

Vliv procesních parametrů tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti

Tomáš Kurečka

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Kurečka**
Osobní číslo: **T18198**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv procesních parametrů tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti**

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro tepelné zpracování
3. Provedení měření mikro-mechanických vlastností
4. Vyhodnocení naměřených hodnot

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

Seznam doporučené literatury:

PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2

PTÁČEK, L. a kol.,: Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

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: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

L.S.

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

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Teoretická část popisuje vlastnosti slitin železa, značení ocelí, možnosti tepelného zpracování ocelí a následné způsoby měření jejich mikro-mechanických vlastností.

Praktická část popisuje postup přípravy zkušebních vzorků, použité tepelné zpracování, měření mikro-mechanických vlastností na vybraných vzorcích a následné grafické vyhodnocení naměřených hodnot.

Klíčová slova: ocel, tepelné zpracování, tvrdost, mikrotvrdost, Rockwell, Vickers, DSI.

ABSTRACT

The bachelor thesis aims to determine the effect of heat treatment on selected steels' resulting micro-mechanical properties.

The theoretical part describes iron alloy properties, marking of steels, possibilities of heat treatment of steels, and the following methods of measuring their micro-mechanical properties.

The practical part describes the procedure of preparation of test specimens, used heat treatments, measurement of micro-mechanical properties on selected samples, and the following graphical evaluation of measured values.

Keywords: steel, heat treatment, hardness, microhardness, Rockwell, Vickers, DSI.

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jeho trpělivost, ochotu, odborné vedení a cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty v průběhu vypracování této práce.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA	11
1.1 PŘEHLED OCELÍ KE TVÁŘENÍ	12
1.1.1 Nelegované oceli	12
1.1.2 Legované oceli	13
1.2 ZNAČENÍ OCELÍ PODLE ČSN EN.....	14
1.2.1 Značení podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností	14
1.2.2 Značení podle chemického složení	15
1.2.3 Číselné značení ocelí	15
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ	16
2.1 ŽIHÁNÍ	17
2.1.1 Žihání ke snížení pnutí	18
2.1.2 Rekrystalizační žihání	18
2.1.3 Žihání na měkko.....	18
2.1.4 Difúzní (homogenizační) žihání.....	18
2.1.5 Normalizační žihání	19
2.1.6 Izotermické žihání	19
2.2 KALENÍ	19
2.2.1 Kalicí prostředí.....	20
2.2.2 Techniky martenzitického kalení	21
2.2.3 Techniky bainitického kalení	22
2.3 POPOUŠTĚNÍ.....	23
2.4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	24
2.4.1 Cementování	24
2.4.2 Nitridování	26
2.5 ZAŘÍZENÍ NA TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ.....	26
2.5.1 Ohřívací pece	26
2.5.2 Chladicí zařízení.....	27
3 ZKOUŠKY TVRDOSTI	28
3.1 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	29
3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Martense	29
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella	30
3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	31
3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	33
3.1.5 Zkoušky mikrotvrdomosti	34
3.1.6 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI	35
3.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	37
3.2.1 Měření kladívkem Poldi (porovnávací metoda).....	37
3.2.2 Zkouška podle Shorea (odrazová metoda)	37

II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
5 VOLBA A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	40
5.1 MATERIÁLY POUŽITÉ NA VÝROBU VZORKŮ	40
5.1.1 Ocel EN 1.7102 (54SiCr6)	40
5.1.2 Ocel EN 1.8161 (58CrV4)	40
5.1.3 Ocel EN 1.1121 (Ck10)	41
5.2 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ	41
5.2.1 Parametry tepelného zpracování	42
5.3 ZALISOVÁNÍ VZORKŮ	43
5.4 LEŠTĚNÍ VZORKŮ	43
6 MĚŘENÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	45
6.1 MĚŘENÍ TVRDOSTI DLE ROCKWELLA	45
6.1.1 Postup měření	45
6.2 MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU DSI	46
6.2.1 Postup měření	46
6.2.2 Fáze a strukturní složky	47
7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	48
7.1 OCEL EN 1.7102	48
7.1.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRC)	48
7.1.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI	49
7.2 OCEL EN 1.8161	52
7.2.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRC)	52
7.2.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI	53
7.3 OCEL EN 1.1121	56
7.3.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRA)	57
7.3.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI	58
8 DISKUZE VÝSLEDKŮ	61
8.1 TVRDOST DLE ROCKWELLA	61
8.2 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	62
8.2.1 Vtisková (H_{IT}) a Vickersova (HV_{IT}) tvrdost	62
8.2.2 Vtiskový modul (E_{IT})	64
ZÁVĚR	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
SEZNAM OBRÁZKŮ	71
SEZNAM TABULEK	73
SEZNAM PŘÍLOH	74

ÚVOD

K odhadu mechanických vlastností konstrukčních materiálů se často využívají zkoušky tvrdosti. Tvrdost je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu, která vyjadřuje odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu daného materiálu. Výsledná hodnota tvrdosti je ovlivněna zkušebními podmínkami. Nežádoucím jevem při růstu tvrdosti materiálu, je růst jeho křehkosti. Hodnota tvrdosti je důležitá zejména u ocelí, u kterých výrazně ovlivňuje odolnost proti opotřebení. Ocel je slitinou železa s obsahem uhlíku nižším než 2 %. Nejrozšířenější je konstrukční ocel, menší část pak zaujímá ocel nástrojová.

Tvrdost oceli lze ovlivnit tepelným zpracováním. 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. Pokud měníme i chemické složení povrchu oceli, pak jde o chemicko-tepelné zpracování. V teoretické části jsou popsány jedny z nejčastěji využívaných způsobů tepelného zpracování, které budu následně uplatňovat v praktické části bakalářské práce.

Jednotlivé druhy zkoušek tvrdosti využívají rozdílné způsoby měření. Avšak jejich společnou vlastností je to, že jde o zkoušky nedestruktivní. Proto je lze využít k měření i na již hotových výrobcích, aniž by došlo k jejich znehodnocení. Princip těchto zkoušek spočívá ve vtlačování zkušební tělesa do povrchu zkoušeného materiálu. Aby zkušební těleso nepodléhalo plastickým deformacím, musí mít dostatečnou tvrdost. Jeho tvar závisí na zvolené metodě měření. Nejčastěji jde o kuličku, kužel nebo čtyřboký jehlan. Zkoušky tvrdosti se dělí na statické a dynamické. V této bakalářské práci se budu zabývat převážně statickými zkouškami tvrdosti. Ty lze podle velikosti působící síly využít k měření makrotvrdosti nebo mikrotvrdosti. Jedna z nejvyužívanějších zkoušek je například zkouška podle Brinella, Vickerse nebo Rockwella. Mezi moderní metody měření pak patří metoda DSI, která využívá spojení počítače s měřícím přístrojem.

Předmětem praktické části je vyhodnocení vlivu tepelného zpracování na vybrané druhy oceli. V této části je popsána příprava zkušebních vzorků a použité zkoušky tvrdosti. Naměřené hodnoty jsou následně graficky zpracovány a vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA

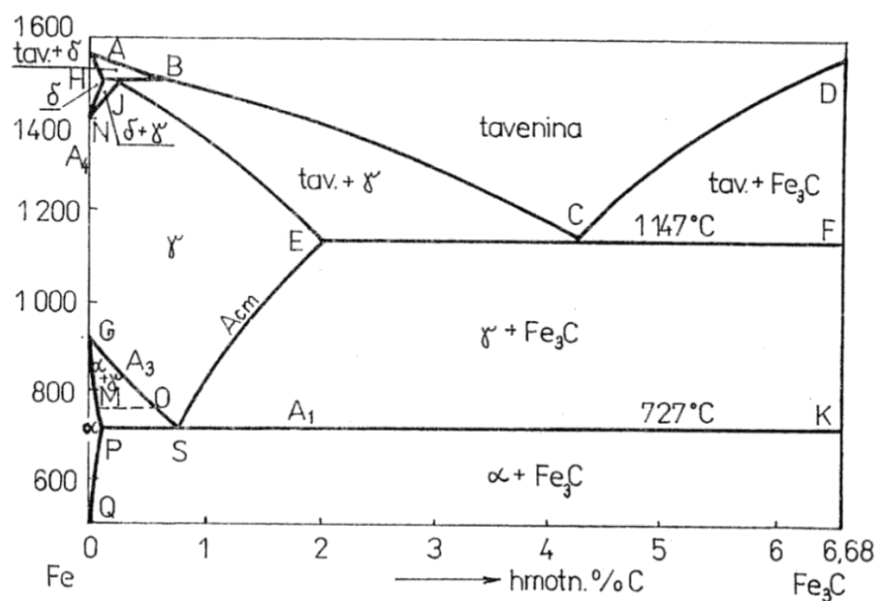
Technické slitiny železa jsou pro své velké uplatnění ve většině průmyslových odvětví nejvíce využívaný konstrukční materiál. Toto uplatnění je dáno jejich rozmanitými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Nejvýznamnější příměsí slitin železa je uhlík, který podstatně ovlivňuje jejich vlastnosti. Slitiny železa obsahují i další prvky jako např. mangan, fosfor, křemík nebo síra. Ve slitinách železa s uhlíkem se uhlík může vyskytovat:

- v tuhém roztoku,
- ve formě intermediální fáze se železem (Fe_3C),
- ve formě grafitu (C).

Podle množství uhlíku dělíme slitiny železa do tří skupin:

- téměř čisté železo o velmi malém obsahu uhlíku,
- ocel s obsahem uhlíku nižším než 2 %,
- surové železo a litiny s obsahem uhlíku nad 2 %. [1, 2]

Vlastnosti technického železa určujeme z rovnovážného diagramu železa s uhlíkem. Protože se ve slitinách železa vyskytuje uhlík jednak chemicky vázaný jako cementit a jednak volný jako grafit, musíme uvažovat jak metastabilní soustavu železo – karbid železa tak i stabilní soustavu železo – grafit. Podle metastabilní soustavy tuhnou a chladnou převážně oceli a podle stabilní soustavy se sledují změny při tuhnutí a chladnutí litin. Rovnovázný diagram metastabilní soustavy Fe – Fe_3C je uveden na obrázku 1. [1, 2]



Obr. 1 Diagram metastabilní soustavy Fe – Fe_3C s fázovým popisem [2]

V diagramu lze vidět fázové poměry v termodynamické soustavě o složkách Fe a Fe₃C. Sleduje se koncentrační rozmezí obsahu uhlíku od 0 % do 6,68 %. V diagramu se vyskytují čtyři typy tuhých fází:

- **α – ferit**
Intersticiální tuhý roztok uhlíku v α Fe, s maximální rozpustností uhlíku 0,02 hm. %, při eutektoidní teplotě 727 °C.
- **γ – austenit**
Intersticiální tuhý roztok uhlíku v γ Fe, s maximální rozpustností uhlíku 2,11 hm. %, při eutektické teplotě 1147 °C.
- **δ – ferit**
Intersticiální tuhý roztok uhlíku v δ Fe, s maximální rozpustností uhlíku 0,10 hm. %, při teplotě 1495 °C.
- **Fe₃C – cementit**
Tato intersticiální sloučenina obsahuje 6,68 hm. % uhlíku a je velmi tvrdá a křehká.

[3]

1.1 Přehled ocelí ke tváření

Oceli ke tváření jsou slitiny železa, ve kterých je hmotnostní podíl železa větší než kteréhokoliv jiného prvku, a které zároveň obsahují méně než 2 % uhlíku. Tyto oceli jsou dodávány ve formě ingotů, které se dále zpracovávají. Podle chemického složení a jakosti se dělí na oceli nelegované a legované. Největší podíl z tvářených ocelí tvoří konstrukční oceli, zbytek pak nástrojové oceli. [1]



Obr. 2 Schéma rozdělení ocelí ke tváření [1]

1.1.1 Nelegované oceli

U nelegovaných ocelí obsahy jednotlivých prvků, uvedených v tabulce 1, nikdy nedosahují mezních hodnot. U vícevrstevných plátovaných výrobků je rozhodující složení základního materiálu. [1]

Nelegované oceli se dělí do tří hlavních skupin:

- **Oceli obvyklých jakostí**

Tyto oceli nejsou určeny pro tepelné zpracování. Nemají předepsány žádné obsahy legovacích prvků, s výjimkou křemíku a manganu.

- **Nelegované jakostní oceli**

U nelegovaných jakostních ocelí není předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování. Na tyto oceli jsou kladeny, oproti ocelím obvyklých jakostí, vyšší požadavky při namáhání, kterému jsou vystaveny.

- **Nelegované ušlechtilé oceli**

Na rozdíl od jakostních ocelí vykazují vyšší stupeň čistoty. Převážně jsou určeny pro zušlechťování a povrchové kalení. Tyto oceli mají přesně stanovené chemické složení. [1]

1.1.2 Legované oceli

V případě legovaných ocelí obsahy jednotlivých prvků uvedených v tabulce 1 minimálně v jednom případě dosahují nebo překračují mezní hodnoty. Legování se provádí převážně za účelem zlepšení mechanických vlastností, korozní odolnosti a technologických vlastností. Rozdělení legovaných ocelí:

- **Legované jakostní oceli**

Tyto oceli nejsou vhodné pro tepelné zpracování. Využívají se např. pro ocelové konstrukce, kolejnice a válcované výrobky.

- **Legované ušlechtilé oceli**

U těchto ocelí můžeme přesným stanovením chemického složení a zvláštními podmínkami výroby dosáhnout požadovaných zpracovacích a užitných vlastností. [1]

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

Prvek	Mezní obsah %	Prvek	Mezní obsah %
Al hliník	0,10	B bór	0,0008
Bi bismut	0,10	Co kobalt	0,10
Cr chrom	0,3	Cu měď	0,40
La lanthanidy	0,05	Mn mangan	1,65
Mo molybden	0,08	Nb niob	0,06
Ni nikl	0,30	Pb olovo	0,40
Se selen	0,10	Si křemík	0,50
Te telur	0,10	Ti titan	0,05
V vanad	0,10	W wolfram	0,10
Zr zirkonium	0,05	ostatní vždy	0,05

1.2 Značení ocelí podle ČSN EN

Oceli se podle evropské normy ČSN EN 10027-1 mohou označovat podle jejich použití, mechanických a fyzikálních vlastností nebo na základě chemického složení. Druhou možností je číselné značení podle evropské normy ČSN EN 10027-2. [4]

1.2.1 Značení podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností

Každá značka oceli je tvořena třemi skupinami znaků, podle následujícího schématu:

1. skup.	2. skup.	3. a. skup.	3. b. skup.
X	nnn(n)	X(X)	X(n)

První skupina obsahuje vždy velké písmeno, které může být podle způsobu použití oceli následující:

- S – konstrukční oceli,
- P – oceli pro tlakové nádoby,
- E – oceli pro strojní součásti,
- L – oceli na potrubí,
- B – oceli pro výztuž betonu,
- Y – oceli pro předpínací výztuž do betonu,
- R – oceli pro kolejnice,
- D – ploché výrobky z měkkých ocelí k tváření za studena,
- H – výrobky válcované za studena z ocelí k tažení,
- T – obalové plechy,
- M – plechy a pásy pro elektrotechniku. [1, 4]

Ve druhé skupině se nejčastěji udává mez kluzu nebo mez pevnosti materiálu v MPa. U některých ocelí se udává tvrdost materiálu. U plochých výrobků z měkkých ocelí ke tváření za studena se označuje způsob tváření. [1, 4]

Ve 3. a. skupině jsou udány dodatečné vlastnosti materiálu. Udává se například chemické složení, houževnatost, způsob výroby nebo tepelné zpracování. Ve 3. b. skupině je vyjádřeno zejména použití oceli. [1, 4]

1.2.2 Značení podle chemického složení

a) Nelegované oceli s obsahem Mn do 1 %:

Značka oceli je složená z písmene *C* a dvojčíslí, které udává stonásobek předepsané střední hodnoty obsahu uhlíku. Další symbol označuje bližší vlastnosti nebo použití oceli. [4]

b) Nelegované oceli s obsahem Mn nad 1 %:

Značka oceli je složená z dvojčíslí, které udává stonásobek střední hodnoty obsahu uhlíku. Další symboly jsou chemické značky legujících prvků seřazených podle klesajících obsahů a střední obsahy příslušných prvků. [4]

c) Legované oceli s obsahem alespoň jednoho legujícího prvku nad 5 %:

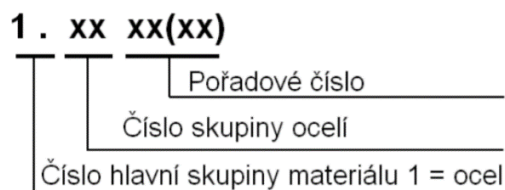
U této oceli se značka skládá z písmene *X*. Následuje číslo udávající stonásobek obsahu uhlíku. Dalšími symboly jsou značky legujících prvků a čísla udávající střední obsah legujících prvků. [4]

d) Rychlořezné oceli:

Značka oceli se skládá z písmen *HS*. Za těmito písmeny jsou uvedeny obsahy legujících prvků v následujícím pořadí: *W-Mo-V-Co*. [4]

1.2.3 Číselné značení ocelí

Číselné značení oceli se skládá z číslice *1*, za kterou následuje tečka a další dvě dvojčíslí. První dvojčíslí udává číslo skupiny materiálu, další dvojčíslí pak značí pořadové číslo oceli ve skupině. [1]

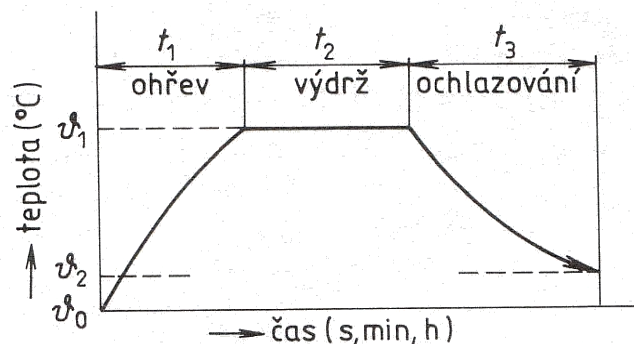


Obr. 3 Číselné značení ocelí podle EN [5]

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ

Při tepelném zpracování získáváme požadovanou strukturu materiálu pomocí fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu. Tím dosáhneme potřebných mechanických a technologických vlastností výrobku. Vhodně zvolené tepelné zpracování nám umožňuje vyrobit trvanlivější, spolehlivější a někdy i levnější výrobek. Avšak musíme počítat i s finančními náklady na spotřebu energie při daném zpracování. [6]

Princip tepelného zpracování spočívá v ohřevu materiálu na danou teplotu, výdrži na této teplotě a ochlazování určitou rychlostí na konečnou teplotu. [7]



Obr. 4 Schéma průběhu tepelného zpracování [8]

Ohřev a ochlazování materiálu jsou jedny z nejdůležitějších operací tepelného zpracování. Tyto operace výrazně ovlivňují konečnou kvalitu výrobku, proto je velmi důležité vhodně zvolit jejich režim. Často se celkový ohřev skládá z více fází, protože musí obsahovat vyrovnávací fáze a je nutné měnit jeho rychlost. Režimy ohřevu výrobku můžeme rozdělit do pěti skupin:

- pomalý** – materiál je vložen do studené pece a postupně ohříván. U tohoto režimu ohřevu vznikají malé rozdíly teplot mezi povrchem a jádrem výrobku.
- normální** – materiál je vložen do vyhřáté pece a postupně ohříván. V materiálu vzniká vyšší teplotní pnutí.
- zrychlený** – využívá se část tepelné kapacity pece vyhřáté na podstatně vyšší teplotu, než je předepsaná teplota ohřevu materiálu. Po vložení materiálu do pece vznikají velké teplotní rozdíly mezi jádrem a povrchem materiálu.
- rychlý** – pec je neustále vyhřívána na teplotu, která je podstatně vyšší, než je teplota požadovaná. Materiál se vyjme z pece po dosažení předepsané teploty.

