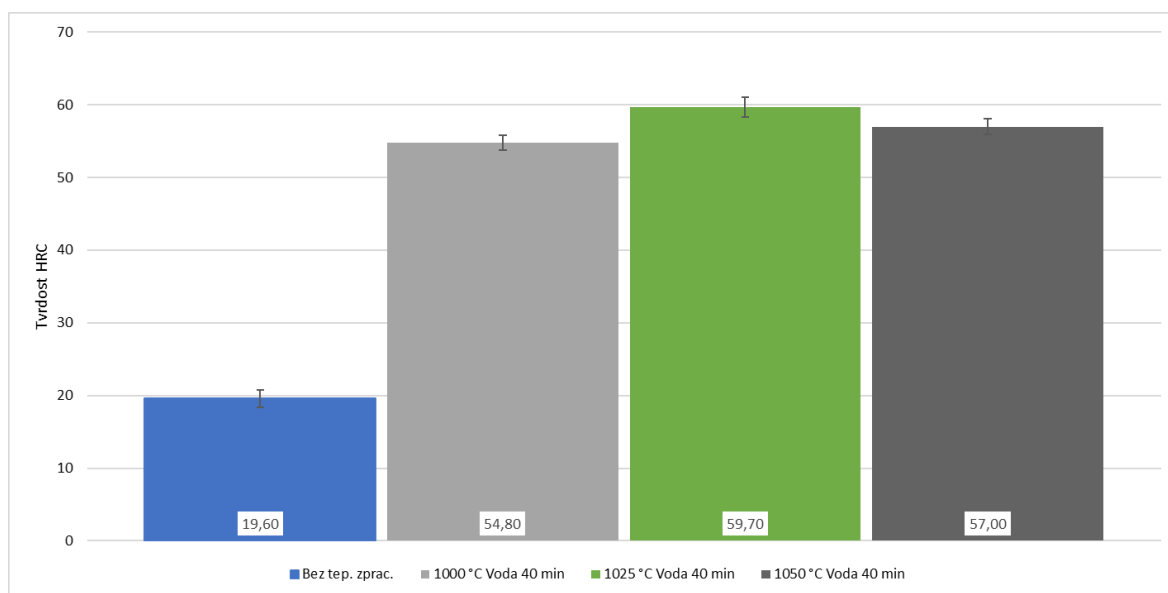
8.5.2 Doba výdrže 40 minut

V této části jsou porovnány výsledky tvrdosti dosažené při konstantní výdrži 40 minut na různých kalicích teplotách. Kalení probíhalo do vody, po němž následovalo popouštění. Výsledky jsou přehledně znázorněny v Obrázek 32 a Obrázek 33.

