

Vliv teploty a doby austenitizace na výsledné mechanické vlastnosti při tepelném zpracování

Ondřej Surovčák

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Ondřej Surovčák
Osobní číslo:	T21666
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv teploty a doby austenitizace na výsledné mechanické vlastnosti při tepelném zpracování.

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

- BRYSON, William E. Heat treatment: master control manual. Munich : Hanser publishers, [2015], ix, 338 s. ISBN 978-1-56990-485-5.
- BENEKE, Franz, Bernard NACKE a Herbert PFEIFER, ed. Handbook of thermoprocessing technologies. Volume 2, Plants, components, safety. Essen: Vulkan Verlag, [2015], xxxiii, 993 s. Edition heat processing. ISBN 978-3-8027-2976-8.
- BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.

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

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit jaký má vliv teplota a doba austenitizace na výsledné mechanické vlastnosti (tvrdosti) při tepelném zpracování u vybraných materiálů.

V teoretické části jsem popsal základní rozdělení a charakteristiku ocelí, způsoby jejich tepelného zpracování a základní zkoušky mechanických vlastností.

Praktická část popisuje použitá zařízení, z kterých jsou statisticky zpracované a následně graficky vyhodnocené naměřené hodnoty. Dále byly hodnoceny naměřené výsledky na zadané téma.

Klíčová slova: rozdělení ocelí, způsoby tepelné zpracování, tvrdost, Rockwell.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to determine the effect of temperature and austenitization time on the resulting mechanical properties (hardness) during heat treatment of selected materials.

In the theoretical part I described the basic distribution and characteristics of steel, methods of their heat treatment and basic tests of mechanical properties.

The practical part describes the equipment used, from which statistics are processed and then graphically evaluated measured values. Furthermore, the measured results on the given topic were evaluated.

Keywords: classification of steel, heat treatment methods, hardness, Rockwell.

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu Bakalářské práce panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a pomoc, při vypracování mojí bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	12
1.1 ROZDĚLENÍ OCELI	12
1.1.1 Oceli nelegované.....	13
1.1.2 Oceli legované.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ OCELÍ PODLE HLAVNÍCH SKUPIN JAKOSTI	14
1.2.1 Hlavní skupiny jakosti nelegovaných ocelí.....	14
1.2.2 Hlavní skupiny jakosti legovaných ocelí	15
1.3 ČÍSELNÉ OZNAČOVÁNÍ A ROZDĚLENÍ OCELÍ KE TVÁŘENÍ.....	16
1.3.1 Ocele třídy 10.....	16
1.3.2 Ocele třídy 11.....	16
1.3.3 Ocele třídy 12.....	17
1.3.4 Ocele třídy 13.....	17
1.3.5 Ocele třídy 14.....	17
1.3.6 Ocele třídy 15.....	17
1.3.7 Ocele třídy 16.....	18
1.3.8 Ocele třídy 17.....	18
1.3.9 Ocele třídy 19.....	18
1.4 OZNAČENÍ OCELÍ PODLE EVROPSKÉ NORMY.....	19
1.4.1 Značení dle ČSN EN 10027-1.....	19
1.4.2 Značení dle ČSN EN 10027-2.....	21
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	25
2.1 DIAGRAMY IRA A ARA.....	26
2.1.1 Izotermický rozpad austenitu (IRA).....	26
2.1.2 Anizotermický rozpad austenitu (ARA)	27
2.2 ŽÍHÁNÍ	28
2.2.1 Žíhání ocelí.....	28
2.3 KALENÍ	30
2.3.1 Kalící prostředí.....	30
2.3.2 Baitické kalení.....	31
2.3.3 Martenzitické kalení.....	33
2.4 POPOUŠTĚNÍ.....	34
2.5 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	36
2.5.1 Cementování	36
2.5.2 Nitrocementování.....	38
2.5.3 Nitridování	38
2.5.4 Karbonitridování	39
2.5.5 Boridování.....	39

2.5.6	Iontová nitridace.....	39
2.5.7	Sulfonitridace	40
2.6	TEPELNĚ-MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ (TMZ)	40
2.6.1	Vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování (VTMZ).....	40
2.6.2	Nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování (NTMZ)	40
3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	42
3.1	TVRDOST.....	42
3.1.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella	43
3.1.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	44
3.1.3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	45
3.2	MIKROTVRDOST	46
3.2.1	Mikrotvrdost strukturních složek a fází	47
3.2.2	Stanovení a ověření hloubky cementace	49
3.2.3	Měření mikrotvrdosti podle Vickerse	49
3.2.4	Měření mikrotvrdosti podle Knoopu.....	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	53
4	CÍLE PRÁCE	54
5	POUŽITÉ OCELI.....	55
5.1	OCEL 12060 (EN 1.0535).....	55
5.2	OCEL 14209 (1.3520).....	55
5.3	OCEL 19132 (EN 1.1520).....	56
6	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	57
6.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	57
6.2	POSTUP TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	58
7	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	61
7.1	VYHODNOCENÍ PRO OCEL 12060	62
7.1.1	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 bez tepelného zpracování.....	62
7.1.2	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 po tepelném zpracování	63
7.2	VYHODNOCENÍ PRO OCEL 14209	71
7.2.1	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 bez tepelného zpracování.....	71
7.2.2	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 po tepelném zpracování.....	72
7.3	VYHODNOCENÍ PRO OCEL 19132	80
7.3.1	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 bez tepelného zpracování.....	80
7.3.2	Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 po tepelném zpracování.....	81
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	89
8.1	POROVNÁNÍ TVRDOSTI OCELI 12060 PŘI ROZDÍLNÝCH DOBÁCH AUSTENITIZACE	89
8.2	POROVNÁNÍ TVRDOSTI OCELI 14209 PŘI ROZDÍLNÝCH DOBÁCH AUSTENITIZACE	91

8.3	POROVNÁNÍ TVRDOSTI OCELI 19132 PŘI ROZDÍLNÝCH DOBÁCH AUSTENITIZACE	93
ZÁVĚR		95
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		96
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		98
SEZNAM OBRÁZKŮ		99
SEZNAM TABULEK		102

ÚVOD

Tepelné zpracování je proces, při kterém je materiál řízeně ohříván na požadovanou teplotu a po určité prodlevě ochlazován v daném prostředí tak, aby získal požadované mechanické vlastnosti. Jestli se změní i chemické složení povrchu oceli, tak se jedná o chemicko-tepelné zpracování. V teoretické části jsou popsány základy tepelného zpracování a jeho rozdělení, které se nejčastěji využívají a které využiji v praktické části. Například kalení, které se používá ke zlepšení mechanických vlastností ocelí, a to konkrétně ke zvýšení tvrdosti.

Mechanické vlastnosti charakterizují chování materiálu při mechanickém namáhání. K určení základních mechanických vlastností patří např. tvrdost. Ta je obecně definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa do jeho povrchu. Podstatou metod měření tvrdosti se zakládá na vtlačování malého tělíska (indentoru) do povrchu zkoušeného materiálu určitou silou za definovaných podmínek. Tvrdost se měří podle několika metod např. podle Brinella, Vickerse a Rockwella. Jedná se o zkoušky nedestruktivní, tudíž je možno měřit tvrdost na přímo hotových výrobcích, aniž by došlo k jejich znehodnocení.

V bakalářské práci se poté zaměřím na vyhodnocení vlivu teploty a doby austenitizace na výsledné mechanické vlastnosti při tepelném zpracování u vybraných ocelí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ

Technické materiály jsou materiály, které se používají ve strojírenské nebo jiné výrobě. Lze je získávat nebo vytvářet chemickými ději, fyzikálními postupy, a také mohou být přírodní. Můžeme je rozdělit do dvou skupin, kdy v každé skupině jsou materiály s podobnými vlastnostmi, podobnou zpracovatelskou technologií a často i se stejným použitím. Dělí se:

a) Kovy

- Železné kovy
 - Surové železo
 - Ocel
 - Litina
- Neželezné materiály
 - Lehké $\rho < 5 \text{ kg/dm}^3$
 - Těžké $\rho > 5 \text{ kg/dm}^3$

b) Nekovy

- Plasty (termoplasty, reaktoplasty, elastomery)
- Ostatní technické materiály (dřevo, sklo, kůže, keramika, kamenina)
- Pomocné materiály (maziva, brusiva, chladící prostředky). [1]

1.1 Rozdělení oceli

Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším a nejčastěji používaným technickým materiálem. Je to všestranný materiál, který se dá použít pro stavbu strojů, zařízení, nástrojů apod., vede k výrobě oceli o nejrůznějších vlastnostech. Oceli představují cca 90 % slitin železa. Zbýlých 10 % patří litinám. Oceli jsou slitiny železa s uhlíkem případně s dalšími legujícími prvky definovaného chemického složení, které obsahují méně než 2 % uhlíku. Při obsazích uhlíku vyšších než 2 % se hovoří o litinách. Zde je uhlík vyloučen jako grafit nebo cementit. Může se vyskytovat ve více fázích, které popisuje fázový binární diagram železo-uhlík. [2], [3]

V současné době je vyráběno asi 2 500 druhů ocelí. V normách (ČSN, DIN atd.) jsou ocele rozděleny do skupin jednak podle chemického složení, jednak podle struktury a mechanických a fyzikálních vlastností.

Oceli se podle chemického složení dělí na legované a nelegované, kde obsah žádného prvku nepřekročí mezní obsah uvedený v tabulce. [4]

Tabulka 1. Mezní hodnota prvků podle ČSN EN [4]

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	Prvky vzácných zemin	Mn	Mo	Nb
0,30	0,0008	0,10	0,30	0,30	0,40	0,10	1,65	0,08	0,06

Tabulka 2. Mezní hodnota prvků podle ČSN EN [4]

Pb	Se	Ni	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Ostatní C, P, S, N, (každý)
0,40	0,10	0,30	0,60	0,10	0,05	0,10	0,30	0,05	0,10

Oceli dále dělíme podle chemického složení do dvou základních skupiny, a to oceli nelegované (uhlíkové) a oceli legované.

1.1.1 Oceli nelegované

Oceli nelegované jsou slitiny Fe-C, u nichž obsah dalších prvků nepřekročí stanovené mezní hodnoty, viz tab. 1, 2. Pokud přidáváme některé prvky záměrně v nižších množstvích, než jsou uvedené hodnoty, pak hovoříme o mikrolegování. [5]

1.1.2 Oceli legované

Legované oceli se dále dělí na:

Nízkolegované oceli – obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je nižší než 5 %. Mají podobné vlastnosti jako ocele nelegované, ale jsou vhodné pro tepelné zpracování. Tepelným zpracováním je u nich možnost ovlivnit mechanické vlastnosti.

Vysocolegované oceli – obsah legujících prvků je vyšší než 5 %. Kombinací legujících prvků se dosahuje potřebných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.

1.2 Rozdělení ocelí podle hlavních skupin jakosti

1.2.1 Hlavní skupiny jakosti nelegovaných ocelí

Oceli obvyklých jakostí – Jsou to ty druhy nelegovaných ocelí, kde požadavky na jakost nevyžadují zvláštních opatření při výrobě, musí však splňovat tyto podmínky:

- nejsou určeny pro tepelné zpracování,
- požadavky, které je nutno dodržet pro nezpracovaný nebo normalizační žíhaný stav,
- nejsou předepsány další zvláštní kvalifikační charakteristiky,
- s výjimkou obsahu Si a Mn nejsou předepsány žádné další obsahy legovacích prvků.

Nelegované jakostní oceli – Jsou to druhy nelegovaných ocelí, pro které všeobecně není předepsaná rovnoměrná reakce na tepelné zpracování ani požadavky na stupeň čistoty. Jsou však ne ně kladeny (na základě namáhání) přísnější nebo dodatečné požadavky než na oceli obvyklých jakostí, takže výroba ocelí vyžaduje větší pozornost.

Nelegované ušlechtilé oceli – Jsou to ty druhy ocelí, které na rozdíl od jakostních ocelí vykazují vyšší stupeň čistoty. Jsou určeny hlavně pro zušlechťování nebo povrchové kalení. Mají rovnoměrnější reakci na tepelné zpracování a přesné chemické složení. Těchto vlastností je dosahováno zvláštními podmínkami výroby a zkoušení. Patří sem:

- oceli s požadavky na nárazovou práci v zušlechtěném stavu,
- oceli s požadavky na hloubku zakalené vrstvy nebo povrchovou tvrdost,
- oceli s požadavky na obzvlášť nízké obsahy nekovových vměstků,
- oceli s předepsaným maximálním obsahem fosforu a s minimálním obsahem síry,
- oceli s hodnotami nárazové práce min. $KV > 27 \text{ J}$ při $-50 \text{ }^\circ\text{C}$,
- oceli pro jaderné reaktory,
- oceli s předepsanou hodnotou elektrické vodivosti min. $G > 9 \text{ S}$,
- feriticko-perlitické oceli s předepsaným obsahem uhlíku min. 0,25 %,

- oceli pro předpínací výztuž do betonu.

1.2.2 Hlavní skupiny jakosti legovaných ocelí

Legované jakostní oceli – Jde o oceli určené pro podobné účely jako nelegované jakostní oceli. Aby ale vyhovovaly zvláštním podmínkám použití, obsahuje legovací prvky, které z něj dělají legované oceli. Nejsou všeobecně určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení. Patří sem:

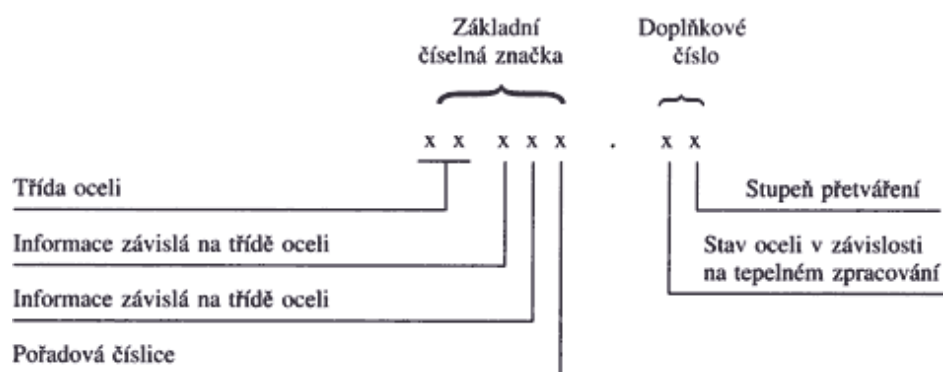
- svařitelné jednozrnné konstrukční oceli pro ocelové konstrukce včetně tlakových nádob a potrubí,
- oceli legované pouze křemíkem nebo křemíkem a hliníkem se zvláštními požadavky na magnetické a elektrické vlastnosti,
- oceli určené na výrobu kolejnic, štetovnic a důlních výztuží,
- oceli pro ploché výrobky válcované za tepla nebo za studena, které jsou určeny pro náročnější tváření za studena a legované jednotlivě nebo v kombinaci bór, niob, titan, vanad, nebo zirkon,
- oceli legované pouze mědí.

Legované ušlechtilé oceli – Jde o oceli, u nichž je dosahováno požadovaných zpracovatelských a užitných vlastností – často v kombinacích a v zúžených mezích, přesným stanovením chemického složení a zvláštními podmínkami výroby a zkoušení. Patří zde nerezová oceli, žárovzdorné a žárovepné oceli, oceli na valivá ložiska, nástrojové oceli, oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a jiné. Rozdělujeme je na následující skupiny:

- nerezové oceli s obsahem C \leq 1,20 % a obsahem Cr \geq 10,5 %,
- oceli s obsahem Ni $<$ 2,5 % a Ni \geq 2,5 %,
- rychlořezné oceli se stanoveným C \geq 0,6 % a obsahem Cr = (3-6) %,
- Ostatní legované ušlechtilé oceli. [2]

1.3 Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření

Oceli se označují jednak číselně, ale i barevně. Oceli ke tváření jsou rozděleny do devíti tříd jakosti podle chemického složení. Jsou to třídy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Toto označení se skládá ze základní číselné značky a doplňkového čísla odděleného tečkou.



Obrázek 1. Schéma číselného označení [6]

Základní číselná značka je **pětimístné číslo**, označující základní materiál.

První číslice v základní značce je 1 a označuje tvářenou ocel.

Druhá číslice ve spojení s první označuje třídu oceli.

Třetí a čtvrtá číslice mají různý význam podle třídy oceli.

Pátá číslice má význam pořadový.

Doplňkové číslo má **jednu** nebo **dvě doplňkové číslice**, kdy první číslice označuje stav oceli v závislosti na tepelném zpracování a druhá číslice označuje stupeň přetváření oceli. [2], [6]

1.3.1 Ocele třídy 10

Ocel tvářená, konstrukční obvyklých jakostí s nezaručeným chemickým složením, a tedy s předepsanými mechanickými vlastnostmi. Nejvíce se používá ocelí tř. 10 o mezi pevnosti v rozmezí 340 až 520 MPa. Jsou to ocele značek 10 340 až 10 451 pro nejrůznější konstrukce i některé strojní součástky např. ocele pro stavbu mostů, jeřábových a lodních konstrukcí, též na svorníky, šrouby, nýty atd. Užívá se jich ve tvaru tyčí, nejrůznějších profilů a plochých vývalků, většinou ve stavu bez tepelného zpracování.

1.3.2 Ocele třídy 11

Ocel tvářená konstrukční obvyklých jakostí se zaručeným chemickým složením a s předepsanými hodnotami mechanických vlastností, vhodná k tváření. Ocele tř. 10 a 11

nejsou vhodné pro tepelná zpracování s výjimkou žihání. Jsou nejpoužívanější a také nejlevnější ocele z dále uváděných ocelí.

1.3.3 Ocele třídy 12

Ocel tvářená konstrukční uhlíková, neobsahující žádné další legury. Jsou určeny především k tepelnému zpracování s výjimkou žihání. Jejich využití je velmi široké vzhledem k obsahu C, kterého obsahují od 0,1 až do 1 hm. %. Tepelným zpracováním, pro které jsou tyto ocele výhradně určeny, mohou získat velmi širokou škálu užitečných vlastností. Je to především vysoká tvrdost povrchu při zachování vysoké houževnatosti a odolnosti proti dynamickému namáhání. Oceli tř. 12 se řadí do několika podskupin, a to z důvodu změny mechanických vlastností při tepelném zpracování. Jsou to oceli k cementování, oceli k zušlechťování, oceli k povrchovému kalení a oceli na patentované dráty.

1.3.4 Ocele třídy 13

Ocel tvářená konstrukční legovaná (ušlechtilá). Platí i pro ocele třídy 14 až 16. Z přidaných legur obsahuje především Mn, Si a jejich kombinace. Používají se tam, kde již uhlíková ocel nevyhověla, tj. na strojní součásti středně namáhané, kde se vyžaduje prokalení a vyšší odolnost proti opotřebení. Jsou zde ocele pružinové, transformátorové a dynamové ocele, a také ocele na nádoby pro stlačené plyny.

1.3.5 Ocele třídy 14

Obsahují z legujících prvků především Cr, Mn, Si, Al a jejich kombinace. Ocele této třídy jsou značně používané, a to jednak jako nízkouhlíkové chromové ocele vhodné pro cementování, jednak jako středně a vysokouhlíkové ocele určené pro zušlechťování. Zvláštní skupinu tvoří ocele pro valivá ložiska, která obsahují okolo 1 hm. % C, 0,8 až 1,6 hm. % Cr a asi 1 hm. % Mn. Tyto ocele se vyznačují vysokou prokalitelností, jejímž výsledkem je vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení a vysokou pevností v tlaku.

1.3.6 Ocele třídy 15

Obsahují kromě prvků vyskytujících se ve třídě 14 i V, Mo a různé kombinace uvedených legur. Mají specifické vlastnosti, jako velmi dobrá prokalitelnost a tím vhodnost k zušlechťování, vysoká mez pevnosti a kluzu při normální teplotě, zaručená mez tečení (žárupevnost), zvýšená odolnost proti korozi. Dělí se na ocele pro cementování a

zušlechťování. Z ocelí určených především k zušlechťování se vyrábějí velmi namáhané součásti strojů a letadel, např. klikové hřídele, torzní tyče, náročná ozubená kola atd. Ocele se zaručenou mezí tečení se používají na stavbu energetických zařízení, a to jak tlakových nádob, tak na strojní součásti.

1.3.7 Ocele třídy 16

Obsahují Ni, Cr, Mo a jejich kombinace. Jsou to nejkvalitnější ocele pro vysoce namáhané součásti. Jsou dobře prokalitelné, některé až do průměru 140 mm. Dosahuje se u nich také vysoké meze kluzu při dostatečné houževnatosti. Opět se dělí na ocele pro cementování a zušlechťování. Důležitá je skupina ocelí pro součásti pracující za nízkých teplot. [4], [7]

1.3.8 Ocele třídy 17

Ocel tvářená konstrukční středně a vysoce legovaná se speciálními vlastnostmi. Podle účelu použití je dělíme na oceli korozivzdorné, žárovzdorné, žárovevné, odolné proti opotřebení, pro nízké teploty a se zvláštními fyzikálními vlastnostmi. Hlavním cílem vývoje korozivzdorných ocelí je zlepšování houževnatosti a zvyšování meze kluzu. Toho dosahujeme především přísadami molybdénu, mědi a křemíku. Pro zvýšení pevnosti přichází v úvahu zejména nikl. Nejvyšší korozivzdornosti dosahují materiály, kde obsah legur niklu, chromu a molybdénu je větší než obsah železa. [2], [7]

1.3.9 Ocele třídy 19

Třída 19 obsahuje ocele určené především pro výrobu nástrojů pracujících jak zastudena, tak zatepla. Výjimečností těchto ocelí je náročná ocelářská výroba, která zaručuje maximální čistotu ocele a velmi úzké rozmezí jak C, tak všech legujících prvků. Konečným zpracováním je zpravidla kalení s následným popouštěním jak nízkoteplotní, tak vysokoteplotní. Většinu nástrojových ocelí tvoří speciální oceli legované nejrůznějšími prvky, které dodají specifické vlastnosti. Každá skupina nástrojových ocelí má své charakteristické vlastnosti, z nichž nejdůležitější jsou mechanické a technologické vlastnosti: tvrdost (pevnost), houževnatost, vrubová houževnatost, zakalitelnost, prokalitelnost, odolnost proti popouštění, odolnost proti otěru a stálost rozměrů. [4]

1.4 Označení ocelí podle Evropské normy

Protože značení dle ČSN 42 0002 je v současnosti povoleno používat pouze mezi tuzemskými podniky je nutno přecházet na evropské normy. Zkrácené označení písmeny a čísla dle ČSN EN 10027-1 vyjadřuje základní charakteristické znaky ocelí, číselné značení dle ČSN EN 10027-2 zahrnuje skupiny ocelí a jejich charakteristické vlastnosti.