- e) **stupňovitý** – materiál se přehřeje v jednom prostředí a poté se přesune do prostředí s vyšší teplotou. Tento druh ohřevu umožňuje snížit napětí na minimum a tím zamezit deformacím. [7]

Po ohřátí výrobku na určitou teplotu je důležité setrvání na této teplotě, z důvodu prohřátí do požadovaného průřezu a průběhu příslušných reakcí. Pokud při zvýšené teplotě působí na součást vhodné prostředí, které mění chemické složení povrchu materiálu, pak mluvíme o chemicko-tepelném zpracování. [7]

2.1 Žihání

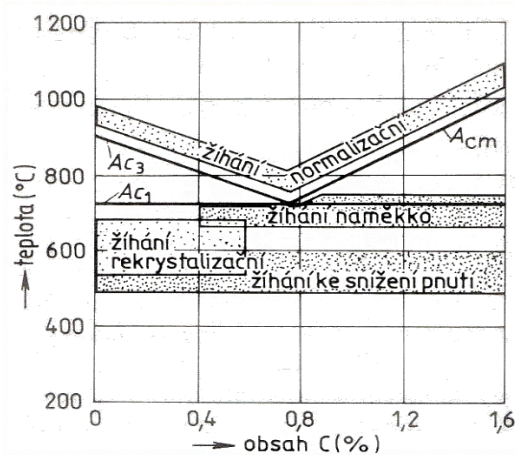
Proces žihání se skládá z rovnoměrného ohřevu materiálu na určitou teplotu, výdrži na této teplotě a následném pomalém ochlazování. Tento proces slouží k dosažení určité úrovně rovnovážného stavu materiálu. Základní způsoby žihání se podle probíhajících přeměn dělí na: [7]

a) žihání bez překrytalizace

U žihání bez překrytalizace teplota žihání obvykle nepřekračuje kritickou teplotu A_{c1} . Ve zpracovávané oceli dochází pouze ke změnám ve struktuře. Fázové složení oceli se nemění. Do této skupiny se řadí žihání ke snížení pnutí, rekrytalizační žihání a žihání na měkko.

b) žihání s překrytalizací

U žihání s překrytalizací teplota žihání překračuje kritickou teplotu A_{c1} . Do této skupiny patří homogenizační, normalizační a izotermické žihání. [2]



Obr. 5 Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu Fe – Fe₃C [8]

2.1.1 Žihání ke snížení pnutí

Tento způsob žihání se využívá ke snížení vnitřních pnutí v materiálu. Tyto vnitřní pnutí mohou vznikat při tváření za studena, svařování nebo jako důsledek rychlého a nestejnomyrného ochlazování. Teplota žihání se pohybuje v rozmezí 500 až 650 °C. Doba výdrže na dané teplotě závisí na teplotě ohřevu, nejčastěji se pohybuje v řádu několika hodin. Materiál je v peci pomalu ochlazován na teplotu cca 200 °C s a poté dochlazen na vzduchu. Tímto způsobem ochlazování materiálu zabráníme vzniku nových vnitřních pnutí. [7]

2.1.2 Rekrystalizační žihání

Rekrystalizační žihání se využívá k obnově tvárných vlastností oceli a odstranění důsledků předchozího tváření za studena. Při žihání dojde k opravě deformovaných zrn a tím k obnově struktury materiálu. Teplota žihání se volí, v závislosti na druhu oceli a předchozím tváření, v rozmezí 550 až 700 °C. Doba výdrže na zvolené teplotě bývá v rozmezí od několika desítek sekund až po několik hodin. [9, 7]

2.1.3 Žihání na měkko

Tento způsob žihání se využívá k výrobě struktury, která je tvořena zrnitým perlitem. Tato struktura je měkká a snadno deformovatelná. Zrnitá struktura perlitu je vhodná pro oceli s obsahem uhlíku nad 0,5 %. Dalším cílem tohoto žihání je u materiálu, který byl zpracováván kalením, vyrobit jednotnou jemnou strukturu s jemně rozptýleným uhlíkem. Způsob žihání na měkko spočívá v ohřátí materiálu na teplotu pohybující se blízko kritické teploty A_{c1} a výdrži několik hodin na této teplotě. Materiál je pomalu ochlazován v peci na určitou teplotu a následně chlazen na vzduchu. [9]

2.1.4 Difúzní (homogenizační) žihání

Cílem difúzního žihání je eliminace nehomogenního chemického složení, které se objevuje během krystalizace slitin železa. Provádí se v rozsahu teplot 1100 až 1300 °C. Tímto zpracováním klesá tvrdost materiálu. Úspěšnost difúzního žihání do značné míry závisí na čistotě oceli, z toho důvodu se obvykle používá ke zlepšení vlastností středně čistých ocelí. [9]

2.1.5 Normalizační žihání

Transformace, která se odehrává během normalizačního žihání, vede ke vzniku jemnozrnné a rovnoměrné struktury. Odstraněním hrubozrnné struktury získá materiál lepší mechanické vlastnosti. Optimální teplota ohřevu je určena obsahem uhlíku v oceli. Obvykle jde o teplotu 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} (A_{cm}). Následuje krátká výdrž na této teplotě. V případě normalizačního žihání probíhá ochlazování materiálu na vzduchu, proto je důležité počítat se vznikem vnitřních pnutí. Pro odstranění těchto vnitřních pnutí se materiál dále zpracovává popouštěním nebo žiháním při teplotách 500 až 600 °C. [7, 9]

2.1.6 Izotermické žihání

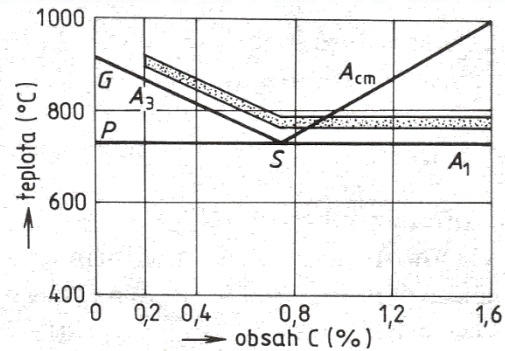
Izotermické žihání se používá ke zlepšení obrobiteľnosti a snížení pevnosti oceli. Materiál je ohříván na teplotu 30 až 50 °C nad A_{c3} (A_{cm}). Při této teplotě dochází k austenizaci oceli. Následuje zrychlené ochlazování na teplotu pod A_{c1} , výdrž na této teplotě po dobu potřebnou k izotermické přeměně austenitu a další ochlazování. Výsledná tvrdost oceli je dána výší teploty izotermické přeměny. Tento druh žihání je vhodný pouze pro výrobky s malými průřezy. [7]

2.2 Kalení

Kalení se využívá ke zvýšení tvrdosti materiálu. Je to tepelné zpracování, při kterém se materiál ohřeje na austenitizační teplotu. U padeutektoidních ocelí jde o teplotu nad A_{c3} a u nadeutektoidních ocelí je to teplota nad A_{c1} . Následuje výdrž na této teplotě a ochlazování kritickou rychlostí. Velkou rychlostí ochlazování je potlačen vznik feritu a perlitu. Zachovaný nestabilní austenit se následně při teplotách pod 500 °C přemění na bainit nebo martenzit. [8]

- Martenzit – přesycený nerovnovážený metastabilní tuhý roztok uhlíku v železe α
- Bainit – nerovnovážná nelamelární směs feritu a karbidů [7]

Tvrdost martenzitu stoupá s růstem obsahu uhlíku, ale zároveň roste i jeho křehkost. Proto se kalené oceli dále zpracovávají popouštěním. Pouze nízkouhlíkové oceli mají po kalení dobrou houževnatost, proto tyto oceli není nutné dále zpracovávat. Oceli s obsahem uhlíku menším než 0,2 % považujeme za nekalitelné. [8, 10]

Obr. 6 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe – Fe₃C [8]

2.2.1 Kalící prostředí

Všechny druhy kalících prostředí musí odebírat teplo z části nebo z celého průřezu výrobku větší rychlostí, než je kritická rychlost ochlazování daného materiálu. Kalící médium musí dále splňovat:

- odolnost proti tepelnému rozkladu a oxidaci,
- snadnou odstranitelnost z povrchů kalených materiálů,
- musí vykazovat správnou kinetiku chlazení v celém rozsahu teplot,
- nesmí intereagovat s povrchy kalených obrobků. [8, 10]

Většinu kalících prostředí tvoří kapaliny, ty se dělí do tří podskupin:

a) Voda jako kalící médium

Voda je velmi účinným kalícím prostředím, ale ochlazování materiálu ve vodě neprobíhá plynule. Jedním z důvodů je vznik parního polštáře kolem ochlazovaného materiálu, ale ten je možné eliminovat pohybem vody. Další nevýhodou je, že ocelový materiál při kontaktu s vodou snadno koroduje a při chladnutí dochází ke vzniku značných vnitřních pnutí.

b) Olej jako kalící médium

Minerální oleje patří k nejběžněji používaným kalícím prostředím. Oproti vodě je to mnohem mírnější kalící prostředí. Maximální ochlazovací rychlost je v oblasti martenzitické přeměny asi 10× menší. Nevýhodou je degradace oleje v důsledku oxidace, uhelnatění a znečistění. Proto je nutné olej pravidelně měnit.

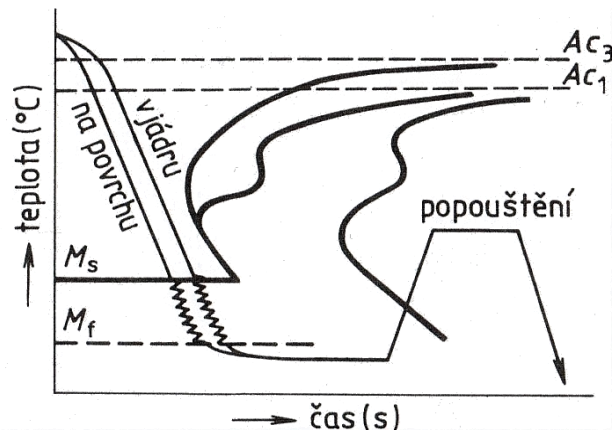
c) Roztavené solné a kovové lázně jako kalící médium

Velkou výhodou je plynulá rychlost ochlazování materiálu. Při tomto způsobu ochlazování nedochází ke vzniku velkých vnitřních pnutí. [8, 10]

2.2.2 Techniky martenzického kalení

a) Nepřetržitě kalení

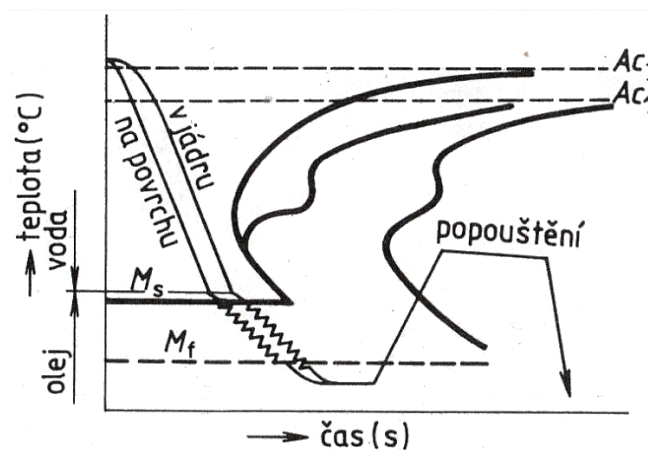
Materiál je ohříván na teplotu vyšší než A_{c3} (A_{c1}). Následuje výdrž na této teplotě k dosažení homogenního austenitu. Kalícím prostředím je nejčastěji voda, olej a u samokalitelných ocelí i vzduch. [8]



Obr. 7 Schéma průběhu nepřetržitého kalení [8]

b) Lomené kalení

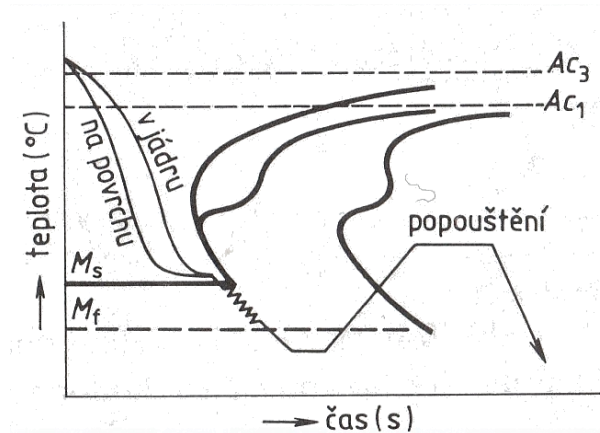
U lomeného kalení je materiál postupně ochlazován ve dvou studených lázních. Materiál se vyjme z jednoho kalícího prostředí v ten moment, kdy je jeho teplota lehce nad teplotou martenzické přeměny (M_s) dané oceli, následně se dochládí ve druhém kalícím prostředí s menším ochlazovacím účinkem. Tímto způsobem kalení vzniká menší vnitřní pnutí při ochlazování materiálu. [8]



Obr. 8 Schéma průběhu lomeného kalení [8]

c) Termální kalení

Termálním kalením se snižuje pnutí a deformace v kaleném materiálu. Materiál ohřátý na austenitizační teplotu je chlazen v solné lázni na teplotu asi 20 až 30 °C nad M_s . Následuje výdrž na této teplotě, aniž by došlo k bainitickému rozpadu. Tím dojde k vyrovnání teplot v celém průřezu materiálu. Poté je materiál dochlazen na vzduchu. [8]



Obr. 9 Schéma průběhu termálního kalení [8]

d) Kalení se zmrazováním

Používá se ihned po martenzitickém kalení. Dojde k ochlazení oceli, jejíž teplota M_f leží pod 0 °C, na teplotu pod bodem mrazu. Tímto zpracováním chceme dosáhnout co největšího rozpadu zbytkového austenitu na martenzit. [8]

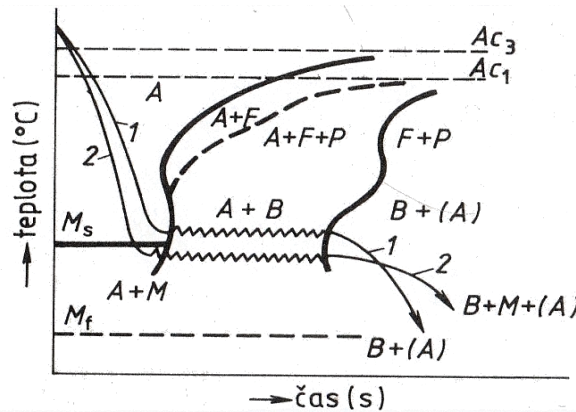
2.2.3 Techniky bainitického kalení

a) Izotermické bainitické kalení

Izotermické bainitické kalení bylo vyvinuto na základě znalostí diagramů IRA. Dochází při něm k rozpadu nestabilního austenitu po ochlazení z austenitizační teploty v solných nebo kovových lázních. Po skončení izotermické přeměny se výrobek z lázně vyjme a ochladí na vzduchu. Zakalený materiál má vysokou vrubovou houževnatost a při kalení je téměř eliminováno nebezpečí vzniku trhlin a zbytkových pnutí. Tento způsob kalení je vhodný pro součásti středního a malého průřezu.

Izotermické kalení rozdělujeme podle teploty izotermické výdrže do dvou skupin:

- Izotermické zušlechťování – zakalená ocel se již dále nepopouští,
- Izotermické kalení – zakalená ocel se obvykle dále popouští. [7, 8]

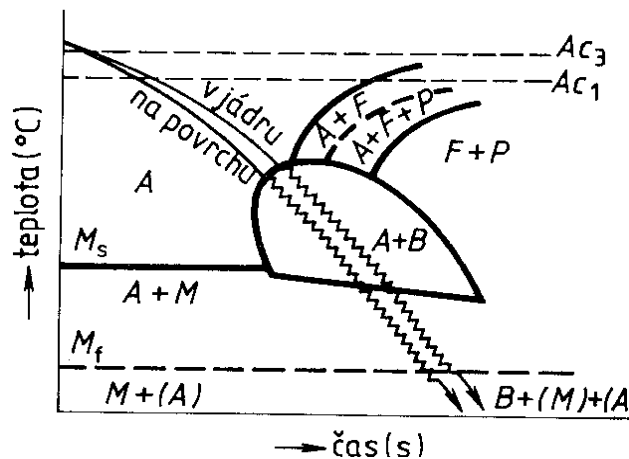


Obr. 10 Schéma průběhu izotermického kalení [8]

1 – izotermické zušlechťování, 2 – izotermické kalení

b) Nepřetržitě bainitické kalení

Tento druh kalení je možné použít pouze u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu ARA. Princip kalení spočívá v dostatečně rychlém a plynulém ochlazení, aby došlo k rozpadu austenitu na bainit, případně směs bainitu a martenzitu. Poté obvykle následuje popouštění. [8]



Obr. 11 Schéma průběhu nepřetržitého bainitického kalení [8]

2.3 Popouštění

Popouštění je tepelné zpracování kalených a normalizovaných ocelí, za účelem zlepšení houževnatosti, tažnosti a rozměrové stability. Materiál je ohříván na teplotu pod A_{c1} . Následuje výdrž na této teplotě, která u oceli slouží k tvorbě struktur bližších k rovnovážnému stavu a následném ochlazení oceli na teplotu okolí. [2]

V závislosti na teplotě ohřevu nejčastěji rozlišujeme čtyři fáze popouštění kalených ocelí:

- **První fáze popouštění** (do 200 °C) – V oceli dochází k rozpadu silně přesyceného tuhého roztoku martenzitu a vzniku popouštěného (kubického) martenzitu. Díky tomuto procesu výrazně klesne křehkost oceli.
- **Druhá fáze popouštění** (200 až 300 °C) – Probíhá rozpad zbytkového austenitu a vzniká struktura bainitického typu. Dojde ke zvětšení měrného objemu oceli.
- **Třetí fáze popouštění** (nad 250 °C) – Vzniká rovnovážný karbid železa Fe_3C . Nízkouhlíkový martenzit se mění v rovnovážný tuhý roztok α (ferit). Při vyšších teplotách v této fázi dochází k rozpuštění karbidických částic a vzniku sorbidu. V tomto stadiu popouštění klesá tvrdost oceli a roste její tvárnost a houževnatost.
- **Čtvrtá fáze popouštění** (nad 500 °C) – V této fázi dochází k postupnému hrubnutí částic cementitu, rekystalizaci a hrubnutí feritického zrna. Klesá tvrdost oceli a roste její houževnatost a plasticita. [2]

Jelikož množství strukturních změn vzniklých při popouštění, závisí na teplotě a době popouštění, dělíme jej na:

- nízkoteplotní popouštění (100 až 300 °C),
- vysokoteplotní popouštění (400 až 650 °C). [2]

S rostoucí teplotou klesá tvrdost a roste plasticita a houževnatost oceli. Účelem nízkoteplotního popouštění je snížení křehkosti, při zachování vysoké tvrdosti oceli. Tímto způsobem se nejčastěji zpracovávají nástrojové oceli. Vysokoteplotní popouštění se používá pro namáhané součásti z konstrukčních ocelí, na které jsou kladeny vysoké pevnostní požadavky. [2]

2.4 Chemicko-tepelné zpracování

Při chemicko-tepelném zpracování dochází ke změnám chemického složení povrchu oceli. Tyto změny se dosahují chemickým působením obklopujícího prostředí při zvýšené teplotě. Cílem tohoto zpracování je nejčastěji zvýšení tvrdosti povrchu oceli a zlepšení odolnosti proti opotřebení. [11]

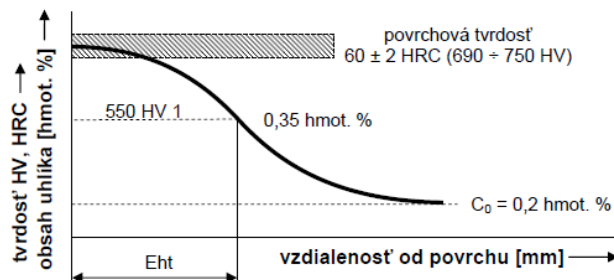
2.4.1 Cementování

Cementování se používá k získání vysoké tvrdosti povrchové vrstvy oceli a odolnosti proti opotřebení. Při tomto zpracování se povrch oceli nasycuje uhlíkem. Jádro materiálu si zachovává dobré houževnaté vlastnosti. Pro tento typ zpracování jsou vhodné oceli s obsahem

uhlíku do 0,2 hm. %. Cementační teplota se nejčastěji pohybuje v rozmezí 900 až 930 °C a hloubka nauhličené vrstvy je obvykle od 0,5 do 1,3 mm. [11]

Po nasycení povrchu uhlíkem následuje kalení, které výrazně zvýší tvrdost nauhličené vrstvy oceli. Poté se ocel popouští při nízkých teplotách (180 až 200 °C). [11]