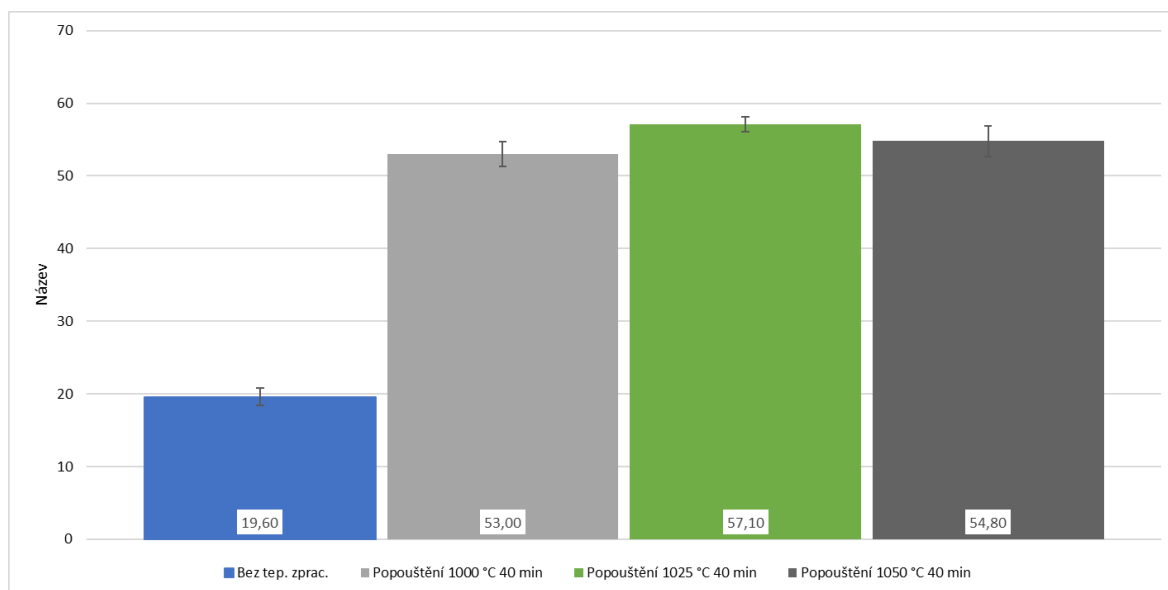
Po kalení byla nejvyšší tvrdost naměřena při teplotě 1025 °C, a to 59,7 HRC. Při kalení na 1000 °C činila tvrdost 54,8 HRC a při nejvyšší sledované teplotě 1050 °C byla zaznamenána hodnota 57,0 HRC. Ve srovnání s předchozí sérií (20 minut výdrže) zde není trend nárůstu tvrdosti s teplotou tak výrazný. Nejvyšší tvrdost se vyskytla při střední teplotě, což může naznačovat, že při 1050 °C již dochází k mírnému růstu zrna nebo k jiným negativním strukturálním jevům.

Po popouštění byly hodnoty tvrdosti následující: 53,0 HRC (1000 °C), 57,1 HRC (1025 °C) a 54,8 HRC (1050 °C). Rozdíl mezi tvrdostí po kalení a po popouštění zůstal relativně konstantní (kolem 2 HRC), což odpovídá očekávanému chování materiálu během nízkoteplotního popouštění.

Z výsledků vyplývá, že při kalení do vody s výdrží 40 minut je optimální kalicí teplotou 1025 °C, při které bylo dosaženo nejvyšší tvrdosti před i po popouštění. Při teplotě 1000 °C je tvrdost výrazně nižší, zatímco při 1050 °C již nejsou výsledky lepší, čímž se potvrzuje, že zvyšování teploty nad určitou hranici může být kontraproduktivní i při delší výdrži.