1.4.1 Značení dle ČSN EN 10027-1

Nový způsob značení, který nahrazuje normu ČSN 42 0002. Označování je složeno z písmena a čísel, která vyjadřují základní charakteristické znaky ocelí. Dále se toto značení dělí na:

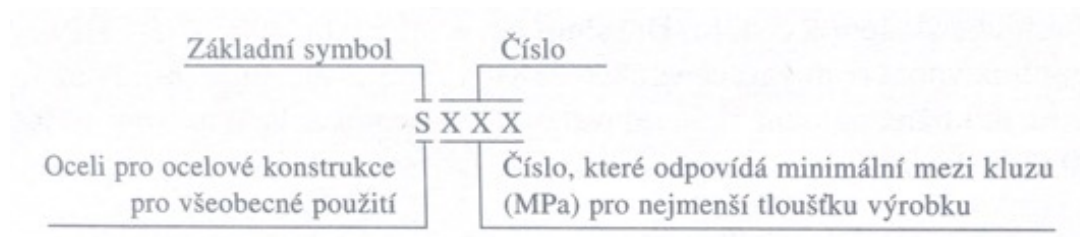
- a) Značky tvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností
- b) Značky vytvořené na základě chemického složení

Značky tvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností

Tabulka 3. Značky vytvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností [6]

Značka	Význam značky
S	oceli pro ocelové konstrukce pro všeobecné použití
P	oceli pro tlakové nádoby
L	oceli na potrubí
E	oceli na strojní součásti
G	oceli na odlitky
B	oceli pro výztuž do betonu (následující číslo vyjadřuje mez kluzu $N \cdot mm^{-2}$)
H	ploché výrobky válcované zastudena z ocelí k tažení a vyšší pevnosti
D	ploché výrobky z měkkých ocelí pro tažení zastudena
R	oceli na kolejnice (následující číslo odpovídá min. pevnosti v tahu $N \cdot mm^{-2}$)

T	tenké a pocínované plechy a pásy (pochromované plechy a pásy)
M	plechy a pásy pro elektrotechniku

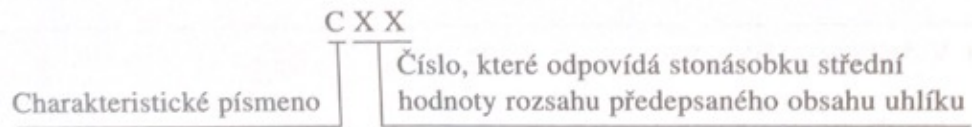


Obrázek 2. Značky tvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností ocelí [2]

Značky vytvořené na základě chemického složení oceli

Tabulka 4. Značky vytvořené na základě chemického složení oceli [6]

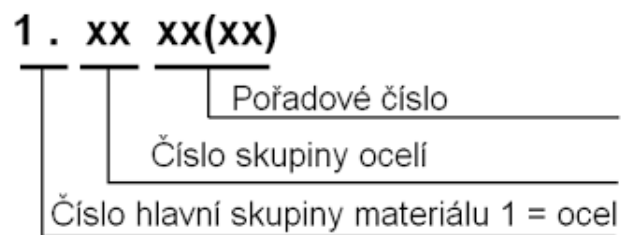
Značka	Význam značky
C + čísla odpovídající stonásobku středního obsahu uhlíku	nelegované oceli (s výjimkou automatových) se středním obsahem manganu pod 1 %
číslo odpovídající stonásobku středního obsahu uhlíku + chemické symboly legujících prvků + čísla vyjadřující obsah charakterizujících legujících prvků	nelegované oceli se středním obsahem manganu ≥ 1 %, nelegované automatové oceli a legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahy jednotlivých legujících prvků pod 5 %
X + číslo odpovídající stonásobku střední hodnoty rozsahu předepsaného pro obsah uhlíku + chemické symboly legujících prvků charakterizující ocel + čísla udávající obsahy charakteristických legujících prvků	legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahem min. jednoho legujícího prvku ≥ 5 %
HS + čísla udávající obsahy prvků v následujícím pořadí wolfram (W), molybden (Mo), vanad (V), kobalt (Co)	rychlořezné oceli



Obrázek 3. Značky vytvořené na základě chemického složení ocelí [2]

1.4.2 Značení dle ČSN EN 10027-2

Tato norma stanovuje systém číselného označování ocelí, pro označení ocelí značkami. Tato čísla platí jako doplňková ke značkám ČSN EN 10027-1. Každé číslo odpovídá pouze jedné značce oceli.



Obrázek 4. Stavba čísel oceli [6]

Tabulka 5. Oceli nelegované [6]

oceli obvyklých jakostí	jakostní oceli	ušlechtilé oceli
00 nebo 90 oceli obvyklých jakostí		10 - oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi
	01 - konstrukční oceli pro všeobecné použití s $R_m < 500\text{MPa}$	11 - konstrukční oceli na strojní součásti s $<0,50\%C$
	02 - ostatní konstrukční oceli určené pro tep. Zpracování s $R_m < 500\text{MPa}$	12 - oceli na strojní součásti s $> 0,5\%C$
	03 - oceli s průměrným $\% C < 0,12$ nebo $R_m < 400\text{MPa}$	13 - konstrukční oceli, oceli pro strojní součásti, tlakové nádoby
	04 oceli s průměrným $\%C > 0,12 < 0,25$ nebo $R_m > 400 < 500\text{MPa}$	14
	05 - oceli s průměrným $\%C > 0,25 < 0,55$ nebo $R_m > 500 < 700\text{MPa}$	15 - oceli nástrojové
	06 - oceli s průměrným $\%C > 0,55$ nebo $R_m > 700\text{MPa}$	16 - oceli nástrojové
	07 - oceli s vyšším obsahem P nebo S	17 - oceli nástrojové
		18 - oceli nástrojové
		19

Tabulka 6. Oceli legované [6]

Oceli legované							
Oceli jakostní	Oceli ušlechtilé						
	nástrojové oceli	různé oceli	chemicky odolné oceli	konstrukční oceli, oceli na strojní součásti a na tlakové nádoby			
	20 Cr	30	40 nerezavějící oceli s méně než 2,5% Ni bez Mo, Nb, Ti	50 Mn, Si, Cu 13 141	60 Cr-Ni s obsahem Cr od 2,0 do 3%	70	80 Cr-Si-Mn Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V
	21 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si	31	41 nerezavějící oceli s méně než 2,5% Ni s Mo, bez Nb a Ti	51 Mn-Si Mn-Cr 13 240	61	71 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	81 Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V
	22 Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si	32 rychlořezné oceli s Co	42	52 Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	62 Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	72 Cr-Mo s méně než 0,35% Mo Cr-Mo-B	82 Cr-Mo-W Cr-Mo-V-W
	23 Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V	33 rychlořezné oceli bez Co	43 nerezavějící oceli s $\geq 2,5$ % Ni bez Mo, Nb, Ti (15 260)	53 Mn - Ti Si-Ti	63 Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	73 Cr-Mo s $\geq 0,35$ % Mo (15 121) (15 313)	83
	24 W Cr-W	34	44 nerezavějící oceli s $\geq 2,5$ % Ni s Mo, bez Nb a Ti	54 Mo, Nb, Ti, V, W (15 020)	64	74	84 Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si- Mn-Ti
	25 W-V Cr-W-V	35 oceli na valivá ložiska	45 nerezavějící oceli se zvláštními přísadami	55 B Mn-B s < 1,65 Mn	65 Cr-Ni-Mo s < 4 % Mo + < 2,0 Ni	75 Cr-V s < 2,0 % Cr	85 oceli k nitrídování
	26 W kromě tříd 24,25 a 27	36 materiály se zvláštními magnetickými vlastnostmi bez Co	46 chemicky odolné a žárovečné slitiny Ni	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo s < 0,4% Mo + $\geq 2,0$ < 3,5 % Ni	76 Cr-V s > 2,0 % Cr	86
	27 s Ni	37 materiály se zvláštními magnetickými vlastnostmi s Co	47 žárovzdorné oceli s < 2,5 % Ni	57 Cr-Ni s < 1,0% Cr	67 Cr-Ni-Mo s < 0,4% Mo + $\geq 3,5$ < 5 % Ni nebo ≥ 0 < 4 % Mo	77 Cr-Mo-V	87 oceli neurčené pro tepelné zpracování u odběratele
08 ⁹⁸ oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi	28 ostatní	38 materiály se zvláštními fyzikálními vlastnostmi bez Ni	48 žárovzdorné oceli s $\geq 2,5$ % Ni	58 Cr-Ni s $\geq 1,0$ < 1,5 %Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88 vysocepevné svařitelné oceli
09 ⁹⁹ oceli pro různé oblasti použití	29	39 materiály se zvláštními fyzikálními vlastnostmi s Ni	49 vysocepevné žárovečné materiály	59 Cr-Ni s $\geq 1,5$ < 2 %Cr	69 Cr-Ni kromě tříd 57 až 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89 vysocepevné svařitelné oceli

V polích tabulky jsou obsaženy následující údaje:

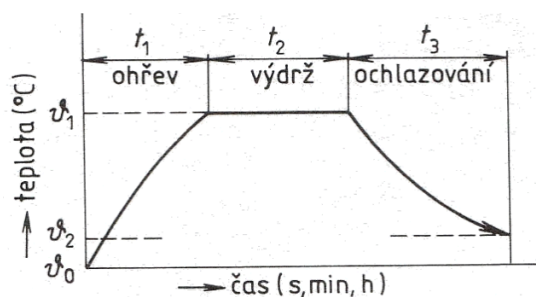
Číslo skupiny ocelí, charakteristické vlastnosti skupiny ocelí shrnuté pod příslušným číslem,
pevnost v tahu R_m . [6]

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Vlastnosti kovových materiálů jsou závislé nejen na jejich chemickém složení, ale především na jejich struktuře, tj. na množství, tvaru, velikosti a rozložení jednotlivých fází. Kovové materiály se získanou vhodnou strukturou lze využít např. snížit hmotnost stroje nebo strojního zařízení, popř. použít materiály levnější. Obojí přispívá ke zvýšení hospodárnosti výroby. Požadovanou strukturu daného kovového materiálu lze získat hlavně tepelným zpracováním. [9]

Tepelným zpracováním se rozumí aplikace určitého teplotního režimu na daný materiál za účelem dosažení požadovaných vlastností (mechanických, obrobiteľnosti, korozní odolnosti atd.). Tepelné zpracování lze rozdělit na:

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



Obrázek 5. Schéma průběhu tepelného zpracování

Tepelné zpracování ocelí

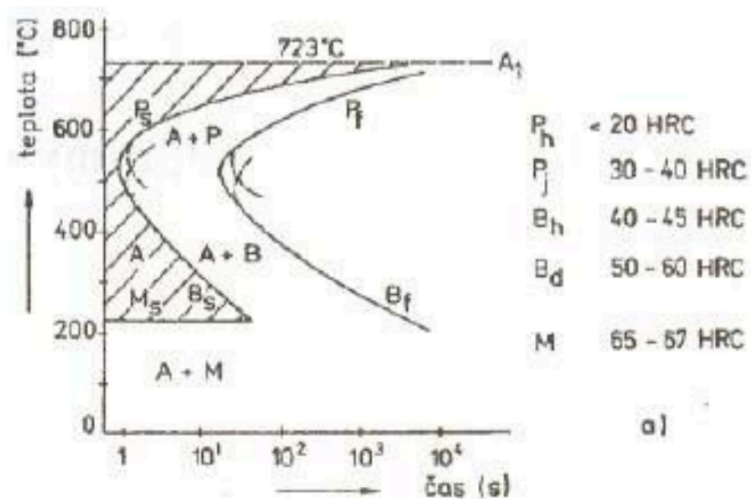
Při ohřevu ocelí na překrystalizační teplotu A_{c1} vznikají za konstantní teploty austenitová zrna, která pohlcují okolní lamelky perlitického feritu a cementitu. Při dalším ohřevu se u podeutektoidních ocelí rozpouštějí v austenitu feritická zrna, u nadeutektoidních ocelí cementit. Překročením křivky A_{c3} u podeutektoidních ocelí a A_{cm} u nadeutektoidních ocelí se změní původní heterogenní struktury v homogenní strukturu austenitu. Průběh austenitizace znázorňují tzv. transformační diagramy austenitizace IRA a ARA. [10]

2.1 Diagramy IRA a ARA

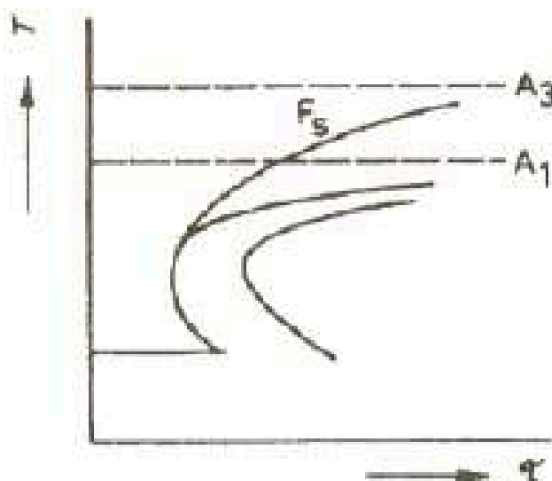
2.1.1 Izotermický rozpad austenitu (IRA)

Diagram izotermického rozpadu austenitu = ukazují průběh přeměny austenitu za konstantní teploty

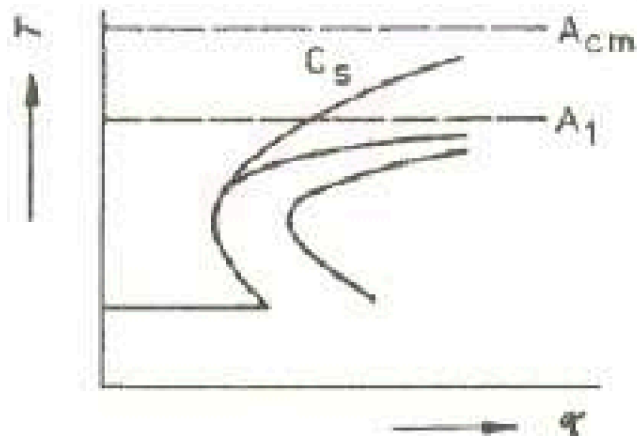
Na průběh křivek diagramů IRA působí řada faktorů. Zásadní vliv má chemické složení oceli, dále se uplatňují podmínky austenitizace, chemická homogenita a velikost zrna austenitu. [12]



Obrázek 6. Diagram izotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [12]



Obrázek 7. Diagram izotermického rozpadu austenitu podeutektoidní oceli [12]

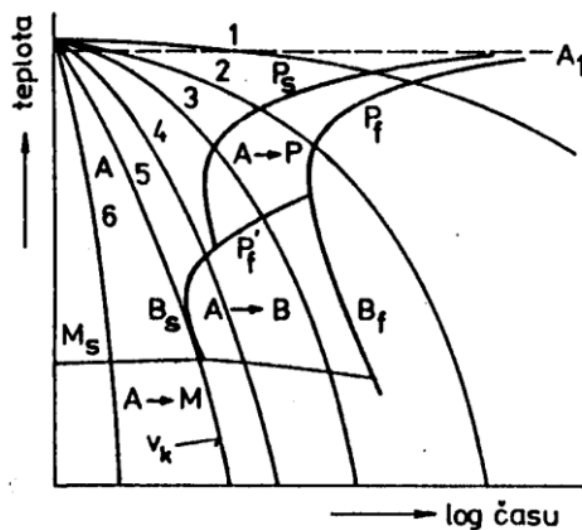


Obrázek 8. Diagram izotermického rozpadu austenitu nadeutektoidní oceli [12]

2.1.2 Anizotermický rozpad austenitu (ARA)

Anizotermický rozpad austenitu = znázorňují průběh přeměn při plynulém ochlazování austenitu různou rychlostí. V praxi se uplatňují ve větším rozsahu než diagramy IRA, neboť při většině postupů tepelného zpracování se austenit transformuje při plynulém ochlazování.

Diagramy ARA jsou v porovnání s IRA diagramy poněkud složitější, protože výsledná struktura oceli může obsahovat směs produktů přeměn, probíhajících postupně s klesající teplotou.



Obrázek 9. Diagram anizotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [12]

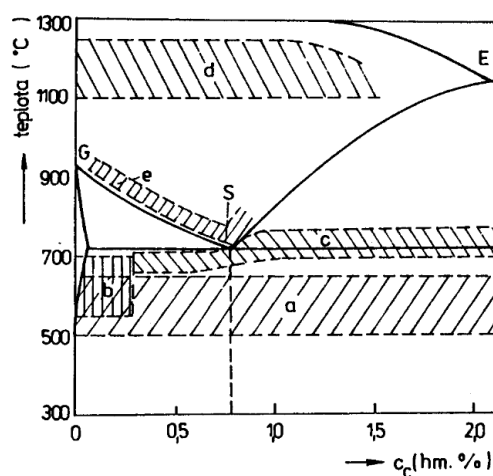
2.2 Žihání

Podstatou je rovnoměrný ohřev součásti na teplotu žihání (je pro různé způsoby žihání a pro různé materiály jiná), setrvání (výdrž) na této teplotě po určitou dobu, a potom obvykle pomalé až velmi pomalé ochlazování. Podle druhu žíhaného materiálu lze rozdělit žihání do tří skupin:

- žihání ocelí,
- žihání litin,
- žihání neželezných kovů.

2.2.1 Žihání ocelí

Oceli lze žihat bez překrytalizace (teplota žihání prakticky nepřekročí překrytalizační teplotu A_{c1}) a s překrytalizací (teplota žihání překročí buď A_{c1} , A_{c3} , nebo A_{cm}) nebo kombinovaně.



Obrázek 10. Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C (žihání: a-ke snížení vnitřního pnutí, b-rekrytalizační, c-na měkko, d-homogenizační, e-normalizační) [11]

Druhy žihání bez překrytalizace:

- a) **Rekrytalizační žihání** – slouží k odstranění deformovaných zrn a zpevnění způsobeného tvářením za studena za současného vzniku nových zrn bez znaků předchozí deformace a k obnovení schopnosti plastické deformace. Používá se jako mezioperační žihání během tvářením za studena. Je to ohřev nad rekrytalizační teplotu (550 až 700 °C), výdrž na této teplotě v závislosti na

zpracovaném polotovaru a technologickém zařízení od desítek sekund až po hodiny a následující ochlazování, u něhož rychlost již není rozhodující.

- b) **Žihání k snížení pnutí** – používáme k snížení vnitřních pnutí, která vznikají ve výrobcích např. po svařování, po obrábění, po tváření za tepla při dokončovacích teplotách apod. Po ohřevu na teplotu 500 až 650 °C a výdrži na této teplotě podle velikosti a tvaru součásti následuje pomalé ochlazování v peci až do teplot 250 až 300 °C a pak dochlazení na vzduchu.
- c) **Žihání na měkko** – používáme zejména u nástrojových ocelí a u některých konstrukčních legovaných ocelí. Účelem je dosažení nejnižší možné tvrdosti a struktury s převážně globulárními karbidy. Zhrubnutí se projeví ve snížení tvrdosti, zlepšení obrobiteľnosti a tváriteľnosti oceli. [9]

Druhy žihání s překrystalizací:

- a) **Normalizační žihání** – patří mezi nejpoužívanější postupy tepelného zpracování podeutektoidních ocelí a slouží k dosažení rovnoměrné struktury u odlitků, po tváření, svařování atd. Provádí se při teplotách 30-50 °C nad A_3 s následným ochlazením na vzduchu. Výsledkem je poměrně jemnozrná struktura s vyšší pevností. Téměř vždy se s ním potkáme u výkovků a odlitků.
- d) **Homogenizační žihání** – slouží k odstranění segregací (odmíšení) v odlitcích. Provádí se při vysokých teplotách (nad 1100 °C), kdy dojde k výraznému urychlení difúzních procesů, které vyrovnávají koncentrační gradienty v oceli. [5], [9]
- b) **Izotermické žihání** – slouží ke stejnému účelu jako základní žihání, popř. žihání na měkko, avšak může být často hospodárnější, neboť žihací doby jsou kratší. Austenitizační teplota je těsně nad A_{c3} , s krátkou dobou setrvání na teplotě, aby vzniklé austenitické zrna byla co nejmenší. Poté ochlazení na teplotu perlitické přeměny, výdrž na této teplotě až do doby ukončení přeměny austenitu v perlit a následující ochlazování. Izotermické žihání využívá diagramu IRA příslušné oceli. Účelem izotermického žihání je snížení pevnosti a zlepšení obrobiteľnosti zejména u legovaných ocelí. [9]

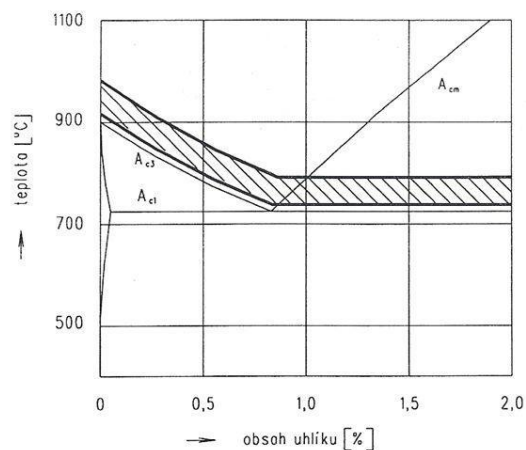
2.3 Kalení

Účelem kalení je zvýšit tvrdost oceli. Je to ohřev součásti na teplotu nad A_{c3} , popř. A_{c1} , výdrž na této teplotě a ochlazování rychlou rychlostí, čímž se potlačí vznik feritu a perlitu a zachovaný nestabilní austenit se přemění na bainit nebo martenzit. Podle převládajícího podílu jedné z těchto uvedených struktur po tepelném zpracování se rozdělují způsoby kalení na kalení martenzitické a bainitické. Kalicí teplota tedy musí ležet nad překrystalizačními teplotami oceli. Správné kalicí teploty se volí 30 až 50 °C nad A_{c3} a A_{c1} . Po kalení ve většině případech následuje popouštění. [8]

Pojmy:

Kalitelnost – je vhodnost oceli dosáhnout kalením zvýšenou tvrdost

Prokalitelnost – je vhodnost oceli dosáhnout kalení v určité hloubce pod povrchem [9], [12]

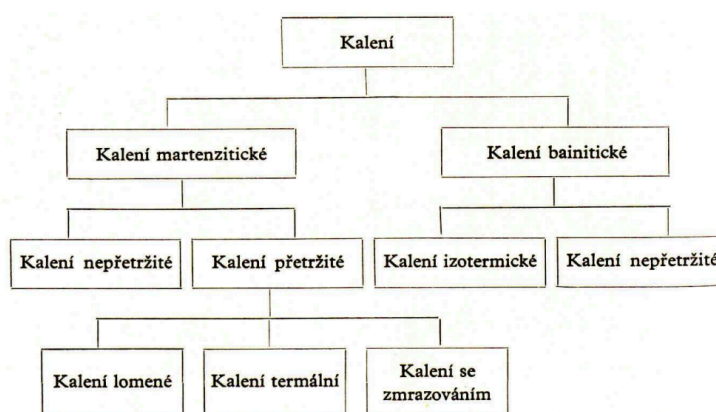


Obrázek 11. Pásmo kalících teplot

2.3.1 Kalicí prostředí

- Voda** – nejpoužívanější kalicí prostředí je voda, která je lehce dostupná a levná. Je to prostředí s intenzivní ochlazovacím účinkem, který však vždy není zcela žádoucí kvůli nebezpečí vzniku vnitřních pnutí zejména v oblasti martenzitické přeměny. Vodu lze kombinovat i s přidáním dalších látek nebo přísad. [5]

- b) **Olejové lázně (minerální oleje)** - dalšími velmi častými kalíciemi médii jsou minerální oleje. Jejich výhodou oproti vodě je v nižší ochlazovací rychlosti, což snižuje vnitřní pnutí po zakalení. Nevýhodou je odmašťování součástek a klesání kalíci účinnosti.
- c) **Vzduchem** – nejmírnějším kalíciím prostředím je vzduch, případně inertní plyny (N_2). Použití pro vysoce legované oceli, kterým pro vznik martenzitu stačí poměrně nízké ochlazovací rychlosti. Ochlazovací rychlosti lze zvýšit její cirkulací nebo zvýšením tlaku. Oceli kalitelné vzduchem se označují jako samokalitelné.
- d) **Solné a kovové lázně** – pro termální kalení nebo izotermické zušlechťování jsou využívány teplé lázně roztavených kovů (Pb, Sn,) nebo anorganických solí (dusičnany, dusitany atd.). Ochlazovací účinnost je většinou menší než u olejových lázní.

