

Vliv podmínek tepelného zpracování na mikro- mechanické vlastnosti

František Henkl

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **František Henkl**
Osobní číslo: **T20643**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv podmínek tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti**

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

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

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

BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 4. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit 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 této bakalářské práce je zkoumat vlivy tepelného zpracování na výsledné mikro-mechanické vlastnosti oceli.

Teoretická část je věnována popisu vlastností technických slitin železa, jejich struktury a rozdělení. Dále popisuje způsoby tepelného namáhání ocelí a měření jejich tvrdosti.

Praktická část se zabývá postupem přípravy zkušebních vzorků z vybraného druhu oceli, tepelného zpracování jednotlivých vzorků, jejich následné měření mikro-mechanických vlastností a grafické vyhodnocení výsledků měření.

Klíčová slova: ocel, tepelné zpracování, tvrdost, teplota, kalení, Vickers, DSI

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to investigate the effects of heat treatment on the resulting micro-mechanical properties of steel.

The theoretical part is devoted to the description of the properties of technical iron alloys, their structure and distribution. It also describes the methods of thermal stressing of steels and the measurement of their hardness.

The practical part deals with the procedure of preparation of test specimens from selected steel types, heat treatment of individual specimens, their subsequent measurement of micro-mechanical properties and graphical evaluation of the measurement results.

Keywords: steel, heat treatment, hardness, temperature, hardening, Vickers, DSI

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D.za jeho ochotu, trpělivost, cenné rady a poznatky, které mi byly poskytnuty během průběhu vypracování této bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ŽELEZO A JEHO SLITINY	11
1.1 VLASTNOSTI ČISTÉHO ŽELEZA	11
1.2 TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA.....	12
1.3 UHLÍK VE SLITINÁCH ŽELEZA	12
1.4 AUSTENITIZACE	13
1.5 TRANSFORMAČNÍ DIAGRAMY OCELÍ.....	14
1.5.1 Diagram izotermického rozpadu austenitu (IRA).....	14
1.5.2 Diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA).....	15
1.6 OBECNÁ KLASIFIKACE OCELÍ.....	16
1.7 OCELI KE TVÁŘENÍ	17
1.7.1 Nelegované oceli	18
1.7.2 Legované oceli	19
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN ŽELEZA	21
2.1 ŽÍHÁNÍ	22
2.1.1 Žíhání na odstranění pnutí.....	23
2.1.2 Žíhání rekrytalizační.....	23
2.1.3 Žíhání na měko.....	23
2.1.4 Žíhání normalizační	23
2.1.5 Žíhání homogenizační (difuzní)	23
2.1.6 Izotermické žíhání	24
2.2 KALENÍ	24
2.2.1 Způsoby kalení	26
2.2.2 Kalení martenzitické	27
2.2.3 Kalení bainitické	28
2.3 POPOUŠTĚNÍ	29
2.4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	30
2.4.1 Cementování	30
2.4.2 Nitridování	31
2.5 TEPELNĚ MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	32
3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI POVRCHU	33
3.1 TVRDOST.....	33
3.2 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	33
3.3 VRYPOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI	34
3.3.1 Martensova zkouška tvrdosti.....	34
3.4 ODRAZOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI	34

3.4.1	Shoreho zkouška	34
3.5	VNIKACÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	35
3.5.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella	35
3.5.2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	36
3.5.3	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	37
3.6	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	41
4	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	42
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
5.1	VOLBA MATERIÁLU ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	43
5.1.1	Ocel 15 330 Cr-Mo-V	43
5.2	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	44
5.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	46
5.3.1	Zalisování vzorků.....	46
5.3.2	Leštění vzorků.....	46
5.4	MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU DSI.....	47
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	49
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ METODOU DSI ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK KALENÍ	49
6.2.1	Kalící teplota 830°C	49
6.2.2	Kalící teplota 855 °C	53
6.2.3	Kalící teplota 880°C	56
6.2.4	Kalící teplota 850°C	58
6.2.5	Kalící teplota 870°C	61
6.2.6	Kalící teplota 890°C	64
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	68
7.1	VICKERSOVA TVRDOST	68
7.2	VTISKOVÝ MODUL.....	69
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK.....	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

Tepelné zpracování je klíčovým procesem při výrobě a úpravě oceli, který má zásadní vliv na její mechanické vlastnosti, zejména tvrdost. Tvrdost je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu. Má vliv na odolnost materiálu proti opotřebení a určuje jeho odolnost vůči trvalé deformaci při působení vnější síly. Tvrdost je velmi důležitá hlavně u ocelí. Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, s obsahem uhlíku méně než 2,14 %. Mezi charakterické vlastnosti oceli patří vysoká pevnost, tvrdost a odolnost proti korozi. Oceli jsou rozděleny podle chemického složení, podle struktury, a podle mechanických a fyzikálních vlastností.

Tvrdost oceli ovlivňuje tepelné zpracování. Tepelné zpracování je technologický proces, který spočívá v řízeném ohřevu na požadovanou teplotu, v udržování na dané teplotě, a v následném ochlazení v daném prostředí. Výsledkem tepelného zpracování mají být změny v mikrostruktuře oceli, které významně ovlivňují její tvrdost, pevnost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Teoretická část popisuje jedny z nejvyužívanějších způsobů tepelného zpracování.

Zkouška tvrdosti je metoda používaná k určení odolnosti materiálu vůči trvalému deformování nebo poškození způsobenému vnějšími silami. Jde o nedestruktivní typ zkoušky, tudíž lze provádět na již zhotovených vzorcích, a nedojde tak k jejich poškození. Zkoušky tvrdosti se dělí na statické a dynamické. V této práci jsou popsány spíše statické zkoušky, které lze podle velikosti působící síly využít k měření mikrotvrdosti. Patří mezi ně zkouška tvrdosti Brinella, Vickerse nebo Rockwella. Moderní metodou měření tvrdosti je metoda DSI.

Cílem praktické části je vyhodnocení vlivu tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti vybraného druhu oceli. Naměřené hodnoty jsou graficky zpracovány a vyhodnoceny.

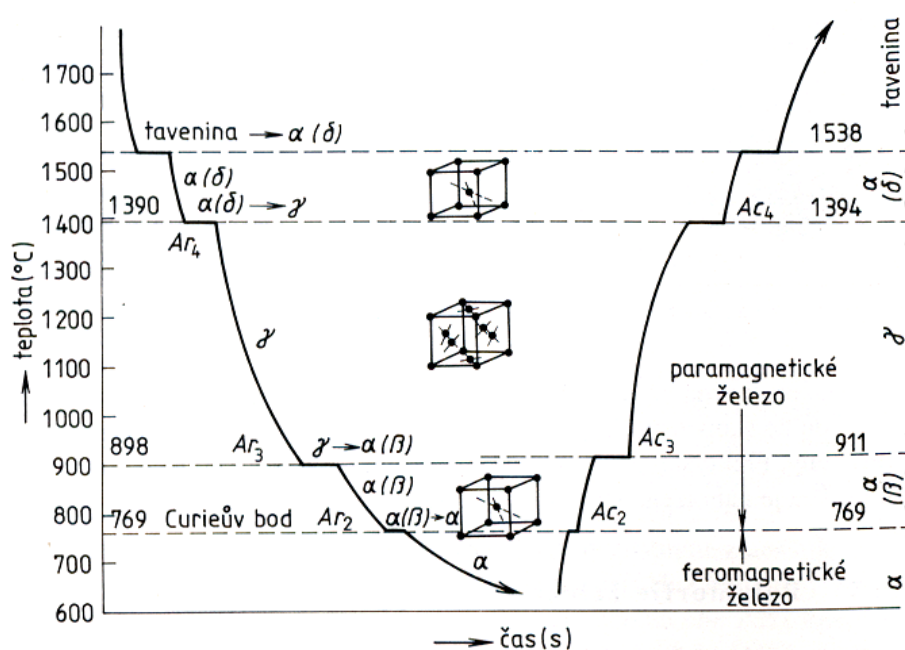
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ŽELEZO A JEHO SLITINY

1.1 Vlastnosti čistého železa

Čisté železo je měkký, tvárný kov s poměrně nízkou pevností. V závislosti na teplotě se železo vyskytuje ve dvou krystalografických modifikacích. Až do teploty 911°C je stabilní modifikace s krystalickou mřížkou krychlovou prostorově středěnou. Modifikace α je magnetická až do teploty 760°C, po překročení této teploty ztrácí železo své magnetické vlastnosti. Nemagnetická modifikace s krychlovou mřížkou prostorově středěnou se označuje jako modifikace β . V rozmezí teplot 911 až 1392°C má železo krychlovou mřížku plošně středěnou, tato modifikace je označována jako modifikace γ . Nad tímto intervalem teplot až do teploty tavení 1538°C nabývá železo opět krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou, která se označuje jako modifikace δ . [1]

Při ochlazování probíhají stejné přeměny, ale v opačném pořadí, popřípadě i za rozdílných teplot. Rozdíl těchto teplot se nazývá tepelná hystereze. [1]



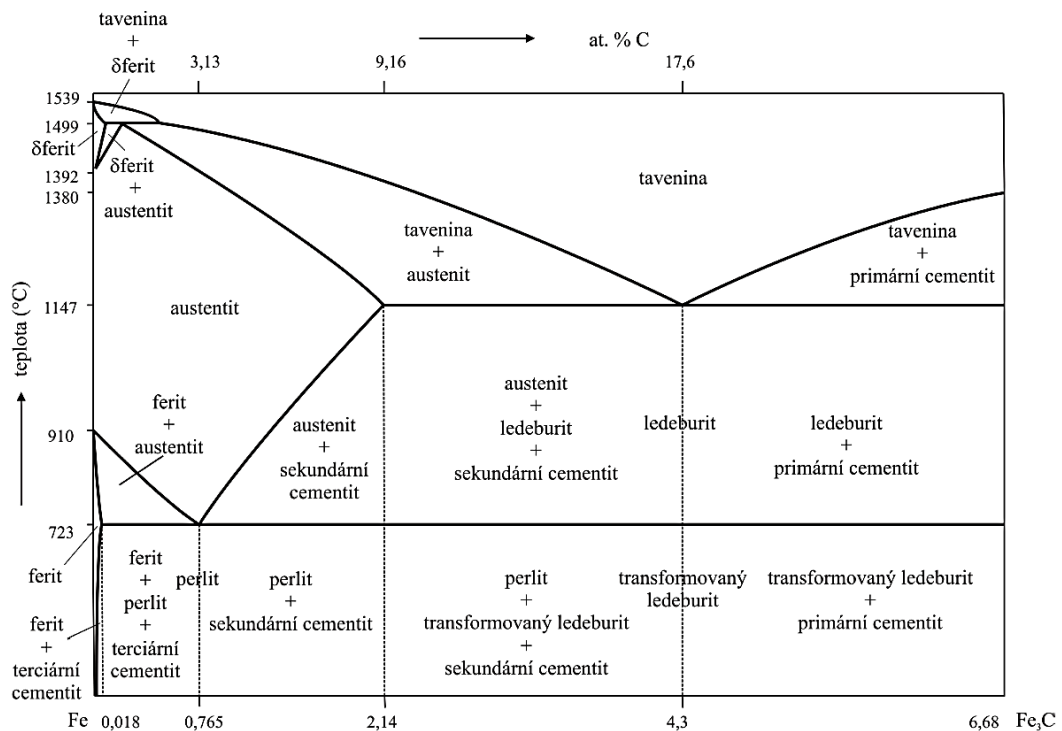
Obr. 1 Křivka chladnutí a ohřevu čistého železa [1]

1.2 Technické slitiny železa

Technické slitiny železa představují nejvýznamnější skupinu kovových materiálů, které nacházejí široké uplatnění v různých oborech lidské činnosti. Díky snadné recyklovatelnosti, patří železo a jeho slitiny mezi nejpříjemnější kovy z ekologického hlediska. Hlavní příměsí technického železa je uhlík, který nejvíce ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti, obrobiteľnosť, nebo možnost tepelného zpracování. Technické slitiny železa lze poté podle obsahu uhlíku rozdělit na oceli, které mají obsah uhlíku pod 2 % a dále na surová železa a litiny, v nichž je obsah uhlíku obvykle překračující 2 %. [1, 2]

1.3 Uhlík ve slitinách železa

Uhlík je nejdůležitější přísadou každého technického železa, jelikož rozhodujícím způsobem ovlivňuje jejich výslednou strukturu a vlastnosti. Pro určení vlastností technického železa lze vycházet z rovnovážného diagramu železa s uhlíkem. Jelikož se uhlík ve slitinách železa vyskytuje jednak volně jako grafit a jednak vázaně chemicky jako cementit, jsou ve slitinách železa s uhlíkem uvažovány dvě rovnovážné soustavy. Soustava Fe-Fe₃C je označována jako metastabilní soustava a podle ní tuhne a chladne zejména oceli. Soustava Fe₃C je označována jako soustava stabilní a posuzují se podle ní změny při tuhnutí a chladnutí litin a surových želez. [1, 2]



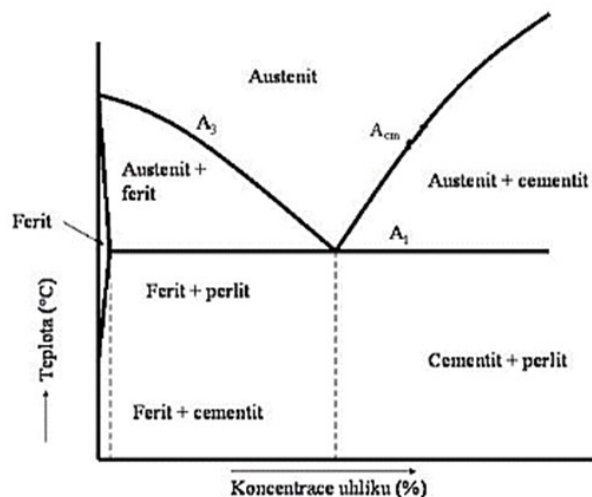
Obr. 2 Metastabilní rovnovážný diagram Fe – Fe₃C [1]

Jedná se o diagram s překrystalizací s peritektickou, eutektickou a eutektoidní přeměnou, a ukazuje fázové poměry v termodynamické soustavě o složkách Fe a Fe₃C. Lze tu sledovat tedy koncentrační rozmezí uhlíku od 0 % do 6,68 %. Podle diagramu lze také vidět, že se zde vyskytují typy tuhých fází. Jedná se o **ferit** (α), což je intersticiální tuhý roztok uhlíku s kubickou prostorově středěnou mřížkou s maximální rozpustností 0,02 % C v železe α při teplotě 727 °C. Stejným typem tuhého roztoku je **ferit δ** , což je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ , s maximální rozpustností 0,1 % při teplotě 1499 °C. **Austenit** (γ) je dalším typem tuhé fáze, jenž vzniká v železe γ . Jeho maximální rozpustnost uhlíku při teplotě 1147 °C je 2,11 %. Pokud obsahují slitiny železa více uhlíků, než rozpustí uvedené fáze, vzniká karbid železa Fe₃C, který se nazývá cementit. Tato intersticiální chemická sloučenina obsahuje 6,68 % C. [1]