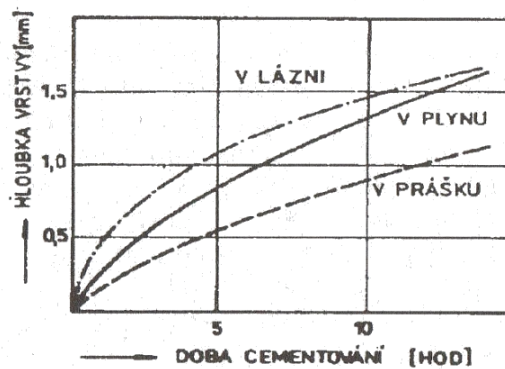
Efektivní hloubka cementační vrstvy (nauhličená a kalená vrstva) se definuje jako kolmá vzdálenost mezi povrchem a vrstvou, ve které má ocel tvrdost 550 HV1. Značí se E_{ht} a je vyjádřena v milimetrech. [11]



Obr. 12 Průběh tvrdosti a koncentrační profil uhlíku ve správně cementované, kalené a popouštěné oceli [11]

Cementování je možné provádět:

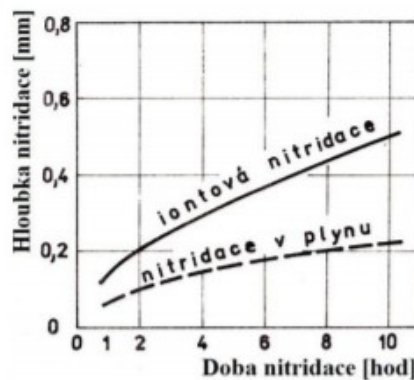
- v tuhém prostředí (v prášku),
- v plynném prostředí,
- v roztavených solích,
- při sníženém tlaku (ve vakuu),
- v plazmě. [11]



Obr. 13 Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [1]

2.4.2 Nitridování

Nitridování je chemicko-tepelné zpracování, při kterém se povrch oceli nasycuje dusíkem. Cílem je získat vysokou tvrdost povrchu při zachování dobré houževnatosti jádra. Požadované tvrdosti oceli se dosahuje už v průběhu nasycování povrchu dusíkem, bez nutnosti dalšího tepelného zpracování. Tloušťka vytvrzené vrstvy se obvykle pohybuje od 0,1 do 0,3 mm. Rychlost růstu povrchových vrstev je přibližně 0,01 mm za hodinu. Po tomto zpracování tvoří povrchovou vrstvu nitridy. Nitridování se uskutečňuje v širokém rozmezí teplot a nejčastěji se provádí v kapalném nebo plynném prostředí. Ale současnosti je nitridování v plynném prostředí, z důvodu vyšší efektivity, postupně nahrazováno iontovou nitridací. [11]



Obr. 14 Porovnání růstu vrstvy [12]

Pro nitridování jsou vhodné oceli s obsahem uhlíku od 0,3 do 0,4 hm. %, které se před nitridací obvykle zušlechťují. Teplota nitridování se volí přibližně o 30 °C nižší, než jaká byla teplota popouštění při zušlechťování oceli. [11]

2.5 Zařízení na tepelné zpracování ocelí

Pro dosažení kvalitních a reprodukovatelných výsledků tepelného zpracování je nutné zvolit vhodné technologické zařízení. Volba závisí na druhu tepelného zpracování, požadované přesnosti, velikosti a tvaru výrobku. [7]

2.5.1 Ohřívací pece

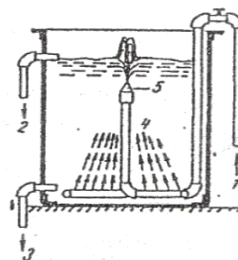
Zpracovávané výrobky se na předepsanou teplotu ohřívají v pecích. Tyto pece často slouží i k ochlazení výrobku potřebnou rychlostí. Konstrukce pece může být pouze jednoúčelová

nebo univerzální (pro různé druhy výrobků a tepelného zpracování). Pece se nejčastěji rozdělují podle:

- druhu použitého zdroje tepelné energie,
 - palivové,
 - elektrické.
- výše teploty,
 - nízkoteplotní (do 600 °C),
 - středně teplotní (od 600 °C do 1100 °C),
 - vysokoteplotní (nad 1100 °C).
- atmosféry v pecním prostoru,
 - s normální atmosférou (vzduch),
 - s řízenou atmosférou,
 - ve vakuu.
- technologického postupu.
 - popouštění,
 - žihání,
 - chemicko-tepelné zpracování. [7]

2.5.2 Chladicí zařízení

Součásti z ocelí kalitelných vzduchem jsou nejčastěji ochlazovány pomocí vzduchových vřidel. Ochlazovací schopnost je v tomto případě závislá na rychlosti proudění vzduchu. Pro kalení materiálu ve vodě, oleji a solných lázních se obvykle využívají kalící nádrže. Tvar nádrže závisí na typu pece nebo na tvaru kalené součásti. Ke zvýšení efektivity ochlazování se nádrže vybavují cirkulací chladicí kapaliny. Dále se materiál může ochlazovat pomocí vodních sprch a u tvarově složitých dílů se využívají kalící lisy. [7]



Obr. 15 Vodní lázeň [7]

1 – *přívod vody*, 2 – *přepad*, 3 – *výpust'*, 4 – *vtok vody*, 5 - *vřídlo*

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Zkoušky tvrdosti slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu a jsou pro svou jednoduchost velmi rozšířené. Tvrdost můžeme měřit i na již hotových výrobcích, aniž by došlo k jejich znehodnocení. [13]

- **Tvrdost** – odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu. Tvrdost není fyzikálně definovatelná veličina, protože její hodnota je závislá na komplexních vlastnostech povrchu zkoušeného materiálu a na zkušebních podmínkách. Například měřenou tvrdost budou při vnikacích zkouškách ovlivňovat:
 - pružné a plastické vlastnosti zkoušeného materiálu,
 - rozměry, tvar, tvrdost a modul pružnosti materiálu vnikacího tělesa,
 - velikost síly působící na vnikací těleso,
 - tření mezi vnikacím tělesem a zkoušeným materiálem,
 - zkušební teplota,
 - vzdálenost mezi středem vtisku a okrajem zkušebního tělesa,
 - doba působení zatížení a rychlost zatěžování.

Z toho důvodu můžeme na jednom materiálu naměřit tolik hodnot tvrdosti, kolik měřících metod použijeme. [14, 15]

Statické zkoušky tvrdosti se podle velikosti síly působící na materiál dělí na:

- zkoušky makrotvrdosti,
- zkoušky mikrotvrdosti. [14]

Tab. 2 Rozdělení zkoušek tvrdosti [14]

Zkoušky makro- tvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martens
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
		Elastické odrazové	Porovnávací metoda
			Shoreho metoda
Kyvadlová metoda			
Zkoušky mikro- tvrdosti	Statické	Vnikací	Metoda Vickers

3.1 Statické zkoušky tvrdosti

U statických zkoušek tvrdosti je vnikací těleso vtlačováno plynule narůstající silou do zkoušeného materiálu. Tím dojde k narušení jeho povrchu. Výsledné rozměry vzniklého vtisku nebo vrypu vnikacího tělesa, slouží k určení tvrdosti povrchu materiálu. [14]

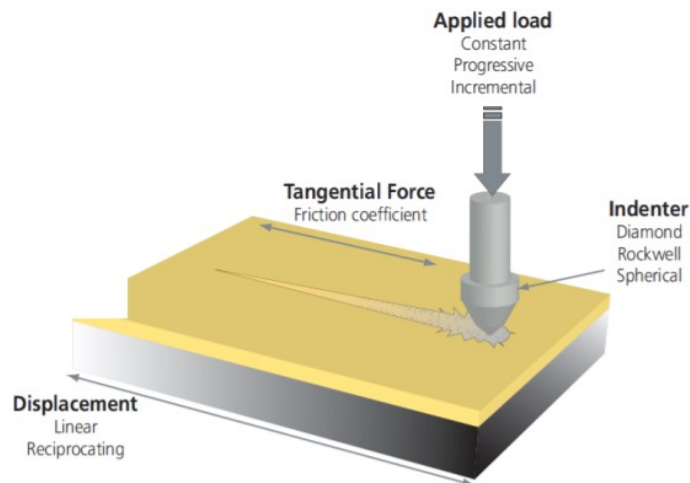
Vnikací těleso musí mít co největší tvrdost a mez pružnosti. Pro zkoušení kalených ocelí a tvrzených litin je obvykle vnikací těleso z diamantu. Pouze při zkoušení materiálů s nižší tvrdostí, je možné použít vnikací těleso ze slinutého karbidu nebo kalené oceli. [14]

3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Martense

Zkouška podle Martense je vrypová zkouška tvrdosti. Tato zkouška není v praxi příliš využívána. [14]

Princip zkoušky:

Po vyhlazené ploše materiálu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90 °. Kužel je zatěžován měnitelnou silou. Tím se vytvoří na povrchu zkoušeného materiálu vryp. Hodnota tvrdosti je velikost zatížení, při kterém se vytvoří na povrchu zkoušeného materiálu vryp o šířce 0,01 mm. [14]



Obr. 16 Vrypová zkouška [16]

3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkouška podle Brinella je vnikací zkouška tvrdosti. Autorem zkoušky je J. A. Brinell. Využívá se pro zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů. [14]

Tato zkouška je vyjádřena normou **ISO 6506**. [6]

Princip zkoušky:

Kulička o průměru D vyrobená z kalené oceli nebo ze slinutých karbidů, je po určitou dobu kolmo vlačována silou F do povrchu zkoušeného materiálu. Po odlehčení zatížení změříme dva na sebe kolmé průměry vtisku a určíme jejich aritmetický průměr d . Výsledná tvrdost je definována poměrem zatížení F k ploše kulovitého vtisku A a stanoví se na základě následujícího vztahu: [6]

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

Plocha vtisku se vypočítá podle vztahu:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (2)$$

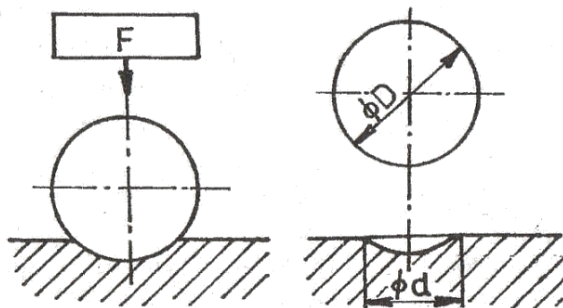
Po dosazení získáme konečný vztah pro výpočet tvrdosti podle Brinella:

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (\sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

kde: F – zátěžná síla [N]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku [mm]



Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Brinella [14]

V praxi se uvedený vzorec nevyužívá pro každé jednotlivé měření, protože k určení hodnoty tvrdosti můžeme využít i tabulky. Tabulky obsahují hodnotu tvrdosti pro všechny standardizované průměry kuliček a zkušební síly. [6]

Zkušební podmínky:

Naměřené hodnoty tvrdosti Brinellovou metodou závisí na zvolených podmínkách měření. Z toho důvodu není možné porovnávat naměřené hodnoty tvrdosti různých materiálů, při použití rozdílných podmínek měření. Podmínky měření ovlivňuje:

a) Průměr kuličky D

Při zkoušce se používají kuličky o průměrech $D = 10; 5; 2,5; a 1 \text{ mm}$. Průměr se volí tak, aby deformovaná oblast pod vtlačeným tělesem nebyla omezena tloušťkou zkoušeného předmětu. Dále musí být zachována určitá vzdálenost mezi středem vtisku vnikajícího tělesa a okrajem zkoušeného předmětu.

b) Doba působení síly F

Doba zatížení se u slitin železa volí v rozsahu 10 až 15 sekund.

c) Velikost zatěžující síly F

Hodnota tvrdosti se mění v závislosti na velikosti působící síly F . Z toho důvodu, pokud na jenom materiálu měříme při konstantním průměru kuličky tvrdost s různou zatěžující silou F , budou výsledné hodnoty rozdílné.

d) Rychlost růstu zatěžující síly F

Rychlost růstu zatížení ovlivňuje výsledek měření až tehdy, když překročí určitou hodnotu, při které se vlivem rychlosti zvýší odpor kovu proti plastické deformaci. [15]

Označení tvrdosti podle Brinella:

Tvrdost měřená při podmínkách $D = 10 \text{ mm}$, $F = 29\,430 \text{ N}$ a době zatížení $t = 10\text{-}15$ sekund, se značí pouze značkou *HBS* nebo *HBW*. Značka *HBS* se používá pro kuličku z kalené oceli a značka *HBW* pro kuličku ze slinutého karbidu. Pokud jsou podmínky měření jiné, musíme za značku *HBS* (*HBW*) doplnit jednotlivé podmínky měření. [15]

3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je založená na stejném principu jako Brinellova metoda, ale její výhodou je, že je vhodná pro testování téměř všech kovů. [15]

Tato zkouška je vyjádřena normou **ISO 6507**. [6]

Princip zkoušky:

Do povrchu zkoušeného materiálu je silou F kolmo vtlačován diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Po odlehčení zatížení změříme délku úhlopříček, ze kterých vypočítáme aritmetický průměr d . Výsledná hodnota tvrdosti je definována jako poměr velikosti síly F k ploše vtisku A . [6, 17]

$$HV = \frac{0,102 \cdot F}{A} \quad (4)$$

Plocha vtisku se vypočítá podle vztahu:

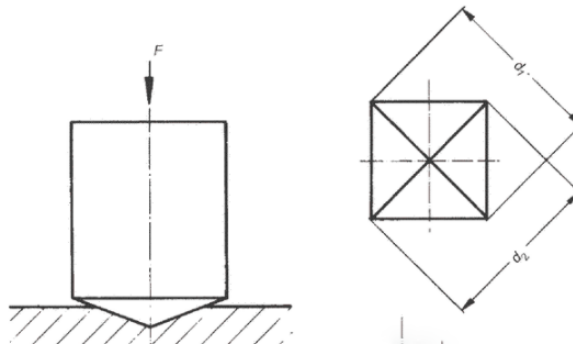
$$A = \frac{d^2}{1,854} \quad (5)$$

Výsledný vztah pro výpočet tvrdosti:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} \quad (6)$$

Kde: F – zátěžná síla [N]

d – aritmetický průměr délky úhlopříček [mm]



Obr. 18 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [6]

Zkušební podmínky:

V určitém rozsahu zatěžujících sil nezávisí výsledky tvrdosti na velikosti zatěžující síly. Pro slitiny železa se v praxi používají síly 49 N, 98 N, 196 N, 294 N, 490 N a 980 N. Zkušební síla musí vzrůst z nulové hodnoty na konečnou hodnotu zatížení za 2 až 8 sekund a doba působení této síly obvykle činí 10 až 15 sekund. Tloušťka zkoušeného předmětu musí být nejméně jeden a půl násobkem úhlopříčky d a vzdálenost středu vtisku od okraje zkoušeného předmětu musí být minimálně $2,5 d$. Povrch zkoušeného předmětu je často nutné upravit broušením. Úhlopříčky vtisku se měří pomocí mikroskopu. [14, 6, 17]

Označení tvrdosti podle Vickerse:

Tvrdot měřenou při zatěžující síle $F = 294 \text{ N}$ a době působení síly $t = 10\text{-}15 \text{ s}$ značíme značkou *HV*. Pokud jsou podmínky měření jiné, musíme za značku *HV* doplnit jednotlivé podmínky měření. [14]

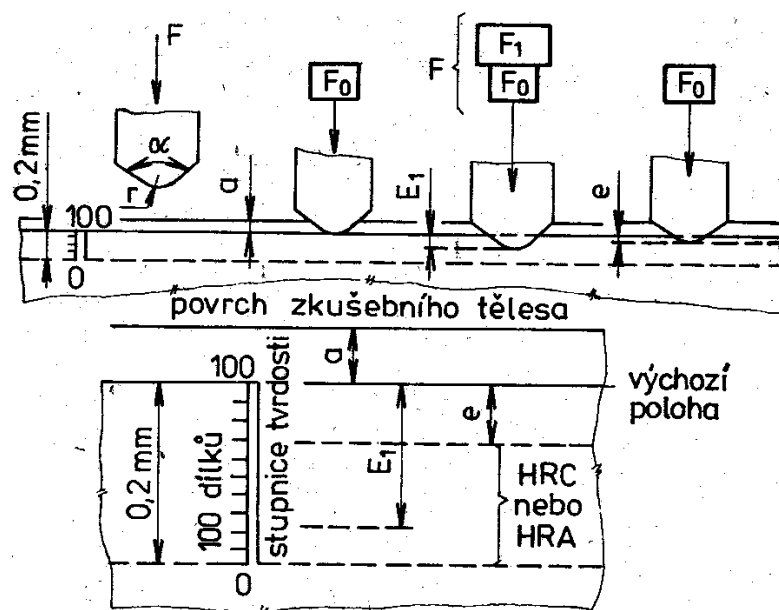
3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Výhodou této metody je její rychlost. Z toho důvodu je tato zkouška tvrdosti velmi rozšířená při hromadné a automatizované výrobě. Tvrdot materiálu se určuje pomocí hloubky trvalého vtisku. [14]

Tato zkouška je vyjádřena normou **ISO 6508**. [6]

Princip zkoušky:

Při zkoušení tvrdých materiálů je vlačovaným tělesem diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a při zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů se používá kulička z kalené oceli o průměru $d = 1/16''$ ($1,5875 \text{ mm}$). Zkoušený předmět se nejprve položí na stůl tvrdoměru kolmo k vnikacímu tělesu a následně se zatíží předběžným zatížením F_0 . Hrot při tom vnikne do hloubky a . Stupnice hloubkoměru se při zatížení silou F_0 nastaví do počáteční polohy. Poté se uplatní přídatné zatížení F_1 . Po prudkém zpomalení pohybu ručičky hloubkoměru se F_1 odlehčí a výsledná hodnota tvrdosti se odečítá přímo na stupnici hloubkoměru, aniž by se odstranilo zatížení F_0 . Výsledná tvrdost je dána hloubkou vtisku E_1 . [14, 17]



Obr. 19 Schéma postupu měření tvrdosti podle Rockwella [14]

Zkušební podmínky:

Povrch zkoušeného předmětu musí být rovný a tloušťka předmětu musí být minimálně osmkrát větší než hloubka vtisku. Vzdálenost středu vtisku od kraje zkoušeného tělesa se doporučuje v závislosti na použité stupnici 1 až 3 mm. U této metody se používají různé velikosti zatížení. Podle zvoleného vnikacího tělesa a velikosti zatížení jsou jednotlivé stupnice tvrdosti nejčastěji označeny *HRA, HRB, HRC, HRN, HRT*. [14]

Tab. 3 Stupnice tvrdosti [6]

Stupnice tvrdosti	Zkratka	Vnikací těleso	F ₀ [N]	F ₁ [N]	Rozsah
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	20 - 88 HRA
B	HRB	Ocelová kulička 1,5875 mm		882,6	20 - 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1373	20 - 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		882,6	40 - 77 HRD
E	HRE	Ocelová kulička 3,175 mm		882,6	70 - 100 HRE
F	HRF	Ocelová kulička 1,5875 mm		490,3	60 - 100 HRF
G	HRG	Ocelová kulička 1,5875 mm		1373	30 - 94 HRG
H	HRH	Ocelová kulička 3,175 mm		490,3	80 - 100 HRH
K	HRK	Ocelová kulička 3,175 mm		1373	40 - 100 HRK
15N	HR15N	Diamantový kužel		29,42	117,7
30N	HR30N	Diamantový kužel	264,8		42 - 86 HR30N
45N	HR45N	Diamantový kužel	411,9		20 - 77 HR45N
15T	HR15T	Ocelová kulička 1,5875 mm	117,7		67 - 93 HR15T
30T	HR30T	Ocelová kulička 1,5875 mm	268,8		29 - 82 HR30T
45T	HR45T	Ocelová kulička 1,5875 mm	411,9		10 - 72 HR45T

Označení tvrdosti podle Rockwella:

Tvrdość podle Rockwella se označuje značkou *HR* s uvedením použité stupnice tvrdosti uvedené v tabulce 3. [14]