Obrázek 32 Kaleno do vody po výdrži 40 min



Obrázek 33 Kaleno a popouštění do vody po výdrži 40 min

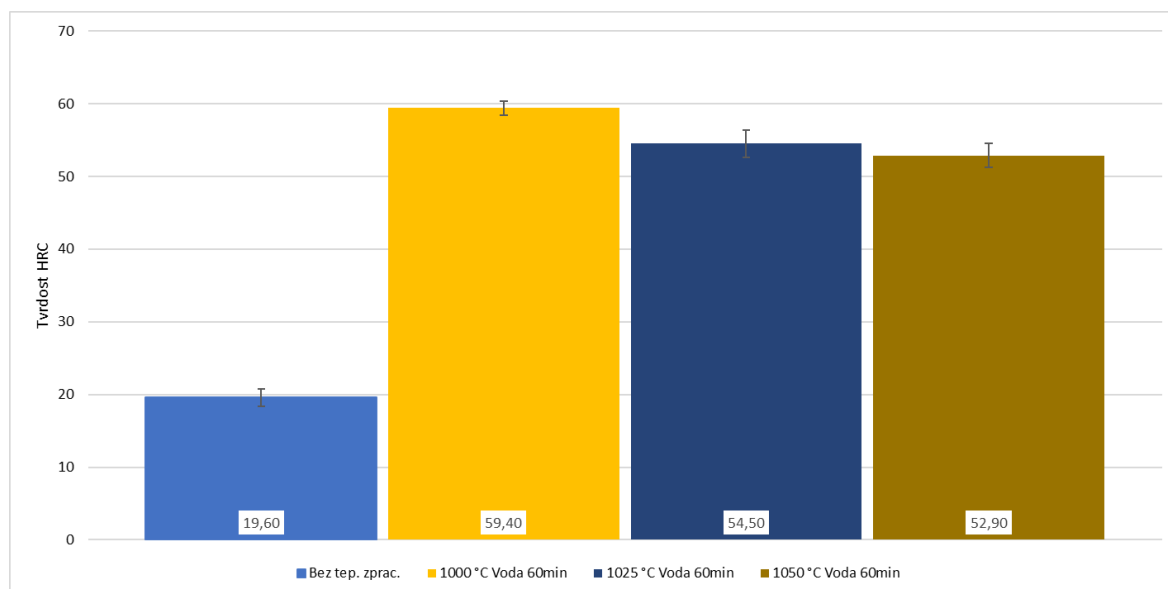
8.5.3 Doba výdrže 60 minut

Tato kapitola shrnuje výsledky tvrdosti po kalení do vody při konstantní výdrži 60 minut na kalici teplotě s následným popouštěním. Hodnoty jsou graficky zobrazeny v Obrázek 34 a Obrázek 35.

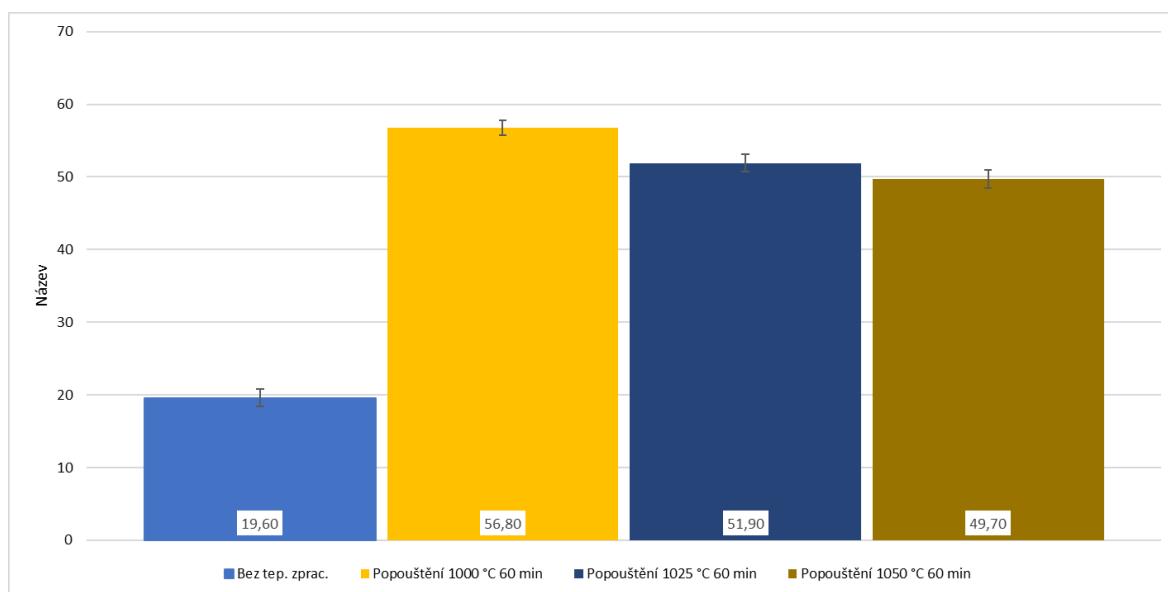
Po kalení byla nejvyšší tvrdost zaznamenána při teplotě 1000 °C, a to 59,4 HRC. Při zvýšení teploty na 1025 °C došlo k poklesu na 54,5 HRC a při 1050 °C byla naměřena nejnižší hodnota série – 52,9 HRC. Výsledky naznačují, že při delší výdrži dochází ke zhoršení mechanických vlastností s rostoucí teplotou kalení, což je pravděpodobně způsobeno hrubnutím austenitického zrna a ztrátou příznivé jemnozrnné struktury.