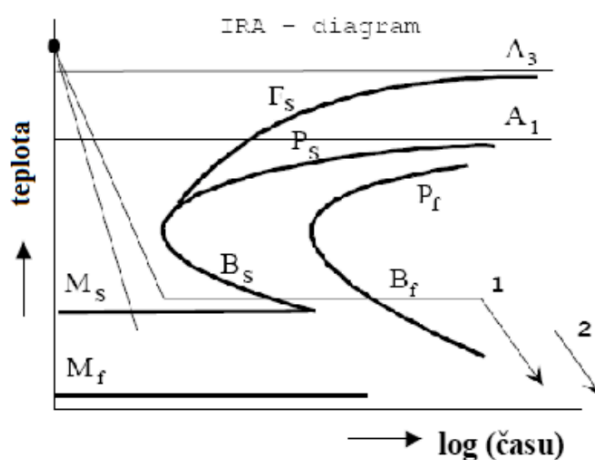


Obrázek 12. Přehled způsobů kalení oceli [9]

2.3.2 Bainitické kalení

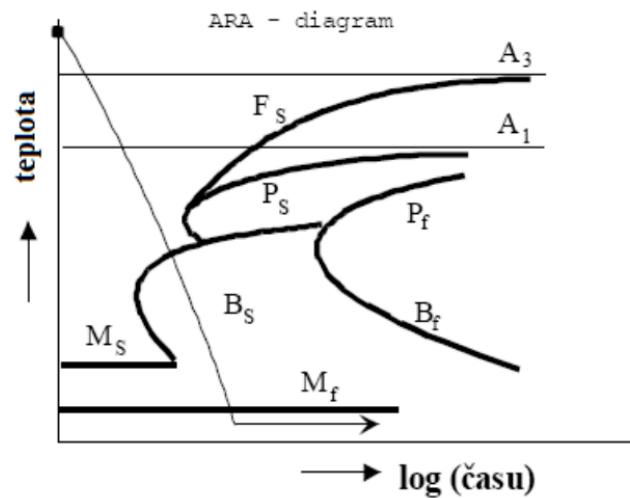
Kalení na bainit, nazývané izotermické bainitické kalení, je charakterizováno ochlazením nestabilního austenitu nadkritickou rychlostí na teplotu, která je až po teplotu M_s . Na této teplotě je provedena výdrž do doby, než se všechny austenit přemění na bainit. Poté již proběhne ochlazení materiálu na teplotu okolí. Izotermický rozpad austenitu při tomto kalení může probíhat způsobem: [13]

- a) **Izotermickým zušlechťováním** – po austenitizaci se vloží součást rychle do solné, příp. kovové lázně o teplotě v oblasti bainitické přeměny (300 až 400 °C). Tam proběhne izotermický rozpad austenitu na bainit. Následné dochlazení probíhá již na vzduchu. Zakalená součást se již nepopouští. Je vhodné především pro výroby menších průřezů z nízkolegovaných ocelí.
- b) **Izotermické kalení** – oblast teploty těsně pod teplotou M_s . Výsledná struktura je pak tvořena směsí bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Obvykle se poté popouští. [12]



Obrázek 13. Izotermické zušlechťování (křivka 1) a izotermické bainitické kalení (křivka 2)

- c) **Nepřetržité bainitické kalení** – díky dostatečně rychlému a plynulému ochlazení po austenitizaci na kalicí teplotu, aby byl zajištěn rozpad austenitu na směs bainitu a martenzitu. Po tomto kalení obvykle následuje popouštění. Toto kalení je možné pouze u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu ARA. [9]



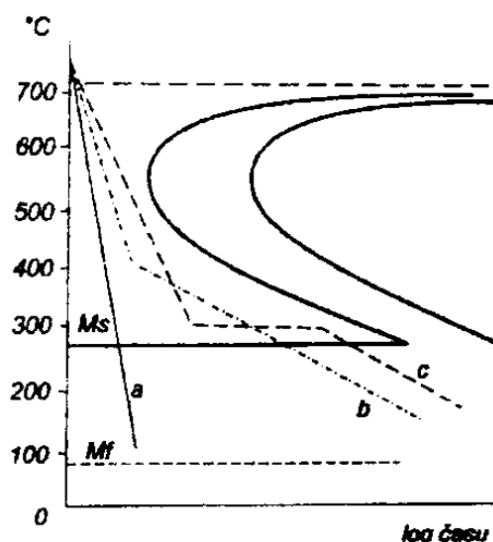
Obrázek 14. Nepřetržité bainitické kalení

2.3.3 Martenzitické kalení

Martenzitické kalení je charakterizováno ochlazením austenitu nadkritickou rychlostí do lázně o teplotě nižší, než je M_s , kdy ve struktuře oceli vznikne pouze martenzit a zbytkový austenit. Mezi druhy martenzitického kalení patří:

- a) **Přímé kalení na martenzit** – je nejpoužívanější způsob kalení a spočívá v ochlazení výrobku ohřátého na kalící teplotu přímo do kalící lázně, kterou je většinou voda nebo olej. Vysoká rychlost ochlazování má však za následek vznik velkých pnutí v materiálu. Tomu lze zabránit přerušovaným ochlazováním. Jedním ze způsobů přímého kalení je povrchové kalení. Jeho účelem je dosažení vysoké tvrdosti a tím i ořezuvzdornosti povrchu výrobku při zachování houževnatého, a tedy i měkčího jádra. Důležité zde je, aby byla rovnoměrně zakalená vrstva po celém povrchu. [13]
- b) **Lomené (přerušované) kalení** – součást se intenzivně ochlazuje ve vodě až na teplotu nad M_s tak, aby se potlačila perlitická přeměna. Poté se pokračuje ochlazování v olejové lázni, kde proběhne martenzitická přeměna. U přerušovaného kalení je důležité správné určení okamžiku pro přenesení součásti do dalšího kalícího prostředí. Použití u některých rozměrnějších a tvarově složitějších součástí.
- c) **Termální kalení** – spočívá v ochlazení kaleného předmětu v lázni o teplotě těsně nad M_s s určitou dobou výdrže na této teplotě, která je kratší než doba začátku

bainitické přeměny. Pak se předmět vyjme a v jiné lázni (nebo na vzduchu) se rychle ochladí pod teplotu M_s . Vnitřní pnutí je značně menší než u přímého kalení. Vhodné pro výrobky z legovaných ocelí (zpravidla nástrojových) nebo u menších tenkostěnných a tvarově složitých výrobků z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí. [12], [13]



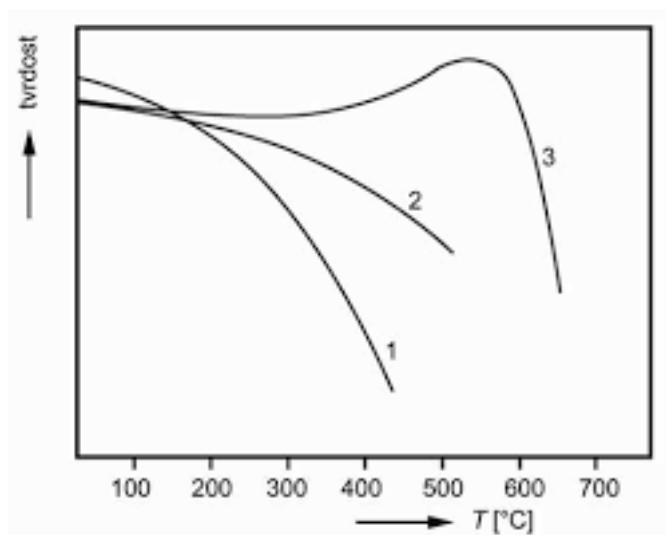
Obrázek 15. Schéma průběhu a) přímého b) lomeného c) termálního kalení eutektoidní oceli v ARA diagramu [13]

- d) **Kalení se zmrazováním** – je způsob, kdy po martenzitickém zakalení následuje co nejrychlejší přesun předmětu do prostředí s teplotou pod 0 °C. Zmenší se tak podíl zbytkového austenitu ve struktuře. Tento postup se používá u výrobků, u kterých se klade důraz na rozměrovou stabilitu (měřidla, nástroje aj.). Materiálem jsou legované oceli s vyšším obsahem uhlíku a teplotou M_f pod bodem mrazu. K zmrazování je potřeba speciálních zařízení, a proto je velmi nákladné. [12]

2.4 Popouštění

Popouštění je ohřev předmětu na určenou teplotu pod A_{c1} , výdrž na této teplotě a následné ochlazení. Provádí se v co nejkratší době po kalení. Cílem je snížit vnitřní pnutí, která vznikla po kalení a upravit mechanické vlastnosti na požadované hodnoty. Při popouštění dochází ve struktuře zakalené oceli k procesům, které ji přibližují rovnovážným stavům. V závislosti na teplotě se rozlišují čtyři stadia popouštění:

- a) **První stadium popouštění** – (cca do 200 °C) rozpad tetragonálního martenzitu na nízkouhlíkový kubický martenzit a nerovnovážný karbid. Vznik částic jemného karbidu částečně kompenzuje pokles tvrdosti způsobený poklesem vnitřního pnutí v martenzitu, proto v této fázi tvrdost klesá jen mírně.
- b) **Druhé stadium popouštění** - (cca do 200-300 °C) přeměna zbytkového austenitu na bainit. Změny vlastností v tomto stadiu popouštění se týkají především zvětšení měrného objemu oceli.
- c) **Třetí stadium popouštění** – (nad 300 °C) rozpad nízkouhlíkového martenzitu na ferit za současné tvorby cementitu. Výsledná jemná feriticko-cementitická struktura se nazývá sorbit. Snižuje se tvrdost, zvětšuje se tvárnost a houževnatost, klesá vnitřní pnutí a zmenšuje se měrný objem.
- d) **Čtvrté stadium popouštění** – (cca nad 500 °C) bývá označováno jako postupné hrubnutí částic cementitu, rekrytalizace a hrubnutí feritického zrna, pevnostní vlastnosti dále klesají, zvyšuje se houževnatost a plasticita oceli. [5], [12]



Obrázek 16. Popouštěcí křivky nelegované oceli (1), nízkolegované oceli (2) a oceli vysocelegované karbidotvornými prvky (3)

2.5 Chemicko-tepelné zpracování

Podstatou všech druhů chemicko-tepelných zpracování je úmyslné sycení povrchových vrstev výrobku různými prvky (kovy i nekovy) s cílem dosažení rozdílných mechanických, fyzikálních nebo chemických vlastností. Změna chemického složení může probíhat jednak v celém objemu (např. odvodňování) nebo jen v povrchových vrstvách. [13]

Chemicko-tepelné zpracování je kombinovaný proces přenosu hmoty a tepla. Požadovaných vlastností se dosahuje buď přímo, tzn. obohacením povrchové vrstvy příslušným prvkem za zvýšených teplot a pomalým ochlazováním (nitridace) nebo následujícím tepelným zpracováním, kterým bývá obvykle kalení s popouštěním při nízkých teplotách (např. cementování). Obecně se může chemicko-tepelné zpracování rozdělit na pět základních etap: [10]

- 1) Reakce v reakčním prostředí (tvorba složky zabezpečující přenos definujícího prvku).
- 2) Difúze v reakčním prostředí (přívod difundujícího prvku k povrchu výrobku, odvod produktů reakce vytvářejících se na fázovém rozhraní).
- 3) Reakce na fázovém rozhraní (kov a reakční prostředí).
- 4) Difúze v kovu.
- 5) Reakce v kovu.

Nejčastěji používanými způsoby chemicko-tepelného zpracování jsou cementování, nitridování, nitrocementování a karbonitridování. [10]

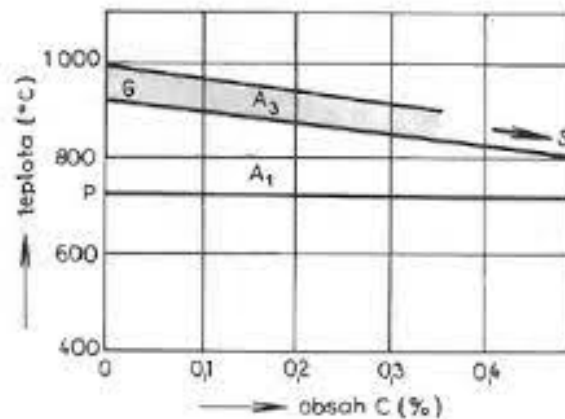
2.5.1 Cementování

Cementování je sycení povrchu uhlíkem při teplotě nad A_{c3} . Vzniklá povrchová vrstva se po zakalení vyznačuje vysokou tvrdostí a odolností proti otěru, a také zvýšenou únavovou pevností. Hloubka cementované vrstvy je nejčastěji do 2 mm. Obsah a rozložení uhlíku v cementační vrstvě závisí na použitém cementačním prostředí, na výši cementační teploty, době výdrže na cementační teplotě a na chemickém složení cementované oceli, především na obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků.

Cementační prostředí

Pro nauhličení povrchové vrstvy oceli lze využít prostředí sytké, plynné nebo kapalné.

- a) **Cementování v suchém prostředí** – patří mezi nejstarší způsob, předměty musí být suché a čisté. Tuhé prostředí (zásyp) se skládá z dřevěného uhlí a aktivátoru (7-20 % BaCO_3 – méně častěji Na_2CO_3). Výrobky se vkládají do krabic z nízkouhlíkového nebo žárovzdorného plechu spolu s cementačním práškem tak, aby jim byly rovnoměrně obklopeny. Dále se krabice uzavře víkem a utěsní jílem. Cementační teplota se obvykle pohybuje v rozmezí 880 až 920 °C. Proces je zdlouhavý a málo produktivní. Jedinou výhodou je adaptabilnost procesu, tedy možnost zpracovávat různé výrobky v běžných např. komorových pecích, čehož se často využívá v kusové výrobě.
- b) **Cementování v kapalném prostředí** – je vhodné pro drobné a střední výrobky, zvláště pokud nevyžadují silné cementační vrstvy. Využívají se lázně roztavených chloridových solí (NaCl , KCl) a jako nositel aktivního uhlí kyanidy (NaCN , KCN). Cementační teplota se opět pohybuje v rozmezí 880 až 920 °C. Pro uvažované teploty je rychlost cementace v soli asi o 30 % vyšší než při cementaci v prášku. Výrobky musí být kovově čisté a suché – protože se jedná o vysoce jedovaté látky (kyanidy) je nutné přísné dodržování bezpečnostních předpisů při práci s těmito solemi a při jejich skladování.
- c) **Cementování v plynném prostředí** – je moderní, technologicky výhodný a produktivní způsob. Plynné prostředí jsou multikomponentní směsi plynů (CO , CO_2 , H_2 , N_2 , NH_3). Teploty cementování se pohybují v rozmezí 850 až 1050 °C, závisí především na druhu oceli, ale i na složení nahličujícího prostředí a velikosti výrobků. Pro cementování uhlíkových ocelí se nejčastěji používají teploty 900 až 950 °C. Zvyšováním teploty se cementování urychluje zejména v důsledku zvětšení difuzivity uhlíku v austenitu. [10]



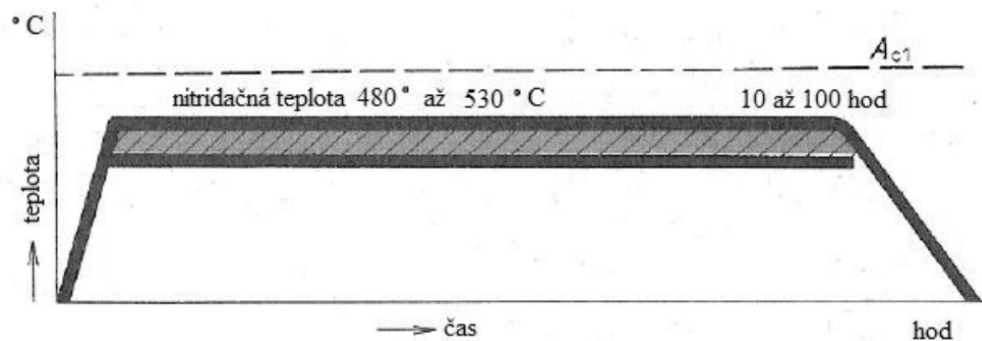
Obrázek 17. Část rovnovážného diagramu Fe – Fe₃C s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot

2.5.2 Nitrocementování

Podstava nitrocementace spočívá v nasycování povrchu uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než teploty cementační, ale vyšších než teploty A_{c3} , nejčastěji do 820 až 840 °C. Vrstva se tedy tvoří současně difúzí dusíku a uhlíku v austenitu. Dosahuje se hloubky vrstvy 0,3 až 0,4 mm za 1 až 2 hodiny. Nitrocementované vrstvy mají vyšší prokalitelnost než vrstvy cementované. Například nitrocementace ozubených kol je doprovázena podstatně menšími deformacemi než cementace, díky nižším teplotám pochodu, menší tloušťkou vrstvy a s rovnoměrnějším rozložením vnitřních pnutí v nitrocementovaných vrstvách.

2.5.3 Nitridování

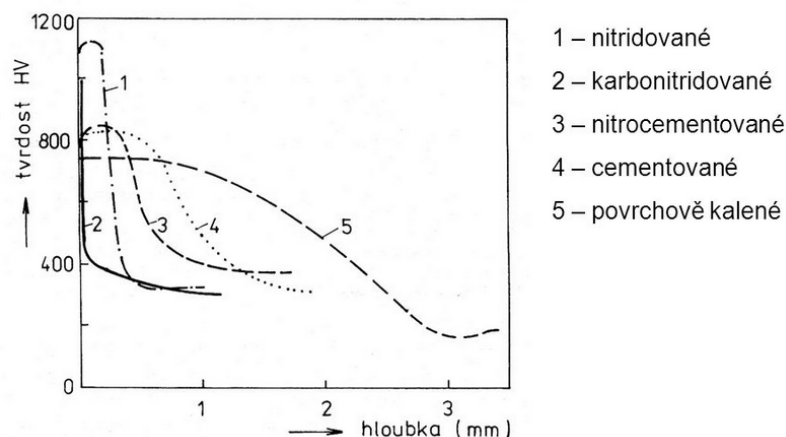
Při nitridování se sytí povrchová vrstva dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí při teplotě pod A_{c1} (obvykle v rozsahu 470 až 580 °C). Tloušťky vrstvy bývají v rozmezí 0,2 až 0,6 mm a dosahuje se jich v rádech desítek hodin (30 až 70). Dosahuje se tak vysoké tvrdosti (až 1200HV), která je důsledkem vzniku velmi tvrdých nitridů. Bez nutnosti dodatečného kalení je tak dosaženo požadované změny vlastností – zvýší se odolnost proti opotřebení, mez únavy i korozní odolnost. Součásti se před nitridováním většinou zušlechťují. Protože proces nitridování probíhá za poměrně nízkých teplot je značně pomalý a také nákladný. Přináší však výborné výsledky. Nitridují se různé konstrukční oceli, zejména vhodné k zušlechťování a oceli legované Al, Cr, Ti, W, V. [10], [12], [13]



Obrázek 18. Průběh času a teplot při nitridování

2.5.4 Karbonitridování

Karbonitridace je sycení povrchu uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než teplota A_{c1} (obvykle za teplot 560 až 620 °C). Cílem je vytvoření vrstvy karbonitridů o tloušťce cca 0,05 mm. Po karbonitridaci se součást nekalí. Předností tohoto způsobu zpracování je poměrně krátká doba depozice. Deformace výrobku jsou velmi malé. [10]



Obrázek 19. Porovnání tvrdosti a hloubky povrchové vrstvy [12]

2.5.5 Boridování

Boridování je sycení povrchu borem, čímž se zvyšuje trvanlivost nástrojů a jejich odolnost proti otěru a zadírání. Provádí se při teplotě vyšší než A_{c3} . Vznikají při tom velmi tvrdé boridy. Boridování může být prováděno v prášku nebo pomocí pasty. [13]

2.5.6 Iontová nitridace

Je to nová a moderní modifikace základního principu nitridace. Vytvářejí se difuzní povrchové vrstvy, které mají výhodné kluzné vlastnosti. Součást je umístěna např. ve vakuové nádobě se zředěnou atmosférou obsahující směs dusíku a vodíku a je zapojená jako

katoda. Stěna nádoby je anoda. Mezi katodou a anodou vzniká doutnavý výboj, ve kterém jsou ionty urychlovány směrem k nitridované součásti.

2.5.7 Sulfonitridace

Je to sycení povrchu sírou, uhlíkem a dusíkem. Tyto vrstvy se vyznačují výbornými kluznými vlastnostmi i při špatném mazání. [9], [13]

2.6 Tepelně-mechanické zpracování (TMZ)

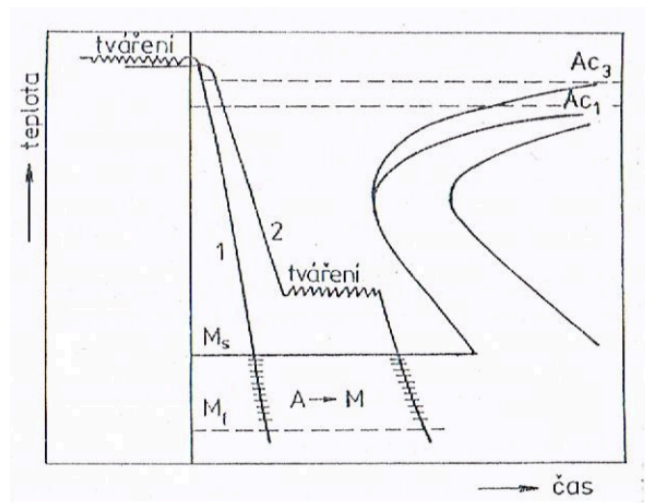
Při tepelně mechanickém zpracování se využívá kombinace tváření a tepelného zpracování. Dosahuje se vysoké pevnosti. V praxi se nejvíce využívá postupů, kdy plastická deformace probíhá v oblasti stabilního nebo metastabilního austenitu a po deformaci následuje martenzitická přeměna viz. obr. 16. Tvářením se zjemní zrno, takže vznikající martenzit bude velmi jemný. Vlivem tváření dochází ke zvýšení pevnostních hodnot v martenzitu. Režimy TMZ je možno podle teplot tváření rozdělit na nízkoteplotní TMZ a vysokoteplotní TMZ.

2.6.1 Vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování (VTMZ)

Tváří se v oblasti stabilního austenitu nad teplotou A_{c3} při 40 až 90% stupni deformace. Aby nedošlo k rekrytalizaci plasticky deformovaného austenitu, musí okamžitě následovat kalení. Dosažené mechanické vlastnosti závisí na složení oceli, teplotě a stupni deformace a na době mezi ukončením deformace a kalením. [12]

2.6.2 Nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování (NTMZ)

Spočívá v austenitizaci za teploty nad A_{c3} , ochlazení do oblasti metastabilního austenitu nad M_s (obvykle 500 až 600 °C), tváření v inkubační době a následujícím zakalením. Stupeň deformace je přitom kolem 50 %. V tomto případě probíhá tváření austenitu pod rekrytalizační teplotou (austenitická zrna zůstávají deformována) a přetvářený odpor je proto oproti deformaci při VTMZ vyšší.



Obrázek 20. Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování 1 - VTMZ, 2 – NTMZ [11]

Pro NTMZ jsou vhodné komplexně legované oceli s dobrou prokalitelností, kde je inkubační doba v oblasti metastabilního austenitu dostatečně dlouhá. Výsledná struktura je tvořena velmi jemným popuštěným martenzitem. Použitím VTMZ se nedosahuje tak vysokých pevnostních hodnot, ale technologie je jednodušší.

V praxi nachází tepelně mechanické zpracování využití zejména při výrobě vysokopevných plechů, výkovků nebo vylisků. [12]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti charakterizují chování materiálů při mechanickém namáhání, tj. při působení vnějších sil. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité jako vstupní data pro pevnostní výpočty konstrukcí a strojních dílů nebo při posuzování vhodnosti materiálů pro technologické účely, dále také jako ukazatel kvality při přejímce materiálů a polotovarů mezi odběratelem a výrobcem. Mezi základní mechanické vlastnosti patří:

- pružnost (elasticita),
- tvárnost (plasticita),
- pevnost,
- houževnatost.