Slitiny železa a uhlíku se dělí na dvě základní skupiny podle obsahu uhlíku, a to na oceli a litiny. Oceli jsou slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky, které obsahují méně než 2 hm.% uhlíku. Litiny jsou naopak slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky obsahující více než 2 hm.% uhlíku. Obsah uhlíku v litinách obvykle nepřesahuje 5 hm.% uhlíku. Oceli se dále dělí na podeutektoidní podle toho, zda je jejich obsah uhlíku nižší nebo vyšší, než odpovídá eutektoidnímu složení 0,765 hm.% uhlíku. Podobně se dělí i litiny na podeutektoické a nadeutektoické, kde eutektické složení odpovídá 4,3 hm.% uhlíku. [1,2]

1.4 Austenitizace

Jedná se o základní proces při všech postupech překrystalizačního tepelného zpracování ocelí. Proces austenitizace spočívá v ohřevu nad kritické teploty a přeměna feriticko-cementitické struktury na strukturu austenitickou. [2]



Obr. 3 Tvorba a homogenizace austenitu [2]

V průběhu austenitizace jsou hlavní zejména dva pochody, a to tvorba a homogenizace austenitu a následný růst austenitického zrna. [2]

Tvorba a homogenizace austenitu je označována jako difuzní přeměna, která probíhá tvorbou zárodků a jejich růstem. Zárodky austenitu vznikají v perlitickém feritu heterogenní nukleací na strukturních poruchách. Po přeměně perlitu zůstávají v austenitu zachovány zbytky karbidů, které se postupně rozpouštějí. [2]

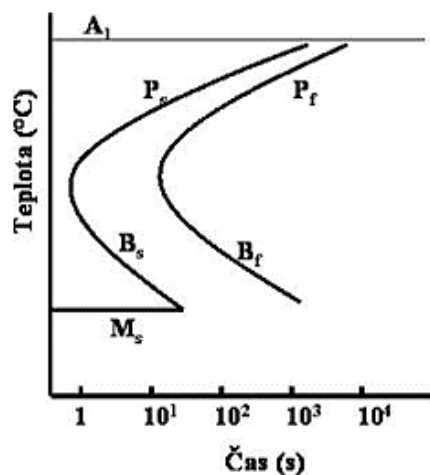
Austenitické zrna a jeho velikost podstatně ovlivňuje mechanické a technologické vlastnosti ocelí. Velikost austenitického zrna závisí na stavu výchozí struktury a na době a teplotě austenitizace. Většinou je snaha získat homogenní jemnozrný austenit. Po překrystalizaci při ohřevu nad kritické teploty je vznikající austenitické zrna drobné. V závislosti na výši teploty poté toto zrna roste. Ocel se poté označuje jako dědičně hrubozrná, nebo dědičně jemnozrná. [1]

1.5 Transformační diagramy ocelí

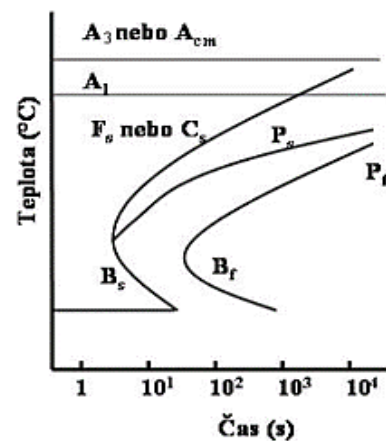
Transformační diagramy jsou zapotřebí zejména ke sledování vzájemných vztahů a souslednosti přeměn austenitu. Transformační diagramy austenitu znázorňují teplotní a časovou závislost průběhu přeměny přechlazeného austenitu. Užívané transformační diagramy jsou dvojího druhu, a to izotermické a anizotermické. [3]

1.5.1 Diagram izotermického rozpadu austenitu (IRA)

Udává dobu přeměn austenitu za izotermických podmínek. K přeměně austenitu dochází za konstantní teploty. V IRA diagramu mají křivky počátků a konců perlitických a bainitických přeměn podobu takzvané „C“ křivky. [3]



Obr. 4 IRA diagram eutektoidní oceli [3]

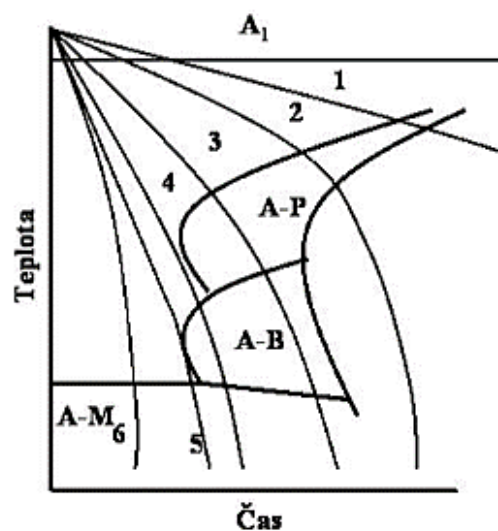


Obr. 5 IRA diagram podeutektoidní nebo nadeutektoidní oceli [3]

Vlevo od křivky počátku perlitické a bainitické přeměny (Ps, Bs) až po teplotu Ms je struktura austenitická. Vpravo od křivky konce přeměny (Pf, Bf) je struktura tvořena produkty těchto přeměn. Příměs karbidotvorných prvků rozpuštěných v austenitu tyto dvě oblasti od sebe teplotně oddaluje. U ocelí jiného složení než eutektoidní, začíná přeměna austenitu vylučováním proeutektoidního feritu (Fs, Ff = Pf), nebo proeutektoidního cementitu (Cs, Cf = Pf). [3]

1.5.2 Diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA)

Jedná se o drhý typ diagramu. Přeměna austenitu probíhá při plynulém ochlazování. Oproti diagramu IRA jsou zde tvary křivek odlišné. V diagramu jsou sestrojeny ochlazovací křivky, které představují různé druhy ochlazování. Z obrázku 6 lze vidět, že při pomalém ochlazování eutektoidní oceli (křivky 1 a 2), se realizuje perlitická přeměna. Při dosažení určité rychlosti ochlazování neproběhne perlitická přeměna do konce, a zbylý austenit transformuje v oblasti bainitické, tudíž je výsledná mikrostruktura tvořena perlitem a bainitem. Se vrůstající rychlostí ochlazování se zvětšuje podíl martenzitu až od rychlosti větší, než udává křivka 5 (resp. v_k), austenit se transformuje pouze na martenzit. Rychlost v_k je nejmenší rychlost ochlazování, kdy je výsledná struktura tvořena pouze martenzitem a jistým podílem zbytkového austenitu. [5]



Obr. 6 ARA diagram eutektoidní oceli [5]

1.6 Obecná klasifikace ocelí

Ocel je pro své mechanické a technologické vlastnosti dodnes jedním z nejdůležitějších technických materiálů. Jedná se o slitinu železa, uhlíku a dalších legujících prvků jako jsou například mangan, křemík, nikl, chrom. Chemickým složením, tepelným zpracováním a způsobem tváření je možno měnit mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti oceli. [1, 3]

Obecně se oceli dělí podle způsobu zpracování na: [3]

- **Oceli k tváření**

Oceli pro tváření jsou dodávány ve formě ingotů, které se potom dále zpracovávají válcováním nebo kováním. [1]

- **Oceli na odlitky**

Z ocelí na odlitky se odlévají již konečné tvary, které se dále dle potřeby opracovávají řeznými nástroji [1]

Dále se ocel dělí podle použití na:

- **Konstrukční**

Používají se na výrobu součástí strojů a zařízení, různých druhů kovových konstrukcí nebo třeba i vozidel. [3]

- **Nástrojové**

Vyrábějí se v elektrických pecích obloukových nebo indukčních. Od těchto materiálů se obecně požaduje tvrdost, pevnost, dostatečná houževnatost, odolnost proti opotřebení, prokalitelnost. [1]

Dalším dělením je dělení podle chemického složení na:

- **Oceli nelegované**

Jedná se o slitinu železa a uhlíku, obsahující kromě uhlíku i případně velmi malá množství dalších prvků jako například (Mn, Si, Ni, Al, Mg). [3]

- **Oceli legované**

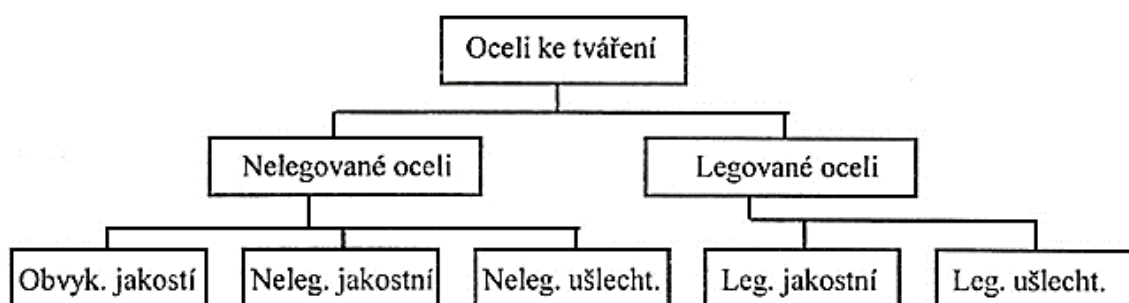
- Za legované se považují oceli, které jsou pro dosažení požadovaných vlastností záměrně upraveny přísadovými prvky jako jsou například (Mo, Ni, Cr, W). Obsah legujících příměsí může obsahovat i více než 10 %. [3]

Hlavní důvody legování slitin železa:

- Zvýšení mechanických vlastností, zejména pevnosti a tvrdosti.
- Zvýšení prokalitelnosti legováním prvky, které snižují kritickou rychlost rozpadu austenitu.
- Dosažení některých fyzikálních vlastností u ocelí, např. elektrických nebo magnetických.
- Vytvoření tvrdých a vůči opotřebení tvrdých karbidů, případně karbidů stabilních i za vysokých teplot.
- Zvýšení žárupevnosti oceli.

1.7 Oceli ke tváření

Jako oceli ke tváření lze považovat materiály, ve kterých je hmotnostní podíl železa větší než kteréhokoliv jiného prvku, a které všeobecně vykazují méně než 2 % C a obsahují i jiné prvky. Oceli ke tváření se dělí podle jakosti a chemického složení na nelegované oceli a legované oceli. [2]



Obr. 7 Schéma rozdělení oceli ke tváření dle chemického složení [4]

1.7.1 Nelegované oceli

Nelegované oceli mají dané chemické složení, které nedosahuje mezních hodnot obsahu jednotlivých prvků. Jak může být vyzorováno ze schématu, tak nelegované oceli se dále dělí na oceli obvyklých jakostí, oceli nelegované jakostní a o oceli nelegované ušlechtilé. [2]

- **Oceli obvyklých jakostí**

Nelegované oceli obvyklých jakostí nemívají v hotovém výrobku předepsané chemické složení. Kromě obsahu Si a Mn není předepsán žádný další obsah legujících prvků. Jednou z podmínek pro oceli obvyklých jakostí je to, že nejsou určeny pro tepelné zpracování (pokud se však jedná o žíhání na měkko, žíhání na odstranění vnitřního pnutí nebo normalizační žíhání, tak to podle EN není považováno za tepelné zpracování). Další podmínkou jsou požadavky, které je nutno dodržet pro nezpracovaný nebo normalizační žíhací stav. [4]

Tabulka 1 Mezní hodnoty pro oceli obvyklých jakostí

Požadavek		Mezní hodnota
Druh	Platný pro tloušťky a^2 (mm)	
Min. pevnost v tahu R_m	≤ 16	≤ 690 MPa
Min. mez kluzu R_e	≤ 16	≤ 360 MPa
Min. tažnost $A_5^{1)}$	≤ 16	≤ 26 %
Min. průměr trnu při zkoušce lámavosti	≥ 3	$\geq a^2)$
Min. nárazová práce při zkoušce rázem v ohybu KV podél při 20 °C	$\geq 10 \leq 16$	≤ 27 J
Max. obsah C v tavbě		$\geq 0,10$ %
Max. obsah P v tavbě		$\geq 0,045$ %
Max. obsah S v tavbě		$\geq 0,045$ %

- **Nelegované jakostní oceli**

Jedná se o druhy ocelí, pro které všeobecně není předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování a nejsou předepsány žádné požadavky na stupeň čistoty, pokud se týká nekovových vměstků. Co se týče výroby, tak ta u nelegované jakostní oceli vyžaduje větší pozornost, jelikož jsou kladeny přísnější nebo dodatečné požadavky z hlediska namáhání ve srovnání s oceli obvyklých jakostí. [3, 4]

- **Nelegované ušlechtilé oceli**

Jsou to oceli, které na rozdíl od jakostních ocelí vykazují vyšší stupeň metalurgické čistoty. Jsou většinou určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení. Mají několik požadavků, u kterých se požaduje splnění minimálně jedno z nich. [2]

1.7.2 Legované oceli

Legované oceli jsou libovolné typy oceli, do kterých byl přidán jeden nebo více přísadových prvků za účele dosažení požadovaných charakteristik nebo fyzikálních vlastností, jako je například žáruvzdornost nebo korozní odolnost. Kvalitativně se legované oceli rozdělují na jakostní a ušlechtilé. [3]

- **Legované jakostní oceli**

Jsou to oceli určené pro podobné účely jako oceli nelegované jakostní. Ale aby vyhovovaly stanoveným požadavkům například na houževnatost, velikost zrna nebo svařitelnost, obsahují legující prvky, které z nich dělají legované oceli. Nejsou všeobecně určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení. [3,4]

Zařazují se k nim:

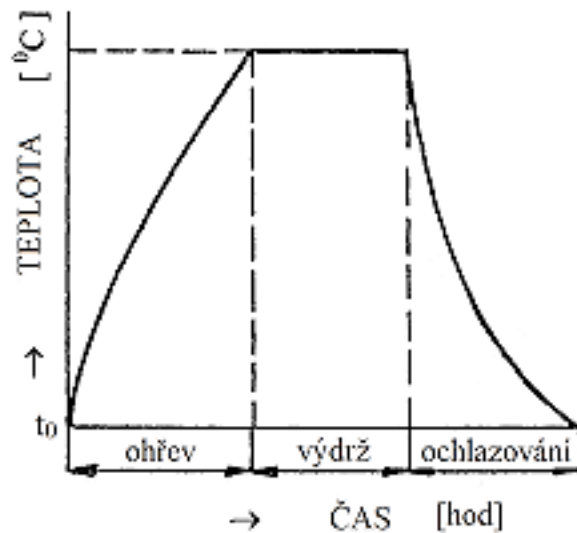
- a) Svařitelné jemnozrné konstrukční oceli pro ocelové konstrukce včetně tlakových nádob a potrubí, které musí vyhovovat předepsaným požadavkům. [4]
- b) Oceli legované pouze křemíkem nebo křemíkem a hliníkem se zvláštními požadavky na magnetické a elektrické vlastnosti.
- c) Oceli na výrobu kolejnic, štetovnic, důlních výztuží.
- d) Oceli legované pouze mědí.
- e) Oceli pro ploché výrobky válcované za tepla nebo za studena. [4]