3.1.5 Zkoušky mikrotvrdości

Pokud měříme tvrdost velmi malých předmětů nebo tenkých vrstev, využíváme zkoušky mikrotvrdości. Tato metoda měření je téměř shodná se zkouškou tvrdosti podle Vickerse. Liší se pouze ve velikosti použitého zatížení. Pro měření mikrotvrdości používáme převážně zatížení od $9,8 \cdot 10^{-3}$ do $49 \cdot 10^{-1}$ N odstupňované v deseti stupních. Výsledná hodnota tvrdosti závisí na velikosti použitého zatížení a rozměru vtisku. Z toho důvodu nemůžeme naměřené hodnoty porovnávat s hodnotami makrotvrdości. [15, 18]

Před měřením je nutné upravit povrch materiálu. Nejvhodnější volbou úpravy je elektrolytické nebo chemické leštění. Při těchto úpravách na rozdíl od mechanického leštění nedochází k deformačnímu zpevnění povrchové vrstvy materiálu. [15]

3.1.6 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

Tento druh zkoušky vznikl pro zjišťování mechanických vlastností tenkých vrstev materiálu. To bylo pomocí tradičních zkoušek mikrotvrdosti obtížně zjistitelné. U této zkoušky nedojde k ovlivnění podkladu, na němž je vrstva nanášena. [19]

Princip zkoušky:

Měřicí přístroj detekuje okamžitou změnu hloubky vtisku vnikacího tělesa v závislosti na nárůstu nebo poklesu zatížení v průběhu celého procesu měření. Naměřená data se graficky zpracují do indentační křivky. Měřicí přístroj je připojený k PC, což nám umožňuje ihned zaznamenávat průběh zkoušky a současně vyhodnocovat některé materiálové parametry. Výsledná hodnota tvrdosti se obecně vypočítá podle následujícího vztahu: [19]

$$H = \frac{F_{max}}{A_S} \quad (7)$$

kde: F_{max} – maximální působící síla [N]

A_S – zbytková kontaktní (styčná) plocha vtisku [mm²]

Z uvedeného vzorce při použití Vickersova indentoru získáme následující vztah:

$$VHN = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F_{max} \cdot \sin\alpha}{d^2} \quad (8)$$

kde: g – tíhové zrychlení [m·s⁻¹]

F_{max} – maximální síla [N]

α – poloviční úhel který svírají protilehlé stěny indentoru (68°)

d – aritmetický průměr délky obou úhlopříček [mm]

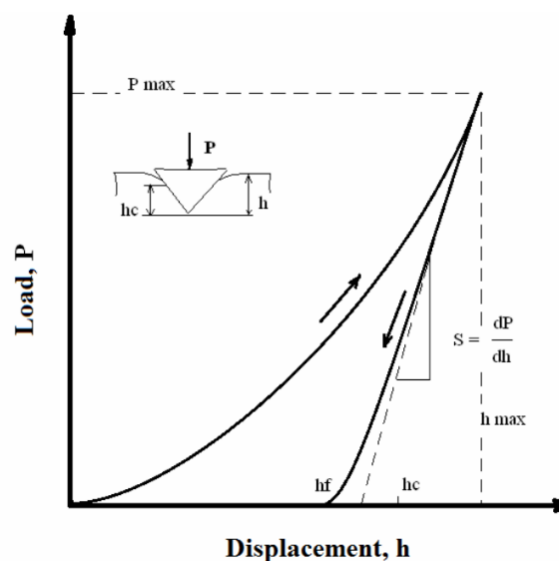
Indentační křivky:

Pomocí zaznamenání průběhu hodnot působícího zatížení a velikosti vtisku vnikacího tělesa určíme výslednou mikro-tvrdost a elastický modul zkoušeného předmětu. Zpracovávané hodnoty se získávají při vzrůstajícím nebo klesajícím zatížení. Pokud se testovaný předmět

plasticky deformuje, zůstává v jeho povrchu trvalý vtisk o velmi malých rozměrech. Geometrie vnikacího tělesa a hloubka jeho vtisku poskytují informaci o velikosti kontaktní plochy při plném zatížení, pomocí které vypočítáme hodnotu tvrdosti. Tvar indentační křivky je nejvíce ovlivňován odezvou měřeného materiálu na indentaci. Měřené materiály můžeme obecně rozdělit na:

- elastické,
- elasticko-plastické,
- plastické,
- visko-plastické. [19]

U čistě plastického materiálu nedojde během indentace k elastické deformaci. Z toho důvodu je výsledkem indentačního cyklu (zatížení/odlehčení) trvalý vtisk, jehož hloubka odpovídá hloubce při maximálně zatíženém indentoru. V případě elastických materiálů nevzniká na povrchu materiálu žádná trvalá deformace. Ovšem většina materiálů se chová visko-plasticky, z toho důvodu jejich indentační křivky tvoří střed mezi indentačními křivkami předchozích dvou skupin materiálů. [19]



Obr. 20 Reprezentativní křivka zatížení [20]

Měřicí přístroje:

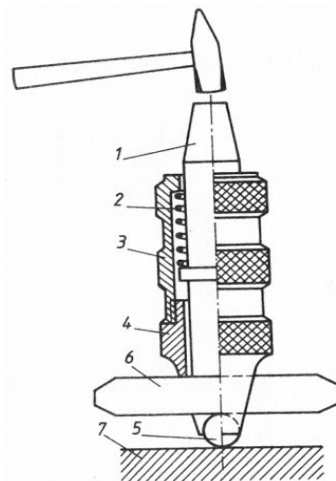
Tato metoda vyžaduje použití zvláštních měřicích přístrojů (nanoindentorů). Tyto přístroje používají k měření hloubky průniku indentoru do materiálu indukční nebo kapacitní senzor. Jejich rozlišení je méně než desetina nanometru a rozlišení zatížení je několik nanonewtonů. [19]

3.2 Dynamické zkoušky tvrdosti

U dynamických zkoušek tvrdosti působí zkušební tělísko na zkoušený předmět rázem. Tvrdost materiálu určujeme buď z velikosti vtisku na povrchu zkoušeného předmětu, nebo z velikosti odrazu zkušebního tělíska. Výhodou dynamických tvrdoměrů je jejich přenosnost. Díky tomu lze snadno provádět zkoušky i na těžkých nepřenositelných výrobcích. [6]

3.2.1 Měření kladívkem Poldi (porovnávací metoda)

U této zkoušky tvrdosti se na zkoušený povrch materiálu přiloží kladívko s vloženou porovnávací tyčkou a poté se úderem kladiva na úderník vytvoří vtisk současně na povrchu materiálu a v porovnávací tyčce o známé tvrdosti. Z velikosti obou vtisků se v tabulce najde výsledná hodnota tvrdosti. Vnikacím tělesem je kulička o průměru $D = 10 \text{ mm}$. [15]



Obr. 21 Zkouška tvrdosti POLDI kladívko [21]

1 – úderník, 2 – pružina, 3 – horní část pouzdra, 4 – spodní část pouzdra,
5 – kulička, 6 – porovnávací tyčka, 7 – zkoušený materiál

3.2.2 Zkouška podle Shorea (odrazová metoda)

Tato zkouška je založena na pružném odrazu tělesa o tvaru válečku, které je zakončené kulovitě zabroušeným diamantem. Těleso je puštěno z určité výšky na povrch zkoušeného předmětu. Použitý tvrdoměr (Shoreho skleroskop) má stupnici rozdělenou na 140 dílků. Základ stupnice tvoří 100 dílků, který odpovídá tvrdosti vysokouhlíkové oceli zakalené na martenzitickou strukturu. Hodnotu tvrdosti určíme podle dosažené výšky odrazu válečkového tělesa od povrchu zkoušeného předmětu. Nevýhodou této metody je její malá přesnost. [14, 17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bylo určit vliv použitého tepelného zpracování na výsledné mikro-mechanické vlastnosti vybraných vzorků oceli. K provedení experimentu byly vybrány zkušební vzorky z materiálu 1.7102, 1.8161 a 1.1121. Z každého materiálu bylo vytvořeno pět druhů zkušebních vzorků. Jeden druh vzorků zůstal v původním (nezpracovaném) stavu a zbylé čtyři druhy byly za určitých podmínek tepelně zpracovány. Poté byly na vybraných vzorcích oceli naměřeny hodnoty tvrdosti. Hlavním cílem experimentu tedy bylo porovnat naměřené hodnoty mikro-mechanických vlastností jednotlivých vzorků oceli a vyhodnotit vliv použitého tepelného zpracování.

Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Volba a příprava zkušebních vzorků pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených hodnot

5 VOLBA A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

K provedení experimentu byly vybrány tři různé druhy oceli. Z těchto materiálů byly následně nařezány jednotlivé zkušební vzorky, které se poté tepelně zpracovávaly. Všechny takto nařezané a tepelně zpracované vzorky bylo potřeba, před samotným měřením tvrdosti zalisovat a vyleštit.

5.1 Materiály použité na výrobu vzorků

K přípravě zkušebních vzorků byly zvoleny následující druhy materiálů.

5.1.1 Ocel EN 1.7102 (54SiCr6)

Ocel Si-Cr (křemík – chromová ocel) je speciální legovaná konstrukční ocel na pružiny, kterou je vhodné dále zpracovávat kalením a popouštěním. Tato ocel má v případě vhodně zvoleného tepelného zpracování dobrou pružnost, odolnost proti rázovému namáhání a vibracím. Z toho důvodu se nejčastěji využívá u šroubových a ventilových pružin, torzních tyčí a talířových pružin. [22, 23]

Česká technická norma: ČSN 41 4260

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.7102 [23]

Chemické složení [hm. %]					
C	Si	Mn	P	S	Cr
0,51 - 0,59	1,20 - 1,60	0,50 - 0,80	max. 0,030	max. 0,030	0,50 - 0,80

5.1.2 Ocel EN 1.8161 (58CrV4)

Ocel Cr-V (vanad – chromová ocel) je legovaná uhlíková ocel k zušlechťování. Tato ocel má vysokou pevnost a velmi dobrou odolnost proti opotřebení. Využívá se na strojní součásti větších rozměrů ve stavbě automobilů a převodů (např. hnací a pastorkové hřídele). [22, 24]

Česká technická norma: ČSN 41 5261

Tab. 5 Chemické složení oceli 1.8161 [24]

Chemické složení [hm. %]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,55 - 0,62	0,15 - 0,40	0,70 - 1,10	max. 0,035	max. 0,035	0,90 - 1,20	0,10 - 0,20

5.1.3 Ocel EN 1.1121 (Ck10)

Nelegovaná uhlíková konstrukční ocel k cementování. Tato ocel je měkká, snadno obrobitelná a svařitelná. Po tepelném zpracování se využívá na součásti odolné proti opotřebení s nižší pevností v jádře jako např. páky, čepy, pouzdra, šrouby, vačkové hřídele a součásti šicích strojů. [22, 25]

Česká technická norma: ČSN 41 2010

Tab. 6 Chemické složení oceli 1.1121 [25]

Chemické složení [hm. %]				
C	Si	Mn	P	S
0,07 - 0,13	max. 0,40	0,30 - 0,60	max. 0,035	max. 0,035

5.2 Tepelné zpracování vzorků

Z každého materiálu bylo nařezáno 5 zkušebních vzorků. Čtyři z nich byly tepelně zpracovány kalením a popouštěním a jeden zůstal v původním (nezpracovaném) stavu. U každého takto tepelně zpracovaného vzorku byly zvoleny odlišné parametry tepelného zpracování.

Tepelné zpracování probíhalo na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC. Ke kalení byla použita kalící pec LH a popouštění probíhalo v popouštěcí peci PP 20/65 také od firmy LAC. Jako kalící médium byl použit olej a voda.



Obr. 22 Kalící pracoviště SKM

Postup tepelného zpracování byl následující:

1. Nařezaný vzorek byl ohřátý v kalící peci na požadovanou kalící teplotu.
2. Následovala výdrž na kalící teplotě. Ta byla zvolena u všech vzorků stejná (30 minut).
3. Poté byl zkušební vzorek chlazen v určitém kalícím médiu.
4. Následovalo popouštění v popouštěcí peci.
5. Výdrž na popouštěcí teplotě byla u všech vzorků 60 minut.
6. Poté byly zkušební vzorky dochlazeny na vzduchu.

5.2.1 Parametry tepelného zpracování

Jednotlivé vzorky byly tepelně zpracovány pomocí kalení a popouštění za odlišných kalících a popouštěcích teplot. Tyto teploty byly zvoleny na základě doporučených parametrů tepelného zpracování uvedených v materiálových listech. Vždy se zvolila minimální doporučená teplota zpracování a poté maximální doporučená teplota. V některých případech se také lišilo použité kalící médium. V následující kapitole budeme vyhodnocovat, jak ovlivní zvolená kalící a popouštěcí teplota vlastnosti určitého materiálu.

Tab. 7 Parametry tepelného zpracování jednotlivých vzorků

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
ocel 1.7102	1	bez tepelného zpracování					
	2	830	30	olej	430	60	vzduch
	3	830	30	olej	500	60	vzduch
	4	860	30	olej	430	60	vzduch
	5	860	30	olej	500	60	vzduch
ocel 1.8161	1	bez tepelného zpracování					
	2	820	30	olej	480	60	vzduch
	3	820	30	olej	650	60	vzduch
	4	850	30	olej	480	60	vzduch
	5	850	30	olej	650	60	vzduch
ocel 1.1121	1	bez tepelného zpracování					
	2	880	30	voda	150	60	vzduch
	3	880	30	voda	200	60	vzduch
	4	920	30	voda	150	60	vzduch
	5	920	30	voda	200	60	vzduch

5.3 Zalisování vzorků

Nářezané a tepelně zpracované zkušební vzorky bylo nutné vyleštit. Ale abychom tyto vzorky mohly upnout do metalografické leštičky, tak je bylo nejprve potřeba zalisovat. Zalisování bylo provedeno na stroji Simpli-Met 1000. A vzorky byly zalisovány do materiálu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler.



Obr. 23 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

5.4 Leštění vzorků

Posledním krokem před měřením bylo leštění vzorků. Správně zalisované vzorky mohly být bez problému upnuty do metalografické leštičky a tím mohl být zahájen proces samotného leštění. To slouží k tomu, aby byly naměřené hodnoty tvrdosti co nejpřesnější.

Leštění probíhalo na leštícím stroji Eco – Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi (250, 600, 1200) a následně byly doleštěny pomocí textilního plátna a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn 9 μm a 3 μm .

Parametry leštění:

- přítlačná síla – 25 N,
- otáčky vzorků – 30 ot/min,
- otáčky plátna – 300 ot/min.



Obr. 24 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO

6 MĚŘENÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Ke zjišťování makrotvrdosti byla zvolena zkouška tvrdosti podle Rockwella. Mikrotvrdost byla měřena pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI.

6.1 Měření tvrdosti dle Rockwella

Při měření tvrdosti dle Rockwella byly použity metody HRA a HRC. Měření probíhalo podle normy ČSN 42 0373 na analogovém tvrdoměru Rockwell HR – 150A.

Tab. 8 Parametry zkoušky dle Rockwella

Stupnice tvrdosti	Zkratka	Vnikací těleso	Předběžné zatížení F_0 [N]	Přídavné zatížení F_1 [N]	Celkové zatížení F [N]	Rozsah
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 - 88 HRA
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 - 70 HRC



Obr. 25 Analogový tvrdoměr Rockwell HR - 150A

6.1.1 Postup měření

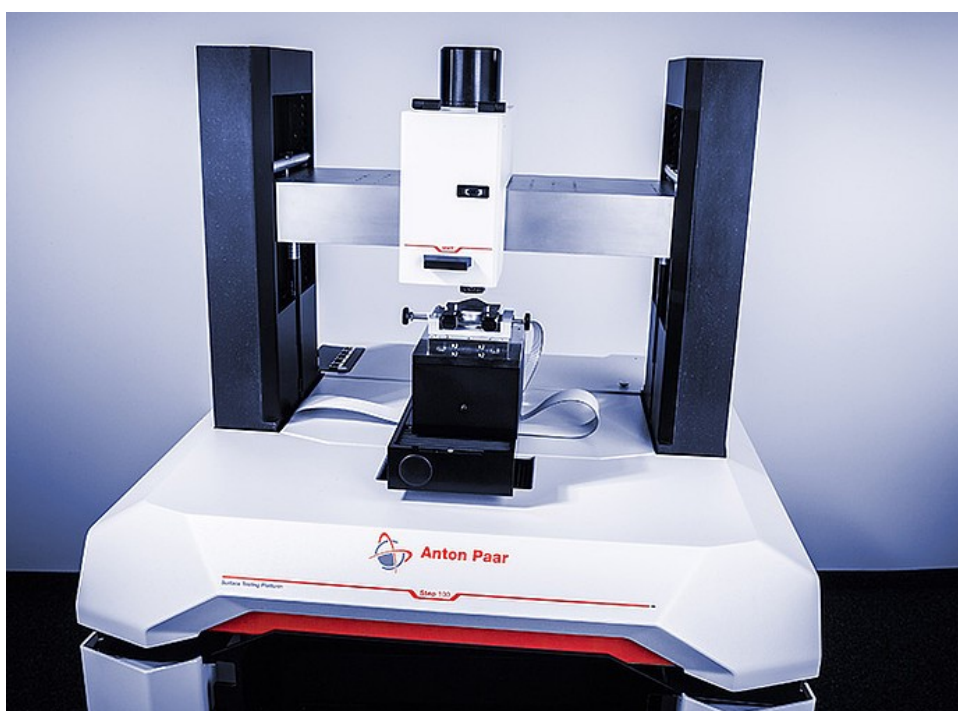
U obou metod byl jako vnikací těleso použit diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° . Na zkušební stroji se nastavila daná stupnice tvrdosti. Poté se zkušební vzorek umístil na podložku pod vnikací těleso, které následně působilo na vzorek předběžným zatížením F_0 . Po dosažení předběžného zatížení se vynulovala stupnice a vnikací těleso začalo působit na vzorek přídavným zatížením F_1 , jehož velikost závisela na probíhající metodě měření. Po určité prodlevě následovalo odlehčení zpět na zatížení F_0 a ze stupnice tvrdoměru se odečetla daná hodnota tvrdosti.

6.2 Měření tvrdosti metodou DSI

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester (MHT³) od firmy Anton-Paar dle normy ČSN EN ISO 14577.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení – 12 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost – 10 N/min,
- Poissonovo číslo – 0,3.



Obr. 26 Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT³)

6.2.1 Postup měření

U Instrumentované zkoušky tvrdosti byl jako vnikací tělíčko (indentor) použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI. A k vyhodnocení mikro-mechanických vlastností byla použita metoda Oliver & Pharr.

U této zkoušky byly zjišťovány následující parametry:

- vtisková tvrdost H_{IT} [MPa] – míra rezistence k trvalé deformaci nebo poškození,
- Vickersova tvrdost HV_{IT} ,

- vtiskový modul E_{IT} [GPa] – hodnota srovnatelná s Youngovým modulem materiálu,
- maximální hloubka vpichu H_{max} [nm],
- elastická práce W_{elast} [μ J] – vratná práce,
- plastická práce W_{plast} [μ J] – nevratná práce.

6.2.2 Fáze a strukturní složky

Měření mikro-tvrdomosti lze velmi efektivně využít při zjišťování strukturních složek. Lze při tomto využít poznatku, že každá strukturní složka odpovídá určité hodnotě tvrdosti dle Vickerse, která byla zjištěna zkouškou DSI. Podrobný přehled strukturních složek a jejich tvrdostí vycházející z diagramu Fe – Fe₃C, je uveden v tabulce níže. Vzhledem k testovaným ocelím nás bude zajímat především oblast Austenitu, Perlitu, Bainitu a Martenzitu.