Základní informace o materiálových vlastnostech poskytují zkoušky mechanických vlastností, při nichž se zjišťuje odezva materiálu na zvolený způsob namáhání. Výsledky zkoušek se vyjadřují číselně, a hodnotí tak danou vlastnost kvantitativně. Podle časového průběhu zatěžování se mechanické zkoušky dělí na statické a dynamické. Mezi nejběžnější zkoušky mechanických vlastností je možné zařadit:

- statické zkoušky,
- zkoušky tvrdosti,
- zkoušky rázem a ohybem,
- únavové zkoušky. [12]

Dále se bakalářská práce věnuje jen zkouškám tvrdosti a mikrotvrdosti.

3.1 Tvrdost

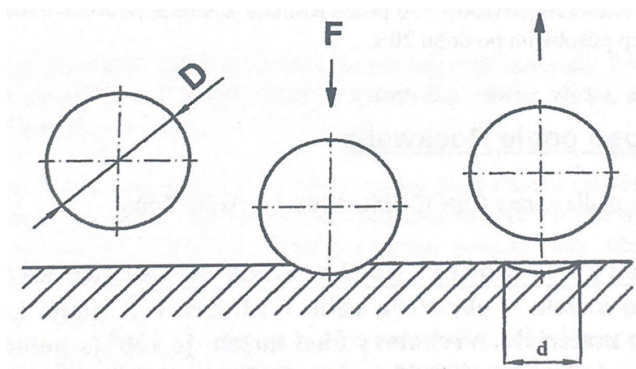
Tvrdost je obecně definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa do jeho povrchu. Každá naměřená tvrdost je funkcí celé řady činitelů, jakou jsou pružné a tvárné vlastnosti tělesa, jeho rozměry, velikost zatížení, tvar indentoru, rychlost a doba vnikání indetoru atd. Podstatou metod měření tvrdosti se tedy zakládá na vtláčování malého tělíska (indentoru) do povrchu zkoušeného materiálu určitou silou za definovaných podmínek. Měřítkem tvrdosti je velikost stopy, která vznikla vtláčováním tělesa určitého tvaru (kulička,

kužel, jehlan). Výhodou je možnost zkoušení hotových výrobků bez jejich destrukce nebo znehodnocení.

Zkoušky tvrdosti se dělí na vrypové, vnikající a odrazové, podle charakteru zatížení na statické a dynamické. [12], [13]

3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Podstatou zkoušky je vtláčování vyleštěné kalené ocelové nebo tvrdokovové kuličky daného průměru určitou silou po stanovenou dobu do zkoušeného materiálu. Výsledkem je vtisk kulového tvaru, který se v průmětu zobrazí jako kruh o průměru d . Měření probíhá na Brinellově tvrdoměru.



Obrázek 21. Zkouška tvrdosti podle Brinella [14]

Tvrdot podle Brinella se označuje písmeny HB, když se použije kulička z tvrdokovu tak HBW, HBS při použití ocelové kuličky. Průměry kuliček bývají 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm, doba zatížení bývá podle druhu materiálu 10 až 180 s, u ocelí 10 až 15 s.

Tvrdot se vyjadřuje poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku a stanoví se ze vztahu:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{S} \quad (1)$$

Nebo:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Probíhá-li zkouška za normálních podmínek, to je kulička průměru $D = 10$ mm, zatížení $F = 29\,430$ N (3000 kp) a doba 10 až 15 s, zapisuje se její výsledek pouze číslem tvrdosti (např. 280 HBS), je-li indentorem ocelová kulička. Přesnost zkoušky závisí na správném proměření

vtisku. Je to mnohdy obtížné z důvodu nesouměrného a nezřetelného vtisku anebo deformace kuličky. Dále nevýhodou je zdlouhavé měření a vysoké zatížení.

Pro měření tvrdosti tuhých polymerních systémů byly zvětšeny průměry měřících kuliček a nížena síla při jejich vtlačování. [14], [15], [17]

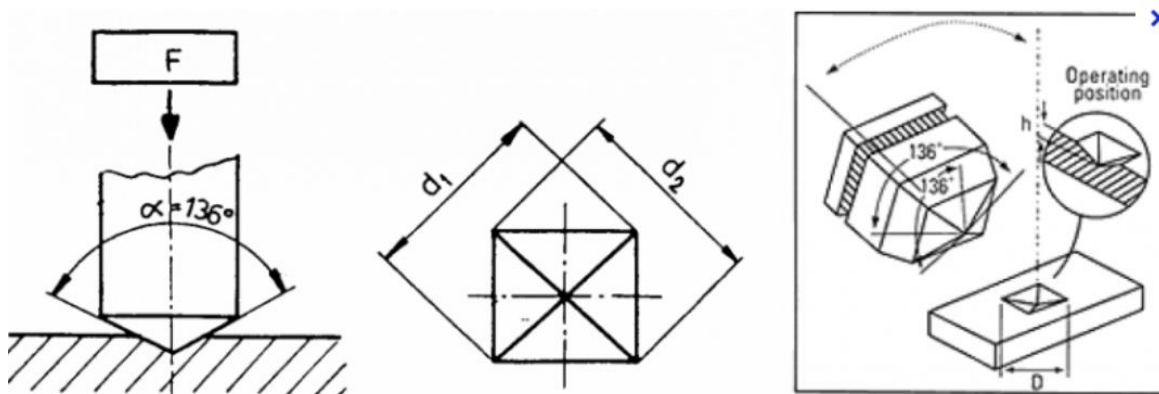
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstatou zkoušky je vtlačování diamantového indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° do povrchu zkoušeného materiálu stanovenou silou, která se podle materiálu a tloušťky měřeného vzorku může lišit ve velkém rozmezí.

Tvrdość podle Vickerse se označuje HV a je definována jako tlakové napětí na plochu vtisku vypočtenou jako podíl použitého zatížení a plochy vtisku. Po zkoušce se odečte velikost uhlopříček d_1 a d_2 vtisku, který zůstane na povrchu zkoušeného materiálu po odlehčení. Používané zatížení je od 10 N do 1000 N. Tuto metodu lze použít pro všechny tvrdosti. Je velmi přesná a není téměř závislá na zatížení.

V praxi se tvrdost vypočítá podle zjednodušeného vztahu, je-li zatěžující síla F udána v N a aritmetický průměr délek uhlopříček d v mm.

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$



Obrázek 22. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

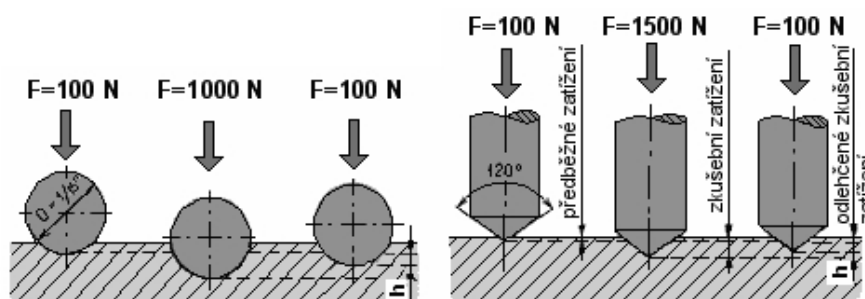
Ve velkých závodech používáme zdokonalených Vickersových tvrdoměru, tzv. diatestorů. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky uhlopříčky.

Výhody: přesné, malá zatížení, malé vtisky, lze měřit i tenké vrstvy, lze použít různých zatížení, aniž se změní hodnoty tvrdosti, nejuniverzálnější metoda,

Nevýhody: zdlouhavé, náročné na zrak z důvodu přesnosti odečítání hodnot [14], [15], [17]

3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Podstatou zkoušky je vtlačování diamantového kuželu nebo tvrdokovové, popř. kalené ocelové kuličky do zkoušeného materiálu. Vrcholový úhel kuželu je 120° (s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm).



Obrázek 23. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – vlevo HRB a vpravo HRC

Postup zkoušky je schematicky znázorněn na obr. 19. Vnikající těleso se nejprve zatíží předběžným zatížením (F_0). Stupnice tvrdoměru se nastaví v zatíženém stavu do počáteční polohy. Poté se pozvolna zatěžuje přídavným zatížením F_1 (celkové zatížení $F = F_0 + F_1$) tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou. Po odlehčení na zatížení F_0 se na hloubkoměru odečte přímo tvrdost na příslušné stupnici. Mírou tvrdosti u této zkoušky je tedy hloubka vtisku indentoru do zkoušeného materiálu po odstranění přídavného zatížení.

Tvrdost se označuje písmeny HR a dalšími písmeny, které označuje použitou stupnici. Ta je označována písmeny A až K následovně:

Tabulka 7. Stupnice tvrdosti podle Rockwella [15]

Stupnice tvrdosti podle Rockwella	Značka tvrdosti ^{a)}	Typ vnikacího tělesa mm	Předběžné zatížení F_0 [N]	Přídavné zatížení F_1 [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití (zkouška tvrdosti podle Rockwella)
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 HRA až 88 HRA
B	HRB	Kulička 1,587 5 mm	98,07	882,6	980,7	20 HRB až 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 HRC až 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel	98,07	882,6	980,7	40 HRD až 77 HRD
E	HRE	Kulička 3,175 mm	98,07	882,6	980,7	70 HRE až 100 HRE
F	HRF	Kulička 1,587 5 mm	98,07	490,3	588,4	60 HRF až 100 HRF
G	HRG	Kulička 1,587 5 mm	98,07	1373	1471	30 HRG až 94 HRG
H	HRH	Kulička 3,175 mm	98,07	490,3	588,4	80 HRH až 100 HRH
K	HRK	Kulička 3,175 mm	98,07	1373	1471	40 HRK až 100 HRK

Výhody: rychlá obsluha, vhodnost pro automatizované zkoušky

Nevýhody: nejednotná stupnice pro tvrdé a měkké materiály [14], [15], [17]

3.2 Mikrotvrdot

Mikrotvrdot je mikrostrukturální vlastnost materiálu, vyjadřující obecně tvrdost pevné fáze. Při použití této metody musí být indentor dostatečně malý a nesmí obsahovat viditelné póry. Běžně se využívá zatížení od 0,147 N do 1,960 N. Rozlišujeme dvě metody měření mikrotvrdoti a to:

- Měření podle Vickerse
- Měření podle Knoop

Tato měřicí metoda se používá ke kontrole chemického složení, tepelného a povrchového zpracování. Dále je vhodná pro měření malých nebo tenkých součástí, strukturálních složek a fází, tenkých povlaků, svárů, křehkých materiálů.

Měření je ovlivněno vnějšími vlivy jako jsou např.: vibrace přístroje, vnější vibrace, lidský faktor, přesnosti odečítání, kvalité povrchu, teploty rovnoměrnosti struktury vzorky atd. Výsledky měření jsou také závislé na velikosti zatížení indentoru a z toho důvodu jej nelze srovnávat s metodami měření makrotvrdoti.

Mikrotvrdot se měří na mikrotvrdoměrech. Ten se skládá z několika částí:

- zatěžovací zařízení s indentorem,
- mikroskopu se 2 objektivy (100 až 400krát zvětšení),

- digitální kamery,
- stůl s posuvem v ose X a Y,
- záznamové zařízení (PC). [16]



Obrázek 24. Mikrotvrdoměr [16]

Tento Mikrotvrdoměr je vybaven posuvným stolem s mikroskopickým posuvem a mikroskopem jehož součástí je digitální kamera. Ta je propojena přímo s počítačem, kde velikost vtisku je zobrazena na monitoru počítače a jeho velikost je změřena pomocí myši. Vyhodnocení měření je provedeno přímo na příslušném počítači, který je schopen přesně řídit i stůl se vzorkem. Díky tomu je celé měření plně automatizováno.

Povrchu vzorku musí být rovný a nesmí obsahovat žádné mastnoty. Výsledek je bezrozměrný, vez uvedených fyzikálních jednotek.

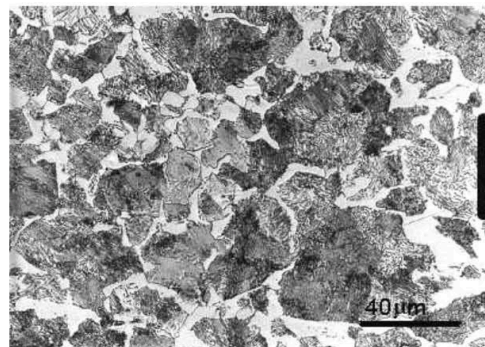
3.2.1 Mikrotvrdost strukturních složek a fází

Pomocí mikrotvrdosti můžeme identifikovat a rozlišit jednotlivé strukturní části jako např. horní a dolní bainit, nízko a vysokouhlíkový martenzit atd. viz. Tabulka

Tabulka 8. Tvrdost strukturních složek a fází

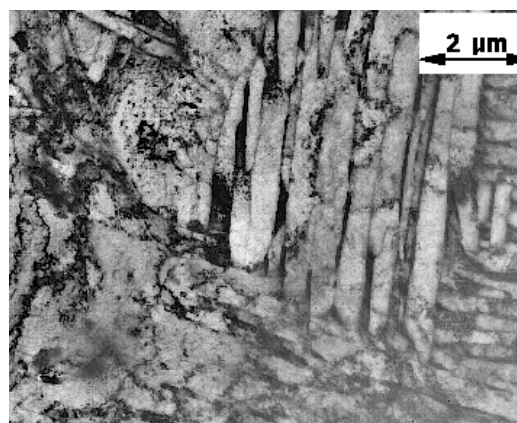
Fáze a strukturní složky	Tvrdost dle Vickerse
Fe	85
Ferit	85 - 130
Austenit	120 - 180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200 - 250
Perlit jemný	250 - 300
Bainit horní	300 - 400
Bainit dolní	400 - 550
Martenzit nízkouhlíkový	600 - 700
Martenzit vysokouhlíkový	700 - 850

Struktura oceli je závislá na tepelném zpracování a určuje tvrdost materiálu, z čehož vyplývá i její další použití. Materiál dodávaný z oceláren má strukturu perlitickou a tvrdost se pohybuje okolo 200 HV. [16]



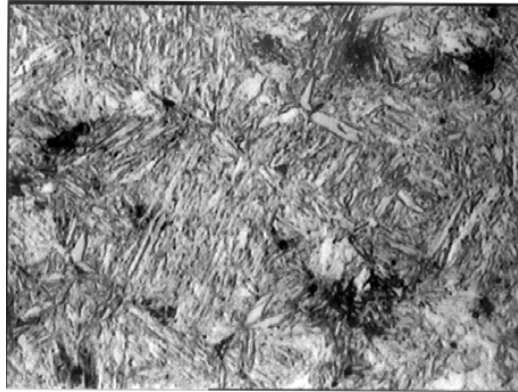
Obrázek 25. Perlitická struktura oceli

Při tepelném zpracování vznikají postupně různé struktury ocelí, které jsou závislé na teplotě a také mají rozdílnou tvrdost. Při teplotě cca 250 až 550 °C vzniká bainitická struktura jejichž tvrdost se pohybuje okolo 400 HV.



Obrázek 26. Bainitická struktura oceli

Při teplotě cca 550 až 600 °C vzniká martenzitická struktura. Její tvrdost se pohybuje okolo 800 HV. [16]



Obrázek 27. Martenzitická struktura oceli

3.2.2 Stanovení a ověření hloubky cementace

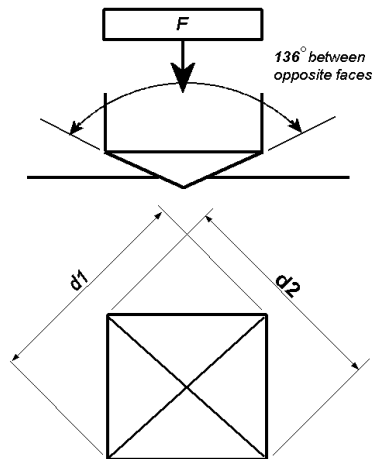
Slouží pro velmi přesné stanovení křivky průběhu tvrdosti v závislosti vzdálenosti od povrchu. Pro přípravu vzorku se použije příčný řez, jehož povrch je upraven broušením. Hloubka cementace (nauhličená a kalená vrstva) je kolmá vzdálenost mezi povrchem a vrstvou, ve které je tvrdost 550 HV1 nebo ekvivalentní tvrdost podle Knoopu. Hloubka cementace se označuje písmeny CHD a vyjadřuje se v mm.

Příklad:

CHD = 0,8 mm

3.2.3 Měření mikrotvrdosti podle Vickerse

Měření mikrotvrdosti a tvrdosti podle Vickerse je principově stejné. Indentor je stejný, rozdíl je ve velikosti zatížení. Tato metoda měření mikrotvrdosti je méně přesná, méně náročná na přípravu povrchu a hodí se na měření tvrdosti menších pravidelných ploch. Doba zatěžování od minima po maximum musí být od 2 s do 8 s, přičemž rychlost zatěžování nesmí překročit $0,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. [15]



Obrázek 28. Indentor podle Vickerse [17]

Tabulka 9. Zatěžující síla při mikrotvrdoosti podle Vickerse [16]

Symbol tvrdosti	Velikost zkušebního zatížení F [N]
HV 0,01	0,09807
HV 0,015	0,1471
HV 0,02	0,1961
HV 0,025	0,2942
HV 0,05	0,4903
HV 0,1	0,9807

Příklad označování tvrdosti:

62 HV 0,01 = Tvrdost dle Vickerse 62 stanovená při zkušebním zatížení 0,09807 N působícím po dobu od 10 do 15 s.

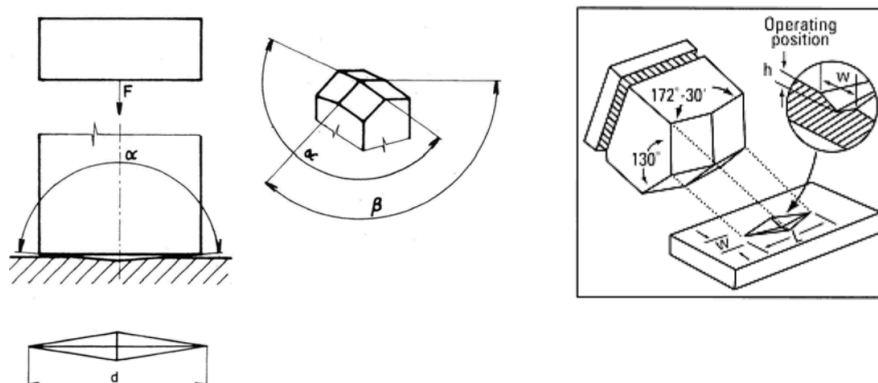
Pokud se působení zkušebního zatížení liší od předepsané doby, tak zápis vypadá následovně: 62 HV 0,01/20 = Tvrdost dle Vickerse 62 stanovená při zkušebním zatížení 0,09807 N působícím po dobu 20 s. [16]

Tabulka 10. Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse [16]

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

3.2.4 Měření mikrotvrdosti podle Knoop

Tato metoda se používá pro měření tvrdosti malých, podlouhlých, tenkých vzorků z velmi tvrdých a křehkých materiálů a také drátů. Tato metoda vychází z metody měření podle Vickerse. Indentorem je diamantový jehlan s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly. Ve srovnání s Vickersovou metodou, metoda podle Knoop vytváří relativně mělký vtisk při ekvivalentním zatížení. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodnější pro měření tenkých a povrchových vrstev.



Obrázek 29. Podstata zkoušky tvrdosti podle Knoop [16]

Při měření podle Knoop vznikají největší deformace a největší odpružení u kratší úhlopříčky. Z tohoto důvodu se měří pouze úhlopříčka delší. U měření drátu musí být delší úhlopříčka rovnoběžná s osou drátu. Tvrdost podle Knoop lze vypočítat ze vztahu:

$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

Přičemž HK je tvrdost podle Knoop, F je zatěžující síla v N a d délka delší úhlopříčky v mm. [16]

Tabulka 11. Zatěžující síla při tvrdosti podle Knoop [16]

	Symbol tvrdosti	Velikost zkušebního zatížení F [N]
Mikrotvrdost	HK 0.01	0,09807
	HK 0,02	0,1961
	HK 0,025	0,2452
	HK 0,05	0,4903
	HK 0,1	0,9807
Makrotvrdost	HK 0,2	1,961
	HK 0,3	2,942
	HK 0,5	4,903
	HK 1	9,807

Příklad označování tvrdosti:

640 HK 0,1 = Tvrdost dle Knoop 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působící od 10 s do 15 s.

Pokud se působení zkušebního zatížení liší od předepsané doby, tak zápis vypadá následovně:

640 HV 0,1/20 = Tvrdost dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu 20 s.

Povrch zkoušeného materiálu musí být připraven jako při měření Vickersovou metodou. Vzorek je umístěn na tuhé podložce, aby bylo zamezeno jeho možnému posunutí. Indentor musí být vtačován kolmo k povrchu měřeného materiálu. Doba mezi minimálním a maximálním zatížení nesmí přesáhnout 10 s. [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce byl výzkum vlivu teploty a doby austenitizace na výsledné mechanické vlastnosti (tvrdosti) při tepelném zpracování. Tvrdost zadaných materiálů byla zjišťována pomocí metody podle Rockwella.

Samostatné měření tvrdosti bude probíhat u každé oceli při 3 různých teplotách austenitizace a 2 dobách austenitizace. Oceli budou chlazeny ve vodě a oleji. Tvrdost bude změřena před tepelným zpracováním a po kalení a popouštění.

Po naměření konkrétních hodnot tvrdosti budou naměřené hodnoty statisticky a přehledně zpracované do tabulek a vyneseny do příslušných grafů. Výsledky měření budou slovně vyhodnoceny a porovnány mezi sebou v diskuzi výsledků.

Hlavní zásady při vypracování:

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

5 POUŽITÉ OCELI

5.1 Ocel 12060 (EN 1.0535)

Jedná se o uhlíkovou ocel k zušlechťování. Mezi tvářenými uhlíkovými ocelmi má mírně nízkou tepelnou vodivost. Kromě toho má poměrně nízkou tažnost a středně vysokou pevnost v tahu. Použití např. ozubená kola, spojky, pružiny, hřídele turbokompresorů, různé spojovací součásti apod. [18]

Tabulka 12. Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,52-0,60	0,50-0,80	0,15-0,40	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ			
normalizační žhání	810-840 °C	ochlazovat na vzduchu	
žhání na měkko	680-720 °C	ochlazovat v peci	
kalení	800-830 °C	ochlazovat ve vodě (obvykle praská)	
	810-840 °C	ochlazovat v oleji	
popouštění	540-680 °C	ochlazovat na vzduchu	
teploty přeměn	$A_{C1} \sim 715-725$ °C	$A_{C3} \sim 750-760$ °C	$M_S \sim 290$ °C
povrchová tvrdost po povrchovém kalení	$\varnothing \leq 40$ mm	60 ± 3 HRC	
	$\varnothing 41-100$ mm	57 ± 3 HRC	
optimální průměr pro zušlechťení	26 mm (voda)	13 mm (olej)	

Obrázek 30. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21]

5.2 Ocel 14209 (1.3520)

Jedná se o ocel Cr-Mn na valivá ložiska. Je vhodná pro práci při zvýšených teplotách a korozivním prostředí. Vyznačuje se vysokou odolností proti oděru. [18]

Tabulka 13. Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90-1,10	0,90-1,20	0,35-0,65	1,30-1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ		
kalení	810-830 °C	ochlazovat v oleji
	780-810 °C	ochlazovat ve vodě
popouštění	150-170 °C	ohřev v oleji
žihání na měkko	720-780 °C	ochlazovat v peci

Obrázek 31. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21]

5.3 Ocel 19132 (EN 1.1520)

Jedná se o uhlíkovou houževnatou nástrojovou ocel druhé jakostní skupiny. Používá se na ruční nástroje, nástroje pro stříhání za studena a nástroje pro tváření za studena. [18]

Tabulka 14. Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,65-0,75	0,25-0,45	0,15-0,35	max 0,030	max 0,035	max 0,20	max 0,25

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ		
normalizační žihání	810-830 °C	ochlazovat na klidném vzduchu
žihání na měkko	680-710 °C	ochlazovat ve vypnutí peci, tvrdost max 195 HB
žihání ke snížení pnutí	600-650 °C	ochlazovat ve vypnutí peci
kalení	800-830 °C	ochlazovat v oleji, tenké průřezy pod 4 mm, tvrdost ~ 58 HRC
	770-810 °C	ochlazovat ve vodě tlustší kusy pomocí vřídla, tvrdost min 62 HRC
popouštění	100-250 °C	
prokalitelnost	při kalení ve vodě v celém průřezu do 10 až 12 mm	
	při kalení v oleji v celém průřezu do 2,5 až 3 mm	
teploty přeměn	A _{C1} ~ 730 °C	A _{C3} ~ 750 °C

Obrázek 32. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21]

6 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Z důvodu tepelného zpracování na vybraných ocelí byla zvolena zkouška tvrdosti podle Rockwella. Měření bylo provedeno na tvrdoměru Rockwell modelu HR-150A. U této zkoušky nebyla nutná úprava povrchu.