Po popouštění došlo ke standardnímu poklesu tvrdosti o přibližně 2–3 HRC. Tvrdosti činily 56,8 HRC (1000 °C), 51,9 HRC (1025 °C) a 49,7 HRC (1050 °C). Snížení tvrdosti odpovídá očekávanému vlivu popouštění, avšak pokles je výraznější u vzorků kalených při vyšších teplotách, kde se negativně projevila předchozí degradace struktury.

Z uvedených výsledků vyplývá, že při výdrži 60 minut poskytuje nejlepší mechanické vlastnosti kalení na teplotu 1000 °C. Vyšší teploty při této délce výdrže vedou ke znatelnému poklesu tvrdosti, což potvrzuje, že příliš dlouhá doba působení vyšších teplot není pro tuto ocel vhodná, a to ani v případě rychlého ochlazování vodou.



Obrázek 34 Kaleno do vody po výdrži 60 min



Obrázek 35 Kaleno a popouštění do vody po výdrži 60 min

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Souhrnný Obrázek 36 zachycuje přehledně všechny dosažené hodnoty tvrdosti po kalení bez následného popouštění. Jsou zde znázorněny výsledky pro všechny kombinace kalicí teploty (1000 °C, 1025 °C, 1050 °C), délky výdrže (20, 40, 60 minut) a kalicích médií (olej, voda).

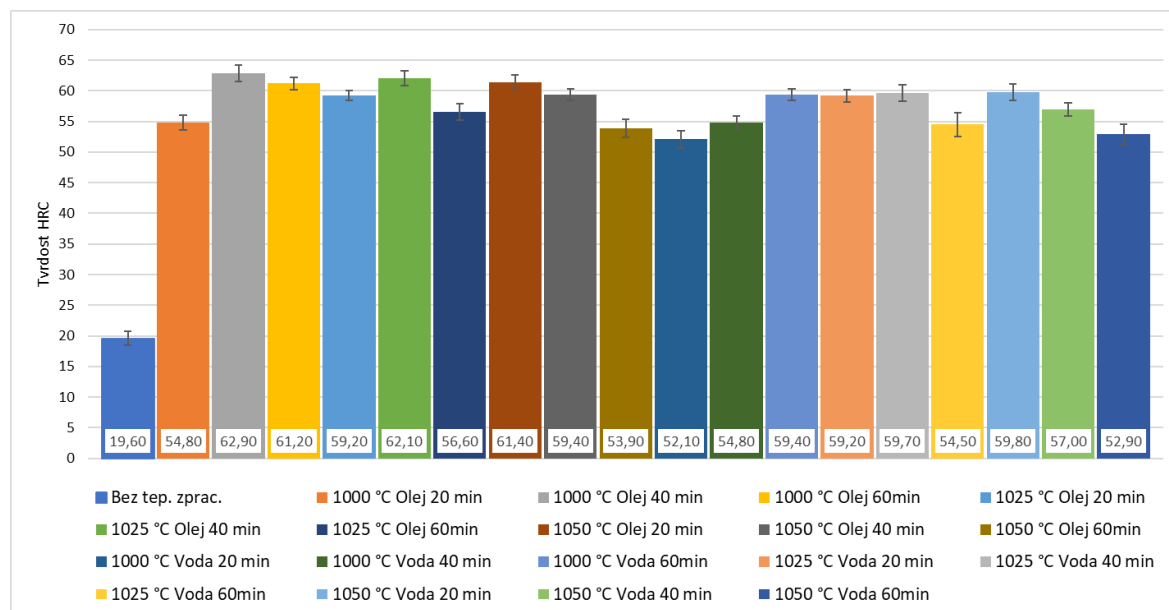
Z přehledu je patrné, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo při kalení do oleje na teplotu 1000 °C s výdrží 40 minut, kde hodnota dosáhla 62,9 HRC. Srovnatelných výsledků bylo dosaženo také při kalení do oleje na 1025 °C s výdrží 40 minut (62,1 HRC) a při 60 minutách na 1000 °C (61,2 HRC). Tyto výsledky potvrzují, že olej jako kalicí médium je vhodnější pro dosažení vysoké tvrdosti, zejména při nižších nebo středních kalicích teplotách a přiměřené délce výdrže.