Tab. 9 Tvrdomost strukturních složek

Strukturní složky	Tvrdomost HV
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	700-580

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

7.1 Ocel EN 1.7102

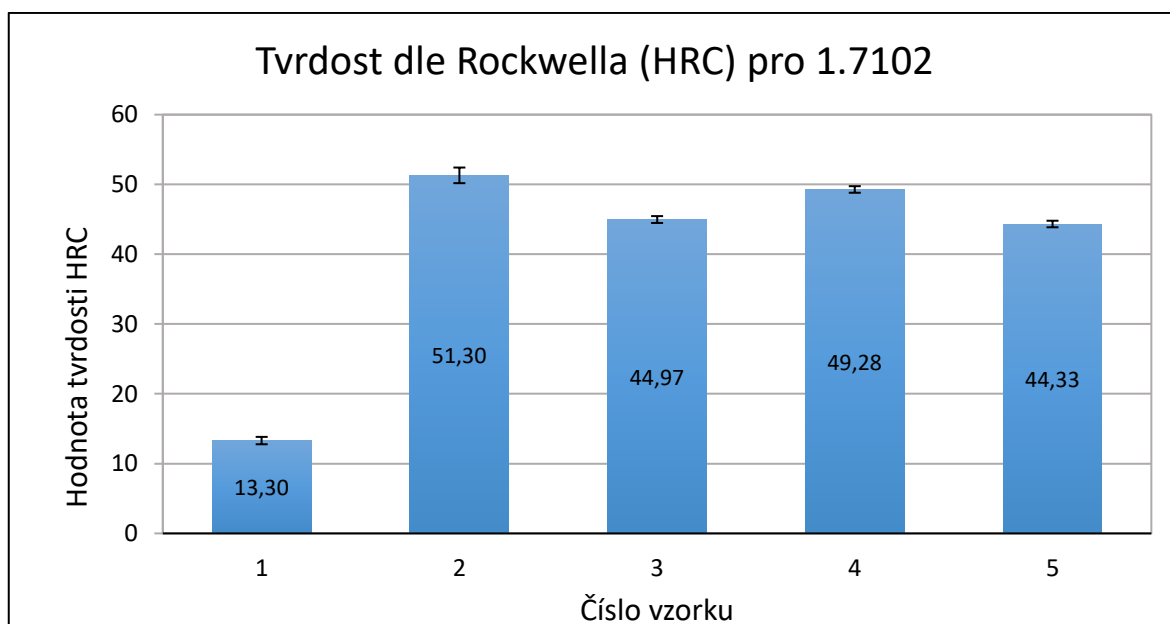
U oceli 1.7102 byla provedena zkouška tvrdosti dle Rockwella (metoda HRC) a Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI se zkušebním zatížením 5 N. Měření tvrdosti probíhalo na pěti vzorcích s rozdílnými parametry tepelného zpracování, uvedenými v tabulce 10. Zbylé údaje o tepelném zpracování jsou popsány v tabulce 7.

Tab. 10 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.7102

Ocel 1.7102	Číslo vzorku	Kalící teplota [°C]	Popouštěcí teplota [°C]
	Vzorek č. 1	nezpracovaný	
	Vzorek č. 2	830	430
	Vzorek č. 3	830	500
	Vzorek č. 4	860	430
	Vzorek č. 5	860	500

7.1.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRC)

Na každém vzorku bylo naměřeno 10 hodnot tvrdosti. Tyto hodnoty byly následně statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny v následující tabulce.



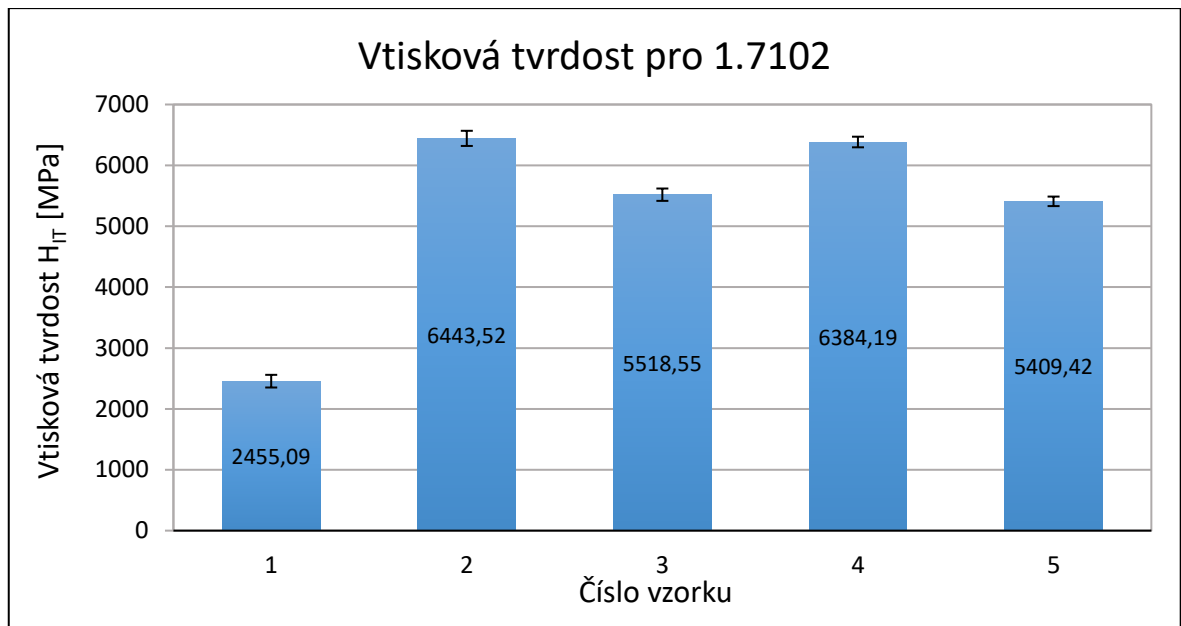
Obr. 27 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.7102 metodou měření HRC

Měření metodou HRC ukázalo, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo u vzorku č. 2, který byl zpracováván za kalící teploty 830 °C a poté popouštěn při teplotě 430 °C. V porovnání

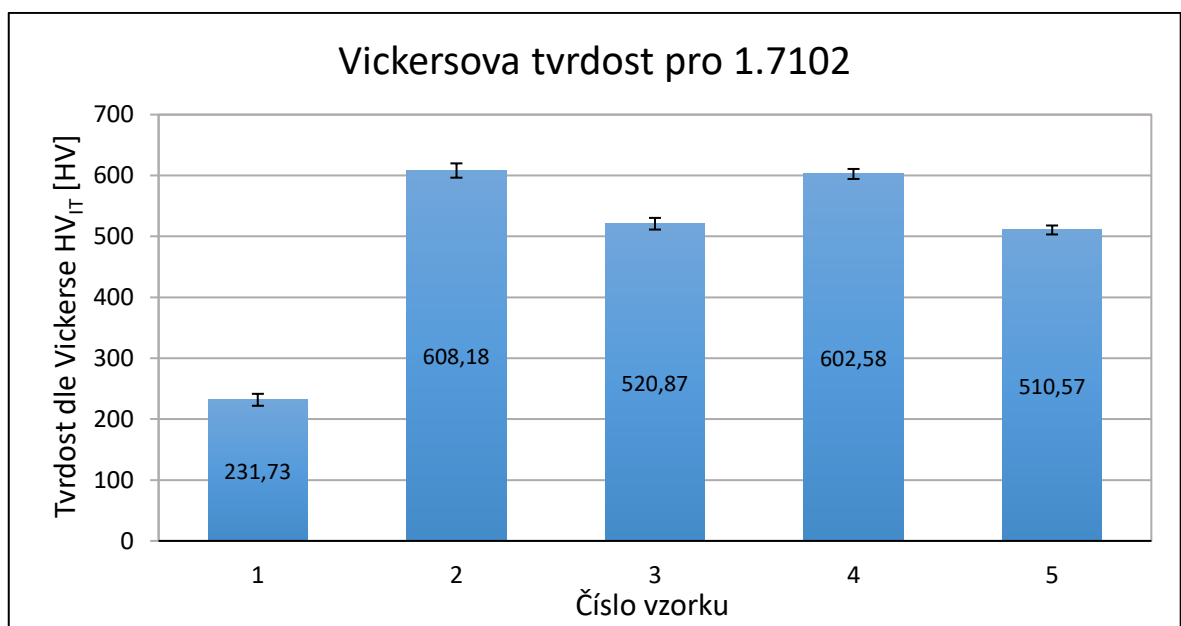
s tepelně nezpracovaným vzorkem č. 1 byla tato hodnota tvrdosti větší o 286 %. U tepelně zpracovaných vzorků byla nejnižší hodnota tvrdosti naměřena na vzorcích č. 3 a č. 5, což by mohlo být způsobeno vyšší teplotou popouštění.

7.1.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI

Měření metodou DSI probíhalo na každém zkušebním vzorku vždy devětkrát při zkušebním zatížení 5 N. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



Obr. 28 Vtisková tvrdost H_{IT} pro materiál 1.7102

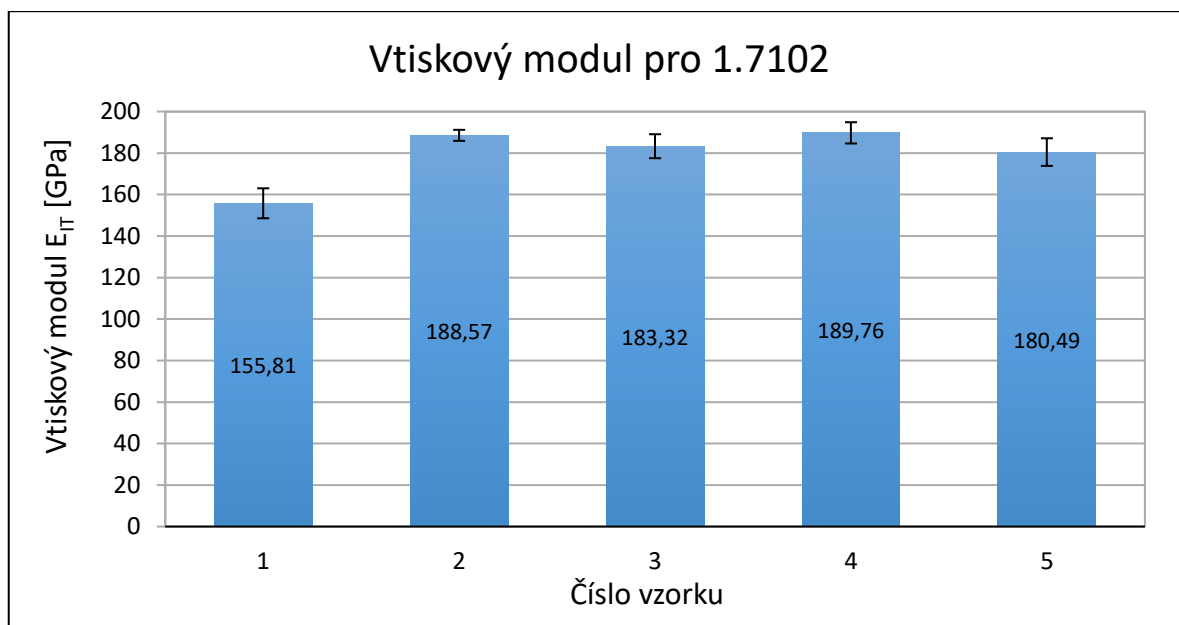


Obr. 29 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro materiál 1.7102

Z předchozích dvou grafů lze vyčíst, že hodnota vtiskové tvrdosti H_{IT} i hodnota Vickersovi tvrdosti HV_{IT} byla nejvyšší u vzorku č. 2. Tedy u materiálu zpracovaného za kalící teploty $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ a popouštěném při teplotě $430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tepelně zpracovaných vzorků dosáhl nejnižší tvrdosti vzorek č. 3 a vzorek č. 5, což byly materiály, které byly zpracovány za vyšší popouštěcí teploty ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Neměsí rozdíl v tvrdostech byl mezi vzorkem č. 2 a vzorkem č. 4. U vtiskové tvrdosti tento rozdíl činil pouhých $59,33\text{ MPa}$ a u Vickersovi tvrdosti jen $5,60\text{ HV}$.

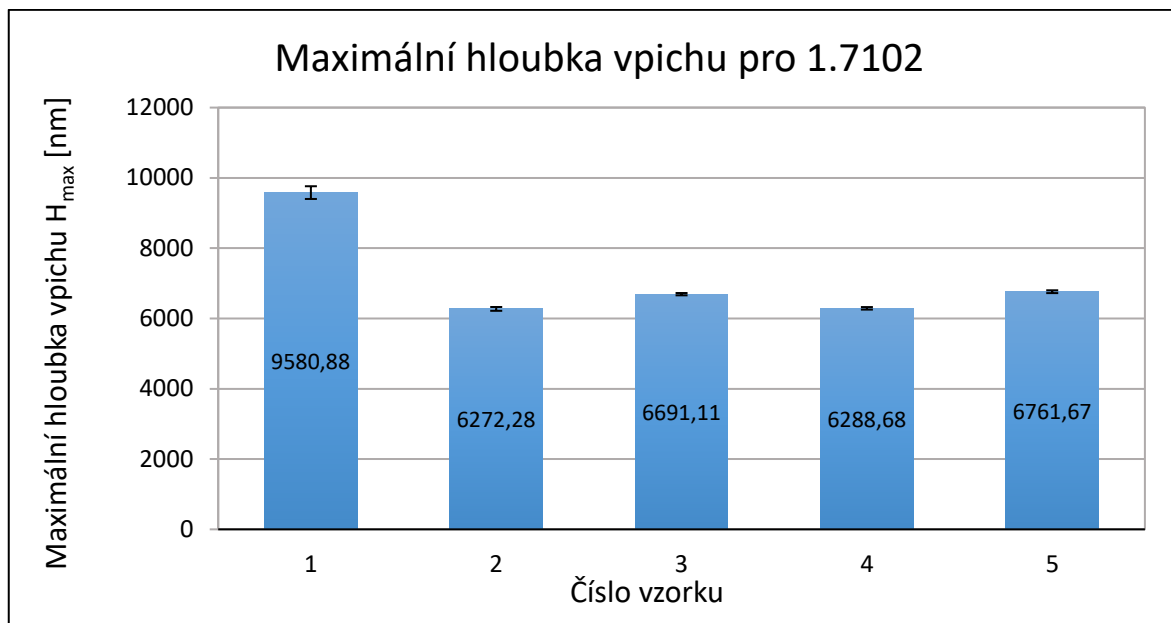
V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tedy nejvíce vzrostla vtisková H_{IT} i Vickersova HV_{IT} tvrdost u vzorku č. 2 a to v obou případech o 162% .

Z výsledků tvrdosti dle Vickerse bylo dále možné určit, z jakých strukturních složek se daný materiál u konkrétního zkušební vzorku skládá. K určení těchto strukturních složek byla využita tabulka 9. Z této tabulky plyne, že struktura materiálu u tepelně nezpracovaného vzorku se nachází v oblasti perlitu hrubého. Oproti tomu vzorky, které byly tepelně zpracovány, se nachází v oblasti dolního bainitu a nízkouhlíkového martenzitu. Právě tyto strukturní složky vznikly při kalení v důsledku ochlazování materiálu kritickou rychlostí a jejich vznik měl za následek zvýšení tvrdosti daného materiálu.

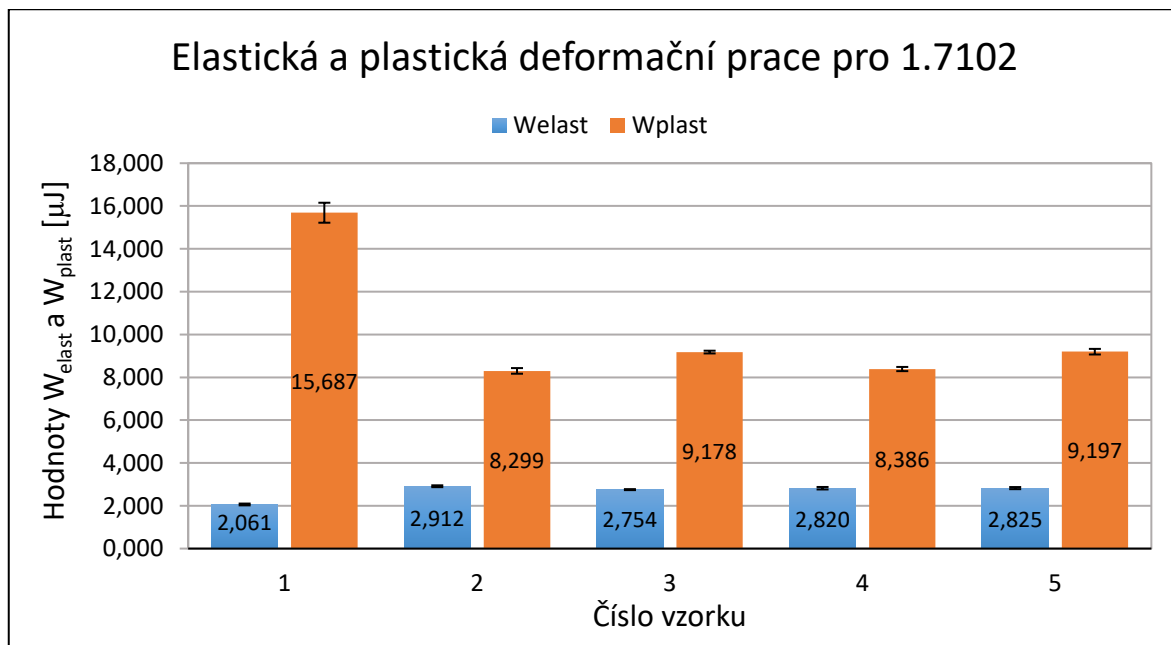


Obr. 30 Vtiskový modul E_{IT} pro materiál 1.7102

U tepelně zpracovaných ocelí se hodnoty vtiskového modulu téměř nelišily. Největší rozdíl nastal při porovnání oceli bez tepelného zpracování se vzorky, u kterých tepelné zpracování proběhlo.

Obr. 31 Maximální hloubka vpichu H_{\max} pro materiál 1.7102

Z grafů je patrné, že s nárůstem tvrdosti oceli klesá maximální hloubka vpichu. Z toho důvodu byla největší hloubka vpichu naměřena u tepelně nezpracovaného materiálu. Nejmenší pak u vzorku č. 2, který dosahoval nejvyšší tvrdosti. Tento pokles činil 3308,6 nm (o 35 %).

Obr. 32 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.7102

Z grafu můžeme vyčíst, že s rostoucí hodnotou elastické deformační práce W_{elast} dochází k poklesu plastické deformační práce W_{plast} . Nejvyšší hodnota elastické deformační práce byla dosažena u vzorku č. 2 (2,912 μJ), u kterého byla z předchozích grafů zjištěna i nejvyšší

hodnota tvrdosti. U ostatních tepelně zpracovaných vzorků se naměřené hodnoty již příliš nelišily. Plastická deformační práce byla nejvyšší u vzorku č. 1, který nebyl tepelně zpracováván a nejvíce klesla u vzorku č. 2, po zpracování za kalící teploty 830 °C a při popouštění za teploty 430 °C.

7.2 Ocel EN 1.8161

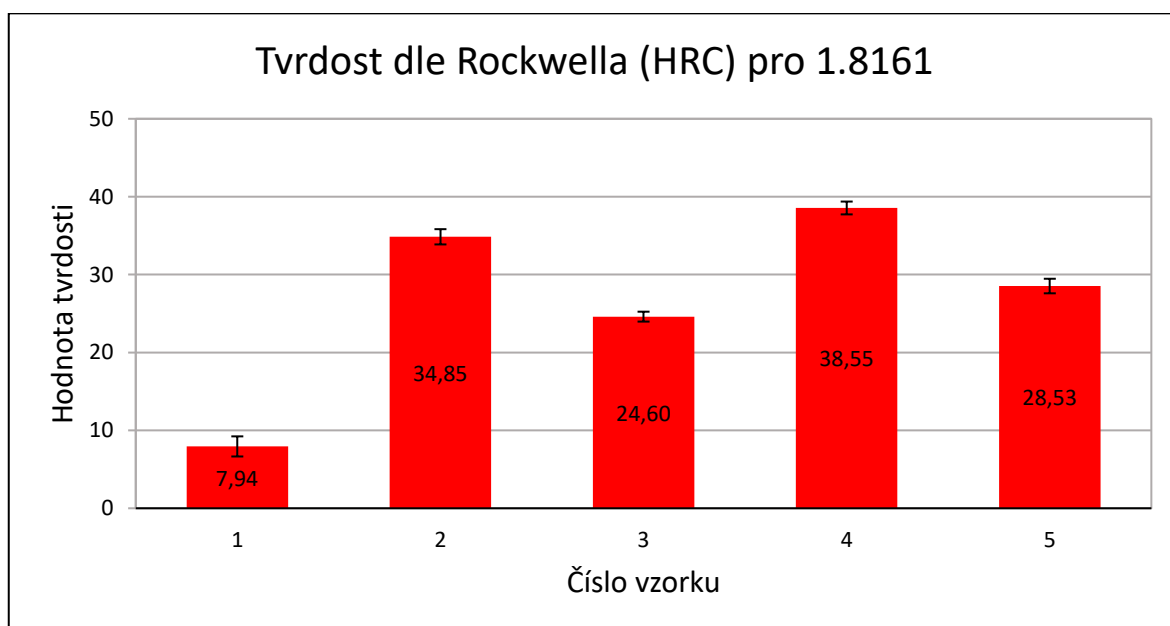
U oceli 1.8161 byla provedena zkouška tvrdosti dle Rockwella (metoda HRC) a Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI se zkušebním zatížením 5 N. Měření tvrdosti probíhalo na pěti vzorcích s rozdílnými parametry tepelného zpracování, uvedenými v tabulce 11. Zbylé údaje o tepelném zpracování jsou popsány v tabulce 7.