Obrázek 33. Tvrdoměr Rockwell model HR-150A [18]

6.1 Postup měření

Jako indentor byl použit diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° . Poté se pod něj vložil zkušební vzorek. Vzorek se nejprve zatížil předběžným zatížením (F_0), které se manuálně nastavilo otáčejícím vřetenem. Stupnice tvrdoměru se nastavila v zatíženém stavu do počáteční polohy. Poté se pozvolna zatíží přídavným zatížením F_1 (celkové zatížení $F = F_0 + F_1$) tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou. Po odlehčení na zatížení F_0 se přímo odečetla tvrdost HRC na příslušné stupnici. Mírou tvrdosti u této zkoušky je tedy hloubka vtisku indentoru do zkoušeného materiálu po odstranění přídavného zatížení.

Tabulka 15. Použité zatížení podle Rockwella

Značka tvrdosti	Typ vnikajícího tělesa	Předběžné zatížení F_0 [N]	Přídavné zatížení F_1 [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
-----------------	------------------------	------------------------------	-----------------------------	------------------------	----------------

HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 HRC až 70 HRC
-----	------------------	-------	------	------	------------------

Nejprve se změřila tvrdost před tepelným zpracováním u každé ze tří ocelí. Poté se vzorky zakalily podle třech různých teplot daných technologickými údaji o oceli a dvou dobách austenitizace. Posléze se vzorky popustily opět podle technologických údajů dané oceli. Tvrdost vzorků se měřila po kalení a po popouštění při třech různých teplotních režimech. Například vzorek oceli 12060 byl ohřát na teplotu 800 °C, doba kalícího režimu byla půl hodiny a následně se vzorek ochladil ve vodě nebo v oleji. Změřila se jeho tvrdost a následovalo popouštění, kdy se vzorek ohřál na teplotu 550 °C s dobou výdrže 2 hodiny a zchladil se na vzduchu. Poté se opět změřila tvrdost.

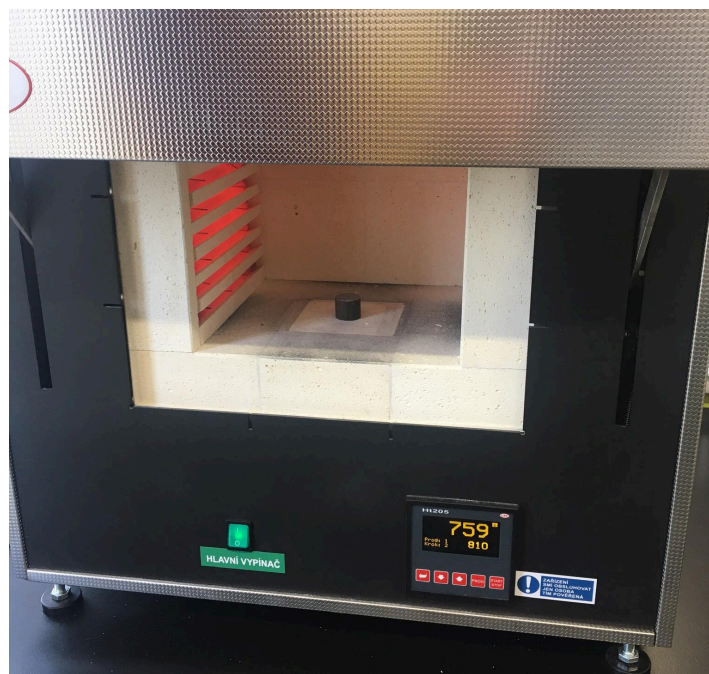
6.2 Postup tepelného zpracování

Všechny tři oceli byly kaleny a popouštěny v laboratoři Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, Zlín. Kalení bylo provedeno v kalící peci, která je v horní pozici pracoviště a popouštění peci, která se nachází v dolní pozici pracoviště viz. Obr. 34. Jako chladicí médium se použila voda, olej a vzduch.

Nejprve se vzorky vložily do kalící pece a byly ohřáty na danou kalící teplotu, výdrž na dané kalící teplotě a následné ochlazení ve vodě nebo oleji. Poté byla změřena tvrdost. Následně byly vzorky vloženy do popouštěcí pece, kde proběhl ohřev na popouštěcí teplotu, výdrž na dané teplotě a následné ochlazení na vzduchu. Posléze se opět změřila tvrdost.



Obrázek 34. Kaličí pracoviště SKM [20]



Obrázek 35. Vložený vzorek v kaličí peci



Obrázek 36. Ohřátý vzorek na kalici teplotu před vyjmutím z pece a následným ochlazením ve vodě nebo v oleji



Obrázek 37. Zakalené vzorky již po změření tvrdosti

7 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Měření tvrdosti bylo provedeno na každém vzorku vždy 10krát metodou podle Rockwella. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny. Pro experimentální vyhodnocení jsem použil vzorce:

- Vzorec pro výpočet průměrné naměřené hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

- Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky:

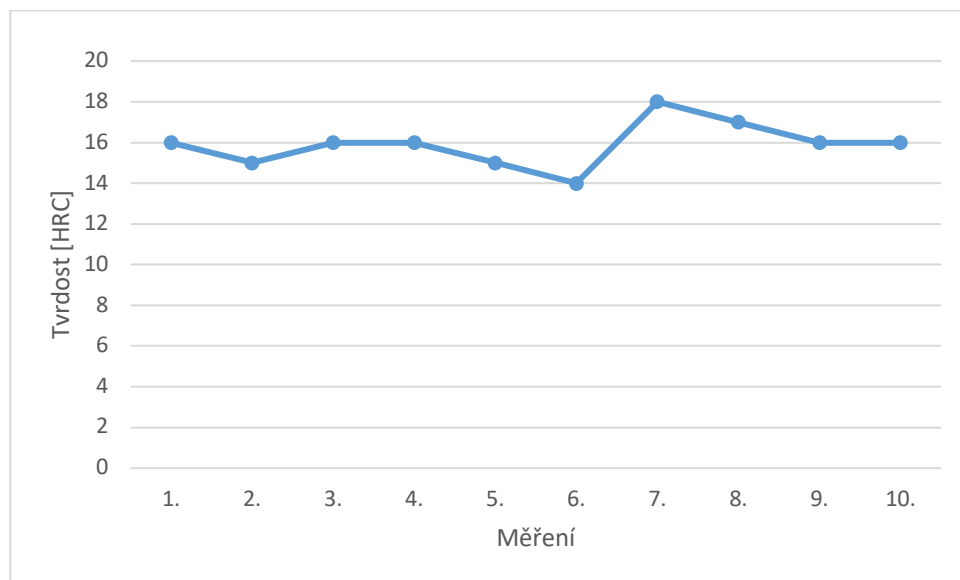
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

7.1 Vyhodnocení pro ocel 12060

7.1.1 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 bez tepelného zpracování

Tabulka 16. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 bez tepelného zpracování

Měření	Naměřená tvrdost [HRC]
1.	16
2.	15
3.	16
4.	16
5.	15
6.	14
7.	18
8.	17
9.	16
10.	16
\bar{x}	15,9
$\bar{\sigma}$	1,044



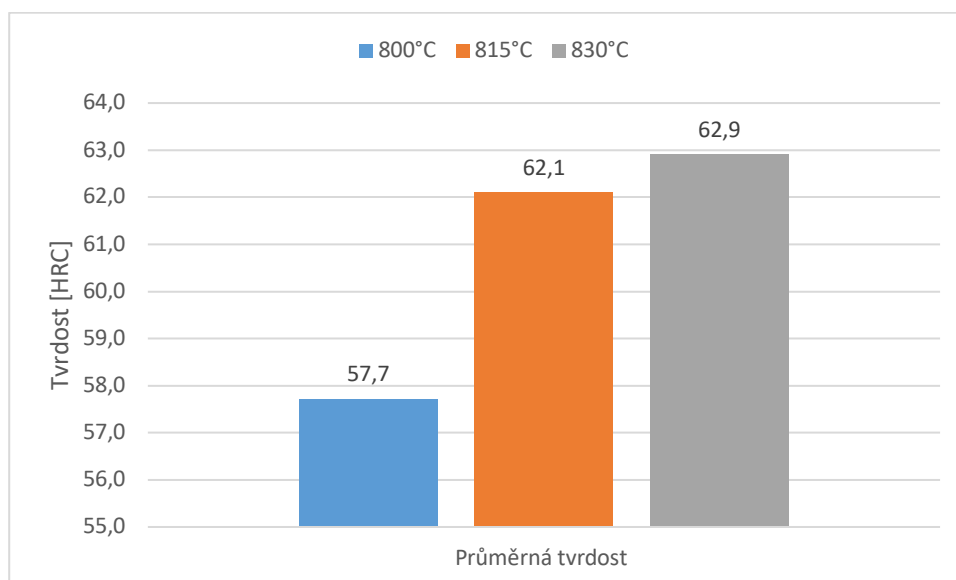
Obrázek 38. Tvrdost ocele 12060 bez tepelného zpracování

Naměřená tvrdost oceli 12060 bez tepelného zpracování je poměrně nízká. Průměrná naměřená tvrdost pro nezpracovaný vzorek je 15,9 HRC.

7.1.2 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 po tepelném zpracování

Tabulka 17. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060

Doba výdrže na kalící teplotě	Doba výdrže 30 minut		
Chladicí médium	Voda		
Kalící teplota	Naměřená tvrdost [HRC]		
Měření	800 °C	815 °C	830 °C
1.	58	62	63
2.	57	61	63
3.	56	63	63
4.	59	62	61
5.	58	64	62
6.	58	62	65
7.	56	60	65
8.	60	62	61
9.	58	63	63
10.	57	62	63
\bar{x}	57,7	62,1	62,9
$\bar{\sigma}$	1,187	1,044	1,300

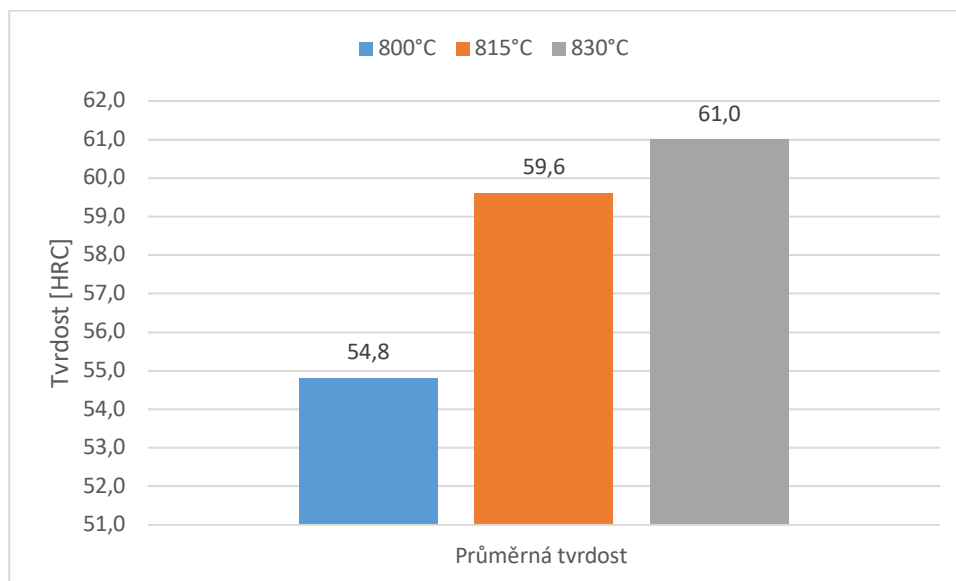


Obrázek 39. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 830 °C a to 62,9 HRC a nejmenší při 800 °C 56 HRC viz. Obr 39. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 18. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Klidný vzduch		
Popouštěcí teplota	550 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	55	60	61
2.	54	59	61
3.	53	60	61
4.	56	60	59
5.	55	61	60
6.	55	60	63
7.	53	58	63
8.	57	60	59
9.	55	60	61
10.	54	60	61
\bar{x}	54,8	59,6	61,0
$\bar{\sigma}$	1,128	1,002	1,261

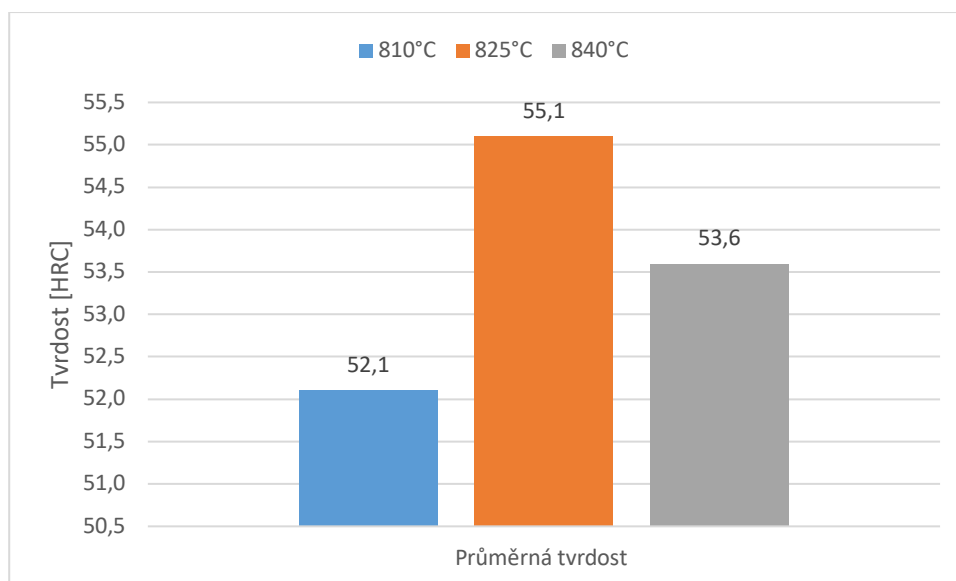


Obrázek 40. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 550 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně ochladily na klidném vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 830 °C s následným popouštěním 61 HRC. A nejmenší při 800 °C s následným popouštěním 54,8 HRC.

Tabulka 19. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060

Doba austenitizace	30 minut		
Chladicí médium	Olej		
Kalící teplota	810 °C	825 °C	840 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	52	55	54
2.	53	56	54
3.	52	56	54
4.	52	56	52
5.	52	55	55
6.	51	53	53
7.	50	55	51
8.	53	54	55
9.	52	56	54
10.	54	55	54
\bar{x}	52,1	55,1	53,6
$\bar{\sigma}$	1,044	0,943	1,200

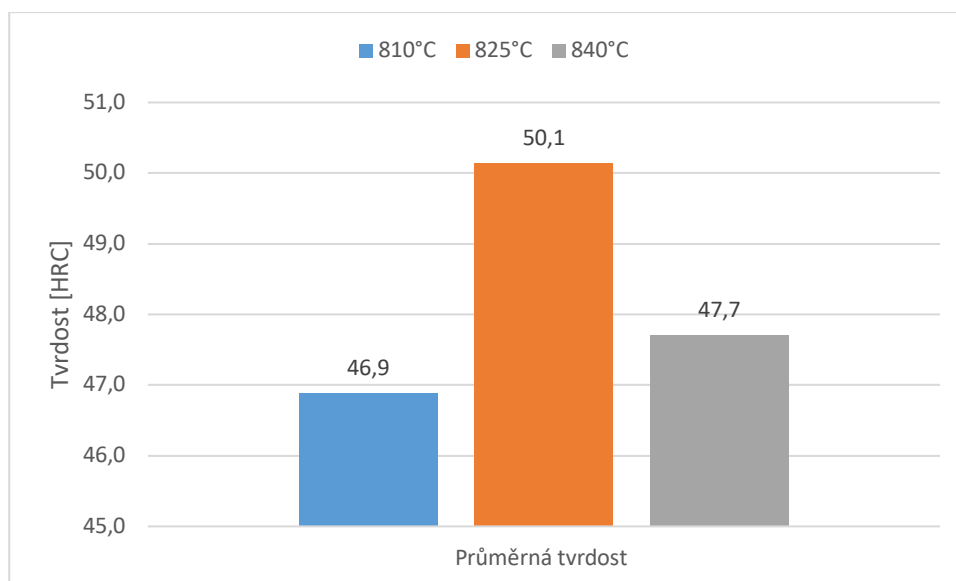


Obrázek 41. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 825 °C a to 55,1 HRC. Nejmenší při kalící teplotě 810 °C 52,1 HRC. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 20. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladící médium	Klidný vzduch		
Popouštěcí teplota	550 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	47	50	48
2.	48	51	48
3.	47	51	48
4.	47	51	46
5.	47	50	49
6.	46	48	47
7.	45	50	45
8.	48	49	49
9.	47	51	48
10.	49	50	48
\bar{x}	46,9	50,1	47,7
$\bar{\sigma}$	0,940	0,858	1,068



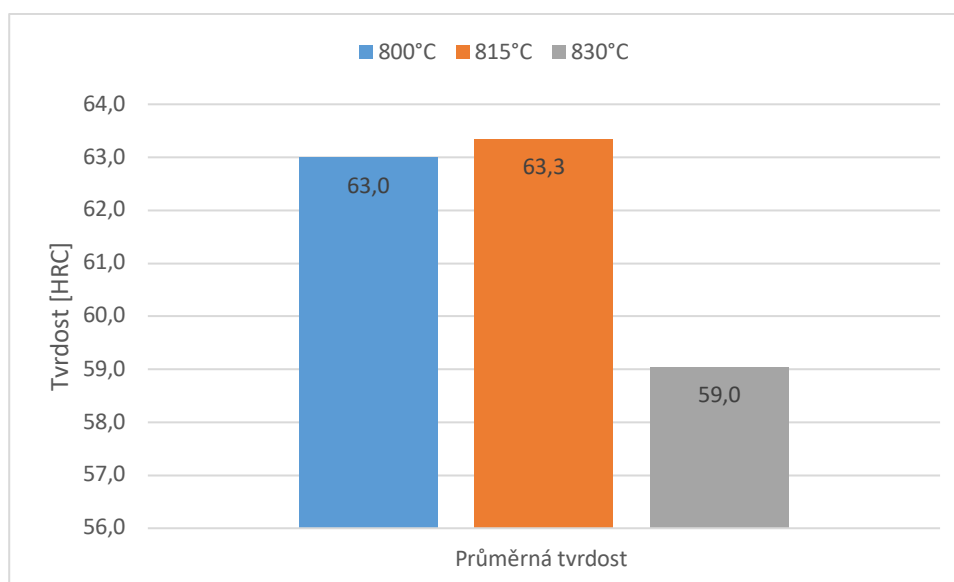
Obrázek 42. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 550 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorčky se následně ochladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 825 °C s následným popouštěním 50,1 HRC. A nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 46,9 HRC.

Změna austenitizační doby při kalení na 1 hodinu.

Tabulka 21. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladicí médium	Voda		
Kalící teplota	800 °C	815 °C	830 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	62	63	59
2.	62	62	58
3.	63	64	57
4.	62	63	60
5.	63	65	59
6.	64	63	59
7.	64	61	59
8.	62	63	61
9.	63	64	59
10.	64	63	58
\bar{x}	63,0	63,3	59,0
$\bar{\sigma}$	0,828	1,065	1,064

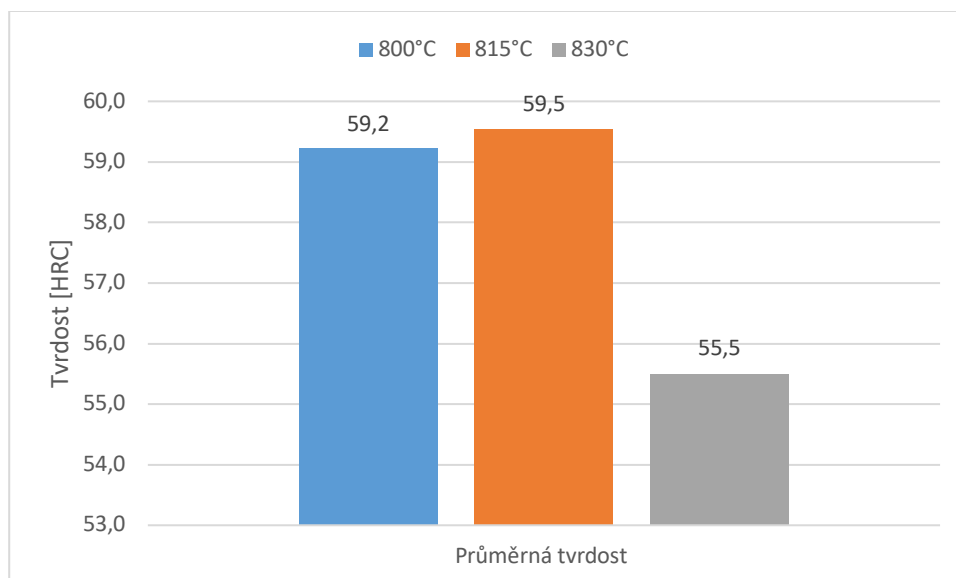


Obrázek 43. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 815 °C a to 63,3 HRC a nejmenší při 830 °C 59 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 22. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladící médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	550 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	58	59	56
2.	58	58	55
3.	59	60	54
4.	58	59	57
5.	59	61	56
6.	60	59	56
7.	60	58	55
8.	58	59	58
9.	59	60	56
10.	60	59	55
\bar{x}	59,2	59,5	55,5
$\bar{\sigma}$	0,779	1,001	1,001

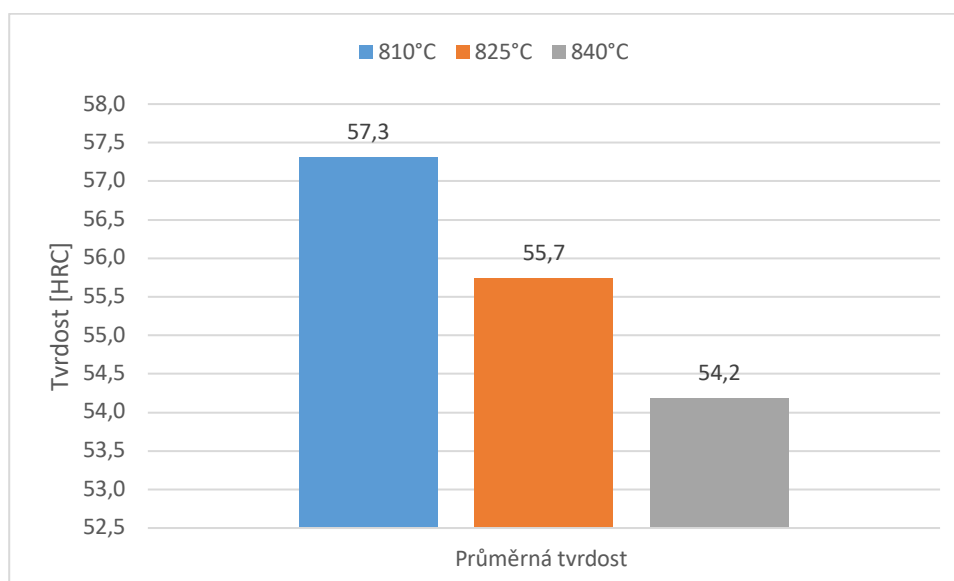


Obrázek 44. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 550 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorčky se následně ochladily ve vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 815 °C s následným popouštěním 59,5 HRC. A nejmenší při 830 °C s následným popouštěním 55,5 HRC.