- **Legované ušlechtilé oceli**

Legované ušlechtilé oceli jsou charakterizovány přesnou kontrolou chemického složení a zvláštními výrobními a zkušebními podmínkami za účelem dosažení zlepšení vlastností. Patří mezi ně zejména nerezavějící oceli, žárovzdorné a žárovevné oceli, oceli na valivá ložiska, nástrojové oceli a jiné. [3,4]

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN ŽELEZA

Tepelné zpracování je proces, kdy je součástka podrobena jednomu nebo více tepelným cyklům, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností a struktury výrobku. Průběh tepelného zpracování se skládá ze 3 základních cyklů, a to z ohřevu (materiál se musí zahřát na určitou teplotu), výdrže na požadované teplotě a ochlazování. [5]

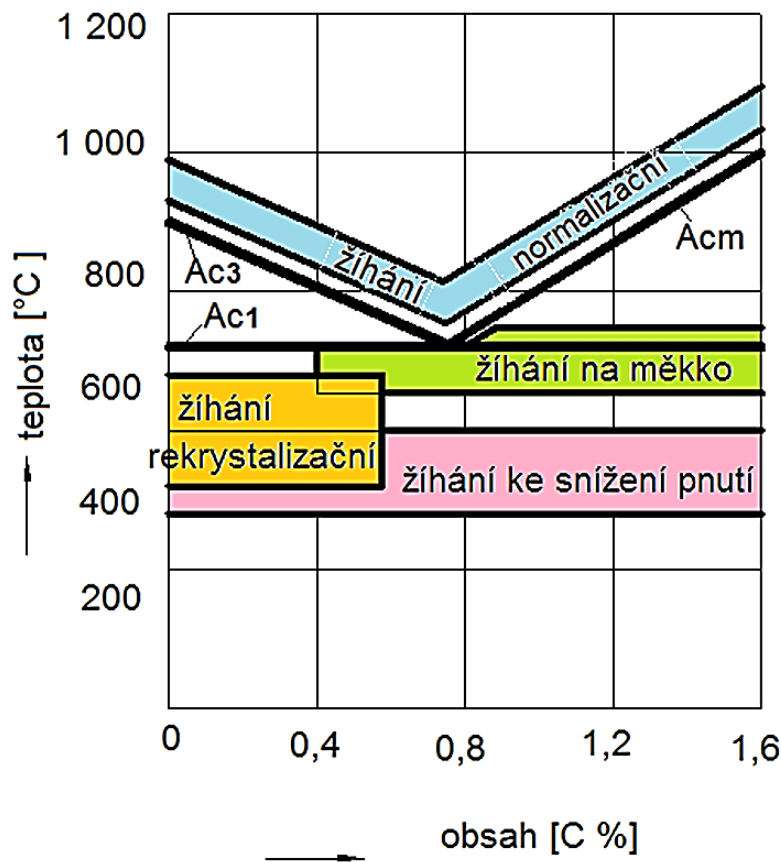


Obr. 8 Obecný diagram tepelného zpracování [6]

Konkrétní druh tepelného zpracování je charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu, konečnou teplotou ohřevu, dobou setrvání na dané teplotě a rychlosti ochlazování. Vhodný průběh a rychlost ohřevu závisí na účelu tepelného zpracování. U některých případů je nutno použít pozvolný proces ohřívání, aby v materiálu nedocházelo ke vzniku pnutí a porušení jeho pevnosti. Jsou i postupy, které naopak vyžadují velmi prudký ohřev, například u povrchového kalení ocelí. Co se týče výdrže na požadované teplotě, tak tam opět záleží na účelu zpracování a rozměrech materiálu. Podle rychlosti ochlazování rozlišujeme dva základní druhy tepelného zpracování a to žihání (ochlazujeme pomalu a vzniká rovnovážná stabilní struktura) a kalení (ochlazujeme velmi rychle, vzniká nerovnovážná struktura). [8]

2.1 Žihání

Žihání je proces tepelného zpracování, při kterém je kov zahříván nad svou rekrytalizační teplotu, udržován na této teplotě po určitou dobu a poté pomalu ochlazen, aby se vytvořila rovnovážná struktura. Mezi hlavní účely tepelného zpracování žiháním řadíme eliminaci zbytkových pnutí, ke kterým došlo během dřívějších kroků zpracování, zlepšení obrobiteľnosti, snížení tvrdosti a zvýšení houževnatosti, odolnost proti deformaci a prasknutí, zlepšení magnetických vlastností. [6]



Obr. 9 Oblast žihacích teplot [7]

Podle výšky žihací teploty rozlišujeme:

- Žihání bez překrytalizace (při teplotách nižších než A_{c1}) – žihání na odstranění pnutí, žihání rekrytalizační, žihání na měkko.
- Žihání s překrytalizací (při teplotách vyšších než A_{c1}) – normalizační žihání, homogenizační (difuzní) žihání, izotermické žihání. [7]

2.1.1 Žihání na odstranění pnutí

Při žihání ke snížení pnutí dochází k ohřevu materiálu na teplotu 500 - 650°C. Cílem je odstranit, nebo alespoň snížit vnitřní pnutí, které vzniklo jako důsledek předchozího zpracování. Aby při procesu ochlazování nevznikla nová pnutí provádí se pomalé chladnutí v peci, kdy je materiál ochlazován na cca 200°C a následně dochlazen na vzduchu. [8,9]

2.1.2 Žihání rekrytalizační

Rekrytalizační žihání je proces žihání při teplotách vyšších, než je teplota rekrytalizace ocelí tvářených za studena. Cílem rekrytalizačního žihání je odstranění důsledků tváření za studena tzn. obnovit tvárné vlastnosti oceli. [8,9]

2.1.3 Žihání na měko

Jedná se o proces tepelného zpracování s cílem dosažení snížení tvrdosti a zejména zlepšení obrobitelnosti oceli. U podeutektoidních ocelí probíhá žihání při teplotách pod A_{c1} v rozmezí 680 - 700°C. U nadeutektoidních ocelí se využívá kolísavého ohřevu, kdy se teplota zvyšuje nad A_{c1} , ale před začátkem překrytalizace se materiál ochlazením opět stabilizuje pod tuto teplotu. [8,10]

2.1.4 Žihání normalizační

Normalizační žihání se uplatňuje především u nelegovaných a nízkolegovaných podeutektoidních ocelí. Cílem normalizačního žihání je dosažení rovnoměrné a jemné struktury bez vnitřních pnutí a zároveň dosažení dobrých mechanických vlastností. U podeutektoidních ocelí je teplota ohřevu mezi 30 - 50°C nad A_{c3} . Ochlazením probíhá na vzduchu, nebo pozvolně v peci. [10]

2.1.5 Žihání homogenizační (difuzní)

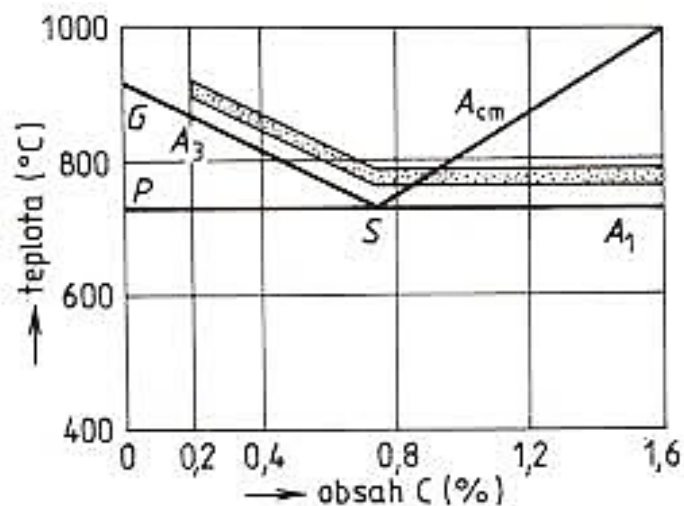
Tento proces žihání se obvykle provádí u těžkých a složitých odlitků, které jsou náchylné k výrazné mezikrytalické segregaci. Cílem tohoto procesu žihání je dosažení homogenní struktury. Pro zajištění homogenity se žihání provádí při vysokých teplotách až 1250°C. Při tak vysoké teplotě má však homogenizační žihání tendenci vytvářet hrubozrnnou mikrostrukturu spolu s tvorbou okují na povrchu odlitku, proto je nutno zařadit po homogenizačním žihání proces normalizačního žihání. [11]

2.1.6 Izotermické žíhání

Je vhodné pro součásti středních velikostí z nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Izotermické žíhání se provádí zahříváním oceli, kdy je austenitizační teplota těsně nad A_{c3} , popř. A_{c1} , s následnou krátkou dobou setrvání na této teplotě, aby vzniklé austenitické zrna bylo co nejmenší. Poté následuje rychlé ochlazení na teplotu perlitické přeměny, výdrž na této teplotě do té doby, než dojde k ukončení přeměny austenitu v perlit a následně ochlazení na vzduchu. Cílem je zlepšení obrobitelnosti a jakosti povrchu, snížení tvrdosti a vnitřního pnutí. [12]

2.2 Kalení

Kalení je způsob tepelného zpracování, jehož hlavním účelem je zvýšení tvrdosti oceli. Průběh kalení je stejný jako u ostatních způsobů tepelného zpracování. Skládá se z ohřevu, prohřátí a ochlazení. Ohřev provádíme na austenizační teplotu (u podeutektoidních ocelí 30 až 50°C nad A_{c3} , u ocelí nadeutektoidních nad A_{c1}). Po ohřevu následuje výdrž na této teplotě, dochází k austenitizaci a k rozpouštění feritu a perlitu. Poté je nutné ochlazení kritickou rychlostí, kdy vznikají metastabilní struktury, martenzitická nebo bainitická. [12]



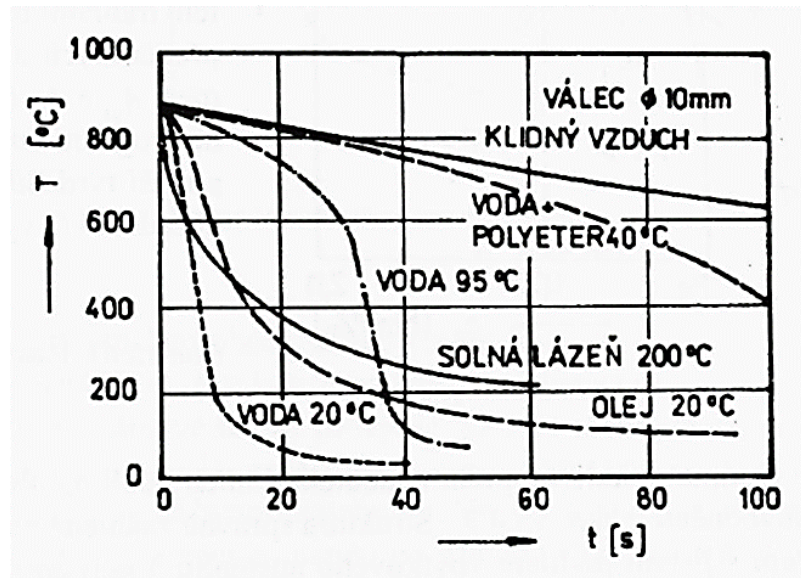
Obr. 10 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [12]

Nezbytné pojmy pro volbu vhodné oceli a vhodného způsobu kalení:

- **Kalitelnost** – Jedná se o schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti. Nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli po kalení je závislá na obsahu uhlíku. Oceli s nízkým obsahem uhlíku nedosahují vysoké tvrdosti, až nelegované oceli obsahující

více než 0,35 % C považujeme za dobře kalitelné. Naopak nelegované oceli s obsahem uhlíku menším než 0,2 % C už považujeme za nekalitelné. [12]

- **Prokalitelnost** – Schopnost oceli dosáhnout tvrdosti odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu. [12]
- **Kalící prostředí** – Cílem kalení je dosažení martenzitické struktury v předem stanovené části průřezu, kde musí být rychlost ochlazování větší než rychlost kritická. Při volbě ochlazovacího prostředí je třeba volit takové prostředí, kde bude rychlost ochlazování co možná nejméně překračovat rychlost kritickou. Příliš velká ochlazovací rychlost totiž zvětšuje teplotní rozdíly mezi povrchem a jádrem součásti, a tím zvyšuje i tepelné pnutí, které spolu se strukturním pnutím vyvolává deformace. [1]



Obr. 11 Ochlazovací křivky středu ocelového válce o průměru 10 mm v uvedených prostředích [2]

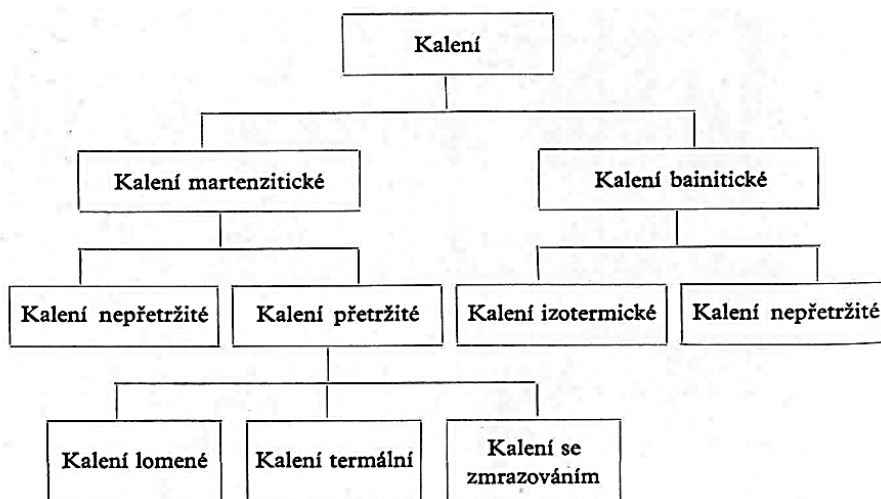
- Voda – Nejstarší a velmi účinné kalící prostředí. Ochlazování ve vodě neprobíhá plynule. Ponoříme-li součást ohřátou na teplotu kalení do vody, vytvoří se kolem ní okamžitě parní polštář, který zpomaluje ochlazování. Proto je nutné předmětem v lázni pohybovat. Při kalení do vody vzniká vždy velké vnitřní pnutí. [1,12]
- Olej – Ochlazovací rychlost olejových lázní je podstatně menší v porovnání s vodní lázní, a to zejména v oblasti martenzitické přeměny. Ke kalení se

používá především minerálních olejů, hlavně díky jejich viskozitě. Olej musí být čistý a řídký. Za provozu olej obvykle stárne v důsledku oxidace, uhelnatění a znečišťování okujemi a musí se proto opakovaně měnit. [1,12]