Tab. 11 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.8161

Ocel 1.8161	Číslo vzorku	Kalící teplota [°C]	Popouštěcí teplota [°C]
	Vzorek č. 1	nezpracovaný	
	Vzorek č. 2	820	480
	Vzorek č. 3	820	650
	Vzorek č. 4	850	480
	Vzorek č. 5	850	650

7.2.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRC)

Na každém vzorku bylo naměřeno 10 hodnot tvrdosti metodou HRC. Tyto hodnoty byly následně statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny v následující tabulce.

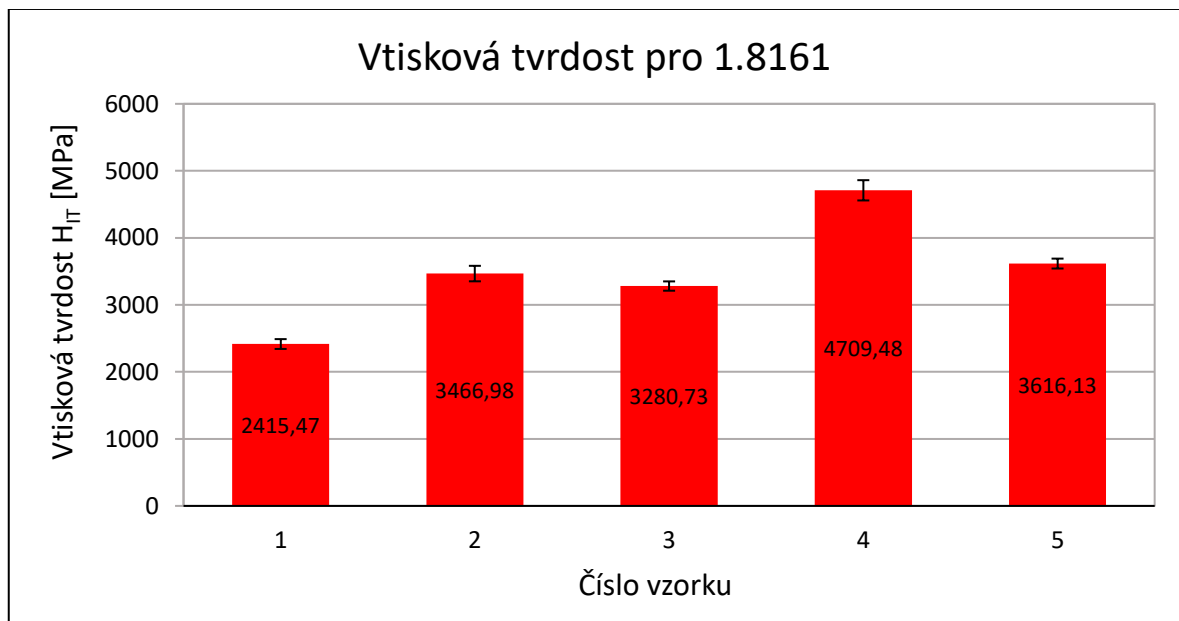


Obr. 33 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.8161 metodou měření HRC

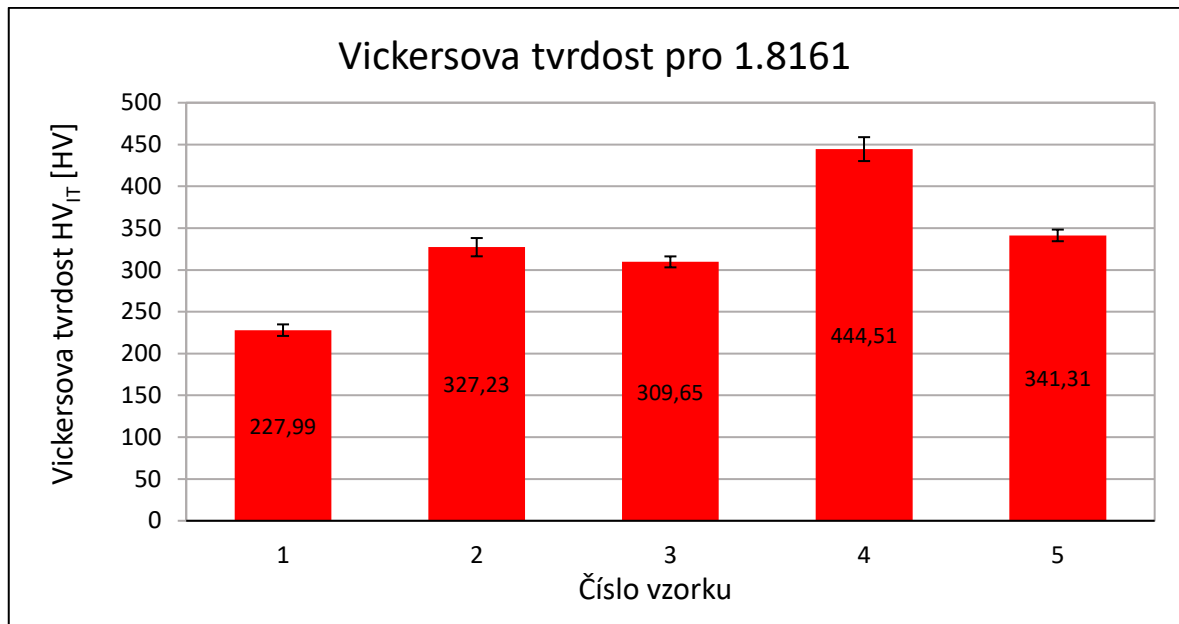
U metody HRC byla nevyšší hodnota tvrdosti naměřena u vzorku č. 4 (38,55 HRC), který byl zpracován za kalící teploty 850 °C a popouštěn při teplotě 480 °C. Oproti tepelně nezpracovanému vzorku č. 1 činil tento nárůst v tvrdosti o 385,5 %. Z tepelně zpracovaných vzorků byla nejmenší hodnota naměřena u vzorku č. 3 a u vzorku č. 5, u kterých byla zvolena vyšší popouštěcí teplota 650 °C. V případě vzorku č. 3 byl tedy nárůst v tvrdosti při porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem o 210 %.

7.2.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI

U materiálu 1.8161 probíhalo měření metodou DSI na každém zkušební vzorku vždy devětkrát při zkušební zatížení 5 N. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



Obr. 34 Vtisková tvrdost H_{IT} pro materiál 1.8161

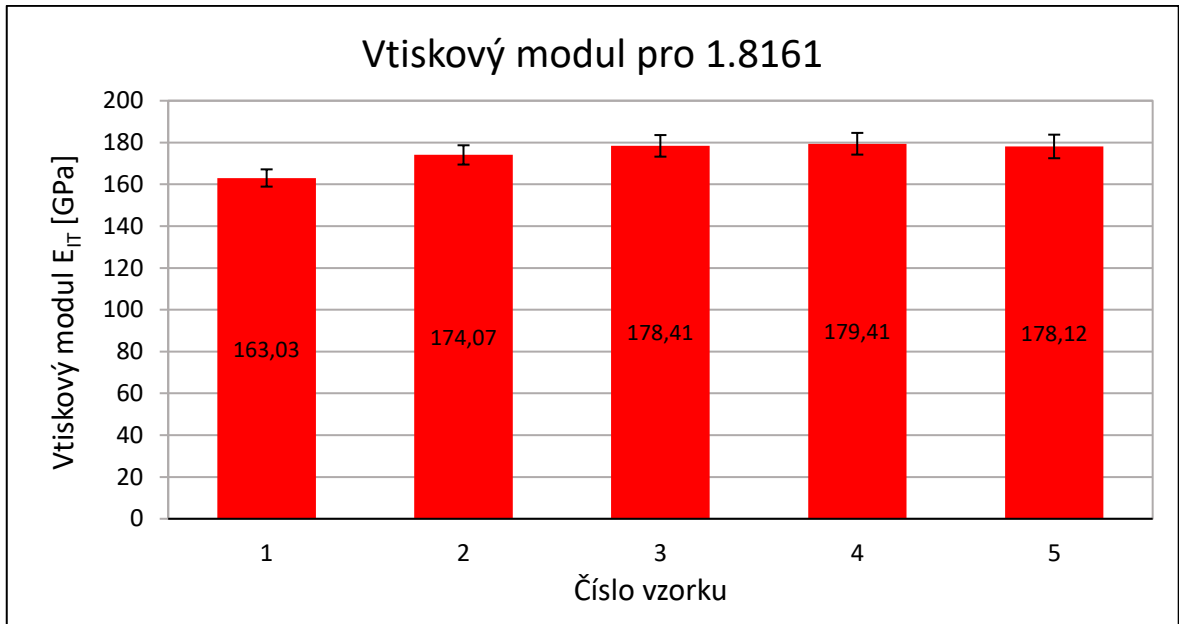


Obr. 35 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro materiál 1.8161

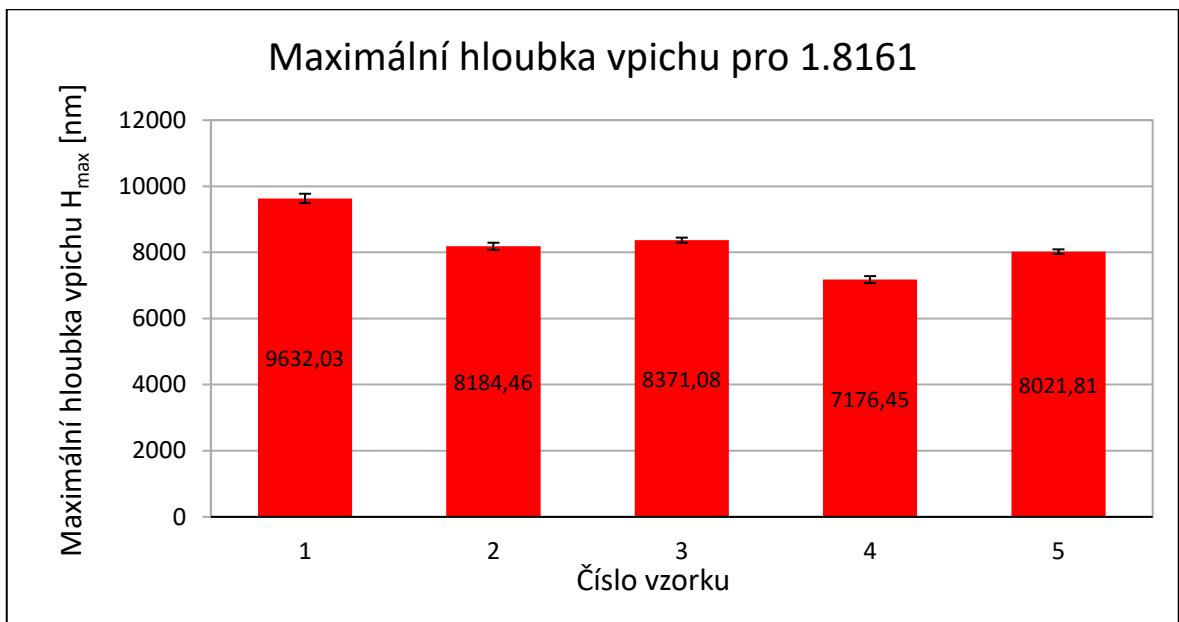
Z předchozích dvou grafů lze vyčíst, že hodnota vtiskové tvrdosti H_{IT} i hodnota Vickersovi tvrdosti HV_{IT} byla nejvyšší u vzorku č. 4. Tedy u materiálu zpracovaného za kalící teploty 850 °C a popouštění při teplotě 480 °C. Z tepelně zpracovaných vzorků dosáhl nejnižší tvrdosti vzorek č. 2 a vzorek č. 3, což byly materiály, které byly zpracovány za nižší kalící teploty (820 °C).

V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tedy nejvíce vzrostla vtisková H_{IT} i Vickersova HV_{IT} tvrdost u vzorku č. 4 a to v obou případech o 95 %.

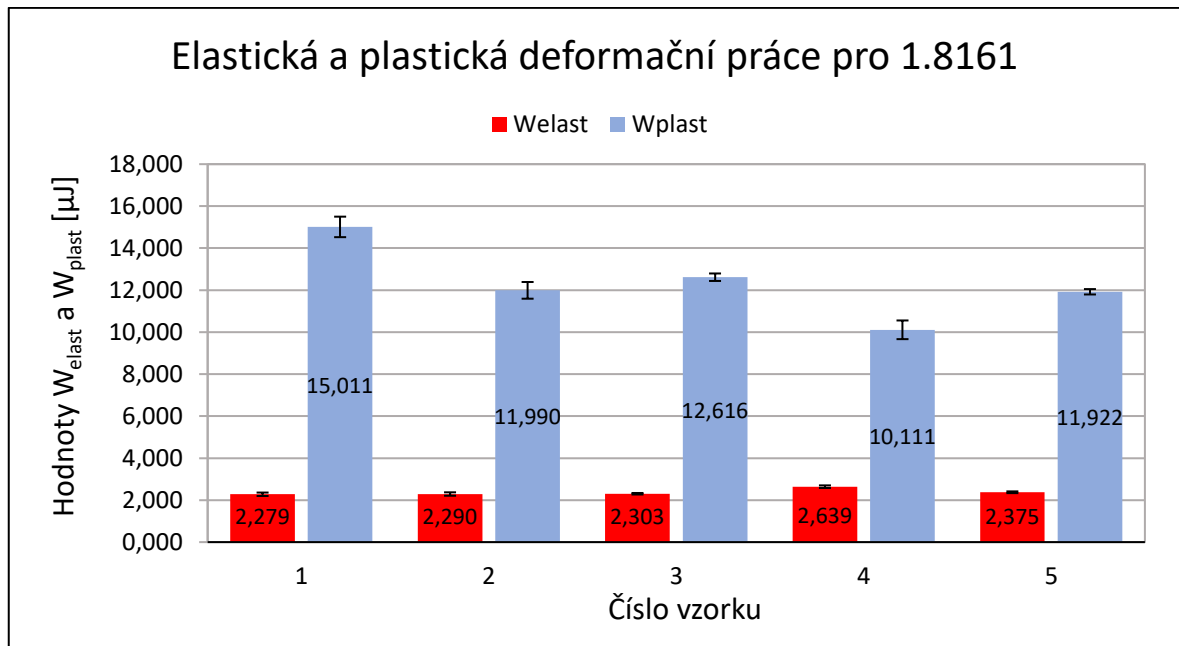
Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse bylo i v tomto případě možné využít k určení strukturních složek daného materiálu a tím i porovnat změnu ve struktuře materiálu mezi tepelně nezpracovaným a tepelně zpracovaným zkušebním vzorkem. Tyto strukturní složky byly opět určeny pomocí tabulky 9. Z této tabulky plyne, že strukturu tepelně nezpracovaného vzorku č. 1 tvoří perlit hrubý. Naopak tepelně zpracované vzorky č. 2, 3 a 5 se nachází v oblasti bainitu horního a vzorek s největší tvrdostí je tvořen bainitem dolním.

Obr. 36 Vtiskový modul E_{IT} pro materiál 1.8161

U tepelně zpracovaných ocelí se hodnoty vtiskového modulu lišily jen minimálně. Největší rozdíl nastal při porovnání oceli bez tepelného zpracování se vzorky, u kterých tepelné zpracování proběhlo. V případě vzorku č. 4 tato hodnota vzrostla o 10 %.

Obr. 37 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro materiál 1.8161

Z grafů je patrné, že s nárůstem tvrdosti oceli klesá maximální hloubka vpichu. Z toho důvodu byla největší hloubka vpichu naměřena u tepelně nezpracovaného materiálu. V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem klesla hloubka vpichu nejvíce u vzorku č. 4 a to o 25 %.



Obr. 38 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.8161

Z grafu elastické a plastické deformační práce můžeme vidět, že u materiálu 1.8161 se hodnoty elastické deformační práce příliš neliší. Plastická deformační práce je největší u tepelně nezpracovaného vzorku č. 1 (15,011 μJ) a nejnižší u vzorku č. 4 (10,111 μJ), který byl zpracován za kalící teploty 850 °C a popouštěn při teplotě 480 °C.

7.3 Ocel EN 1.1121

U oceli 1.1121 byla provedena zkouška tvrdosti dle Rockwella (metoda HRA) a Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI se zkušebním zatížením 5 N. Měření tvrdosti probíhalo na pěti vzorcích s rozdílnými parametry tepelného zpracování, uvedenými v tabulce 12. Zbylé údaje o tepelném zpracování jsou popsány v tabulce 7.

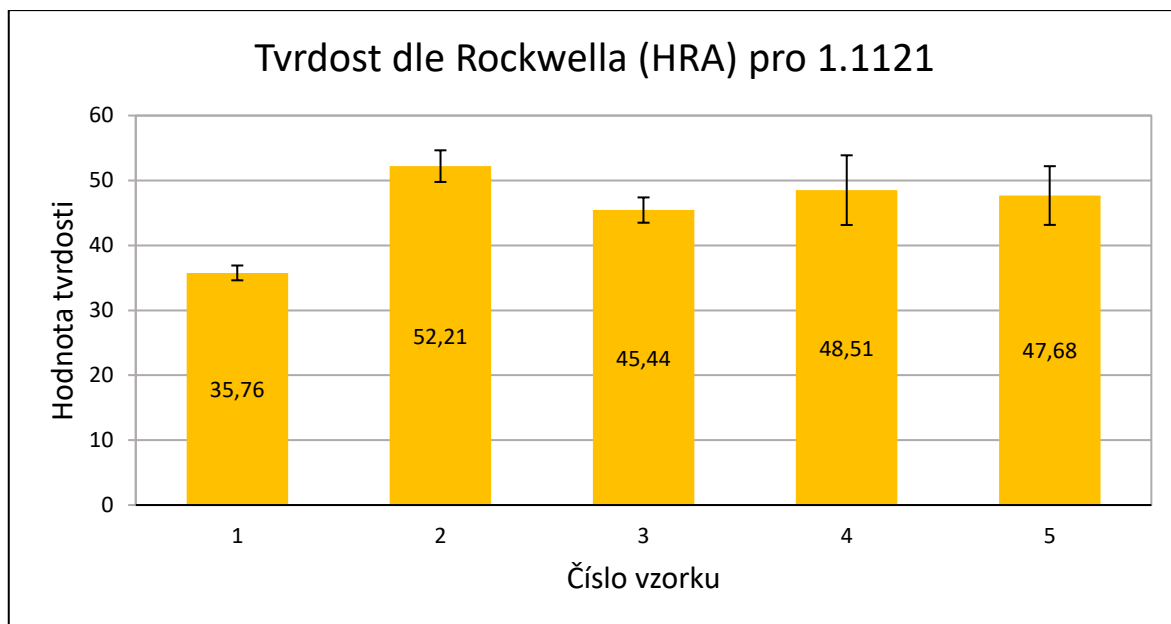
Tab. 12 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.1121

	Číslo vzorku	Kalící teplota [°C]	Popouštěcí teplota [°C]
Ocel 1.1121	Vzorek č. 1	nezpracovaný	
	Vzorek č. 2	880	150
	Vzorek č. 3	880	200
	Vzorek č. 4	920	150
	Vzorek č. 5	920	200

7.3.1 Výsledky zkoušky dle Rockwella (HRA)

U oceli 1.1121 bylo nutné k měření tvrdosti dle Rockwella použít metodu HRA. A to z toho důvodu, protože tvrdost vzorků z této oceli byla příliš nízká pro měření tvrdosti metodou HRC.

Na každém vzorku bylo naměřeno 10 hodnot tvrdosti metodou HRA. Tyto hodnoty byly následně statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny v následující tabulce.