Naopak nejnižší tvrdosti byly naměřeny při kalení do vody, zejména při nejvyšších teplotách a delších výdržích. Například při 60 minutách na 1050 °C činila tvrdost pouze 52,9 HRC. Tento výsledek poukazuje na negativní vliv kombinace vysoké teploty a dlouhé doby výdrže, kdy dochází k růstu austenitických zrn a tím ke zhoršení mechanických vlastností.

Trend změn tvrdosti v závislosti na délce výdrže a kalicí teplotě není vždy lineární. Zatímco krátká výdrž 20 minut často nestačila k úplné homogenizaci austenitu (zejména při nižších teplotách), příliš dlouhá výdrž naopak vedla k degradaci mikrostruktury. Optimálních výsledků bylo dosaženo většinou při výdrži 40 minut, což se jeví jako kompromisní hodnota umožňující dostatečné prohřátí bez výrazného růstu zrna.

Rozdíly mezi kalením do oleje a vody byly rovněž zřejmé. Olejové kalení poskytovalo stabilnější a vyšší hodnoty tvrdosti, zatímco voda sice umožňuje rychlejší ochlazení, ale přináší riziko vzniku vnitřních napětí, trhlin či nepříznivých změn v mikrostruktuře. Z těchto důvodů se olej jeví jako vhodnější médium pro zkoumaný typ oceli, zejména tam, kde je požadována vysoká tvrdost a rozměrová stabilita.

Celkově výsledky potvrzují, že volba teploty, doby výdrže a kalicího média má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Optimální kombinací pro dosažení vysoké tvrdosti se v rámci provedených experimentů ukázalo kalení do oleje na 1000–1025 °C s výdrží 40 minut.



Obrázek 36 Souhrnný graf zakalených vzorků

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo experimentálně posoudit vliv kalicí teploty, délky výdrže a typu kalicího média na výslednou tvrdost zkoumané oceli. Byly provedeny systematické zkoušky při třech kalicích teplotách (1000 °C, 1025 °C, 1050 °C), třech délkách výdrže (20, 40 a 60 minut) a dvou typech kalicích médií (olej a voda). Následně byly vzorky popouštěny za konstantních podmínek a měřena jejich tvrdost před i po popouštění.

Z výsledků vyplývá, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo při kalení do oleje, a to zejména při výdrži 40 minut na kalicí teplotě 1000–1025 °C. V těchto případech byla naměřena tvrdost přesahující 62 HRC, což je z hlediska využití této oceli velmi příznivá hodnota.

Naopak nejnižší tvrdosti byly zaznamenány při delší výdrži na vysoké teplotě (60 minut při 1050 °C), především při kalení do vody, kde docházelo k růstu austenitických zrn a zhoršení mikrostruktury. Tvrdost v těchto případech klesala až k 53 HRC, což je výrazně pod úroveň dosaženou při optimálních podmínkách.

Dále bylo potvrzeno, že příliš krátká výdrž (např. 20 minut při 1000 °C) nemusí být dostatečná pro úplnou transformaci struktury, zatímco příliš dlouhá výdrž může být kontraproduktivní kvůli růstu zrna. Obecně lze tedy říct, že délka výdrže 40 minut představuje vhodný kompromis mezi dosažením požadované tvrdosti a zachováním jemnozrné struktury.

Z hlediska porovnání kalicích médií se olej ukázal jako vhodnější volba, neboť poskytoval konzistentní a vyšší hodnoty tvrdosti. Voda, ačkoliv rychlejší médium, může negativně ovlivnit výslednou mikrostrukturu a přináší vyšší riziko deformací nebo vnitřních napětí.