- c) Roztavené solné a kovové lázně – Teplota 200 až 500 °C. Menší účinnost ochlazování než u olejových lázní. Snižuje se nebezpečí vzniku vnitřních pnutí a deformace kalených součástí. [1]
- d) Vzduch – Ochlazování je plynulé. Na vzduchu se kalí vysocelegované tzv. samokalitelné oceli. [2]

2.2.1 Způsoby kalení

Kalením vzniká buď martenzit nebo bainit. Podle toho dělíme kalení do dvou základních skupin na kalení martenzitické a bainitické. [12]

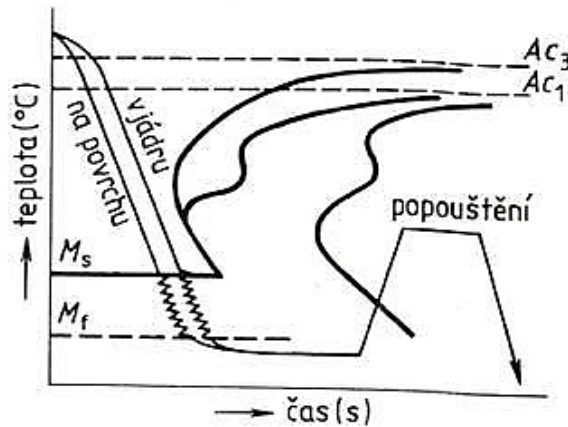


Obr. 12 Přehled způsobů kalení oceli [12]

2.2.2 Kalení martenzitické

a) Nepřetržitě kalení

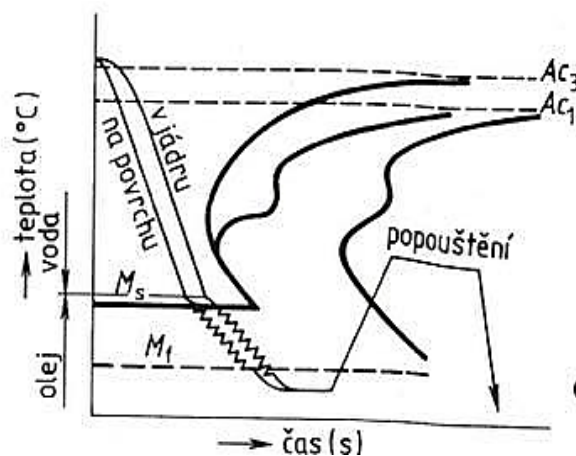
U nepřetržitého kalení dochází k ohřevu součásti na teplotu vyšší než A_{c3} , popř. A_{c1} . Následuje výdrž na této teplotě, aby bylo dosaženo homogenního austenitu a poté dochází k ochlazení v kalícím prostředí. [12]



Obr. 13 Schéma nepřetržitého kalení [12]

b) Lomené kalení

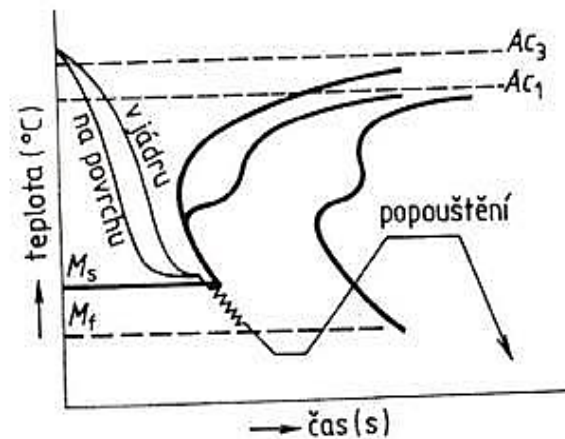
Jedná se o proces, kdy je součást ochlazena ve vodní lázni až na teplotu M_s a následně pokračuje ochlazení v olejové lázni, kde probíhá martenzitická přeměna. Tento proces vyžaduje přesné stanovení okamžiku pro přemístění z vody do oleje. [1]



Obr. 14 Schéma lomeného kalení [12]

c) Termální kalení

Součást se ochlazuje v solné lázni, která se pohybuje těsně nad teplotou M_s kalené oceli. Následuje prodleva na teplotě, během které se v celém průřezu vyrovná teplota. Po vyrovnání teploty v celém průřezu dochází k dalšímu ochlazení, které probíhá většinou na vzduchu, při kterém proběhne martenzitická přeměna. [1]



Obr. 15 Schéma termálního kalení [12]

2.2.3 Kalení bainitické

Hlavním cílem je získání struktury tvořené bainitem, který má nižší pevnostní charakteristiky než martenzit. [1]

a) Izotermické zušlechťování

Součást se po austenitizaci přenesse do solné lázně o teplotě 300 - 400°C, což je oblast bainitické přeměny. V této oblasti dochází k izotermickému rozpadu austenitu na bainit. Dochlazení poté probíhá na vzduchu. Tento proces je velmi podobný martenzitickému termálnímu kalení. Izotermické zušlechťování je vhodné pro nízkolegované oceli menších průřezů. [1]

b) Izotermické kalení

Jedná se o postup, u kterého je teplota lázně menší než teplota M_s příslušné oceli. Výsledná struktura je pak tvořena směsí bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. [1]

2.3 Popouštění

Jedná se o tepelné zpracování, které je prováděno výhradně po kalení. Skládá se z ohřevu součástky na teplotu nižší než A_{c1} , výdrže na této teplotě a ochlazení vhodnou teplotu pro daný materiál. Cílem popouštění je snížit hodnotu vnitřního pnutí, která vznikla při zakalení, a docílit požadovaných mechanických vlastností. Proces popouštění je obvykle členěn do čtyř stádií, mezi nimiž nelze jednoznačně určit teplotní hranice, a tak se mohou jednotlivé pochody navzájem překrývat: [1, 12]

- **První stádium popouštění** (do 200°C) – Dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku martenzitu, a vzniká popouštěný kubický martenzit. Jeho vznik je doprovázen snížením vnitřního pnutí a tvrdosti. [1]
- **Druhé stádium popouštění** (200 až 300 °C) – Probíhá rozpad zbytkového austenitu ve strukturu bainitického typu. [1]
- **Třetí stádium popouštění** (nad 250°C) – Vzniká rovnovážný tuhý roztok α (ferit). Výsledná feriticko-cementitická struktura se nazývá sorbit. Strukturální přeměny v tomto stádiu jsou doprovázeny změnou vlastností. Snižuje se tvrdost, zvětšuje se tvárnost a houževnatost, klesá vnitřní pnutí a dochází ke zmenšení měrného objemu. [1]
- **Čtvrté stádium popouštění** (nad 500°C) – Projevuje se postupným hrubnutím zrn cementitu a feritu, u kterého rovněž může proběhnout i rekrytalizace. Při nižších teplotách v této oblasti vzniká sorbit, za teplot blízkých se A_{c1} vzniká zrnitý perlit. [1]

Jelikož rozsah strukturálních změn a změn mechanických vlastností závisí na teplotě a době popouštění, dělíme je na:

- **Popouštění při nízkých teplotách** (100 až 300°C) – Účelem je snížení hladiny vnitřních pnutí, snížení podílu zbytkového austenitu a zlepšení houževnatosti. [1]
- **Popouštění při vyšších teplotách** (400 až 650°C) – Používá se pro značně namáhané součásti z konstrukční oceli. [1]

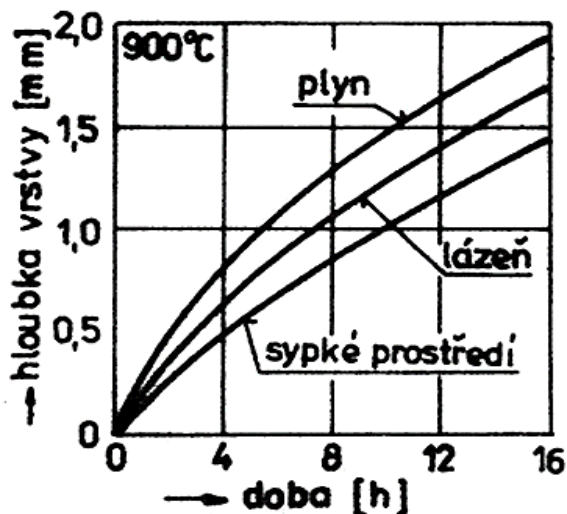
2.4 Chemicko-tepelné zpracování

Cílem chemicko-tepelného zpracování je změna chemického složení povrchu materiálu, díky kterému lze dosáhnout požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. Při tomto procesu dochází k sycení povrchu materiálu za současného působení tepla. Mezi hlavní způsoby chemicko-tepelného zpracování patří cementování, nitridování nebo jejich kombinace. [13]

2.4.1 Cementování

Cementování patří mezi nejrozšířenější způsoby chemicko-tepelného zpracování. Jedná se o metodu, při které dochází k sycení povrchu oceli uhlíkem. Proces probíhá nad teplotou A_{c3} , tedy při teplotách 910 - 930°C v plynném, kapalném nebo pevném prostředí. Vzniklá povrchová vrstva se po zakalení vyznačuje vysokou tvrdostí. Nejčastěji se cementují konstrukční, uhlíkové a slitinové oceli. Hloubka cementované vrstvy je závislá na tom, jak bude součást namáhána a jaké je její konstrukční řešení. Cementace se provádí v plynném, pevném nebo kapalném prostředí. [13]

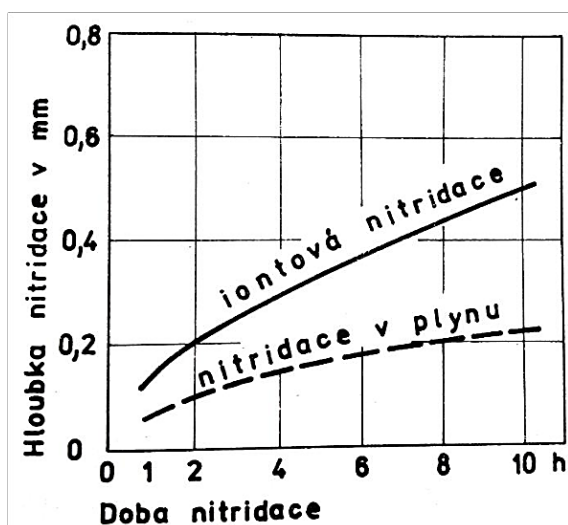
- **Cementování v plynném prostředí** – Nejrozšířenější způsob cementace. Využívá se zde reakcí, při kterých se uvolňuje atomární uhlík, který se difuzí dostává do nauhličovaného materiálu. Typickým plynným médiem je oxid uhelnatý nebo směs CO a CO₂. [14]
- **Cementování v kapalném prostředí** – Cementace se provádí v solných lázních. Proces je velmi rychlý, rovnoměrný, avšak v praxi se tento postup příliš nerozšířil. [14]
- **Cementování v pevném prostředí (prášku)** - Důležité je určit jakých mechanických vlastností je třeba dosáhnout, od toho se odvíjí doba a teplota sycení. Součástky jsou zasypány cementační směsí, která se skládá ze zrnitého dřevěného uhlí a katalyzátoru. Součástky jsou zasypány ve speciálních krabicích [13]



Obr. 16 Závislost hloubky cementační vrstvy na době cementování [14]

2.4.2 Nitridování

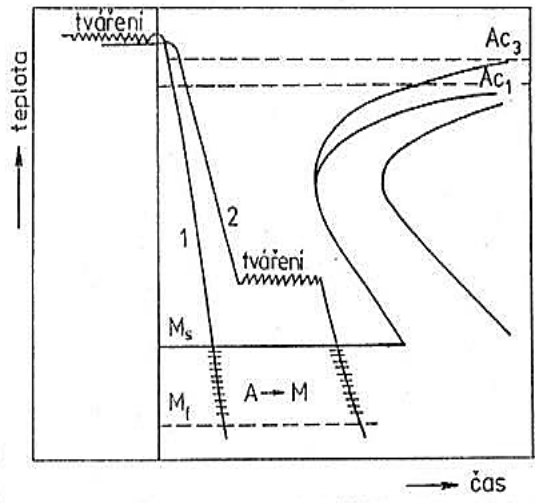
Nitridování je sycení povrchu oceli dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí, při kterém se tvoří povrchová vrstva obsahující vysoce tvrdé nitridy. Proces nitridace probíhá při teplotě 500 - 550°C. Nitridováním se získává vysoká tvrdost povrchu součásti a odolnost proti opotřebení. Zpravidla se nitridují zušlechitelné oceli s obsahem uhlíku 0,3 – 0,4 hm. %. Po nitridaci už není potřeba součást dále tepelně zpracovávat, jelikož má povrch již své konečné vlastnosti. Nitridovaná vrstva většinou obsahuje až 12 hm. % dusíku a hloubka vrstvy dosahuje přibližně 0,01 – 0,05 mm. Nitridace probíhá v solných lázních, plynných aktivních atmosférách a způsobem iontové (plazmové) nitridace, což je moderní metoda, která se uskutečňuje za působení elektrického pole. [13]



Obr. 17 Růst nitridační vrstvy [13]

2.5 Tepelně mechanické zpracování

Využívá se zde kombinace tváření a tepelného zpracování. Cílem je dosažení vysoké pevnosti, které nelze jiným způsobem tepelného zpracování dosáhnout. Plastická deformace nejčastěji probíhá v oblasti stabilního nebo metastabilního austenitu a po deformaci následuje martenzitická přeměna. [1]



Obr. 18 Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování [1]

- **Vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování** – Ocel se zde tváří v oblasti stabilního austenitu nad teplotou Ac_3 . Poté musí následovat kalení, aby nedošlo k rekystalizaci plasticky deformovaného austenitu. [2]
- **Nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování** – Proces spočívá v austenitizaci nad teplotou Ac_3 , ochlazení do oblasti metastabilního austenitu nad M_s , tváření v inkubační době a následně zakalení. [2]

Tepelně mechanické zpracování má největší využití pro nízkolegované a středně legované podeutektoidní oceli s obsahem uhlíku 0,3 až 0,6 %. [1]

3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI POVRCHU

Zkouška tvrdosti je mechanická zkouška, která se používá při konstrukčním návrhu, analýze struktur a vývoji materiálu. Při zkouškách tvrdosti nedochází k deformaci jako u jiných mechanických zkoušek. Do zkoušeného materiálu se vytváří vtisk tlakem zkušebního tělíska (indentoru) definovaného tvaru (kulička, kužel, jehlan). Tyto zkoušky neporušují zkoušený materiál, pouze nepatrně ovlivní objem na povrchu. V praxi jsou velmi často používané pro svoji jednoduchost. [14]

3.1 Tvrdost

Tvrdost je definována jako odolnost materiálu vůči trvalé deformaci, jako je vtlačení, opotřebení, ořez, poškrábání. Tvrdost přímo souvisí s mechanickými vlastnostmi materiálu. Tvrdost není považována za fyzikální veličinu, jelikož závisí na celé řadě vlivů. Nejčastěji je ovlivňována: [15]