Tabulka 23. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladicí médium	Olej		
Kalící teplota	810 °C	825 °C	840 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	57	56	54
2.	58	56	55
3.	58	56	54
4.	58	54	54
5.	57	57	54
6.	55	55	53
7.	57	53	52
8.	56	57	55
9.	58	56	54
10.	57	56	56
\bar{x}	57,3	55,7	54,2
$\bar{\sigma}$	0,981	1,248	1,086

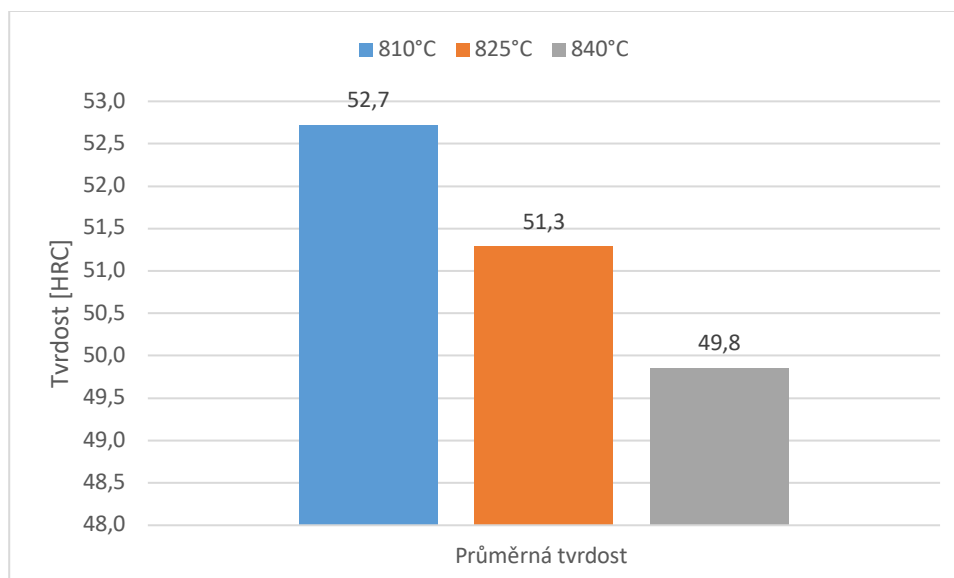


Obrázek 45. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 810 °C a to 67,3 HRC a nejmenší při 840 °C 54,2 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 24. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladící médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	550 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	53	52	50
2.	54	52	51
3.	54	52	50
4.	54	50	50
5.	53	53	50
6.	51	51	49
7.	53	49	48
8.	52	53	51
9.	54	52	50
10.	53	52	52
\bar{x}	52,7	51,3	49,8
$\bar{\sigma}$	0,903	1,148	0,999



Obrázek 46. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 550 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně ochladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší

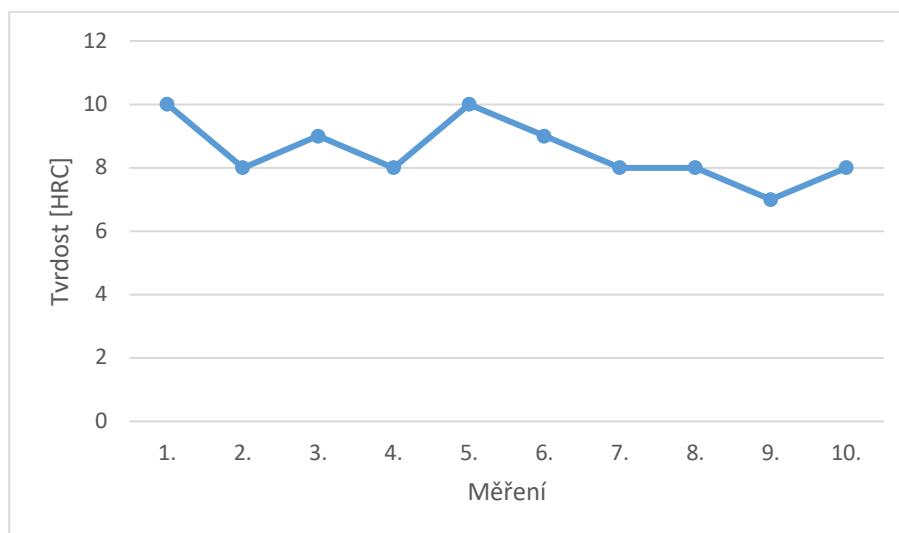
průměrná tvrdost byla při teplotě 810 °C s následným popuštěním 52,7 HRC. A nejmenší při 840 °C s následným popuštěním 49,8 HRC.

7.2 Vyhodnocení pro ocel 14209

7.2.1 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 bez tepelného zpracování

Tabulka 25. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 bez tepelného zpracování

Měření	Naměřená tvrdost [HRC]
1.	10
2.	8
3.	9
4.	8
5.	10
6.	9
7.	8
8.	8
9.	7
10.	8
\bar{x}	8,5
$\bar{\sigma}$	0,922



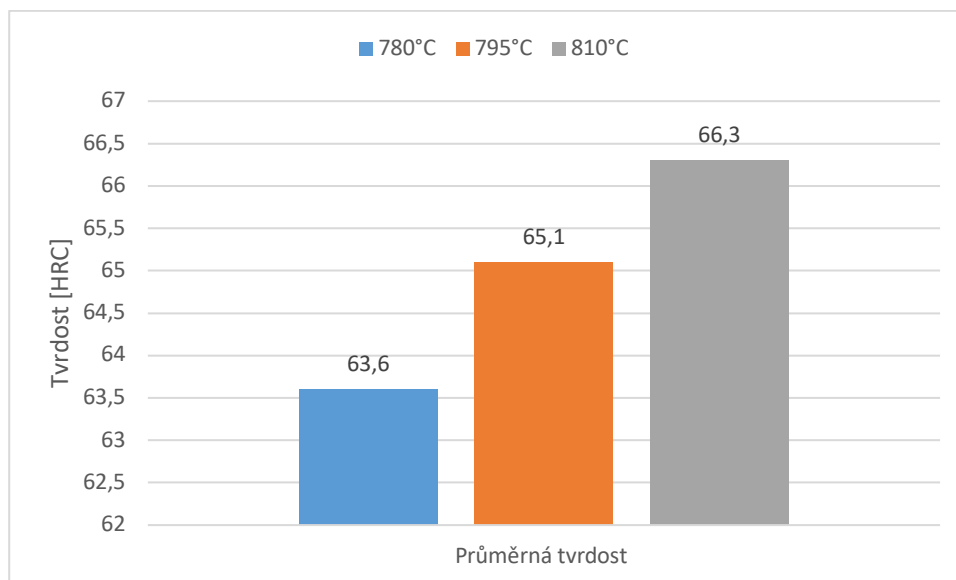
Obrázek 47. Tvrdost oceli 14209 bez tepelného zpracování

Průměrná naměřená tvrdost oceli 12060 bez tepelného zpracování je 8,5 HRC.

7.2.2 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 po tepelném zpracování

Tabulka 26. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209

Doba austenitizace	30 min		
Chladicí médium	Voda		
Kalící teplota	780 °C	795 °C	810 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	62	64	67
2.	63	65	66
3.	64	65	66
4.	64	65	67
5.	63	66	67
6.	64	66	67
7.	65	65	68
8.	63	66	65
9.	62	65	64
10.	66	64	66
\bar{x}	63,6	65,1	66,3
$\bar{\sigma}$	1,200	0,700	1,100

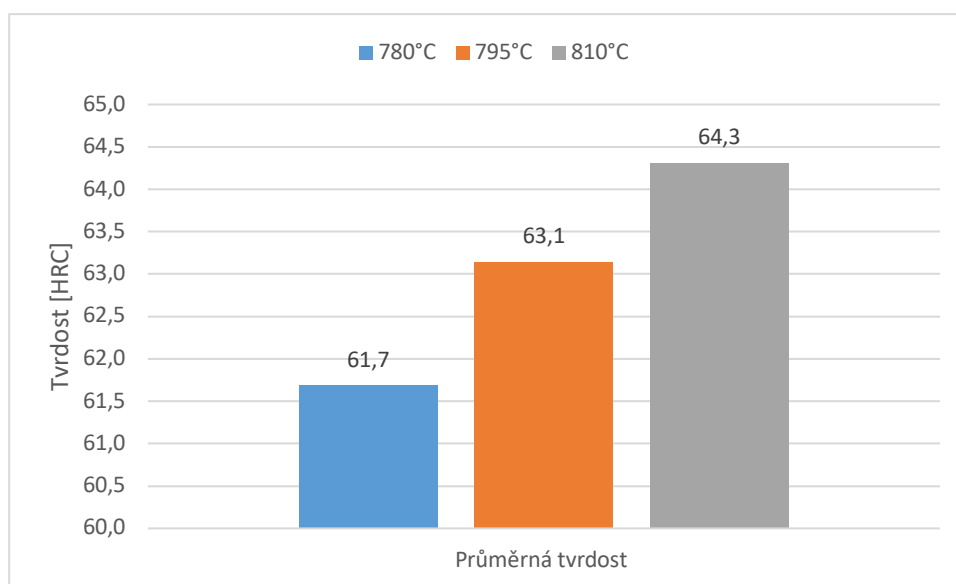


Obrázek 48. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 810 °C a to 66,3 HRC a nejmenší při 780 °C 63,6 HRC. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 27. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	150 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	60	62	65
2.	61	63	64
3.	62	63	64
4.	62	63	65
5.	61	64	65
6.	62	64	65
7.	63	63	66
8.	61	64	63
9.	60	63	62
10.	64	62	64
\bar{x}	61,7	63,1	64,3
$\bar{\sigma}$	1,164	0,679	1,067

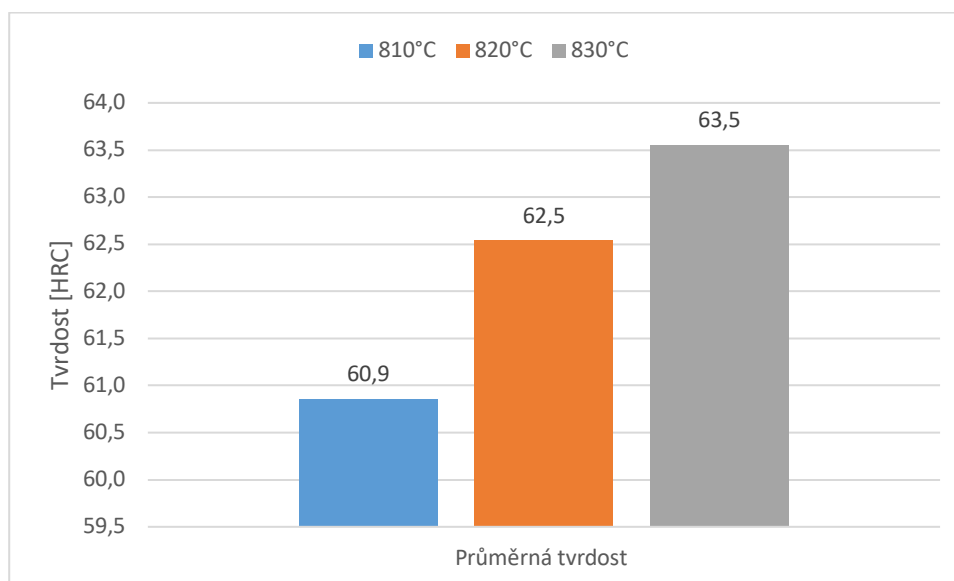


Obrázek 49. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 150 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně ochladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 810 °C s následným popouštěním 64,3 HRC. A nejmenší při 780 °C s následným popouštěním 61,7 HRC.

Tabulka 28. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209

Doba austenitizace	30 minut		
Chladící médium	Olej		
Kalící teplota	810 °C	820 °C	830 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	61	61	64
2.	62	61	62
3.	62	61	61
4.	59	65	65
5.	62	62	62
6.	61	65	64
7.	60	63	65
8.	61	64	66
9.	60	61	62
10.	62	64	65
\bar{x}	60,9	62,5	63,5
σ	0,950	1,608	1,659

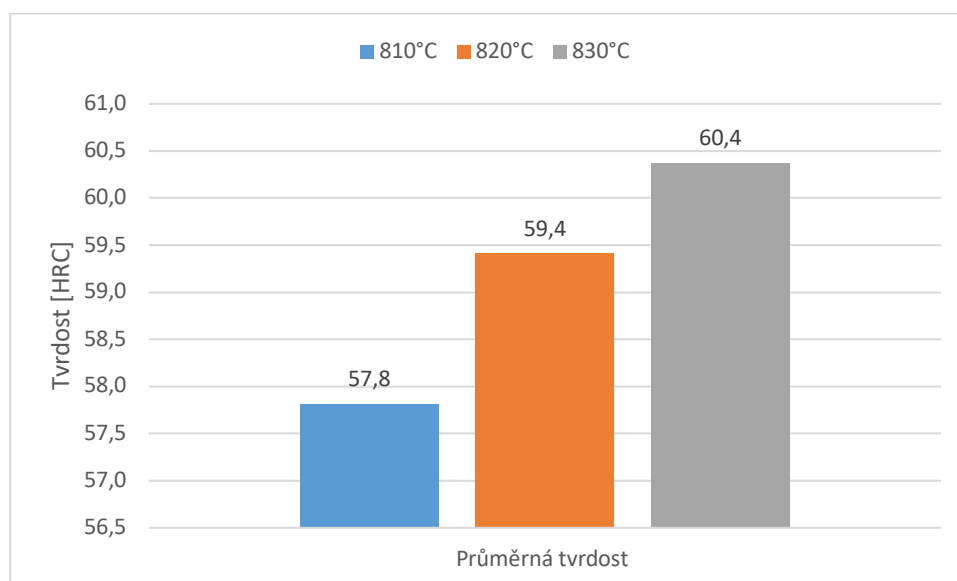


Obrázek 50. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 830 °C a to 63,5 HRC a nejmenší při 810 °C 60,9 HRC. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 29. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	150 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	58	58	61
2.	59	58	59
3.	59	58	58
4.	56	61	62
5.	59	59	59
6.	58	62	61
7.	57	60	62
8.	58	61	63
9.	57	58	59
10.	59	61	62
\bar{x}	57,8	59,4	60,4
$\bar{\sigma}$	0,903	1,528	1,576



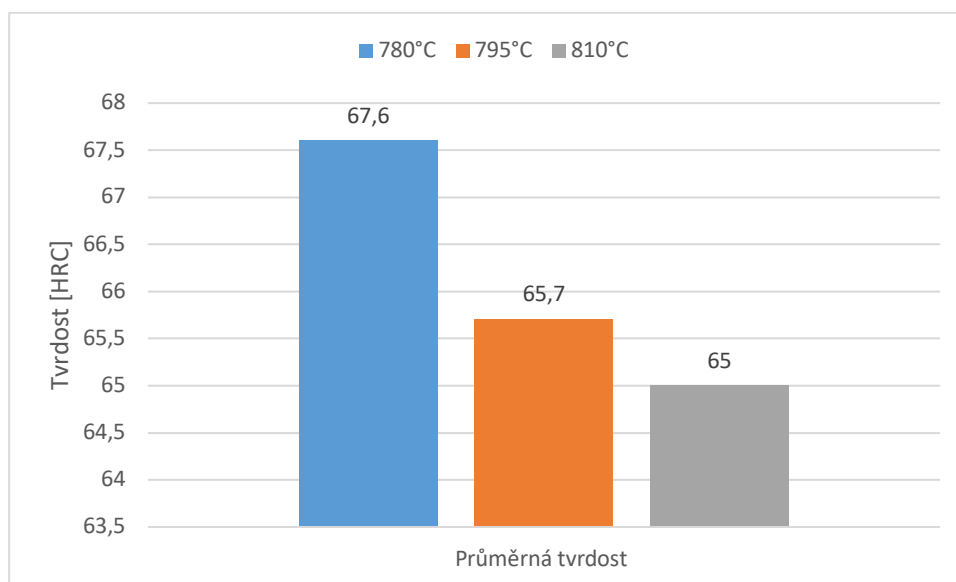
Obrázek 51. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 150 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně ochladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 830 °C s následným popouštěním 60,4 HRC. Nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 57,8 HRC.

Změna austenitizační doby na 1 hodinu.

Tabulka 30. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladící médium	Voda		
Kalící teplota	780 °C	795 °C	810 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	68	66	65
2.	67	66	65
3.	67	65	64
4.	69	65	63
5.	68	64	64
6.	68	67	66
7.	69	67	66
8.	65	68	66
9.	66	64	65
10.	69	65	66
\bar{x}	67,6	65,7	65
σ	1,281	1,269	1,000

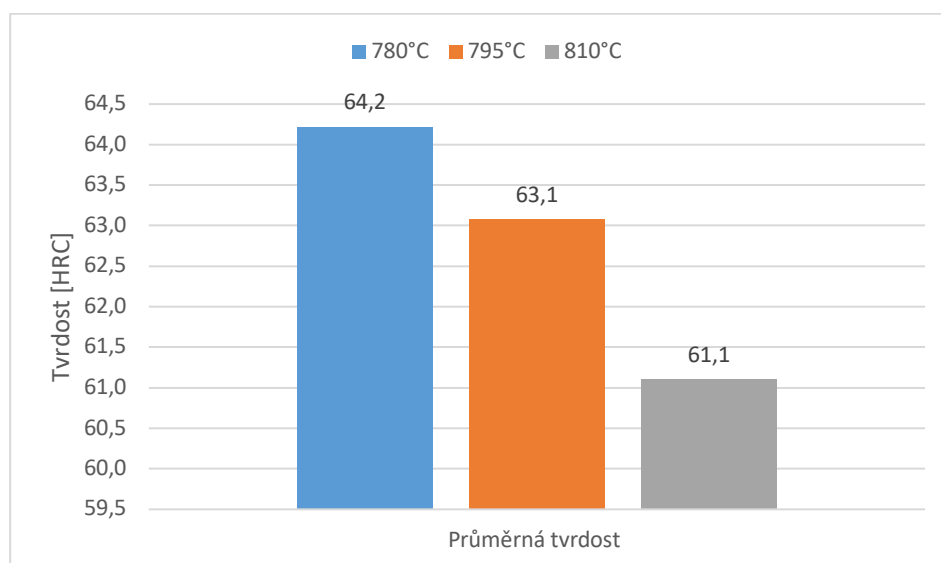


Obrázek 52. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 780 °C a to 67,6 HRC a nejmenší při 810 °C 65 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 31. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	150 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	65	63	61
2.	64	63	61
3.	64	62	60
4.	66	62	59
5.	65	61	60
6.	65	64	62
7.	66	64	62
8.	62	65	62
9.	63	61	61
10.	66	62	62
\bar{x}	64,2	63,1	61,1
$\bar{\sigma}$	1,217	1,218	0,940

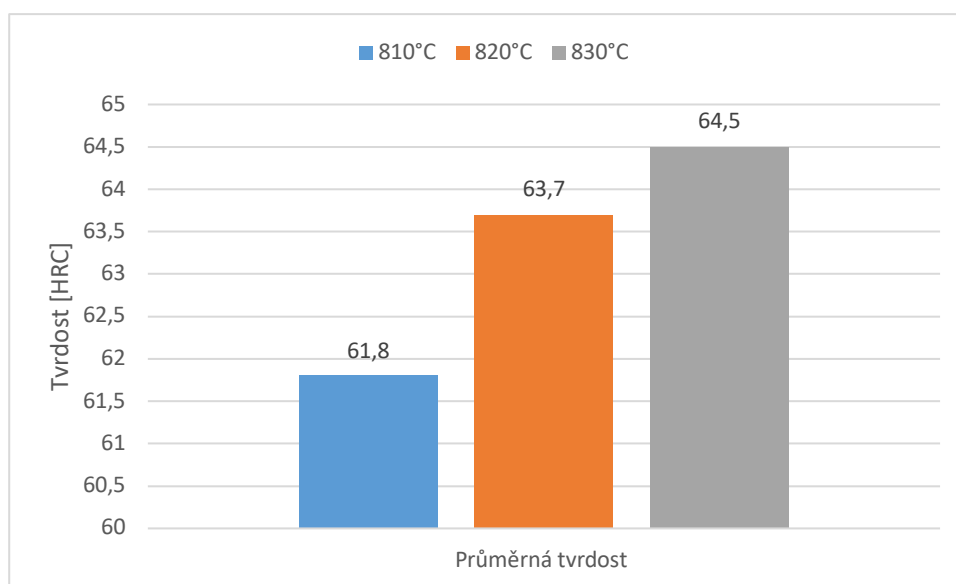


Obrázek 53. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 150 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 780 °C s následným popouštěním 64,2 HRC. Nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 61,1 HRC.

Tabulka 32. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladící médium	Olej		
Kalící teplota	810 °C	820 °C	830 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	62	64	65
2.	60	64	60
3.	63	62	62
4.	62	66	68
5.	63	63	65
6.	62	63	66
7.	61	64	65
8.	60	64	65
9.	62	62	64
10.	63	65	65
\bar{x}	61,8	63,7	64,5
$\bar{\sigma}$	1,077	1,187	2,062

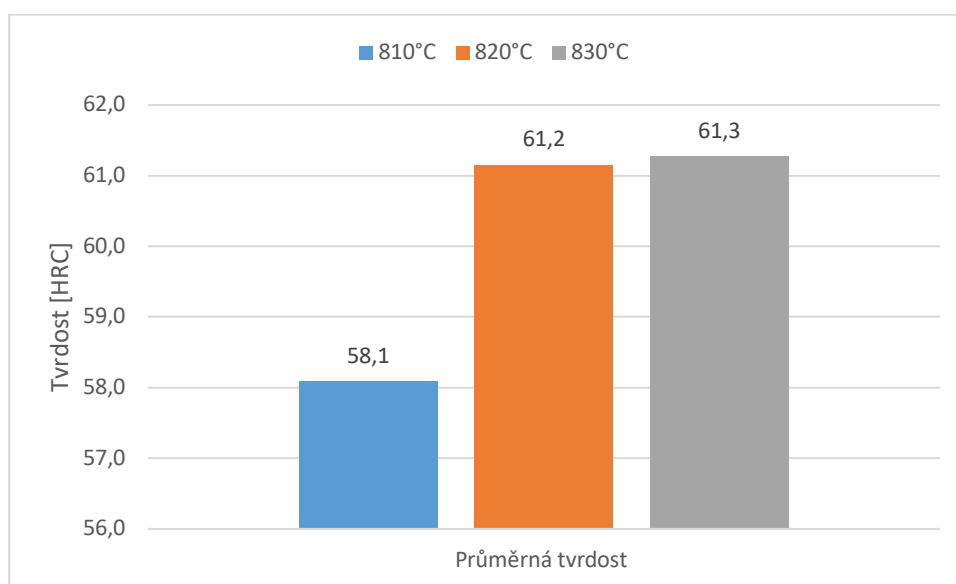


Obrázek 54. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 830 °C a to 64,5 HRC a nejmenší při 810 °C 61,8 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 33. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	150 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	58	61	62
2.	56	61	57
3.	59	60	59
4.	58	63	65
5.	59	60	62
6.	58	60	63
7.	57	61	62
8.	56	61	62
9.	58	60	61
10.	59	62	62
\bar{x}	58,1	61,2	61,3
$\bar{\sigma}$	1,012	1,140	1,958



Obrázek 55. Průměrná tvrdosti oceli 14209 po popouštění

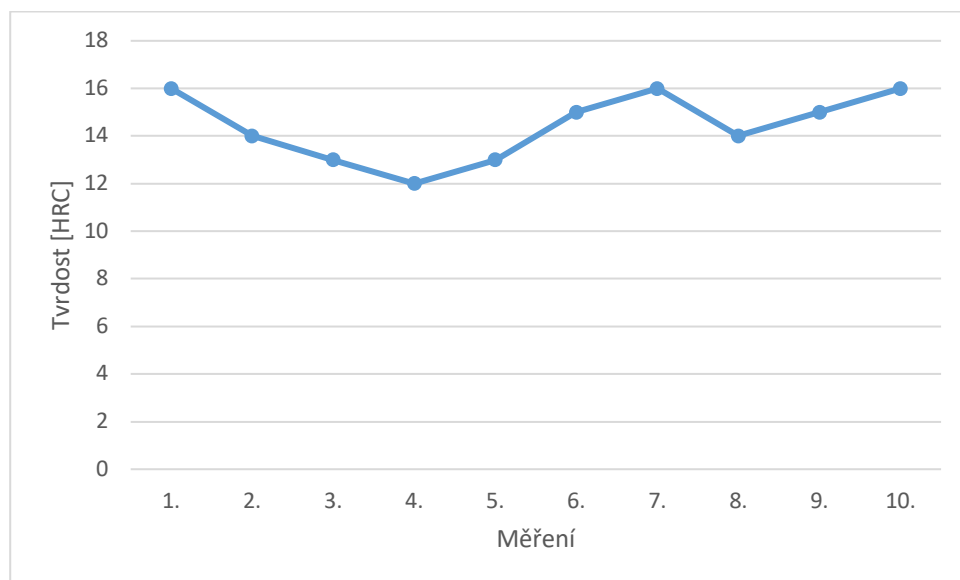
Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 150 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorokly se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 830 °C s následným popouštěním 61,3 HRC. Nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 58,1 HRC.