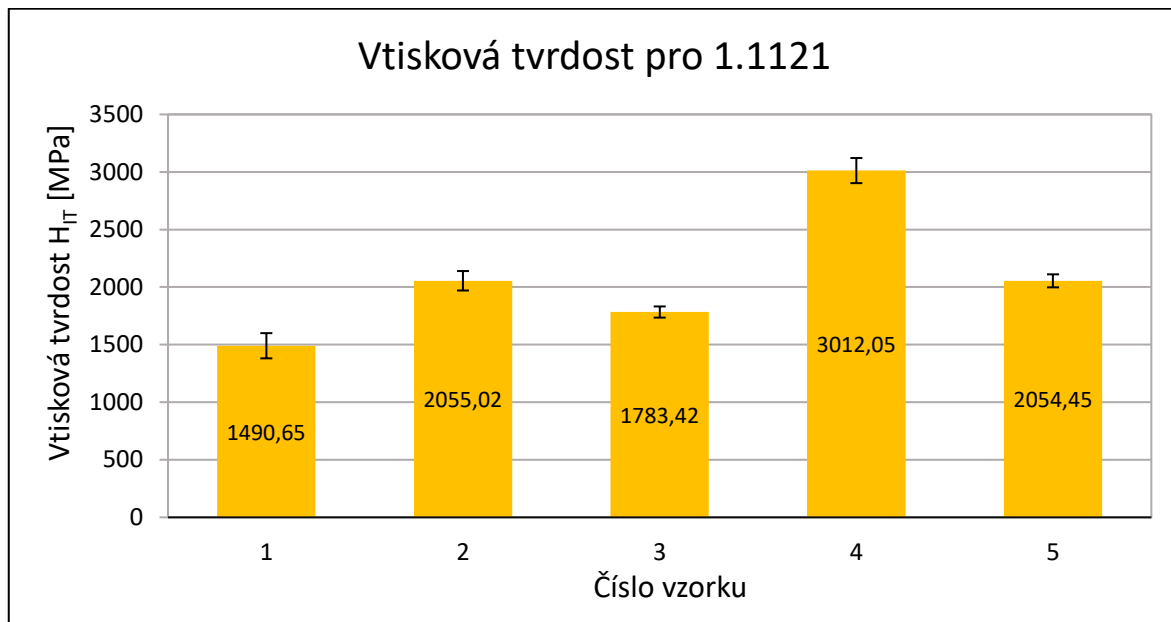


Obr. 39 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.1121 metodou měření HRA

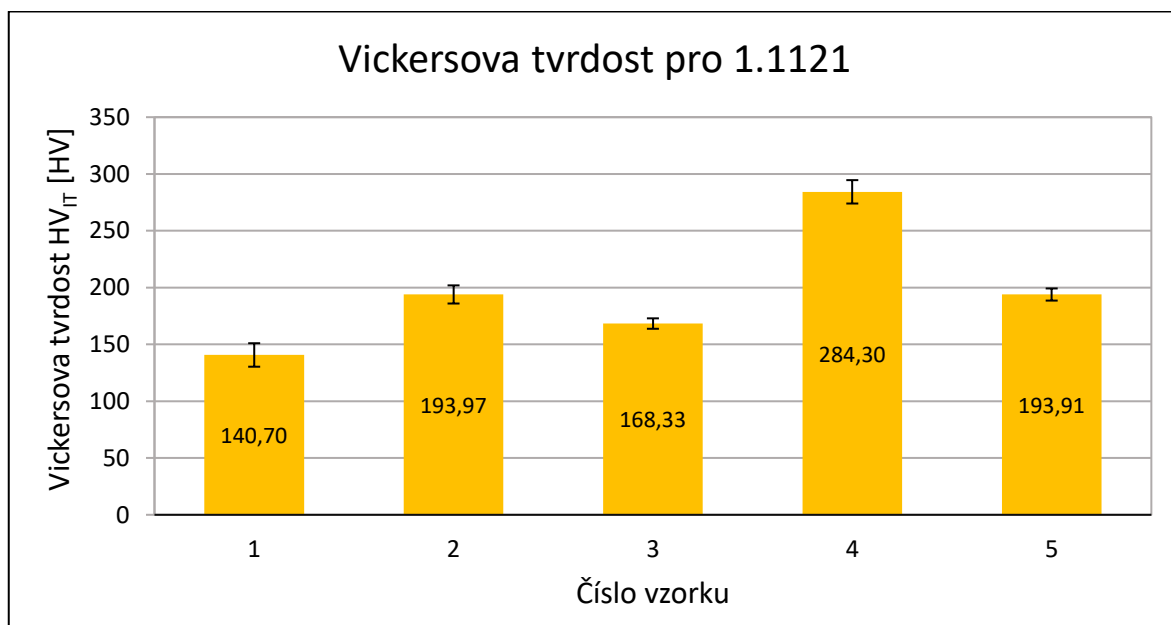
U metody HRA byla nevyšší hodnota tvrdosti naměřena u vzorku č. 2 (52,21 HRA), který byl zpracován za kalící teploty 880 °C a popouštěn při teplotě 150 °C. Oproti tepelně nezpracovanému vzorku č. 1 činil tento nárůst v tvrdosti o 46 %. Z tepelně zpracovaných vzorků byla nejmenší hodnota naměřena u vzorku č. 3, u kterého byla zvolena vyšší popouštěcí teplota (200 °C). V případě vzorku č. 3 byl tedy nárůst v tvrdosti při porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem pouze o 27 %.

7.3.2 Výsledky Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI

U materiálu 1.1121 probíhalo měření metodou DSI na každém zkušebním vzorku vždy devětkrát při zkušebním zatížení 5 N. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



Obr. 40 Vtisková tvrdost H_{IT} pro materiál 1.1121



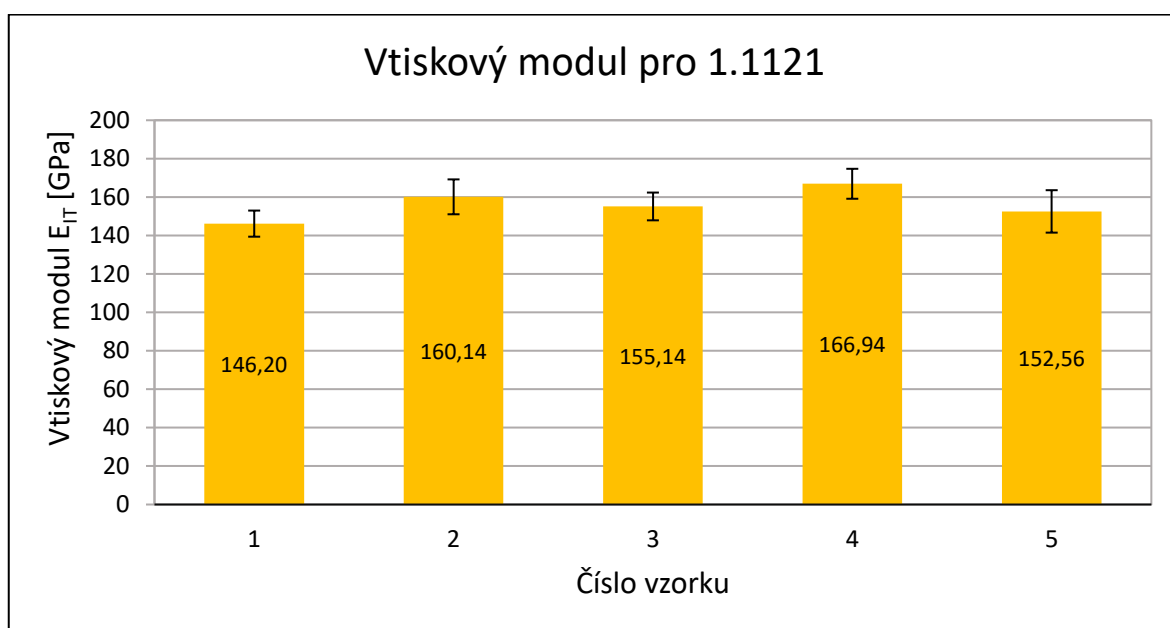
Obr. 41 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro materiál 1.1121

Z předchozích dvou grafů lze vyčíst, že hodnota vtiskové tvrdosti H_{IT} i hodnota Vickersovi tvrdosti HV_{IT} byla nejvyšší u vzorku č. 4. Tedy u materiálu zpracovaného za kalicí teploty 920 °C a popouštěním při teplotě 150 °C. Z tepelně zpracovaných vzorků dosáhl

nejnižší tvrdosti vzorek č. 3 a vzorek č. 5. Tyto vzorky byly zpracovány za vyšší popouštěcí teploty.

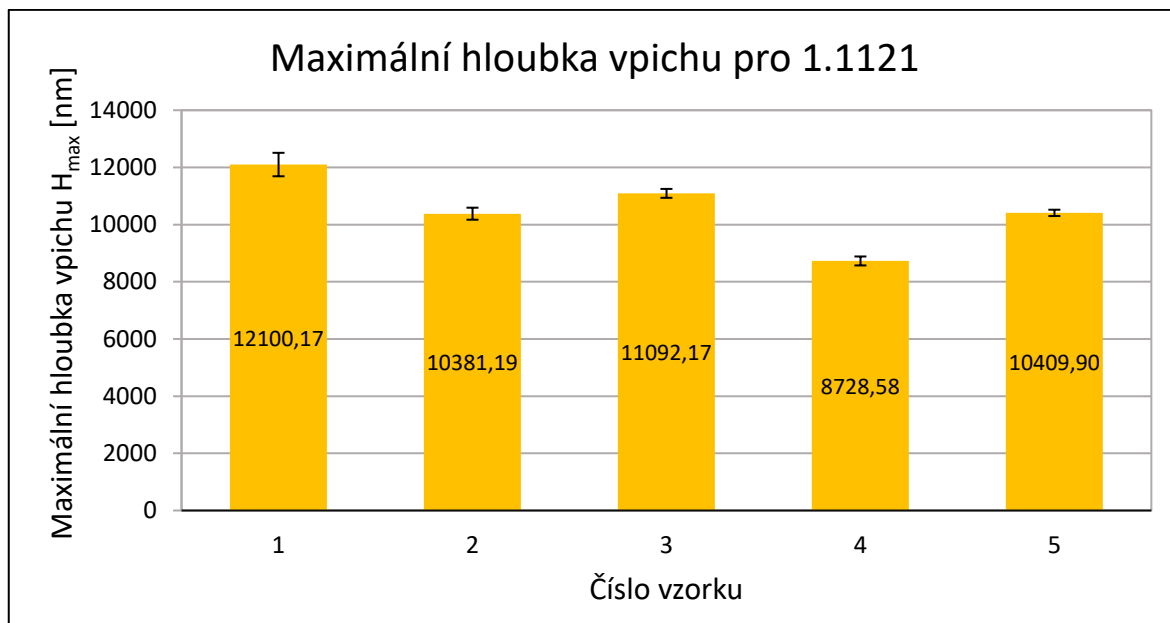
V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tedy nejvíce vzrostla vtisková H_{IT} i Vickersova HV_{IT} tvrdost u vzorku č. 4 a to v obou případech o 102 %.

Tvrdost dle Vickerse nám i v tomto případě posloužila k určení strukturních složek. K tomu jsme opět využily údaje z tabulky 9. Pomocí této tabulky bylo zjištěno, že struktura oceli u vzorku č. 1 je tvořena feritem a austenitem. A vzorek č. 4, který dosahuje největší tvrdosti je tvořen perlitem jemným.

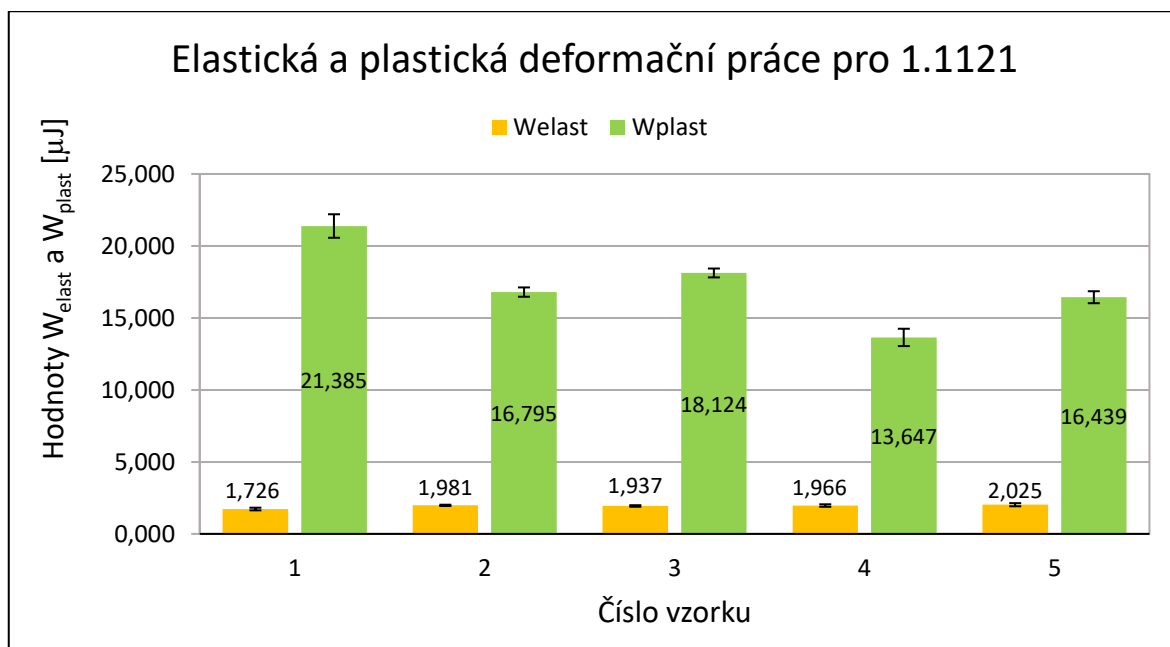


Obr. 42 Vtiskový modul E_{IT} pro materiál 1.1121

Hodnota vtiskového modulu byla v případě oceli 1.1121 největší u vzorku č. 4 (166,94 GPa). Nejmenší rozdíl byl mezi vzorkem č. 3 a vzorkem č. 5. Tento rozdíl činil pouze 2,58 GPa. Naopak nejmenší hodnota vtiskového modulu byla u tepelně nezpracovaného vzorku. Pokud porovnáme tento vzorek se vzorkem č. 4, pak vidíme nárůst o 14 %.

Obr. 43 Maximální hloubka vpichu H_{\max} pro materiál 1.1121

I v tomto případě můžeme vidět, že s růstem tvrdosti oceli dojde k poklesu maximální hloubky vpichu. Z toho důvodu byla nejmenší hloubka naměřena u vzorku č.4 (8728,58 nm). V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tato hodnota poklesla o 28 %.

Obr. 44 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.1121

U oceli 1.1121 byla nejvyšší hodnota elastické deformační práce u vzorku č. 5 (2,025 μJ), který byl zpracován za kalící teploty 920 °C a popouštěn při teplotě 200 °C. Plastická deformační práce byla největší u vzorku č. 1, který nebyl tepelně zpracováván.

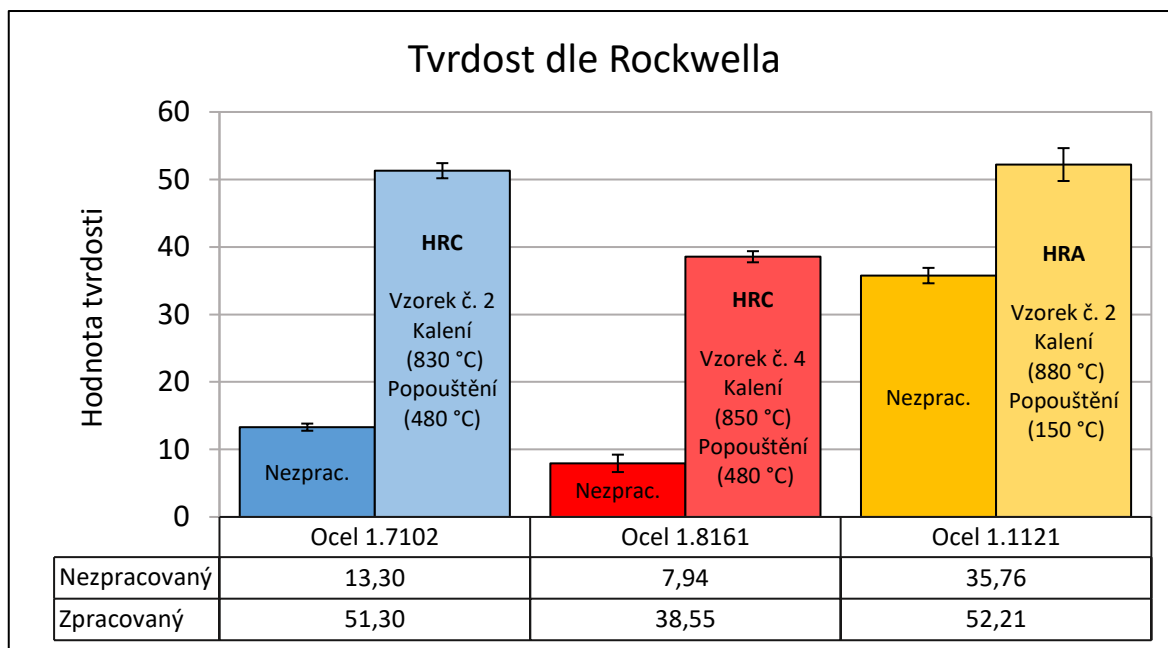
8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V praktické části bylo provedeno měření tvrdosti dle Rockwella a měření mikrotvrdosti pomocí metody DSI. Měření proběhlo na zkušebních vzorcích, které byly za určitých podmínek tepelně zpracovány kalením a popouštěním. Tvrdost takto tepelně zpracovaných vzorků byla následně porovnána s tvrdostí tepelně nezpracovaných vzorků.

V následujících kapitolách je vybrán z každého materiálu vzorek, který dosáhl po zvoleném tepelném zpracování nevyšší tvrdosti. Poté jsou tyto vzorky mezi sebou porovnávány. A zároveň je v grafu uvedeno, za jakých teplot byl vzorek s nejvyšší tvrdostí zpracováván.

8.1 Tvrdost dle Rockwella

U oceli 1.7102 dosáhl nevyšší tvrdosti vzorek č. 2. U oceli 1.8161 dosáhl nevyšší tvrdosti vzorek č. 4 a u oceli 1.1121 byla naměřena největší tvrdost u vzorku č. 2. Tvrdost těchto tří vzorků je porovnána v následujícím grafu a zároveň je i znázorněn nárůst tvrdosti v porovnání s tepelně nezpracovaným materiálem.



Obr. 45 Porovnání vzorků s největší tvrdostí dle Rockwella mezi jednotlivými materiály

Z grafu je zřejmé, že u metody HRC byla při porovnání obou materiálů dosažena nejvyšší tvrdost u oceli 1.7102 a to konkrétně u vzorku č. 2. Tento vzorek byl zpracován za kalící

teploty 830 °C a popouštěn za teploty 430 °C. Použitím tohoto tepelného zpracování byl u této oceli dosažen nárůst tvrdosti o 286 %.

U oceli 1.8161 nejvíce vzrostla tvrdost při kalení za teploty 850 °C a následném popouštění při teplotě 480 °C, tedy u vzorku č. 4. Nárůst byl o 386 %.