- pružnými a plastickými vlastnostmi zkoušeného materiálu,
- velikostí síly, která působí na vnikací těleso,
- tvarem, rozměry, tvrdostí a modulem pružnosti vnikacího tělesa,
- třením mezi indentorem a vzorkem,
- teplotou, při které probíhá zkouška,
- mikrostrukturou materiálu,
- dobou působení zatížení a rychlostí zatěžování. [15]

3.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti

V současnosti existuje spousta způsobů měření tvrdosti, zkoušky poté můžeme rozdělit podle použitého principu na metody:

- **vrypové** – Princip spočívá v tom, že po vyhlazené ploše projíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90°. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. (Martensova zkouška). [16]
- **vnikací** – Jedná se o metodu jejímž měřítkem tvrdosti je velikost plastické nebo elasticko plastické deformace. Tvrdost u vnikacích metod je definována jako odpor proti vniknutí cizího tělesa. (Brinellova, Vickersova, Rockwellova zkouška). [16]

- **odrazové** – Při této metodě dopadá z určité výšky závaží definovaného tvaru a hmotnosti na povrch testovaného materiálu. U této metody se hodnotí výška odrazu. (Shoreho zkouška). [18]

Dle způsobu zatěžování zkoušeného materiálu, mohou být zkoušky rozděleny také na statické a dynamické. Statické zkoušky se pro svou jednoduchost využívají velmi často a patří zde většina vnikacích metod. U dynamických zkoušek indenter vniká do povrchu zkoumané části rázem a patří zde odrazová metoda. [17]

3.3 Vrypové zkoušky tvrdosti

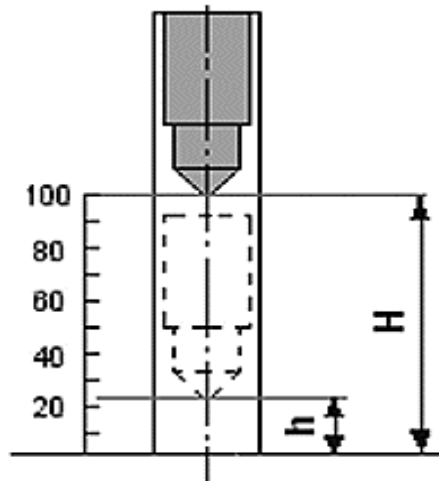
3.3.1 Martensova zkouška tvrdosti

Jedná se o zkoušku vrypovou. Tvrdost se zjišťuje přitlačením kuželového diamantového hrotu s vrcholovým úhlem 90° na leštěný povrch zkušebního předmětu, který se pohybuje danou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla F , potřebná ke vzniku vrypu širokého $0,01\text{mm}$. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Tato zkouška není normalizovaná a v praxi se málo používá. [18,19]

3.4 Odrazové zkoušky tvrdosti

3.4.1 Shoreho zkouška

Jedná se o zkoušku odrazovou. Princip spočívá v tom, že na zkoušený materiál je spuštěno z určité výšky tělíčko tvaru válečku zakončeného kulovitě zabroušeným diamantem. Vyhodnocuje se výška odrazu, která je hodnotou tvrdosti. Čím je materiál tvrdší, tím je odraz větší. Tato zkouška se provádí na tvrdoměru, který nazýváme Shoreho skleroskop. [18,20]



Obr. 19 Shoreho zkouška [20]

3.5 Vnikací zkoušky tvrdosti

3.5.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Jedná se u zkoušku, u které se tvrdost zjišťuje vtlačováním ocelové kalené kuličky o průměru D silou F do zkušebního tělesa. Síla F směřuje kolmo k povrchu tělesa po stanovenou dobu. Následně se po odlehčení změří průměr vtisku d . Průměr kuličky D většinou bývá 1 mm, 2,5mm, 5 mm nebo 10 mm. Doba působení síly o dané velikosti závisí na struktuře materiálu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. [18,20]

Zkouška tvrdosti podle Brinella je dána vztahem:

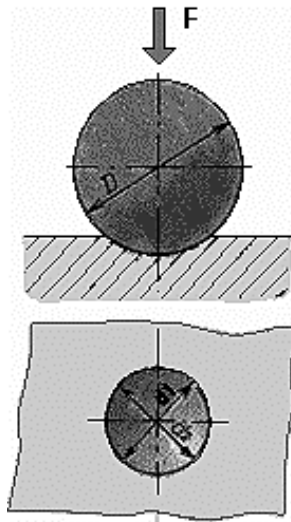
$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (\sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

F – zatěžující síla [N]

S – plocha vtisku [mm^2]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku [mm]



Obr. 20 Zkouška tvrdosti podle Brinella [20]

Nevýhodou této zkoušky je, že se nedá použít na velké tvrdosti materiálů. Z toho důvodu není jednotná stupnice tvrdosti od nejtvrděších po nejměkčí. Jednou z dalších nevýhod této zkoušky je obtížné měření kruhových vtisků. Výhodou této zkoušky je, že se nevyžaduje příliš čistý a upravený povrch a vnikací těleso je levné a nahraditelné. [21]

Při samotném měření se musí dbát na určité náležitosti, aby měření bylo provedeno co nejpřesněji:

- Tloušťka materiálu musí být minimálně desetinásobek hloubky vtisku, aby nedošlo také ke změření tvrdosti podložky, na které je umístěn měřený vzorek.
- Průměr kuličky je volen tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí od 0,25D do 0,60D.
- Průměr vtisku se měří pomocí mikroskopu ve dvou vzájemně kolmých směrech, poté je spočítán aritmetický průměr obou měření. [21]

Označení tvrdosti se skládá ze značky tvrdosti HB, a k ní jsou připojeny údaje podmínek zkoušky, průměr kuličky D, síla F a doba zatížení t. Údaje jsou od sebe odděleny lomítkem (např. 320 HB 5/7500/30). Pro nejběžnější podmínky, tj. HB 10/30000/10 používáme jen označení 210 HB. [18]

3.5.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

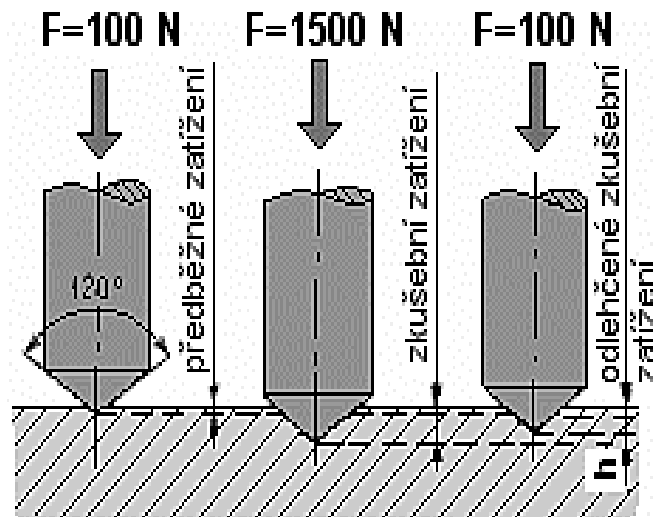
U zkoušky tvrdosti podle Rockwella se jako indenter používá diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° při zkoušení tvrdých materiálů, a kalená ocelová kulička při zkoušení měkkých nebo středně tvrdých materiálů. Zkouška se provádí na Rockwellově tvrdoměru, na kterém se odečítá hloubka vtisku převedená na tvrdost. [14,21]

Postup zkoušky:

1. Zkušební tělísko se položí na stůl tvrdoměru kolmo k vnikacímu tělesu a následně se do zkoušeného materiálu zatlačí předběžným zatížením F_0 , aby se odstranil vliv povrchových nerovností na materiálu.
2. Poté se síla postupně zvětšuje o přídavné zatížení F_1 .
3. Pak se zatěžující síla opět zmenšuje na hodnotu předběžného zatížení F_0 , a v tomto stavu se zjistí přírůstek hloubky vtisku, který nastal oproti výchozí poloze. [21]

Tloušťka měřeného materiálu musí být minimálně osmkrát větší než hloubka vtisku. Zatížení musí působit pomalu a bez rázů. Zkouška je rychlá, snadná a je vhodná pro kontrolu velkých sérií výrobků. Nevýhodou této zkoušky je její menší přesnost. [19,21]

Tvrdost podle Rockwella se vyjadřuje čísly určujícími hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením použité stupnice tvrdosti. [21]



Obr. 21 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [21]

3.5.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip této zkoušky je podobný, jako u Brinellovi metody. Akorát místo kuličky se do materiálu vtlačuje vyleštěný diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Doba působení zatížení je 10 až 15 s. Po odlehčení se změří uhlopříčky vtisku, ze kterých vypočítáme aritmetický průměr d . Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení F k ploše vtisku. [21]

Tvrdost podle Vickerse je dána vztahem:

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

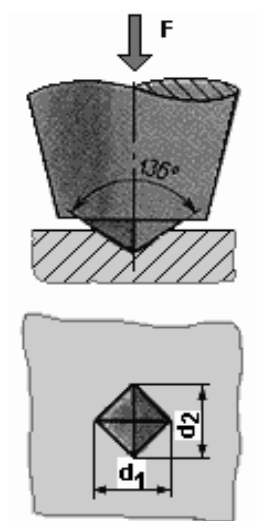
F – zatěžující síla [N]

d – aritmetický průměr délky uhlopříček [mm]

Aritmetický průměr uhlopříček zjistíme podle vztahu:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

d_1, d_2 – rozměry vtisku



Obr. 22 Zkouška
tvrdosti podle Vickerse
[20]

Tato metoda měření tvrdosti je velmi přesná a dá se použít pro všechny materiály. Další výhodou je, že vtisky jsou poměrně malé, takže ani čistě obrobená plocha se příliš nepoškozují. [21]

Normální podmínky zkoušky jsou: $F = 294 \text{ N}$, doba působení od 10 do 15 s. V tomto případě se zjištěná tvrdost označuje čísly, charakterizujícími hodnotu tvrdosti a písmeny HV. [18]

3.6 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

Jedná se o zkoušku, která vznikla za účelem zjištění mechanických vlastností tenkých vrstev. Tradiční zkoušky tvrdosti nebyly schopny vytvořit tak malé zatížení, aby nedocházelo k ovlivnění podkladu, na němž byla vrstva nanášena. [22]

Tyto zkoušky se v posledních letech staly velmi populárními, protože na rozdíl od běžných mikroindentačních technik se při každé zkoušce sleduje zatížení a hloubka nebo posunutí. To umožňuje výpočet tvrdosti bez nutnosti měřit úhlopříčku vtisku optickým nebo elektronovým mikroskopem.

Mezi výhody lze řadit:

- Lepší kontrola zkušebních paramterů.
- Rychlejší analýza dat.
- Menší chybovost.

- Více údajů získané z jedné zkoušky.
- Vyšší rozlišení zatížení. [24]

Principem této metody je okamžitá detekce a zobrazování změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného vzorku. Dále zkoumá nárůst nebo pokles zatížení v celém průběhu zatěžování nebo odlehčování indentoru. Zpracováním dat vzniká grafická charakteristika tzv. indentační křivka, která zobrazuje závislost zatížení na hloubce vtisku. [22]

Výslednou hodnotu tvrdosti získáme podle vztahu:

$$H = \frac{F_{max}}{A_S} \quad (4)$$

F_{max} – maximální zatěžující síla [N]

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

Například pro Vickersův indentor dostáváme Vickersovo číslo jako:

$$VHN = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F_{max} \cdot \sin\alpha}{d^2} \quad (5)$$

g – gravitační zrychlení [m·s⁻¹]

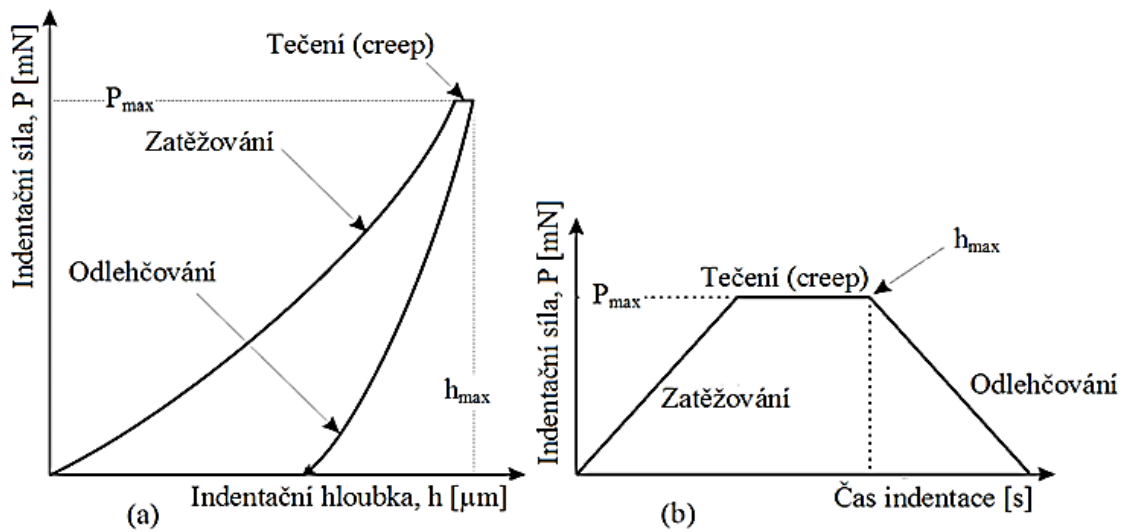
F_{max} – maximální zatěžující síla [N]

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

d – aritmetický průměr délky uhlopříček [mm]

Průběh zkoušky má několik fází. První fází indentačního cyklu je řízené zatěžování, kdy je definovanou rychlostí aplikována zatěžující síla na indentor. Druhá fáze spočívá ve snižování zatěžující síly na nulovou hodnotu, jedná se tedy o odlehčování. Obvykle nastává mezi fází zatěžování a fází odlehčování prodleva, která se využívá ke zkoumání tečení, po dobu, kdy je vzorek vystaven maximální zatěžovací síle. Během zatěžování dochází k elasticko-plastické deformaci a tvar vtisku odpovídá tvaru indentoru. Během odlehčování tvar vtisku neodpovídá indentoru, jelikož dojde ke změně tvaru vtisku kvůli elastickému zotavení. [23]

Pomocí této zkoušky může být vyhodnocen elastický modul, tečení materiálu, lomovou houževnatost nebo fázové transformace. [23]



Obr. 23 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky DSI (b) [23]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce byl výzkum vlivu tepelného zpracování na výsledné mikro-mechanické vlastnosti vybraných vzorků oceli. Experimentální část spočívala ve výběru zkušebních vzorků ze zvoleného materiálu, jejich následná příprava a tepelné zpracování. Poté bylo cílem provést měření mikro-tvrdomosti vzorků pomocí metody DSI. Z výsledků měření byly vybrány parametry, které byly následně statisticky a graficky vyhodnoceny. Primárním cílem experimentu tudíž bylo porovnání naměřených hodnot mikro-mechanických vlastností jednotlivých vzorků oceli 15 330 a vyhodnocení vlivu použitého tepelného zpracování.