7.3 Vyhodnocení pro ocel 19132

7.3.1 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 bez tepelného zpracování

Tabulka 34. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 bez tepelného zpracování

Měření	Naměřená tvrdost [HRC]
1.	16
2.	14
3.	13
4.	12
5.	13
6.	15
7.	16
8.	14
9.	15
10.	16
\bar{x}	14,4
σ	1,356



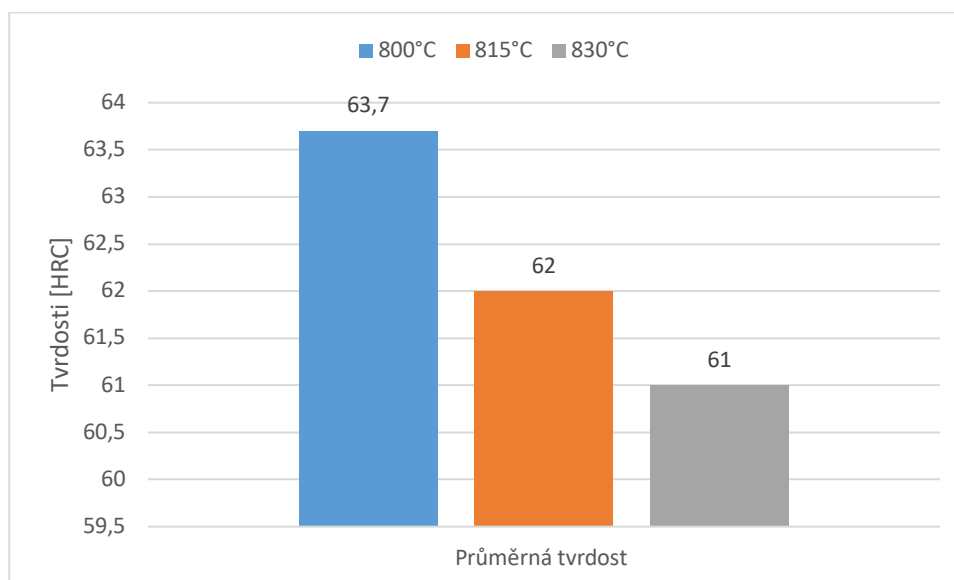
Obrázek 56. Tvrdost oceli 19132 bez tepelného zpracování

Průměrná naměřená tvrdost pro nezpracovaný vzorek je 14,4 HRC.

7.3.2 Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 po tepelném zpracování

Tabulka 35. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132

Doba austenitizace	30 minut		
Chladicí médium	Olej		
Kalící teplota	800 °C	815 °C	830 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	64	62	61
2.	64	61	58
3.	62	61	59
4.	63	60	63
5.	66	63	61
6.	65	62	61
7.	63	63	60
8.	62	62	62
9.	64	64	62
10.	64	62	63
\bar{x}	63,7	62	61
$\bar{\sigma}$	1,187	1,095	1,549

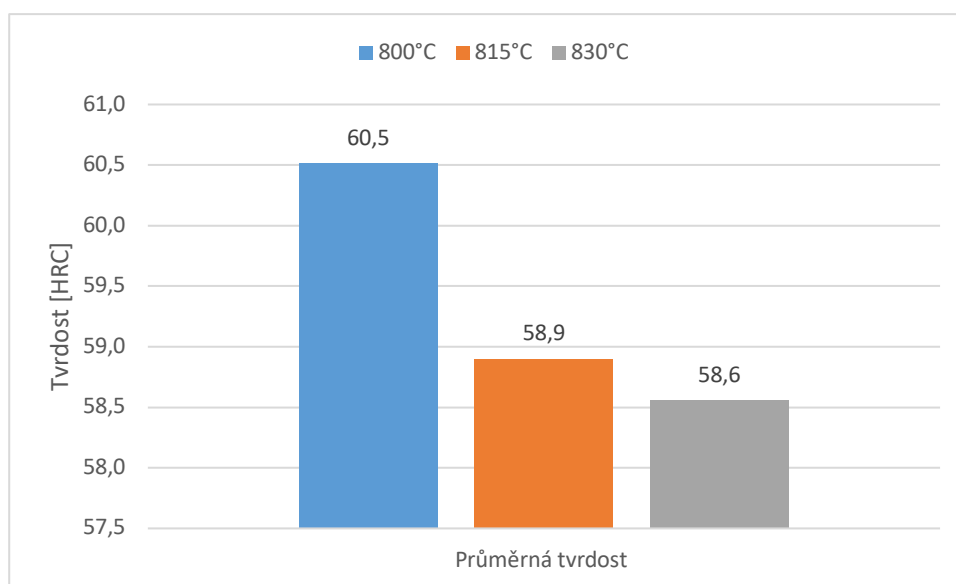


Obrázek 57. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 800 °C a to 63,7 HRC a nejmenší při 830 °C 61 HRC. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 36. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	200 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	61	59	59
2.	61	58	56
3.	59	58	57
4.	60	57	60
5.	63	60	59
6.	62	59	59
7.	60	60	58
8.	59	59	60
9.	61	61	60
10.	61	59	60
\bar{x}	60,5	58,9	58,6
$\bar{\sigma}$	1,128	1,041	1,487

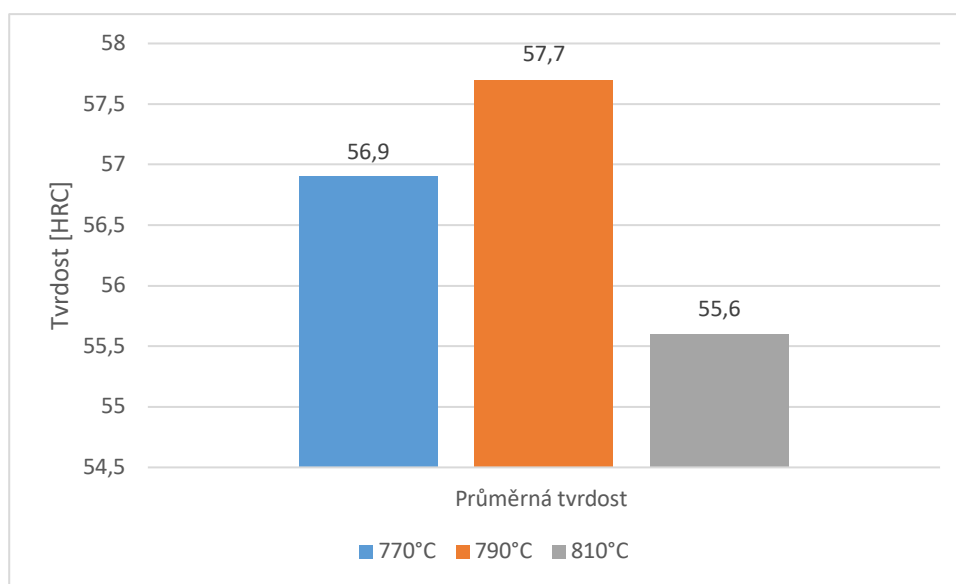


Obrázek 58. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 200 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla po teplotě 800 °C s následným popouštěním 60,5 HRC. Nejmenší při 830 °C s následným popouštěním 58,6 HRC.

Tabulka 37. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132

Doba austenitizace	30 minut		
Chladicí médium	Voda		
Kalící teplota	770 °C	790 °C	810 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	57	58	56
2.	57	58	55
3.	54	56	55
4.	53	57	56
5.	56	59	58
6.	58	60	50
7.	60	58	58
8.	61	57	55
9.	59	52	56
10.	54	62	57
\bar{x}	56,9	57,7	55,6
$\bar{\sigma}$	2,548	2,492	2,154

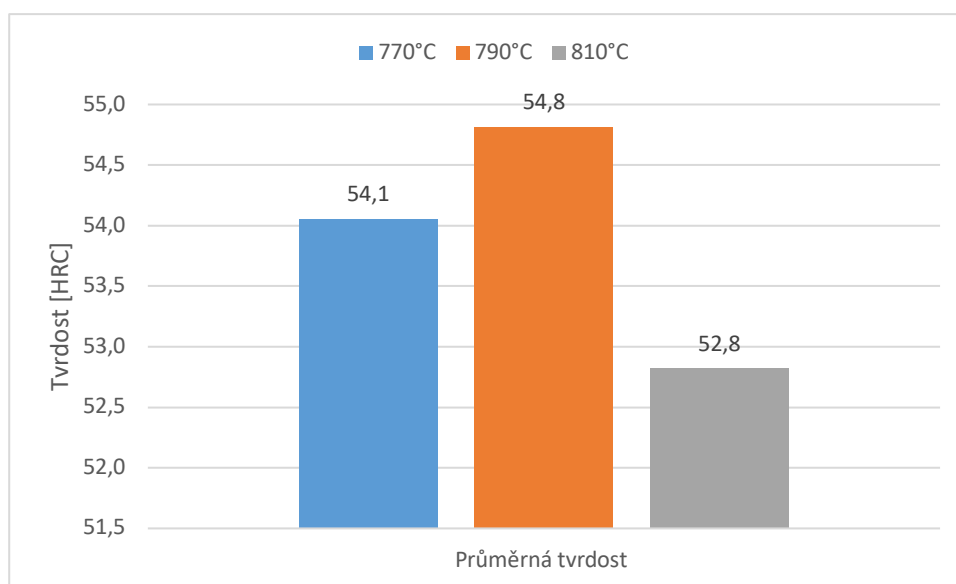


Obrázek 59. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 790 °C a to 57,7 HRC a nejmenší při 810 °C 55,6 HRC. Doba austenitizace byla 30 minut a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 38. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	200 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	54	55	53
2.	54	55	52
3.	51	53	52
4.	50	54	53
5.	53	56	55
6.	55	57	48
7.	57	55	55
8.	58	54	52
9.	56	49	53
10.	51	59	54
\bar{x}	54,1	54,8	52,8
$\bar{\sigma}$	2,420	2,367	2,046



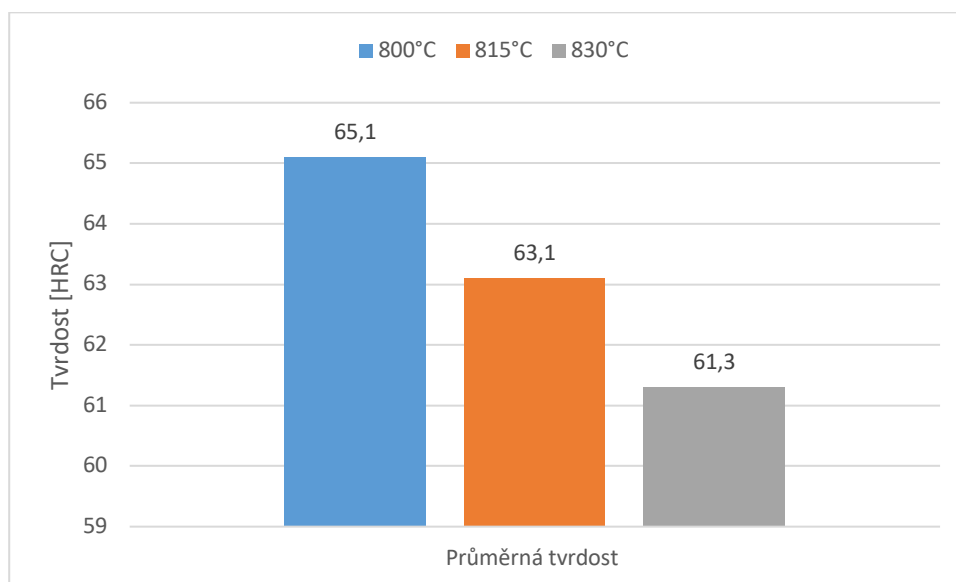
Obrázek 60. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 200 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 790 °C s následným popouštěním 54,8 HRC. Nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 52,8 HRC.

Změna austenitizační doby na 1 hodinu.

Tabulka 39. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladicí médium	Olej		
Kalící teplota	800 °C	815 °C	830 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	66	63	62
2.	65	63	60
3.	67	62	60
4.	65	65	61
5.	66	64	61
6.	65	65	62
7.	66	61	60
8.	65	61	61
9.	64	63	63
10.	62	64	63
\bar{x}	65,1	63,1	61,3
σ	1,300	1,375	1,100

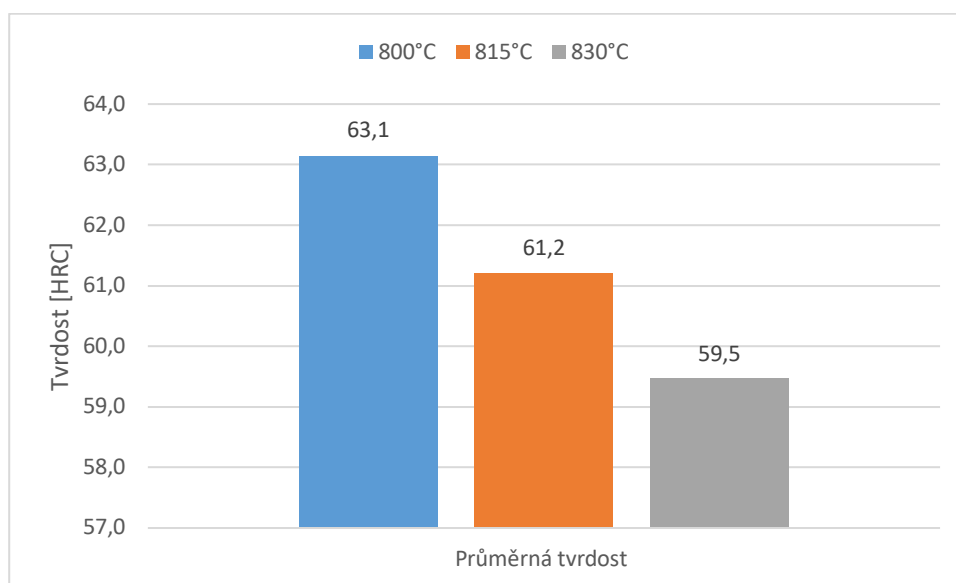


Obrázek 61. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 800 °C a to 65,1 HRC a nejmenší při 830 °C 61,3 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily v oleji.

Tabulka 40. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	200 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	64	61	60
2.	63	61	58
3.	65	60	58
4.	63	63	59
5.	64	62	59
6.	63	63	60
7.	64	59	58
8.	63	59	59
9.	62	61	61
10.	60	62	61
\bar{x}	63,1	61,2	59,5
$\bar{\sigma}$	1,261	1,334	1,067

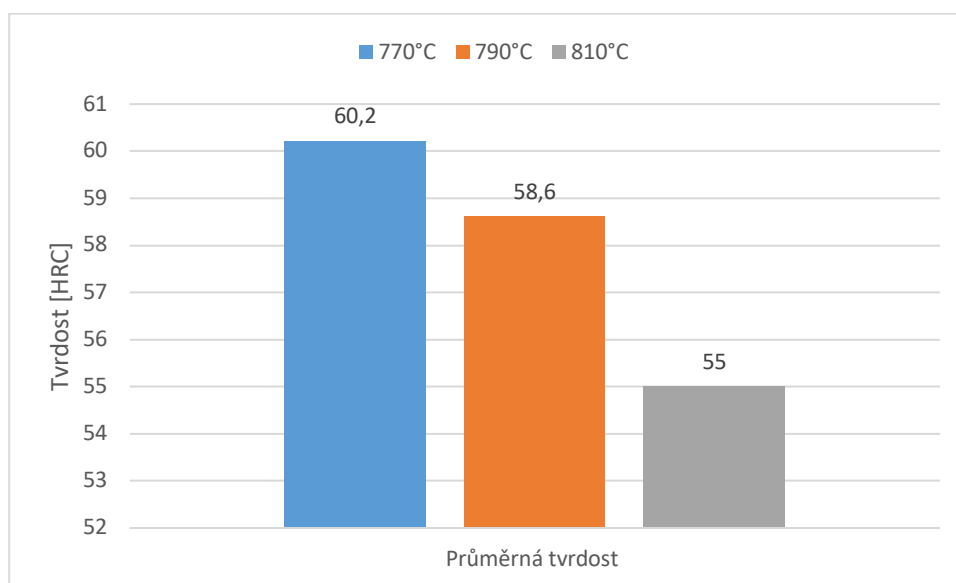


Obrázek 62. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění

Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 200 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 800 °C s následným popouštěním 63,1 HRC. Nejmenší při 830 °C s následným popouštěním 59,5 HRC.

Tabulka 41. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132

Doba austenitizace	1 hodina		
Chladící médium	Voda		
Kalící teplota	770 °C	790 °C	810 °C
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	57	59	57
2.	60	58	56
3.	57	57	56
4.	59	55	58
5.	68	58	55
6.	61	57	55
7.	60	59	52
8.	60	61	56
9.	58	62	53
10.	62	60	52
\bar{x}	60,2	58,6	55
$\bar{\sigma}$	3,027	1,960	1,949

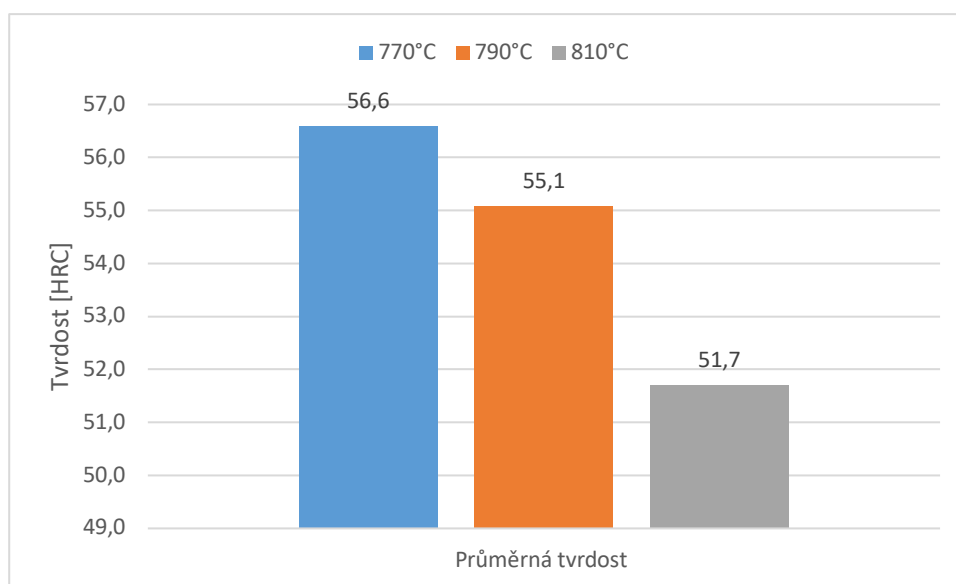


Obrázek 63. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla naměřena při kalící teplotě 770 °C a to 60,2 HRC a nejmenší při 810 °C 55 HRC. Doba austenitizace byla 1 hodina a vzorky se chladily ve vodě.

Tabulka 42. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132

Doba popouštění	2 hodiny		
Chladicí médium	Vzduch		
Popouštěcí teplota	200 °C		
Měření	Naměřená tvrdost [HRC]		
1.	54	55	54
2.	56	55	53
3.	54	54	53
4.	55	52	55
5.	64	55	52
6.	57	54	52
7.	56	55	49
8.	56	57	53
9.	55	58	50
10.	58	56	49
\bar{x}	56,6	55,1	51,7
$\bar{\sigma}$	2,845	1,842	1,832



Obrázek 64. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění

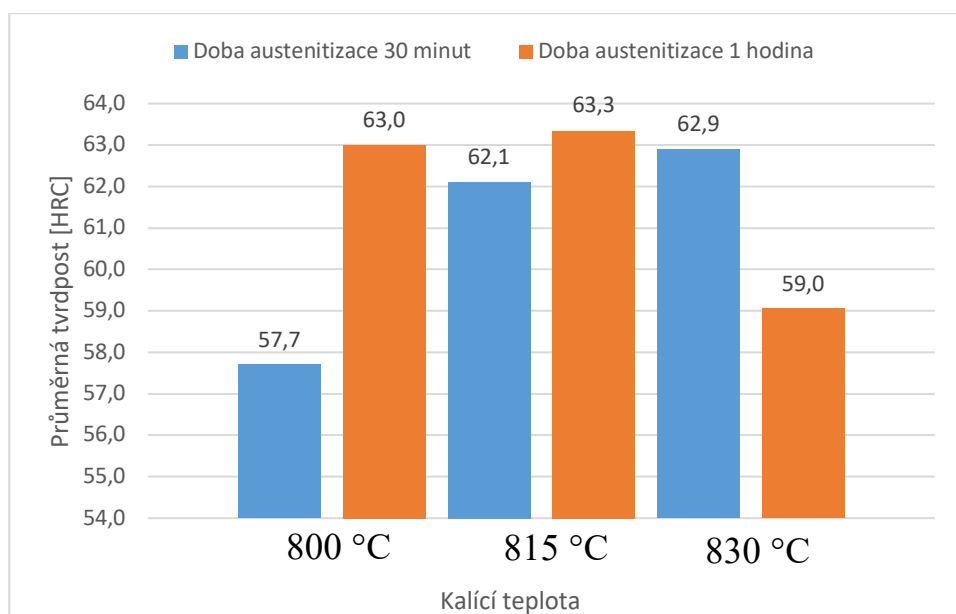
Popouštění následovalo po kalení při popouštěcí teplotě 200 °C a době popouštění 2 hodiny. Vzorky se následně chladily na vzduchu. Z naměřených výsledků vyplývá, že největší průměrná tvrdost byla při teplotě 770 °C s následným popouštěním 56,6 HRC. Nejmenší při 810 °C s následným popouštěním 51,7 HRC.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V experimentální části byly provedeny zkoušky tvrdosti bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním (kaleny a popouštěny) pro oceli 12060, 14209, 19132. Měření tvrdosti bylo realizováno metodou podle Rockwella. Dále se porovnávají naměřené výsledky s rozdílnou dobou a teplotou austenitizace. Při kalení byly oceli chlazeny vodou a olejem. Při kalení do vody většinou vzniká martenzit, ten se vyznačuje vysokou tvrdostí kolem 60 HRC a když se chladí do oleje, tak vzniká horní bainit, který má tvrdost kolem 50 HRC. Při popouštění byly oceli chlazeny na vzduchu.