Závěrem lze konstatovat, že z hlediska dosažení optimální tvrdosti zkoumané oceli je nejvhodnější volbou kalení do oleje při teplotě 1000–1025 °C s výdrží 40 minut, následované mírným popouštěním. Tyto podmínky zajišťují jak vysokou tvrdost, tak příznivou strukturu materiálu, což je zásadní pro jeho další technické využití.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SU, X., G. WANG, Y.T. ZHANG, J.F. LI a Y.M. RONG, 2013. Modeling on Stress Evolution of Step Part for Casting-heat Treatment Processes. *Physics Procedia* [online]. 50(20), 360-367 [cit. 2024-10-30]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2013.11.056
- [2] GAGGIOTTI, Matteo, Luciano ALBINI, Paolo DI NUNZIO, Andrea DI SCHINO, Giulia STORNELLI a Giulia TIRACORRENDO, 2022. Ultrafast Heating Heat Treatment Effect on the Microstructure and Properties of Steels. *Metals* [online]. 12(8), 1–17 [cit. 2024-10-30]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12081313
- [3] HUANG, Guiyun, Li YONG a Xiong YAKUN, 2018. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Steel. In: 2018 7th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (ICAMCS 2018) [online]. Clausius Scientific Press, - [cit. 2024-10-30]. ISBN 9781989348062. Dostupné z: doi:10.23977/icamcs.2018.024
- [4] STEINBACHER, Matthias a Stefanie HOJA, 2021. Optimization of Pre-Heat Treatment for Nitriding. *Materials* [online]. 14(24), 1-12 [cit. 2024-10-30]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14247766
- [5] JOVIČEVIĆ-KLUG, Patricia, Matic JOVIČEVIĆ-KLUG, Tina SEVER, Darja FEIZPOUR a Bojan PODGORNIK, 2021. Impact of steel type, composition and heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 14, 1007-1020 [cit. 2024-10-30]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.07.022
- [6] BRYSON, William E., [2015]. Heat treatment: master control manual. 3rd ed. Munich : Hanser publishers. ISBN 978-1-56990-485-5. <https://doi.org/10.1007/978-1-56990-486-2>.
- [7] TECHNICKE-NORMY-CSN [online], 2006. [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/>
- [8] ČSN 42 0002 (420002) Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření [online], 2020-2022. [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-42-0002-420002-201985.html#>

- [9] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA, 2017. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [10] ŠEBESTOVÁ, Hana a Petr SCHOVÁNEK. Krystalizace ocelí a litin. In: Anzdoc [online]. 2024 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://adoc.pub/krystalizace-oceli-alitin.html>.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH, 2007. *Strojírenská technologie I*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-26-5. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/200903/contents/nkc20071725091_1.pdf
- [12] HLUCHÝ, Miroslav, Oldřich MODRÁČEK a Rudolf PAŇÁK, 2002. *Strojírenská technologie I*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3265-0.
- [13] KRAUS, Václav, 2013. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita. ISBN 978-80-261-0260-1. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:185cc400-de76-11e8-a5a4-005056827e52>
- [14] METHAROM, Sunan, 2017. *Heat treatment - conventional and novel applications*. New York: Scitus academics. 270s. New York: Scitus academics. ISBN 978-1-68117-519-5.
- [15] 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
- [16] 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>.
- [17] CHEN, Xiaoqin, Xiaofei QIN, Yue LI, Wenjia CHENG, Haonan JIN a Quan LI, 2024. Effect of different heat-treatment processes on corrosion resistance of 17-4PH steel. In: *Bulletin of Materials Science* [online]. [cit. 2025-04-29]. ISSN 0973-7669. Dostupné z: doi:10.1007/s12034-024-03300-6
- [18] GUPTA, Nidhi a Rajesh K. KHATIRKAR, 2023. Effect of Quenching Temperature and Tempering Time on the Evolution of Microstructure in UNS S17400 Stainless