Postup vypracování bakalářské práce:

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních vzorků na experimentální část.
- Provedení měření mechanických vlastností.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bylo nejdříve nutné zvolit vhodný druh oceli. Následně byly z tohoto materiálu nařezány jednotlivé zkušební vzorky, které byly poté tepelně zpracovány na kalícím pracovišti. Před měřením tvrdosti bylo nutné všechny nařezané a tepelně zpracované zkušební vzorky zalisovat a vyleštit.

5.1 Volba materiálu zkušebních vzorků

Zkušební vzorky, na kterých byla provedena experimentální část byly zvoleny z následujícího materiálu.

5.1.1 Ocel 15 330 Cr-Mo-V

Ocel k zušlechťování a nitridování. Je dobře tvárná za tepla a dobře obrobitelná ve stavu žíhaném na měkko i ve stavu zušlechtěném. Ocel je vhodná pro nitridované součásti strojů, u nichž se žádá velká povrchová tvrdost při dobré houževnatosti, např. zlomené hřídele leteckých motorů, vačkové hřídele. Vhodná zvláště pro nitridovaná ozubená kola. [25,26]

Česká technická norma: ČSN 41 5330

Tabulka 2 Chemické složení oceli 15 330 [24]

Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
0,24-0,34	0,40-0,80	0,17-0,37	2,30-2,70	0,20-0,30	0,15-0,30	max. 0,035	max. 0,035

Tabulka 3 Technologické údaje oceli 15 330 [24]

Technologické údaje		
Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Dochlazení
Normalizační žíhání	800-860	Vzduch
Kalení	830-880	Voda
Kalení	850-890	Olej
Popouštění	550-650	Voda, Olej
Žíhání na měkko	700-740	V peci
Nitridování	490-520	-

5.2 Tepelné zpracování zkušebních vzorků

Nařezané zkušební vzorky byly tepelně zpracovány pomocí kalení a popouštění. V první fázi tohoto procesu byl nařezaný vzorek vložen do kalící pece, kde byl ohřátý na požadovanou kalící teplotu. Po ohřátí vzorku na požadovanou teplotu následovala výdrž na kalící teplotě. Poté byl vzorek vyjmut z pece, a byl chlazen v určitém kalícím médiu. Následovalo popouštění v popouštěcí peci a výdrž na popouštěcí teplotě. Parametry popouštění byly pro všechny vzorky totožné viz. tabulka 4. Poté byl vzorek dochlazen na vzduchu.

Jednotlivé zkušební vzorky byly tepelně zpracovány za různých podmínek kalení. U jednotlivých vzorků se lišila teplota kalení, která byla zvolena na základě doporučených parametrů z materiálového listu, výdrž na kalící teplotě a kalící médium.

Všechny parametry tepelného zpracování byly zaznamenány do následující tabulky.

Tabulka 4 Parametry tepelného zpracování vzorků

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	830	60	voda	600	120	vzduch
	3	830	90	voda	600	120	vzduch
	4	830	120	voda	600	120	vzduch
	5	855	60	voda	600	120	vzduch
	6	855	90	voda	600	120	vzduch
	7	855	120	voda	600	120	vzduch
	8	880	60	voda	600	120	vzduch
	9	880	90	voda	600	120	vzduch
	10	880	120	voda	600	120	vzduch
	11	850	60	olej	600	120	vzduch
	12	850	90	olej	600	120	vzduch
	13	850	120	olej	600	120	vzduch
	14	870	60	olej	600	120	vzduch
	15	870	90	olej	600	120	vzduch
	16	870	120	olej	600	120	vzduch
	17	890	60	olej	600	120	vzduch
	18	890	90	olej	600	120	vzduch
	19	890	120	olej	600	120	vzduch

Tepelné zpracování probíhalo na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC.



Obr. 24 Kalící pracoviště SKM

Jako kalící médium byla použita voda a olej. Kalení probíhalo v kalící peci LH a popouštění v popouštěcí peci PP 20/65 také od firmy LAC.



Obr. 25 Kalící pec od firmy LAC

5.3 Příprava zkušebních vzorků

Než mohlo být provedeno měření tvrdosti zkušebních vzorků, bylo nutno tyto vzorky nejdříve zalisovat a vyleštit.

5.3.1 Zalisování vzorků

Zkušební vzorky byly zalísovány do materiálu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler. Tyto kompresní montážní hmoty minimalizují smršťování a zároveň chrání a zachovávají okraje vzorku během procesu přípravy. Zalisování zkušebních vzorků bylo provedeno z důvodu následného upnutí do metalografické leštičky.



Obr. 26 Stroj na zalísování vzorků Simpli-Met 1000

5.3.2 Leštění vzorků

Poté co byly vzorky zalísovány, bylo provedeno leštění. Jednalo se o poslední krok přípravy zkušebních vzorků před měřením tvrdosti. Leštění probíhalo na leštícím stroji Eco-Met 250 Pro Grinder – Polisher od firmy Buehler. Proces leštění vzorků probíhal v několika krocích. Nejprve byly vzorky leštěny pomocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi (250, 600, 1200) a následně proběhlo doleštění vzorků pomocí textilního plátna a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn 9 μ m a 3 μ m.

Parametry leštění:

- Přítlačná síla – 25 N.
- Otáčky vzorků – 30ot/min.
- Otáčky plátna – 300ot/min.



Obr. 27 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO

5.4 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. Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení - 1 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 12 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 2 N/min,
- Poissonovo číslo - 0,3.

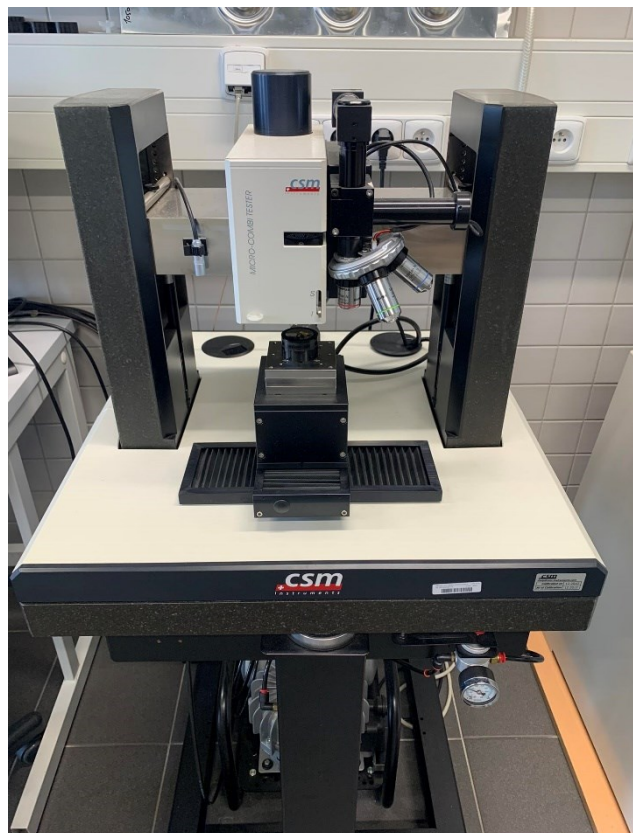
Jako vnikací tělísko (indenter) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indenter).

Měření byla provedena metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

Princip této metody spočívá ve schopnosti přístroje detekovat současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru, v závislosti na plynulém nárůstu či poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu.

Cílem této zkoušky bylo zjistit následující parametry:

- HV_{IT} – vickersova tvrdost,
- E_{IT} [Gpa] – vtiskový modul,
- H_{max} [nm] – maximální hloubka vpichu,
- W_{elast} [μ J] – elastická práce,
- W_{plast} [μ J] – plastická práce.



Obr. 28 Přístroj MICRO-COMBI TESTER od firmy CSM

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

6.1 Statistické vyhodnocení výsledků

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (6)$$

Kde:

n – počet měření

\bar{x} – aritmetický průměr

σ – směrodatná odchylka

6.2 Výsledky měření metodou DSI za různých podmínek kalení

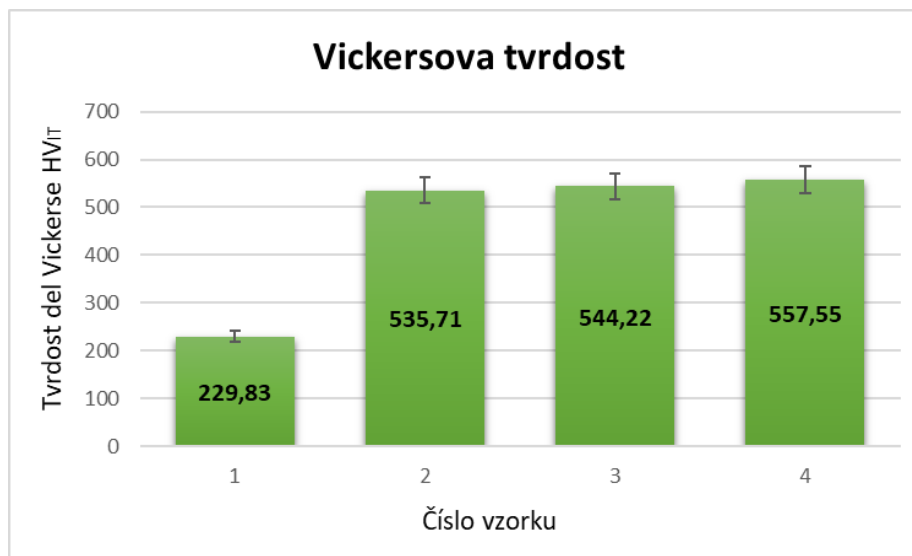
Měření zkušebních vzorků probíhalo metodou DSI. Každý zkušební vzorek byl změřen devětkrát při zkušebním zatížení 1 N. Výsledky měření byly poté graficky znázorněny a vyhodnoceny.

6.2.1 Kalící teplota 830°C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 830°C

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	830	60	voda	600	120	vzduch
	3	830	90	voda	600	120	vzduch
	4	830	120	voda	600	120	vzduch

Obr. 29 30 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 830°C

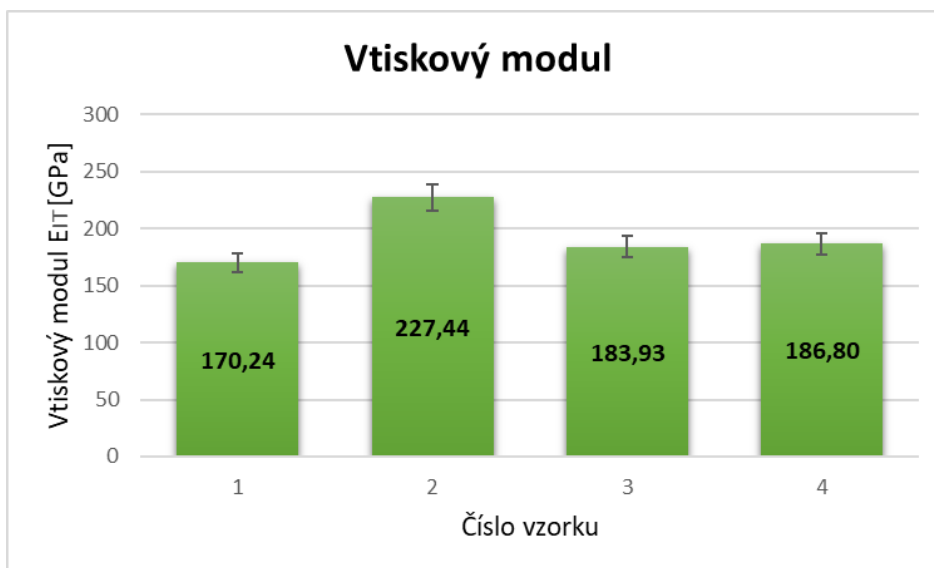
Z předchozího grafu lze vyhodnotit, že nejvyšší hodnota Vickersovi tvrdosti HV_{IT} byla naměřena u vzorku č.2. Tedy u vzorku zpracovaného za kalící teploty 830°C a následné výdrži na kalící teplotě po dobu 120 minut. Z grafu lze také vyčíst, že rozdíly Vickersovi tvrdosti HV_{IT} u tepelně zpracovaných vzorků jsou malé, a tvrdost roste v závislosti na délce výdrže na kalící teplotě.

Z grafu lze také porovnat tepelně nezpracovaný vzorek s ostatními vzorky, které prošly tepelnou úpravou. Lze vyčíst, že Vickersova tvrdost tepelně zpracovaných vzorků narostla o více než 100 %.

Tabulka 6 Tvrdost strukturních složek

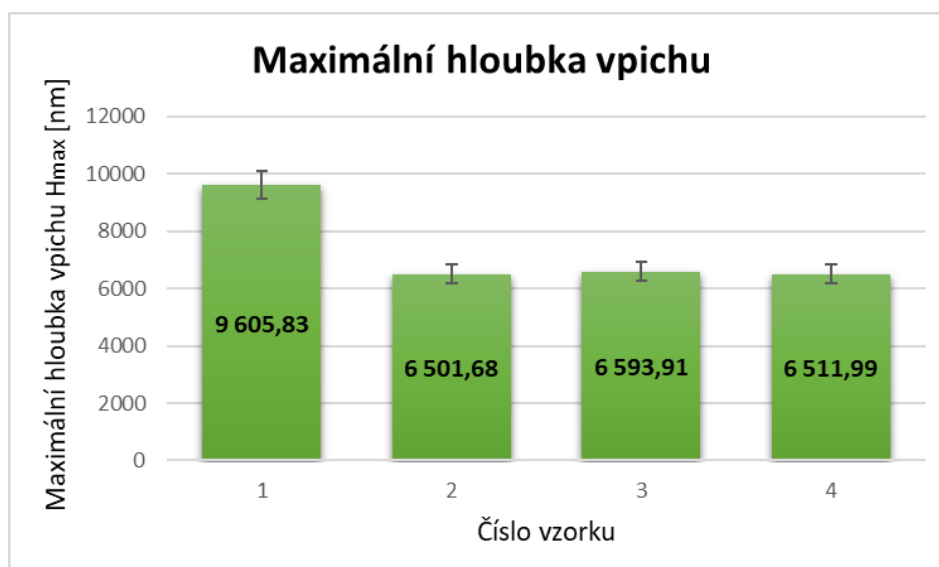
Strukturní složky	Tvrdost HV
Fe	85
Ferit	85-130
Austenit	120-180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200-250
Perlit jemný	250-300
Bainit horní	300-400
Bainit dolní	400-550
Martenzit nízkouhlíkový	600-700
Martenzit vysokouhlíkový	700-580

Z výsledků tvrdosti dle Vickerse lze také určit, z jakých strukturních složek se daný materiál u konkrétního zkušební vzorku skládá. Z tabulky 6 plyne, že vzorky, které byly tepelně zpracovány se nachází v oblasti dolního bainitu a nízkouhlíkového martenzitu. Vzorek č.1, tedy tepelně nezpracovaný vzorek se nachází v oblasti perlitu hrubého.