8.1 Porovnání tvrdosti oceli 12060 při rozdílných dobách austenitizace

Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 800 °C, 815 °C a 830 °C. Zakalená ocel byla chlazená ve vodě.

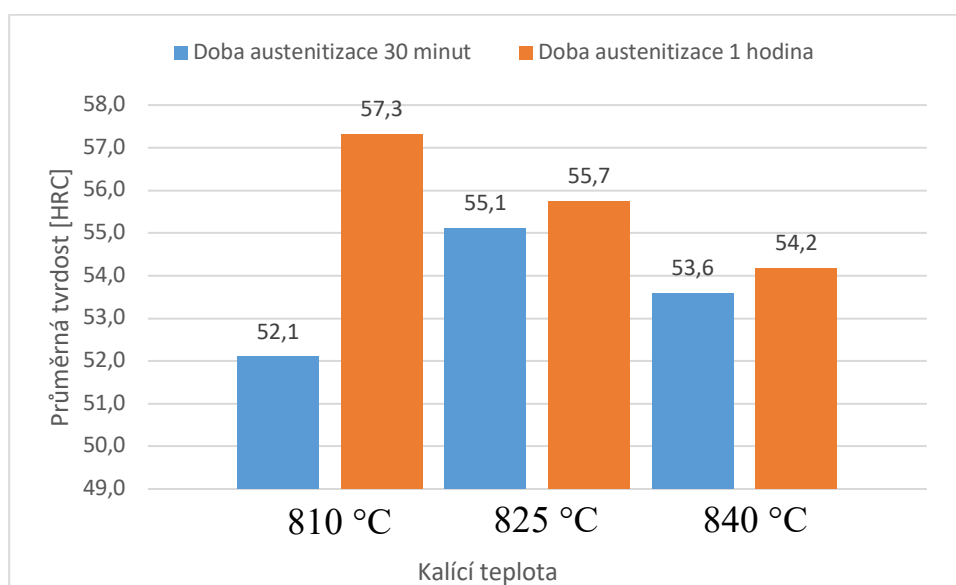


Obrázek 65. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 12060 na době austenitizace a rozdílné teploty

Obr. 65 udává závislost průměrné tvrdosti na době austenitizace (konkrétně při době 30 minut a 1 hodina). Z naměřených výsledků vyplývá, že při teplotě 800 °C byla naměřená tvrdost výrazně vyšší při delší době austenitizace zhruba o 9 %. Při kalící teplotě 815 °C už rozdíl tvrdosti nebyl tak výrazný, ale pořád odpovídal tomu, že při delší době austenitizace

byla i větší tvrdost. Naopak při kalící teplotě 830 °C byla naměřena vyšší průměrná tvrdost při době austenitizace 30 minut. Největší průměrné tvrdosti se dosáhlo při kalící teplotě 815 °C a doby austenitizace 1 hodiny 63,3 HRC.

Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 810 °C, 825 °C a 840 °C. Zakalená ocel byla chlazená v oleji.

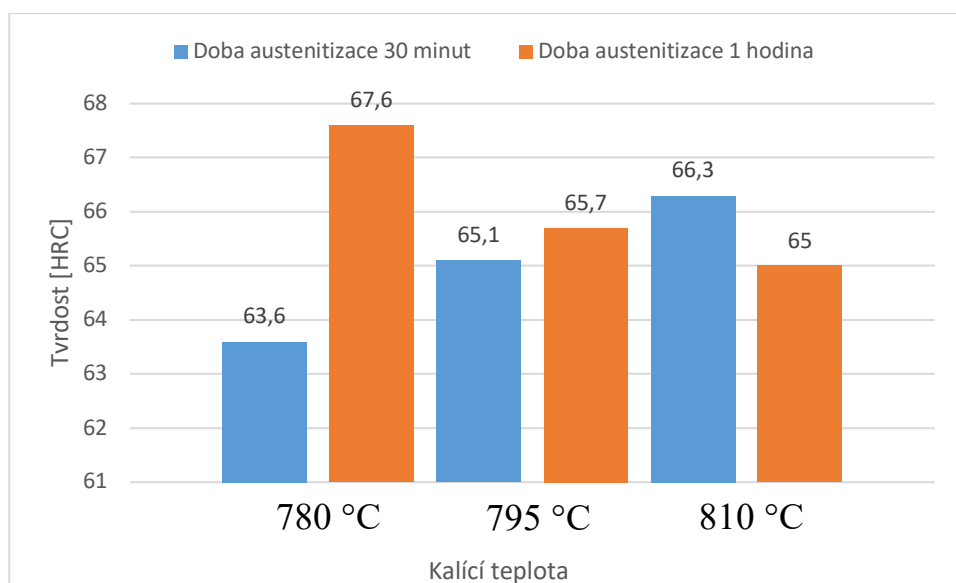


Obrázek 66. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 12060 na době austenitizace a rozdílné teploty

Graf udává závislost průměrné tvrdosti na době austenitizace (konkrétně při době 30 minut a 1 hodina). Z naměřených výsledků vyplývá, že při teplotě 810 °C byla naměřená tvrdost výrazně vyšší při delší době austenitizace zhruba o 10 %. Při kalící teplotě 825 °C už rozdíl tvrdosti nebyl tak výrazný, ale pořád odpovídal tomu, že při delší době austenitizace byla i větší tvrdost. I u poslední měřené kalící teploty 840 °C byla naměřená tvrdost vyšší při době austenitizace 1 hodiny. Největší průměrné tvrdosti se dosáhlo při kalící teplotě 810 °C a doby austenitizace 1 hodiny 57,3 HRC.

8.2 Porovnání tvrdosti oceli 14209 při rozdílných dobách austenitizace

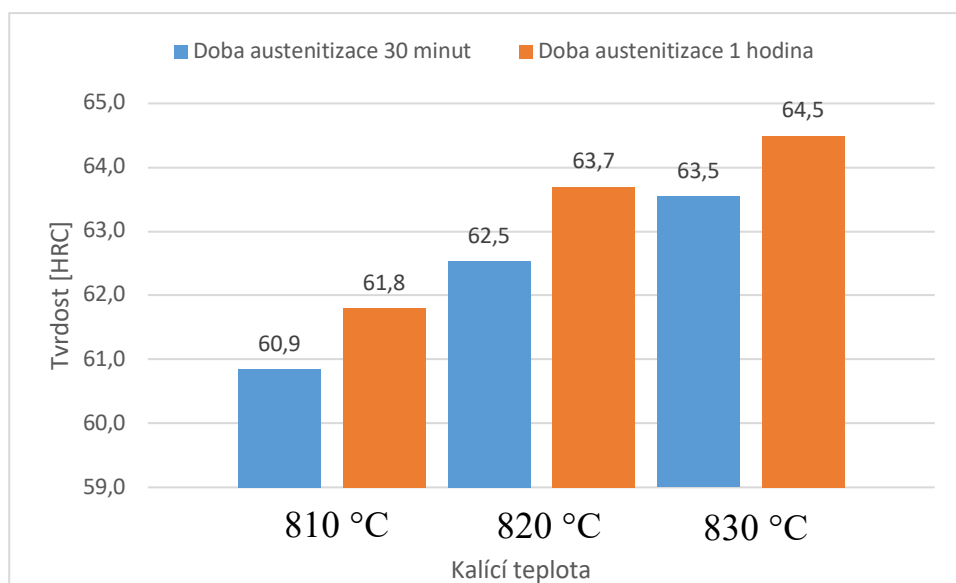
Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 780 °C, 795 °C a 810 °C. Zakalená ocel byla chlazena ve vodě.



Obrázek 67. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 14209 na době austenitizace a rozdílné teploty

Z naměřených výsledků vyplývá, že při teplotě 780 °C byla naměřená tvrdost výrazně vyšší při delší době austenitizace zhruba o 6 %. Při kalící teplotě 795 °C už rozdíl tvrdosti nebyl tak výrazný, ale pořád odpovídal tomu, že při delší době austenitizace byla i větší tvrdost. Naopak při kalící teplotě 810 °C byla naměřena vyšší průměrná tvrdost při době austenitizace 30 minut. Největší průměrné tvrdosti se dosáhlo při kalící teplotě 780 °C a doby austenitizace 1 hodiny 67,6 HRC.

Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 810 °C, 820 °C a 830 °C. Zakalená ocel byla chlazená v oleji.

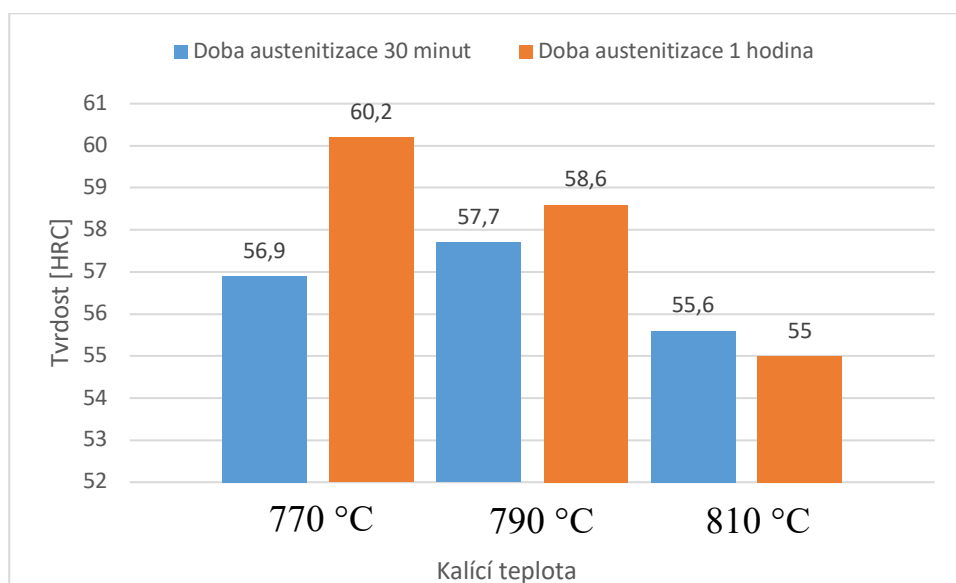


Obrázek 68. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 14209 na době austenitizace a rozdílné teploty

Z naměřených výsledků vyplývá, že při teplotě 810 °C byla naměřená tvrdost vyšší při delší době austenitizace. Při kalící teplotě 820 °C byla opět naměřená tvrdost vyšší u delší doby austenitizace. U teploty 830 °C také odpovídala vyšší tvrdost při delší době austenitizace a byla zde naměřena nejvyšší průměrná tvrdost 64,5 HRC.

8.3 Porovnání tvrdosti oceli 19132 při rozdílných dobách austenitizace

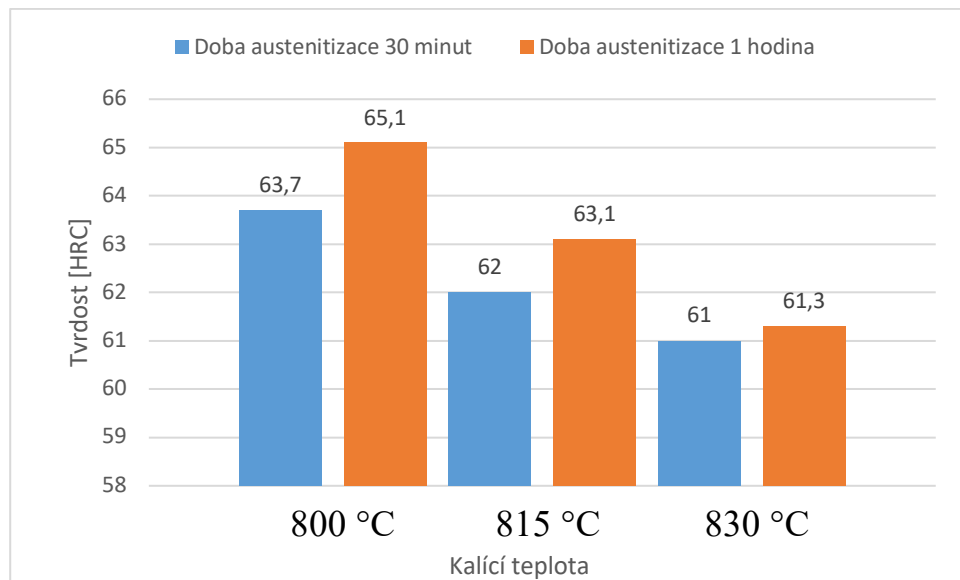
Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 770 °C, 790 °C a 810 °C. Zakalená ocel byla chlazena ve vodě.



Obrázek 69. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 19132 na době austenitizace a rozdílné teploty

Z naměřených výsledků vyplývá, že při teplotě 770 °C byla naměřená tvrdost výrazně vyšší při delší době austenitizace zhruba o 6 %. Při kalící teplotě 790 °C už rozdíl tvrdosti nebyl tak výrazný, ale pořád odpovídal tomu, že při delší době austenitizace byla i větší tvrdost. Naopak při kalící teplotě 810 °C byla naměřena vyšší průměrná tvrdost při době austenitizace 30 minut. Největší průměrné tvrdosti se dosáhlo při kalící teplotě 770 °C a doby austenitizace 1 hodiny 60,2 HRC.

Uvedené naměřené hodnoty průměrné tvrdosti po kalení byly porovnány mezi dobou austenitizace 30 minut a dobou austenitizace 1 hodiny při teplotách 800 °C, 815 °C a 830 °C. Zakalená ocel byla chlazená v oleji.



Obrázek 70. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 19132 na době austenitizace a rozdílné teploty

Z naměřených výsledků vyplývá, že při všech teplotách byla naměřená průměrná tvrdost vyšší při delší době austenitizace. U teploty 800 °C byla naměřena nejvyšší průměrná tvrdost 65,1 HRC.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla rozdělena na dvě části. Část teoretickou, která se zabývala základní charakteristikou ocelí a jejím rozdělením, tepelným zpracováním a tvrdostí. Část praktická, řeší vliv teploty a doby austenitizace na výslednou tvrdost při tepelném zpracování. Oceli 12060 (EN 1.0535), 14209 (EN 1.3520) a 19132 (EN 1.1520) byly kaleny a popouštěny a následně u nich byla změřena tvrdost.

Z naměřených výsledků je patrné, že různá teplota a doba austenitizace měla vliv na výslednou tvrdost po kalení nebo po popouštění. Nižší teplota a kratší doba austenitizace vede k nedostatečné homogenizaci austenitu a tím k neúplné transformaci na martenzit případně bainit. Proto byla naměřena nižší tvrdost. I vysoká teplota a delší doba austenitizace může vést k hrubnutí austenitického zrna, tudíž opět může dojít k poklesu tvrdosti. Kromě toho mělo na výslednou tvrdost vliv i chladicí médium. U všech materiálů si lze všimnout, že při prvních dvou teplotních režimech a delší době austenitizace (1 hodina) je vždy větší naměřená tvrdost. Naopak při třetím teplotním režimu je pokaždé naměřená tvrdost vyšší u doby austenitizace 30 minut. Toto platí při chlazení materiálů vodou. Když byly oceli chlazeny v oleji, tak naměřená tvrdost byla vždy vyšší při delší době austenitizace ve všech teplotách austenitizace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BROŽOVÁ, Kamila. *Technické materiály* [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://adoc.pub/1-technicke-materialy-vlastnosti-technickyh-material-fyzika.html>
- [2] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 1. díl, Nauka o materiálu. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 9788086960265.
- [3] BEROUN, Stanislav. *Úvod do strojírenství*. V Libereci, 2001. [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1915/kap3.pdf>
- [4] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015, 133 s. ISBN 9788001056851.
- [5] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 8070806001.
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011, xiv, 927 s. ISBN 9788073610814.
- [7] PROCHÁZKA, Erik. *Výroba surového železa a oceli* [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://docplayer.cz/69271462-Vyroba-suroveho-zeleza-vyroba-oceli-vyroba-litin.html>
- [8] ISPATGURU, [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/heat-treatment-processes-for-steel/>
- [9] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1*. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování. Ve Scientii 2. vyd. Praha: Scientia, 1998, 165 s. ISBN 8071831409.
- [10] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 8072042483.
- [11] HAVLÍČKOVÁ, Tereza. *Tepelné zpracování a slinování*. [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://docplayer.cz/18081046-Tepelne-zpracovani-a-slinovani-prednasky.html>

- [12] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 9788070432440.
- [13] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013, 168 s. ISBN 9788001052488.
- [14] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 9788073330729.
- [15] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 9788001055274.
- [16] DOLEŽAL, P.; PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. VUT, Brno: 2007, 41 s.
- [17] GORDONENGLAND, [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://www.gordonengland.co.uk/hardness>
- [18] MAKEITFROM, [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Iron-Alloy>
- [19] IGTTESTER, [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <http://www.lgtester.com/English/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=111&id=77>
- [20] SUMMERS, Jennifer. *Industrial furnaces and dryers catalog*. [online]. [cit. 15.5.2022] Dostupné z: <https://docplayer.net/157305630-Industrial-furnaces-and-dryers-catalog.html>
- [21] TECHNICKE-NORMY-CSN, [online]. 2006 [cit. 15.5.2022]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
F	Zatěžující síla	[N]
CHD	Hloubka cementace	[mm]
HRC	Tvrдость podle Rockwella	
\bar{x}	Aritmetický průměr	
$\bar{\sigma}$	Směrodatná odchylka	

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Schéma číselného označení [6]</i>	16
<i>Obrázek 2. Značky tvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností ocelí [2]</i>	20
<i>Obrázek 3. Značky vytvořené na základě chemického složení ocelí [2]</i>	21
<i>Obrázek 4. Stavba čísel oceli [6]</i>	21
<i>Obrázek 5. Schéma průběhu tepelného zpracování</i>	25
<i>Obrázek 6. Diagram izotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [12]</i>	26
<i>Obrázek 7. Diagram izotermického rozpadu austenitu podeutektoidní oceli [12]</i>	26
<i>Obrázek 8. Diagram izotermického rozpadu austenitu nadeutektoidní oceli [12]</i>	27
<i>Obrázek 9. Diagram anizotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [12]</i>	27
<i>Obrázek 10. Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C (žhání: a-ke snížení vnitřního pnutí, b-rekrytalizační, c-na měkko, d-homogenizační, e-normalizační) [11]</i> ...	28
<i>Obrázek 11. Pásmo kalících teplot</i>	30
<i>Obrázek 12. Přehled způsobů kalení oceli [9]</i>	31
<i>Obrázek 13. Izotermické zušlechťování (křivka 1) a izotermické bainitické kalení (křivka 2)</i>	32
<i>Obrázek 14. Nepřetržitě bainitické kalení</i>	33
<i>Obrázek 15. Schéma průběhu a) přímého b) lomeného c) termálního kalení eutektoidní oceli v ARA diagramu [13]</i>	34
<i>Obrázek 16. Popouštěcí křivky nelegované oceli (1), nízkolegované oceli (2) a oceli vysocelegované karbidotvornými prvky (3)</i>	35
<i>Obrázek 17. Část rovnovážného diagramu Fe – Fe₃C s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot</i>	38
<i>Obrázek 18. Průběh času a teplot při nitridování</i>	39
<i>Obrázek 19. Porovnání tvrdosti a hloubky povrchové vrstvy [12]</i>	39
<i>Obrázek 20. Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování 1 - VTMZ, 2 – NTMZ [11]</i>	41
<i>Obrázek 21. Zkouška tvrdosti podle Brinella [14]</i>	43
<i>Obrázek 22. Zkouška tvrdosti podle Vickerse</i>	44
<i>Obrázek 23. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – vlevo HRB a vpravo HRC</i>	45
<i>Obrázek 24. Mikrotvrdoměr [16]</i>	47
<i>Obrázek 25. Perlitická struktura oceli</i>	48
<i>Obrázek 26. Bainitická struktura oceli</i>	48
<i>Obrázek 27. Martenzitická struktura oceli</i>	49
<i>Obrázek 28. Indentor podle Vickerse [17]</i>	50

<i>Obrázek 29. Podstata zkoušky tvrdosti podle Knoop [16].....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 30. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21].....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 31. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21].....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 32. Technologické údaje použité při tepelném zpracování [21].....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 33. Tvrdoměr Rockwell model HR-150A [18].....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 34. Kalící pracoviště SKM [20].....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 35. Vložený vzorek v kalící peci</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 36. Ohřátý vzorek na kalící teplotu před vyjmutím z pece a následným ochlazením ve vodě nebo v oleji.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 37. Zakalené vzorky již po změření tvrdosti</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 38. Tvrdost ocele 12060 bez tepelného zpracování.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 39. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 40. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 41. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 42. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 43. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 44. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 45. Průměrná tvrdost oceli 12060 po kalení</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 46. Průměrná tvrdost oceli 12060 po popouštění</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 47. Tvrdost oceli 14209 bez tepelného zpracování</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 48. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 49. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 50. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 51. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 52. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 53. Průměrná tvrdost oceli 14209 po popouštění</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 54. Průměrná tvrdost oceli 14209 po kalení</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 55. Průměrná tvrdosti oceli 14209 po popouštění</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 56. Tvrdost oceli 19132 bez tepelného zpracování</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 57. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 58. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 59. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 60. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 61. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení</i>	<i>85</i>

<i>Obrázek 62. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 63. Průměrná tvrdost oceli 19132 po kalení</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 64. Průměrná tvrdost oceli 19132 po popouštění</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 65. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 12060 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 66. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 12060 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 67. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 14209 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>91</i>
<i>Obrázek 68. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 14209 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>92</i>
<i>Obrázek 69. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 19132 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>93</i>
<i>Obrázek 70. Graf závislosti průměrné tvrdosti oceli 19132 na době austenitizace a rozdílné teploty</i>	<i>94</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. Mezní hodnota prvků podle ČSN EN [4]</i>	13
<i>Tabulka 2. Mezní hodnota prvků podle ČSN EN [4]</i>	13
<i>Tabulka 3. Značky vytvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností [6]</i>	19
<i>Tabulka 4. Značky vytvořené na základě chemického složení oceli [6]</i>	20
<i>Tabulka 5. Oceli nelegované [6]</i>	22
<i>Tabulka 6. Oceli legované [6]</i>	23
<i>Tabulka 7. Stupnice tvrdosti podle Rockwella [15]</i>	45
<i>Tabulka 8. Tvrdost strukturních složek a fází</i>	48
<i>Tabulka 9. Zatěžující síla při mikrotvrdosti podle Vickerse [16]</i>	50
<i>Tabulka 10. Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse [16]</i>	51
<i>Tabulka 11. Zatěžující síla při tvrdosti podle Knoop [16]</i>	52
<i>Tabulka 12. Chemické složení [hm. %]</i>	55
<i>Tabulka 13. Chemické složení [hm. %]</i>	55
<i>Tabulka 14. Chemické složení [hm. %]</i>	56
<i>Tabulka 15. Použité zatížení podle Rockwella</i>	57
<i>Tabulka 16. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 12060 bez tepelného zpracování</i>	62
<i>Tabulka 17. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060</i>	63
<i>Tabulka 18. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060</i>	64
<i>Tabulka 19. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060</i>	65
<i>Tabulka 20. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060</i>	66
<i>Tabulka 21. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060</i>	67
<i>Tabulka 22. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060</i>	68
<i>Tabulka 23. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 12060</i>	69
<i>Tabulka 24. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 12060</i>	70
<i>Tabulka 25. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 14209 bez tepelného zpracování</i>	71
<i>Tabulka 26. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209</i>	72
<i>Tabulka 27. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209</i>	73
<i>Tabulka 28. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209</i>	74
<i>Tabulka 29. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209</i>	75
<i>Tabulka 30. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209</i>	76
<i>Tabulka 31. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209</i>	77
<i>Tabulka 32. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 14209</i>	78

<i>Tabulka 33. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 14209</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 34. Naměřené hodnoty tvrdosti oceli 19132 bez tepelného zpracování</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 35. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 36. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 37. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 38. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 39. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 40. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 41. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalení oceli 19132</i>	<i>87</i>
<i>Tabulka 42. Naměřené hodnoty tvrdosti po popouštění oceli 19132</i>	<i>88</i>