- Steel. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. s. 1474-1488 [cit. 2025-04-29]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-022-07228-y
- [19] BANIS, Alexandros, Eliseo HERNANDEZ DURAN, Vitaliy BLIZNUK, Ilchat SABIROV, Roumen H. PETROV a Spyros PAPAEFTHYMIU, 2019. The Effect of Ultra-Fast Heating on the Microstructure, Grain Size and Texture Evolution of a Commercial Low-C, Medium-Mn DP Steel. In: *Metals* [online]. [cit. 2025-04-29]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9080877
- [20] AARONSON, H.I a J.F NIE, 2000. Discussion to “the bainitic mechanism of austenite formation during rapid heating.” In: *Scripta Materialia* [online]. s. 505-509 [cit. 2025-04-29]. ISSN 13596462. Dostupné z: doi:10.1016/S1359-6462(99)00388-7
- [21] BUMBÁLEK, Leoš, 2009. *Kontrola a měření pro SPŠ strojní*. Praha: Information. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [22] CERDA, F. Castro, C. GOULAS, I. SABIROV, S. PAPAEFTHYMIU, A. MONSALVE a R.H. PETROV, 2016. Microstructure, texture and mechanical properties in a low carbon steel after ultrafast heating. In: *Materials Science and Engineering: A* [online]. s. 108-120 [cit. 2025-04-29]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi: 10.1016/j.msea.2016.06.056
- [23] ORGANEK, Piotr, Bronisław GOSOWSKI a Michał REDECKI, 2024. Relationship between Brinell hardness and the strength of structural steels. In: *Structures* [online]. [cit. 2025-04-29]. ISSN 23520124. Dostupné z: doi: 10.1016/j.istruc.2023.105701
- [24] KOGA, Norimitsu, Kouki KOIZUMI, Shuto TAKAYASU, Osamu UMEZAWA, Mizuki WATANABE, Masayuki YAMAMOTO a Takashi YAMAMOTO, 2023. High-Temperature Hardness in Hypereutectoid Steels with Various Microstructures Measured by Using Small Ball Rebound Hardness Test. In: *MATERIALS TRANSACTIONS* [online]. s. 1600-1604 [cit. 2025-04-29]. ISSN 1345-9678. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.MT-H2022003
- [25] Materiálový list ČSN 41 7029 ocel ČSN 17 029.

- [26] 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-vlastnostioceli/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma číselného značení	17
Obrázek 2 Metastabilní diagram FeFe_3C	22
Obrázek 3 ARA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli	30
Obrázek 4 IRA diagram podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli	30
Obrázek 5 Ira a Ara diagram eutektoidní oceli	36
Obrázek 6 Kalicí pracoviště s přípravkem na ohřev vzorků	51
Obrázek 7 Vzorek před kalením	53
Obrázek 8 Měřené vzorky	53
Obrázek 9 Tvrdoměr	54
Obrázek 10 Štítek tvrdoměru	54
Obrázek 11 Naměřené hodnoty bez tepelného zpracování	57
Obrázek 12 Kaleno do oleje 1000 °C	59
Obrázek 13 Kaleno do oleje 1000 °C, popuštěno	59
Obrázek 14 Kaleno do oleje 1025 °C	60
Obrázek 15 Kaleno do oleje 1025 °C, popuštěno	61
Obrázek 16 Kaleno do oleje 1050 °C	62
Obrázek 17 Kaleno do oleje 1050 °C, popuštěno	62
Obrázek 18 Kaleno do vody 1000 °C	64
Obrázek 19 Kaleno do vody 1000 °C, popuštěno	64
Obrázek 20 Kaleno do vody 1025 °C	65
Obrázek 21 Kaleno do vody 1025 °C, popuštěno	66
Obrázek 22 Kaleno do vody 1050 °C	67
Obrázek 23 Kaleno do vody 1050 °C, popuštěno	67
Obrázek 24 Kaleno do oleje po výdrži 20 min	69
Obrázek 25 Kaleno a popouštěno do oleje po výdrži 20 min	69
Obrázek 26 Kaleno do oleje po výdrži 40 min	70
Obrázek 27 Kaleno a popouštěno do oleje po výdrži 40 min	70
Obrázek 28 Kaleno do oleje po výdrži 60 min	71
Obrázek 29 Kaleno a popouštěno do oleje po výdrži 60 min	72
Obrázek 30 Kaleno do vody po výdrži 20 min	73
Obrázek 31 Kaleno a popouštěno do vody po výdrži 20 min	73
Obrázek 32 Kaleno do vody po výdrži 40 min	74
Obrázek 33 Kaleno a popouštěno do vody po výdrži 40 min	75
Obrázek 34 Kaleno do vody po výdrži 60 min	76