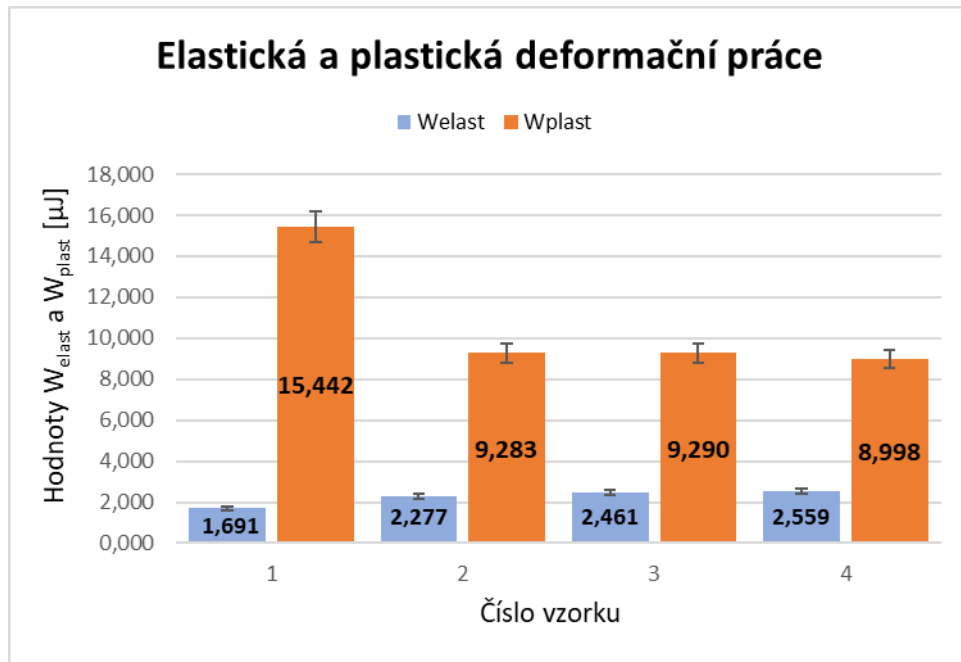
Obr. 30 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 830 °C

Největší nárůst hodnoty vtiskového modulu nastal u vzorku č.2. Z grafu lze vyčíst, že hodnoty vtiskového modulu u vzorků č.3 a 4, tedy u tepelně zpracovaných vzorků, nejsou o mnoho vyšší než hodnota u tepelně nezpracovaného vzorku.



Obr. 31 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 830°C

Největší hloubka vpichu byla naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku. Z grafu lze tedy vyhodnotit, že s nárůstem tvrdosti oceli klesá maximální hloubka vpichu.



Obr. 32 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 830 °C

Z grafu je patrné, že s rostoucí hodnotou elastické deformační práce, dochází k poklesu plastické deformační práce. U tepelně zpracovaných vzorků se hodnoty příliš nelišily. Nejvyšší hodnota elastické deformační práce, byla naměřena u vzorku č.4, u kterého byla zároveň naměřena i nejvyšší Vickersova tvrdost. Vzorek č.4 byl tepelně zpracován za kalící teploty 830°C po dobu 120 minut viz. tabulka 5.

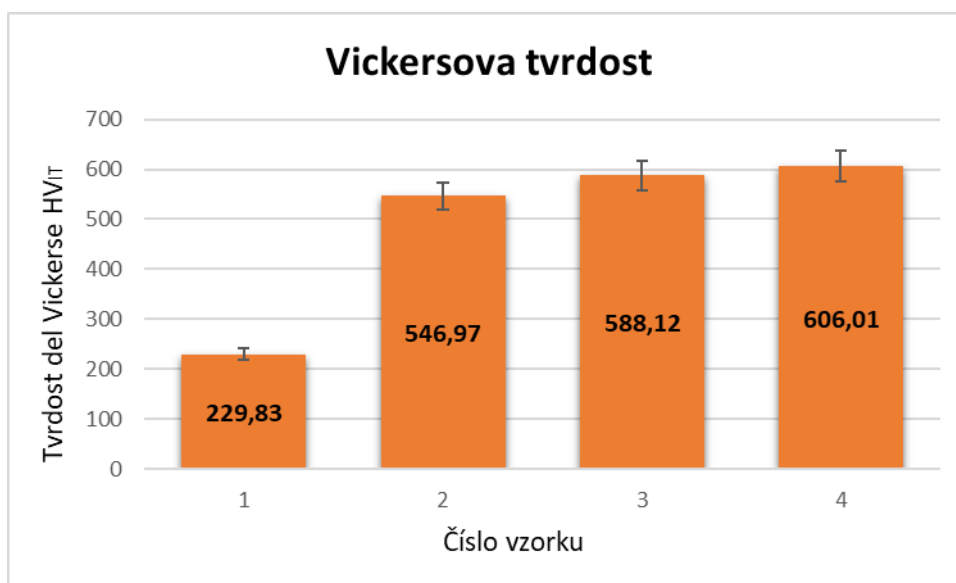
Plastická deformační práce byla nejvyšší u vzorku č.1, tedy u vzorku, který nebyl tepelně zpracovaný, a nejvíce klesla u vzorku č.2.

6.2.2 Kalící teplota 855 °C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Vzorky byly kaleny za teploty 855°C a měnila se doba výdrže na dané kalící teplotě. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 855°C

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	855	60	voda	600	120	vzduch
	3	855	90	voda	600	120	vzduch
	4	855	120	voda	600	120	vzduch

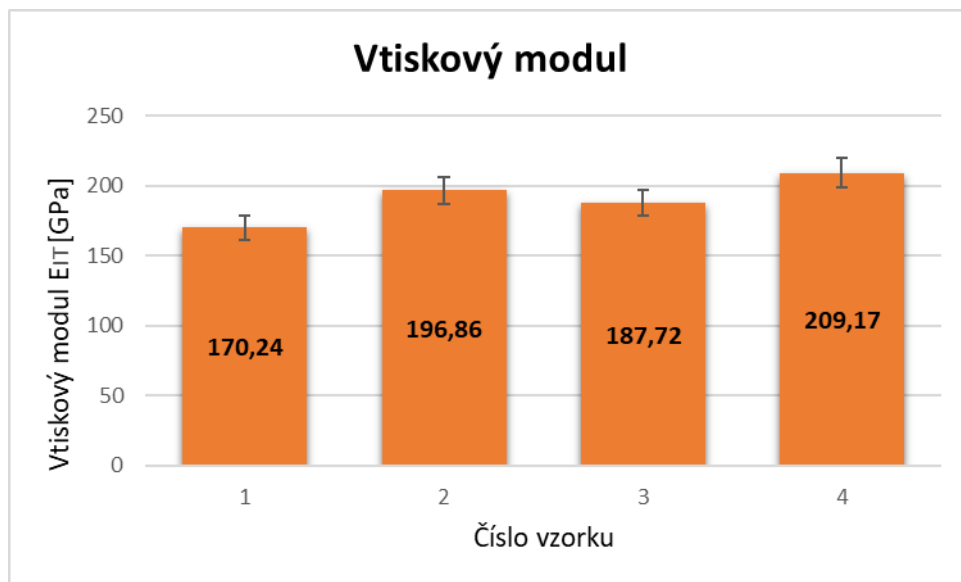


Obr. 33 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 855°C

Z předchozího grafu můžeme vyčíst, že nejvyšší hodnota Vickersovi tvrdosti HV_{IT} byla naměřena u vzorku č.4. Tedy u vzorku, který byl tepelně zpracován dle parametrů zaznamenaných v tabulce 7. Z grafu lze tedy určit, že čím delší je doba kdy vzorek setrvává na dané kalící teplotě, tím větší je výsledná tvrdost vzorku.

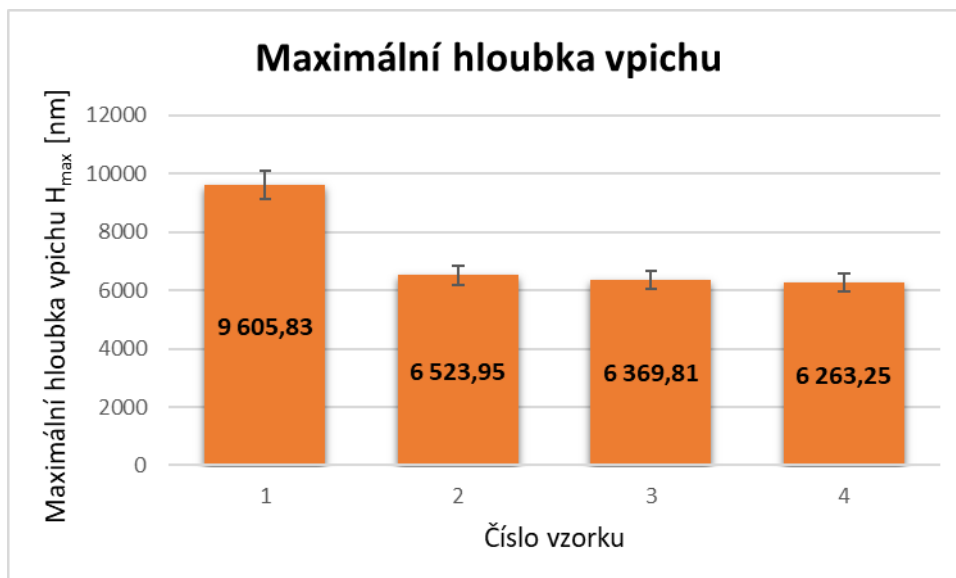
V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem nejvíce vzrostla tvrdost u vzorku č.4, a to o 164 %.

Naměřené hodnoty tvrdosti, bylo dále možné použít k určení strukturních složek materiálu. Díky tomu lze porovnat změnu ve struktuře materiálu mezi vzorkem bez tepelné úpravy a tepelně zpracovanými vzorky. Z tabulky 6 plyne, že strukturu tepelně nezpracovaného vzorku č. 1 tvoří perlit hrubý. Oproti tomu tepelně zpracované vzorky dolního bainitu, a vzorek č. 4 s největší tvrdostí se nachází v oblasti nízkouhlíkového martenzitu.



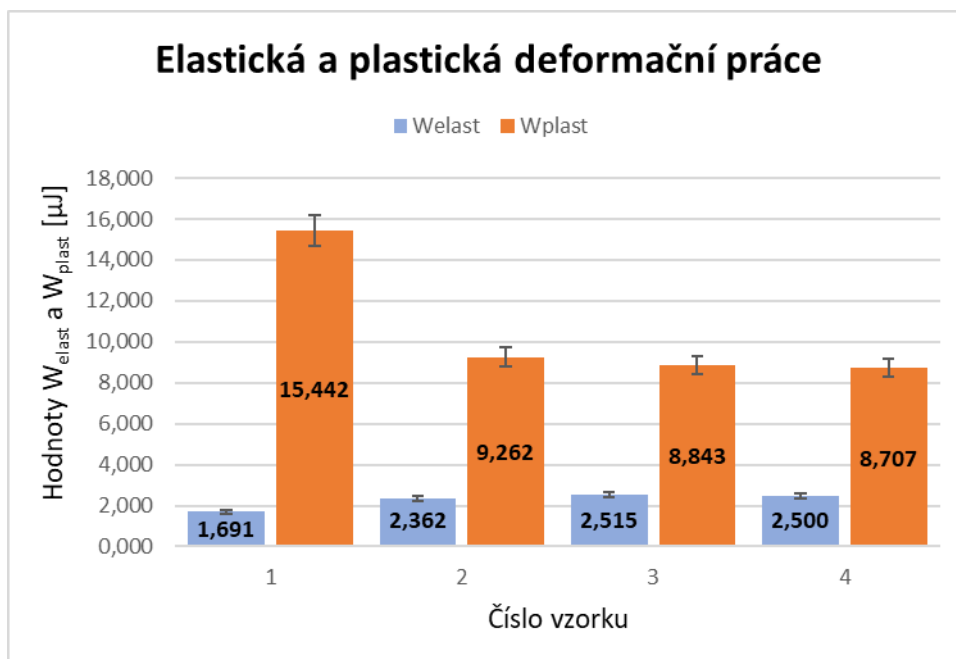
Obr. 34 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 855 °C

Hodnoty vtiskového modulu E_{IT} se u naměřených vzorků lišily minimálně. Nejvyšší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u vzorku č.4, tedy u vzorku, u kterého byla naměřena i nejvyšší hodnota tvrdosti dle Vickerse. Největší nárůst nastal při porovnání vzorku č.1 bez tepelného zpracování, a u vzorku č.4.



Obr. 35 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 855°C

Z grafu lze vyčíst, že s nárůstem tvrdosti oceli klesá maximální hloubka vpichu. Největší hloubka vpichu byla naměřena u vzorku č.1, tedy u vzorku bez tepelné úpravy. Mezi největší a nejmenší naměřenou hloubkou vpichu byl naměřen rozdíl 53 %.



Obr. 36 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 855 °C

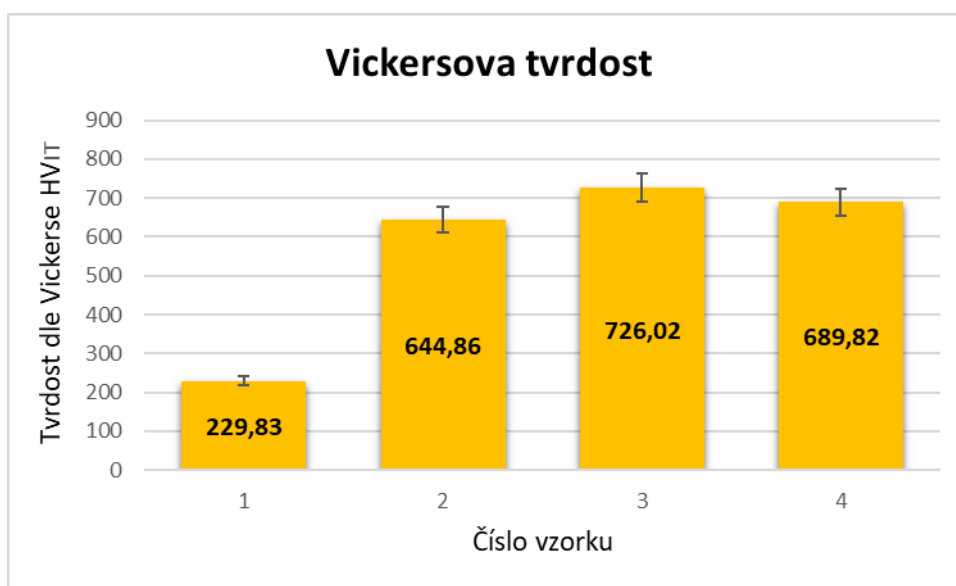
Z předchozího grafu lze určit, že s rostoucí tvrdostí vzorků klesá plastická deformační práce. U tepelně zpracovaných vzorků se naměřené hodnoty příliš nelišily. Nejvyšší hodnota plastické deformační práce byla naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku č.1.