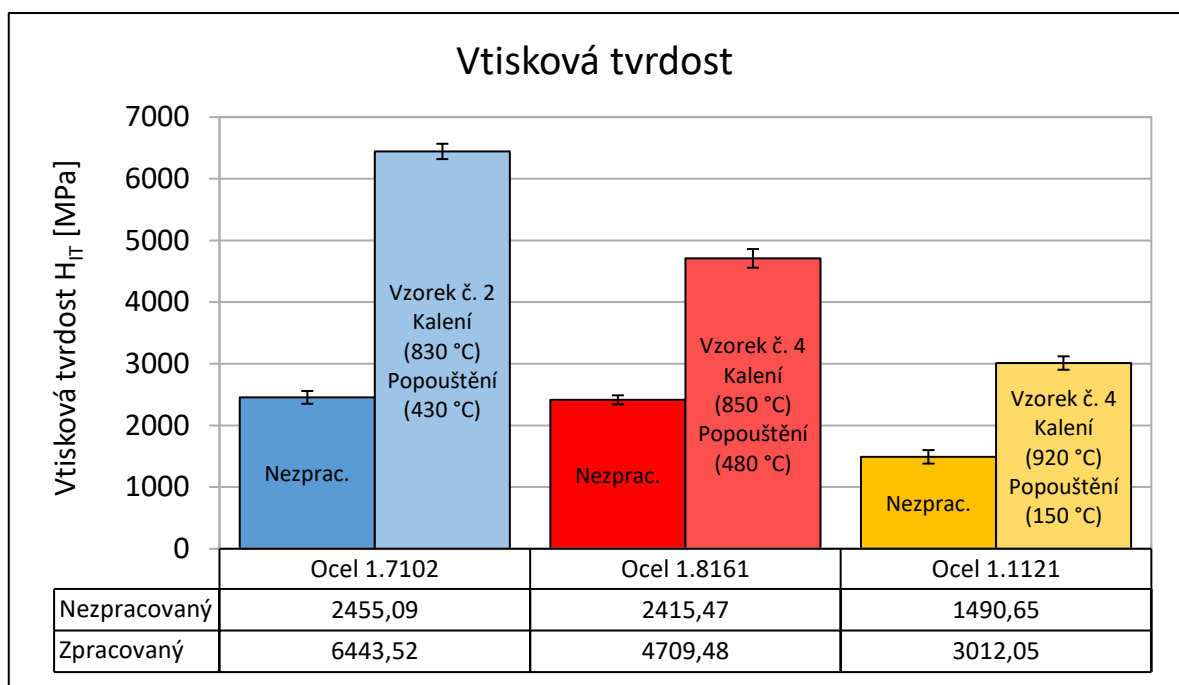
Ocel 1.1121 byla z důvodu nižší tvrdosti měřena metodou HRA. U této oceli nejvíce vzrostla tvrdost při kalení za teploty 880 °C a následném popouštění při teplotě 150 °C, tedy u vzorku č. 2. Nárůst byl o 46 %.

8.2 Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI

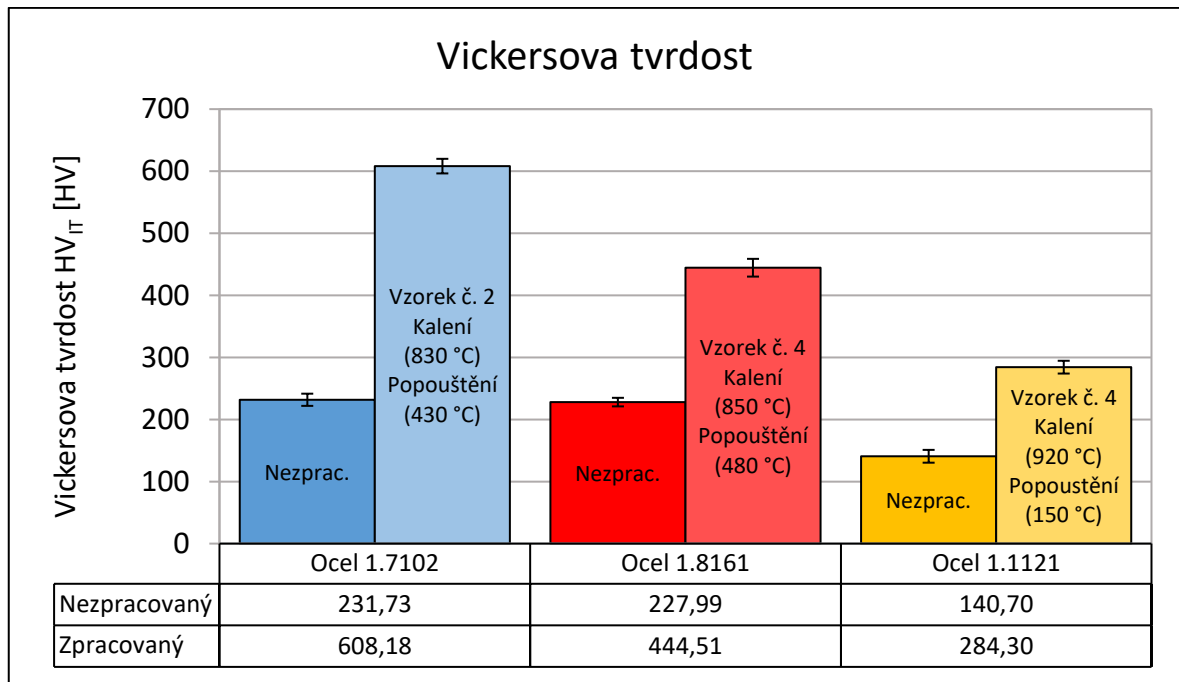
U měření metodou DSI byl stejně jako v případě tvrdosti dle Rockwella vybrán z každého materiálu jeden vzorek, který u této metody měření dosáhl nejlepších výsledků. Následně byly tyto vzorky mezi sebou porovnávány.

U oceli 1.7102 dosáhl nevyšší tvrdosti vzorek č. 2. U oceli 1.8161 dosáhl nevyšší tvrdosti vzorek č. 4 a u oceli 1.1121 byla naměřena největší tvrdost u vzorku č. 4.

8.2.1 Vtisková (H_{IT}) a Vickersova (HV_{IT}) tvrdost



Obr. 46 Porovnání maximální vtiskové tvrdosti mezi jednotlivými materiály



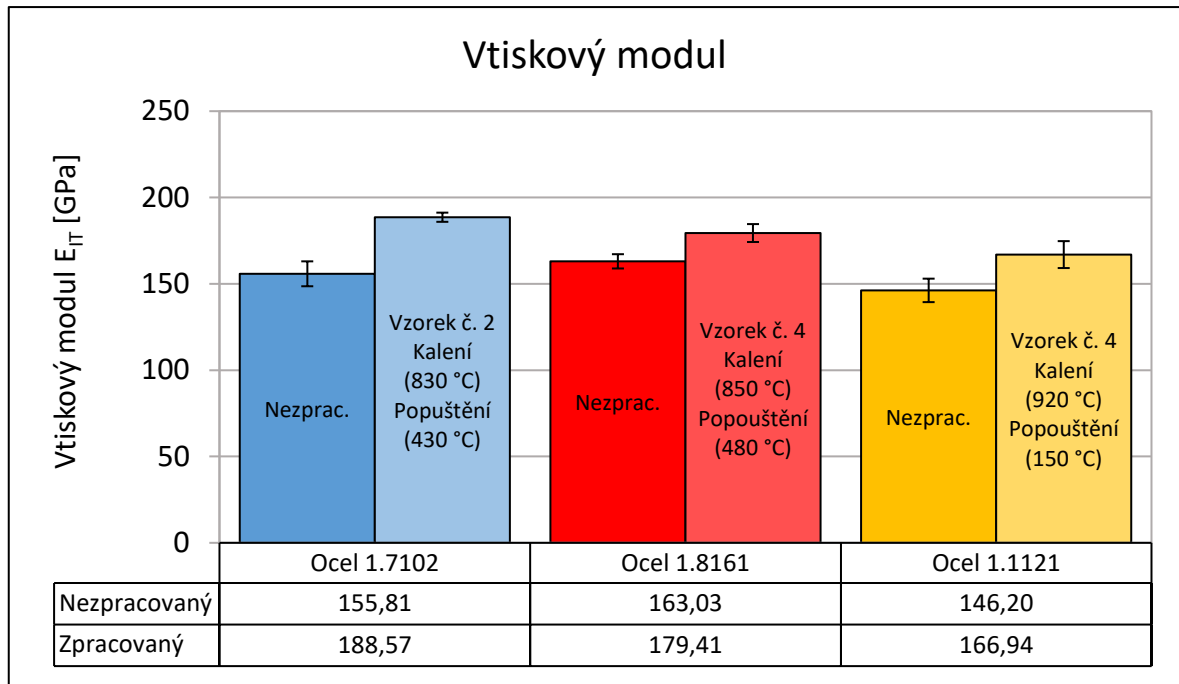
Obr. 47 Porovnání maximální Vickersovi tvrdosti mezi jednotlivými materiály

Z grafů je patrné, že nejvyšší tvrdosti dosahuje zkušební vzorek z materiálu 1.7102. Konkrétně jde o vzorek, který byl zpracován za kalící teploty 830 °C a dále popouštěn při teplotě 430 °C. U tohoto materiálu byl také pomocí uvedeného tepelného zpracování dosažen nejvyšší nárůst v tvrdosti oproti tepelně nezpracovanému vzorku. Tato tvrdost vzrostla o 162 %. Naopak nejnižší tvrdosti dosáhl zkušební vzorek z materiálu 1.1121.

Z hodnot Vickersovi tvrdosti byly u jednotlivých materiálů určeny pomocí tabulky 9 strukturní složky. Z této tabulky plyne, že se tepelně zpracovaná ocel 1.7102 nachází v oblasti nízkouhlíkového martenzitu. Právě tato strukturní složka vznikla při kalení a to tak, že byl ohřátý materiál ochlazován z oblasti austenitu takovou rychlostí, aby se zabránilo vzniku feritu a perlitu, což mělo za následek, že byl takto zachovaný nestabilní austenit přeměněn při teplotách kolem 200 °C na martenzit.

Tepelně zpracovaná ocel 1.8161 se nachází v oblasti dolního bainitu. Bainit vznikl bainitickou přeměnou při kalení. A to tak, že materiál, který se nacházel v oblasti austenitu, byl ochlazován takovou rychlostí, aby nedošlo ke vzniku feritu a perlitu, ale aby se následně zachovaný nestabilní austenit přeměnil při teplotách kolem 500 °C na bainit. Zároveň ale rychlost ochlazování nebyla velká natolik, aby mohlo dojít ke vzniku martenzitu.

Tepelně zpracovaná ocel 1.1121 se nachází v oblasti jemného perlitu. Perlit vznikl z austenitu perlitickou přeměnou při kalení. Perlitická přeměna proběhla za teplot kolem 500 °C.

8.2.2 Vtiskový modul (E_{IT})


Obr. 48 Porovnání maximálního vtiskového modulu mezi jednotlivými materiály

Hodnoty vtiskového modulu jsou u všech tří materiálů téměř totožné. Mírně vyšší hodnota je u materiálu 1.7102, u kterého je zaznamenán i nejvyšší nárůst oproti tepelně nezpracovanému vzorku. Naopak nejnižší hodnota vtiskového modulu u tepelně zpracovaného vzorku je u materiálu 1.1121.

ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá tepelným zpracováním a následně měřením mikro-mechanických vlastností u vybraných vzorků oceli. Pro přípravu zkušebních vzorků byly vybrány tři druhy materiálů. Konkrétně se jednalo o ocel 1.7102, 1.8161 a 1.1121. Z každého materiálu bylo připraveno pět zkušebních vzorků, které byly zpracovávány kalením a popouštěním. Tyto vzorky se od sebe lišily použitou kalicí a popouštěcí teplotou. Tepelné zpracování proběhlo v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, Zlín, na kalicím pracovišti SKM od firmy LAC.

K měření makrotvrdomosti byla použita zkouška dle Rockwella (metoda HRA a HRC) a měření mikrotvrdomosti bylo provedeno metodou DSI (zatížení 5 N). Zkouška dle Rockwella byla provedena na analogovém tvrdoměru Rockwell HR – 150A a Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI byla provedena na měřicím přístroji MicroCombi Tester (MHT³) v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, Zlín. Následně byly všechny naměřené hodnoty graficky zpracovány a vyhodnoceny.

V teoretické části jsou uvedeny vlastnosti a značení technických slitin železa. Následně jsou zde popsány způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování a v neposlední řadě také jednotlivé metody měření tvrdosti.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že nejvyšší tvrdosti dosáhl materiál 1.7102, který byl zpracován za kalicí teploty 830 °C a popouštěn za popouštěcí teploty 430 °C. Z tepelně zpracovaných vzorků dosáhl naopak nejnižší tvrdosti materiál 1.1121, který byl zpracován za kalicí teploty 880 °C a popouštěn za teploty 200 °C.

Z výsledků tvrdosti dle Vickerse byly následně u všech vzorků určeny strukturní složky, ze kterých se daný materiál skládá. Tepelně zpracované vzorky se nacházely převážně v oblasti nízkouhlíkového martenzitu nebo dolního bainitu. Což bylo způsobeno tím, že byly zpracovávány kalením. Naopak tepelně nezpracované vzorky se nacházely převážně v oblasti perlitu hrubého.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 8072042483.
- [2] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 9788070432440.
- [3] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 8070806001. Dostupné také z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/.
- [4] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. [*Nauka o materiálu. 3. část*], Speciální kovové materiály. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 9788001042120.
- [5] BRHLÍK, David. *Evropské normy pro značení ocelí*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Eva Novotná.
- [6] HERRMANN, Konrad. *Hardness testing: principles and applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2011, 1 online zdroj (vi, 255 p.). ISBN 9781613447611. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTPA0>.
- [7] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:185cc400-de76-11e8-a5a4-005056827e52>.
- [8] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1*. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 8071832650.
- [9] TOTTEN, George E., ed. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 9780849384554.

- [10] LISCIC, Bozidar, Hans M. TENSI, Lauralice C.F. CANALE & George E. TOTTEN. *Quenching Theory and Technology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 9781439859865.
- [11] HAZLINGER, Marián a Roman MORAVČÍK. *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. Trnava: AlumniPress, 2008, 141 s. ISBN 9788080960674. Dostupné také z: <https://is.stuba.sk>.
- [12] JÁNSKÝ, Tomáš Jánský. *Zlepšení vlastností povrchů slitiny CoCrMo oxidací a nitridací*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní. Vedoucí práce Vladimír Starý.
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 8072041932.
- [14] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 8070434171.
- [15] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia hutníckej literatúry.
- [16] KADLÍČEK, Tomáš. *Micromechanics and microstructural description of materials*. Praha, 2015. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Jiří Němeček.
- [17] BHADURI, Amit. *Mechanical properties and working of metals and alloys* [online]. Singapore: Springer, [2018] [cit. 2020-01-08]. Springer series in materials science. ISBN 978-981-10-7209-3.
- [18] BALTÁ CALLEJA, F. J. a Stojko Christov FAKIROV. *Microhardness of polymers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. Cambridge solid state science series. ISBN 978-0521-04182-9..
- [19] DUŠEK, Jiří. *Tvrdość, mikrotvrdość, nanotvrdość – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.

- [20] BOROVIANSKA, Irena, E. IVANOV & Rumiana KOTSILKOVA. *Experimental Nano and Micro Mechanics of Nanostructured Materials: Thematic collection*. Vol. 3. Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, 2012.
- [21] HODIS, Zdeněk. *Materiály a technologie: Kovy II - přednášky*. Brno, 2011.
- [22] Materiálové normy. <https://online.ferona.cz/> [online]. Praha [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>.
- [23] Český normalizační institut. *ČSN 41 4260 Ocel 14 260 Si-Cr = Si-Cr Steel 14 260*.
- [24] Český normalizační institut. *ČSN 41 5261 Ocel 15 261 Mn-Cr-V = Manganese-Chromium-Vanadium steel 15 261*.
- [25] Český normalizační institut. *ČSN 41 2010 Ocel 12 010 = Steel 12 010*.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
C	Uhlík
Al	Hliník
Mn	Mangan
Cu	Měď
S	Síra
Si	Křemík
Cr	Chrom
V	Vanad
M _s	Teplota martenzitické přeměny [°C]
A _c	Kritická teplota [°C]
IRA	Izotermický rozpad austenitu
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
E _{ht}	Efektivní hloubka cementační vrstvy [mm]
F	Zátěžná síla [N]
D	Průměr kuličky [mm]
D	Průměr vtisku [mm]
A	Plocha vtisku [mm ²]
HB	Tvrдость podle Brinella
HV	Tvrдость podle Vickerse
HR	Tvrдость podle Rockwella
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti

H_{IT}	Vtisková tvrdost [MPa]
HV_{IT}	Vickersova tvrdost
E_{IT}	Vtiskový modul [GPa]
H_{max}	Maximální hloubka vpichu [nm]
W_{elast}	Elastická deformační práce [μ J]
W_{plast}	Plastická deformační práce [μ J]
g	Tíhové zrychlení [m/s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Diagram metastabilní soustavy Fe – Fe ₃ C s fázovým popisem [2].....	11
Obr. 2 Schéma rozdělení ocelí ke tváření [1]	12
Obr. 3 Číselné značení ocelí podle EN [5]	15
Obr. 4 Schéma průběhu tepelného zpracování [8].....	16
Obr. 5 Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe – Fe ₃ C [8].....	17
Obr. 6 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe – Fe ₃ C [8]	20
Obr. 7 Schéma průběhu nepřetržitého kalení [8].....	21
Obr. 8 Schéma průběhu lomeného kalení [8]	21
Obr. 9 Schéma průběhu termálního kalení [8].....	22
Obr. 10 Schéma průběhu izotermického kalení [8]	23
Obr. 11 Schéma průběhu nepřetržitého bainitického kalení [8]	23
Obr. 12 Průběh tvrdosti a koncentrační profil uhlíku ve správně cementované, kalené a popouštěné oceli [11].....	25
Obr. 13 Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [1]	25
Obr. 14 Porovnání růstu vrstvy [12]	26
Obr. 15 Vodní lázeň [7]	27
Obr. 16 Vrypová zkouška [16]	29
Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Brinella [14].....	30
Obr. 18 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [6]	32
Obr. 19 Schéma postupu měření tvrdosti podle Rockwella [14].....	33
Obr. 20 Reprezentativní křivka zatížení [20].....	36
Obr. 21 Zkouška tvrdosti POLDI kladívko [21].....	37
Obr. 22 Kalící pracoviště SKM	41
Obr. 23 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000	43
Obr. 24 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO	44
Obr. 25 Analogový tvrdoměr Rockwell HR - 150A.....	45
Obr. 26 Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT ³)	46
Obr. 27 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.7102 metodou měření HRC	48
Obr. 28 Vtisková tvrdost H _{IT} pro materiál 1.7102.....	49
Obr. 29 Vickersova tvrdost HV _{IT} pro materiál 1.7102	49
Obr. 30 Vtiskový modul E _{IT} pro materiál 1.7102.....	50

Obr. 31 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro materiál 1.7102	51
Obr. 32 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.7102	51
Obr. 33 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.8161 metodou měření HRC	52
Obr. 34 Vtisková tvrdost H_{IT} pro materiál 1.8161	53
Obr. 35 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro materiál 1.8161	54
Obr. 36 Vtiskový modul E_{IT} pro materiál 1.8161	55
Obr. 37 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro materiál 1.8161	55
Obr. 38 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.8161	56
Obr. 39 Porovnání tvrdosti vzorků oceli 1.1121 metodou měření HRA	57
Obr. 40 Vtisková tvrdost H_{IT} pro materiál 1.1121	58
Obr. 41 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro materiál 1.1121	58
Obr. 42 Vtiskový modul E_{IT} pro materiál 1.1121	59
Obr. 43 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro materiál 1.1121	60
Obr. 44 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce pro materiál 1.1121	60
Obr. 45 Porovnání vzorků s největší tvrdostí dle Rockwella mezi jednotlivými materiály	61
Obr. 46 Porovnání maximální vtiskové tvrdosti mezi jednotlivými materiály.....	62
Obr. 47 Porovnání maximální Vickersovi tvrdosti mezi jednotlivými materiály.....	63
Obr. 48 Porovnání maximálního vtiskového modulu mezi jednotlivými materiály...64	

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mezní obsahy legovacích prvků pro rozdělení ocelí na nelegované a legované [1]	13
Tab. 2 Rozdělení zkoušek tvrdosti [14]	28
Tab. 3 Stupnice tvrdosti [6]	34
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.7102 [23]	40
Tab. 5 Chemické složení oceli 1.8161 [24]	40
Tab. 6 Chemické složení oceli 1.1121 [25]	41
Tab. 7 Parametry tepelného zpracování jednotlivých vzorků.....	42
Tab. 8 Parametry zkoušky dle Rockwella	45
Tab. 9 Tvrdost strukturních složek	47
Tab. 10 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.7102.....	48
Tab. 11 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.8161	52
Tab. 12 Parametry tepelného zpracování pro ocel 1.1121	56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: CD disk obsahující:

- Bakalářskou práci v elektronické podobě
- Materiálový list oceli 1.7102
- Materiálový list oceli 1.8161
- Materiálový list oceli 1.1121