Obrázek 35 Kaleno a popouštěno do vody po výdrži 60 min	76
Obrázek 36 Souhrnný graf zakalených vzorků	78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mezní hodnoty pro legované a nelegované oceli	15
Tabulka 2 Vlastnosti oceli	21
Tabulka 3 Porovnání kalících prostředí	35
Tabulka 4 Porovnání bainitického a martenzitického kalení	38
Tabulka 5 Chemické složení oceli 17 029 v hm%.....	49
Tabulka 6 Naměřené hodnoty po kalení do oleje	55
Tabulka 7 Naměřené hodnoty po pouštění zakalených vzorků do oleje	56
Tabulka 8 Naměřené hodnoty po kalení do vody	56
Tabulka 9 Naměřené hodnoty po pouštění zakalených vzorků do vody	57

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	plocha průřezu [mm ²]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
F	síla [N]
HB	Tvrdost dle Brinella
HRC	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
R _{p0,2}	mez kluzu při deformaci 0,2 % [MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu [MPa]
T	teplota [°C]
t	čas [s]
ε	poměrné prodloužení [%]
σ	napětí [MPa]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list ocel ČSN 17 029

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST OCEL ČSN 17 029

ČSN 41 7029

STN 41 7029

Korozivzdorná chromová ocel

OCEL

17 029

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	P	S
0,40–0,50	max 0,90	max 0,70	14,0–16,0	max 0,040	max 0,035

Polotovary

[1] tyče válcované za tepla

[2] plechy válcované za tepla

[3] výkovky

[4] drát tažený za studena

[5] pásy válcované za studena

Mechanické vlastnosti

Polotovar	[1] [3] [4]	[2]	[1] [3]
Rozměr t, d [mm]	–	1–10	≤ 20
Stav	. 2	. 2	. 4
Mez kluzu R _e nebo R _p 0,2 [MPa] min	–	–	–
Mez pevnosti R _m [MPa]	max 780	max 780	–
Tažnost A ₅ [%] min podél	–	–	–
Kontrakce Z [%]	–	–	–
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min podél	–	–	–
Tvrdost HB	max 225	max 225	HRC min 52
Modul pružnosti E [GPa]	215		
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–		

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 _t [W . m ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ [Ω.m]
7 700	460	9,5.10 ⁻⁶	18,42	550.10 ⁻⁹

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI PLOŠNÉ KOROZI

v kaleném stavu s kovově lesklým povrchem odolává rezivění, zředěné kyselině dusičné a v pasivním stavu některým slabým organickým kyselinám; odolnost proti korozi se zvyšuje dokonalým vyleštěním povrchu

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

žihání	800–840 °C	1h na teplotě, ochlazovat rychlostí 0,5 °C/min do 650 °C, pak ochlazovat na vzduchu
žihání ke snížení prnutí	700–750 °C	1–2h na teplotě, pomalu ochlazovat
kalení	1 000–1 050 °C	ochlazovat v oleji
popouštění	150–200 °C	15–30 min na teplotě
teploty přeměn	A _{c1} ~ 800 °C	A _{c3} ~ 840 °C

TVAŘITELNOST

třída tvařitelnosti za tepla 3

teploty tváření 1 100–900 °C pomalu ochlazovat v peci nebo v popelu

SVAŘITELNOST

podle ČSN 05 1310 – není vhodná pro svařování

OBROBITELNOST

		soustružení, hoblování	frézování, vrtání
polotovary [1] [3] stav .2		10b	10b
.4		6b	6b

Použití

Na nože, chirurgické nástroje, měřidla, pánve a břity vah a na nerezavějící součásti odolné proti otěru s tvrdostí nad 52 HRC.

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 003
elektroocel	červená–bílá–hnědá	010

Porovnání se zahraničními materiály

ISO		EURO		Německo	
–	–	–	–	–	–
Francie		Velká Británie		Rusko	
–	–	–	–	–	–
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
–	–	–	–	–	–
Polsko		Maďarsko		Norsko	
–	–	–	–	–	–
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
–	–	–	–	–	–