6.2.3 Kalící teplota 880°C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Vzorky byly kaleny za teploty 880°C a měnila se doba výdrže na dané kalící teplotě. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 855°C

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	880	60	voda	600	120	vzduch
	3	880	90	voda	600	120	vzduch
	4	880	120	voda	600	120	vzduch



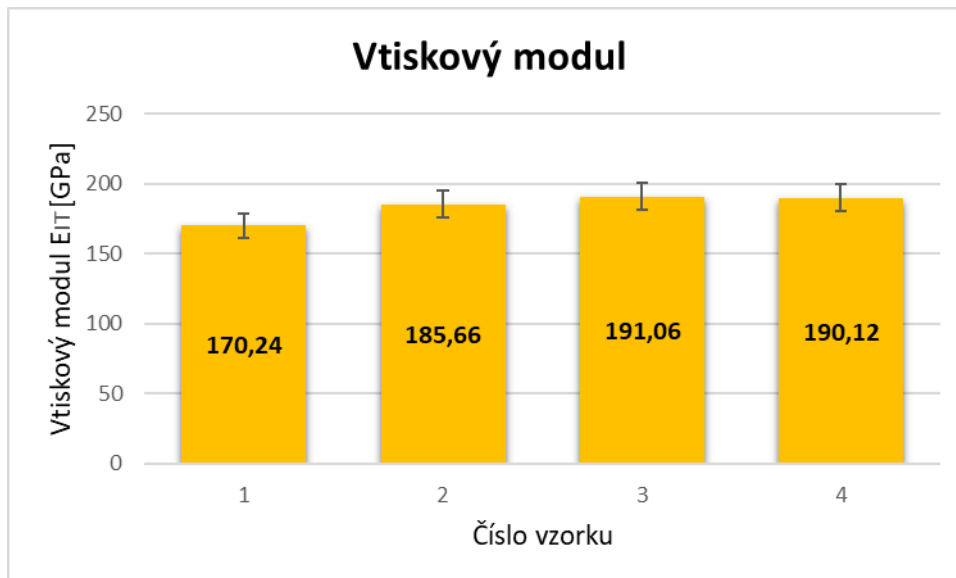
Obr. 37 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 880°C

Hodnoty z předchozího grafu udávají, že u vzorku č.3 byla naměřena nejvyšší tvrdost dle Vickerse HV_{IT}. Naopak nejnižší hodnota tvrdosti byla naměřena u vzorku č.1. Jedná se o vzorek bez tepelného zpracování.

Nárůst tvrdosti mezi vzorkem č.1 a vzorkem č.3 byl 216 %.

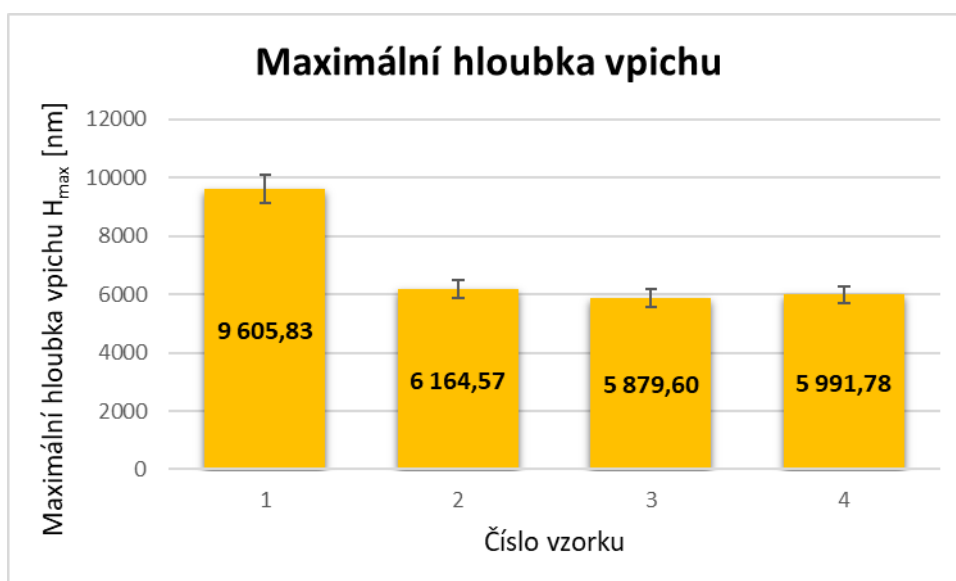
I v tomto případě bylo možné naměřené hodnoty tvrdosti použít k určení strukturních složek daného materiálu. Tyto strukturní složky byly určeny pomocí tabulky 6.

Z tabulky lze vyčíst, že strukturu vzorku č.1 tvoří perlit hrubý. Naopak tepelně zpracované vzorky č. 2,4 se nachází v oblasti nízkouhlíkového martenzitu. Vzorek č.3, u kterého byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti se nachází v oblasti vysokouhlíkového martenzitu.



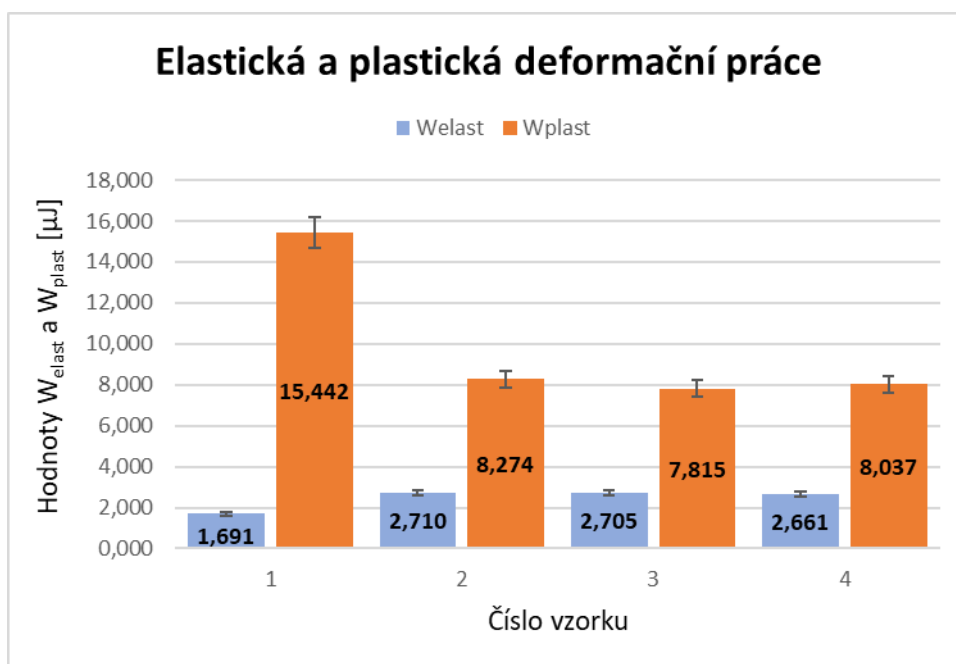
Obr. 38 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 880 °C

Z grafu lze vyčíst, že hodnoty vtiskového modulu se u tepelně zpracovaných vzorků lišily jen minimálně. Nejvyšší hodnota vtiskového modulu E_{IT} byla naměřena u vzorku č.3, u kterého byla zároveň naměřena i nejvyšší hodnota tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} . Největší rozdíl nastal při porovnání vzorku bez tepelného zpracování a vzorku č.3, u kterého tepelné zpracování proběhlo. V tomto případě byl rozdíl 12 %.



Obr. 39 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 880°C

Z předchozích grafů je patrné, že s nárůstem tvrdosti oceli klesá maximální hloubka vpichu. Největší hloubka vpichu byla naměřena u vzorku č.1 tedy u vzorku bez tepelného zpracování, u kterého byla naměřena nejnižší hodnota tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} . Naopak u vzorku č.3, u kterého byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti byla hloubka vpichu nejmenší. V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem klesla hloubka vpichu u vzorku č.3 o 39 %.



Obr. 40 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 880 °C

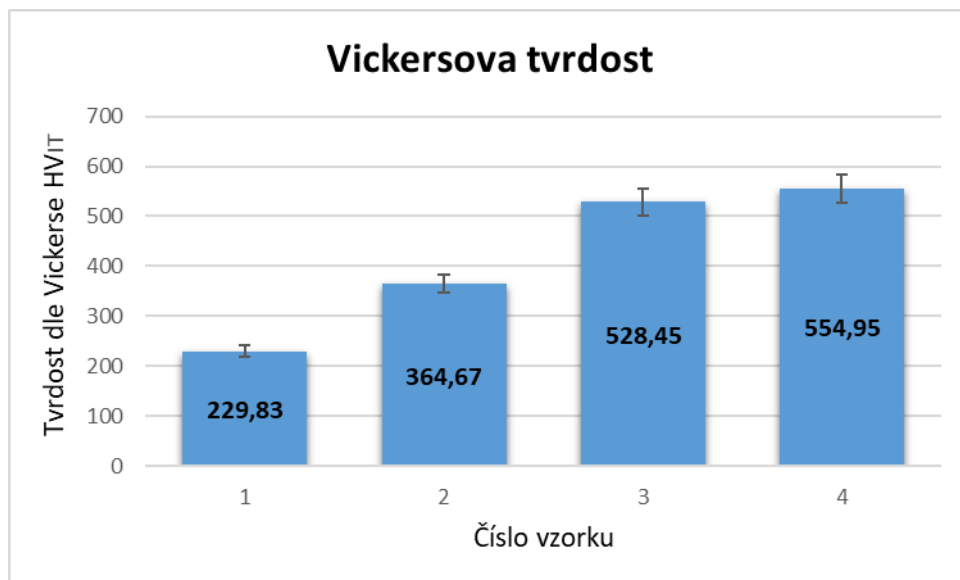
Z grafu lze vyhodnotit, že u tepelně zpracovaných vzorků se hodnoty jak plastické, tak i elastické deformační práce příliš nelišily. Nejnižší hodnota plastické deformační práce byla zaznamenána u vzorku č.3. Z grafů lze tedy usoudit, že s rostoucí tvrdostí zároveň klesá hodnota plastické deformační práce.

6.2.4 Kalicí teplota 850°C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Vzorky byly kaleny za teploty 850°C a měnila se doba výdrže na dané kalicí teplotě. Bylo změněno také kalicí médium na olej. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 9.

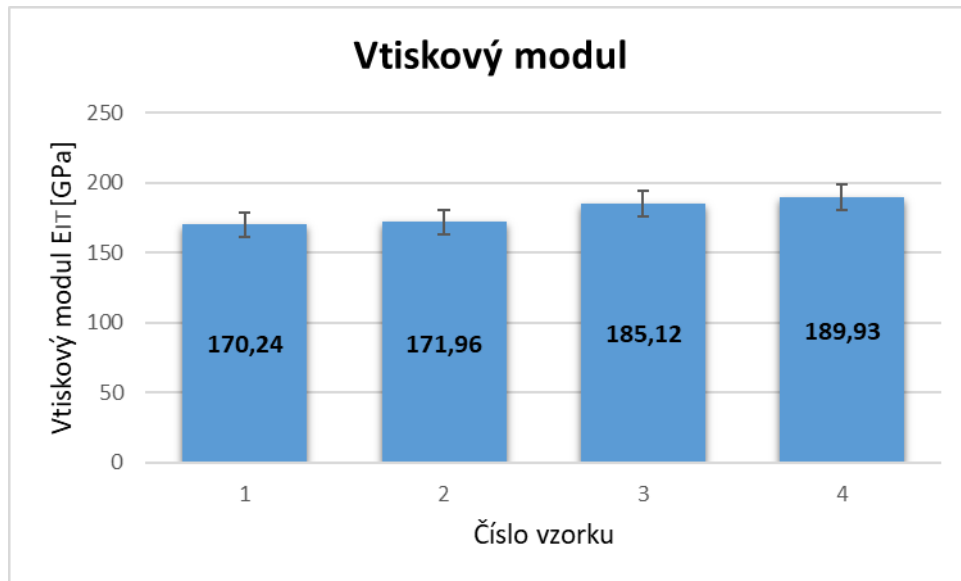
Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	850	60	olej	600	120	vzduch
	3	850	90	olej	600	120	vzduch
	4	850	120	olej	600	120	vzduch

Tabulka 9 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 850°C

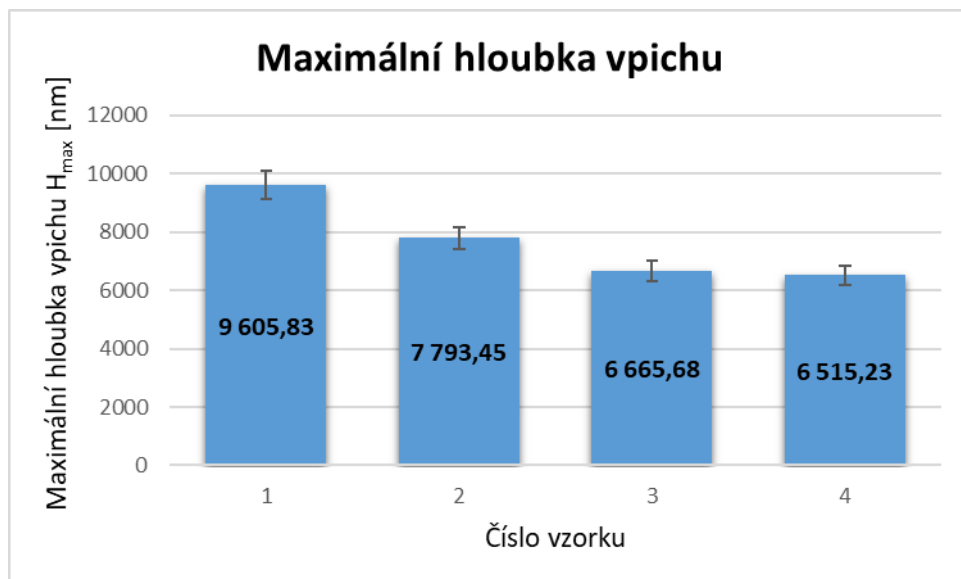
Obr. 41 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 850°C

Z grafu je patrné, že tvrdost zkušebních vzorků roste v závislosti na době kalícího procesu. Vzorek, u kterého byla výdrž na dané kalící teplotě nejdelší, zároveň vykazuje i nejvyšší tvrdost dle Vickerse HV_{IT}. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla tedy naměřena u vzorku č.4, tedy u vzorku kaleného za teploty 850°C po dobu 120 minut. V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem vzrostla hodnota tvrdosti u vzorku č.4 o 141 %.

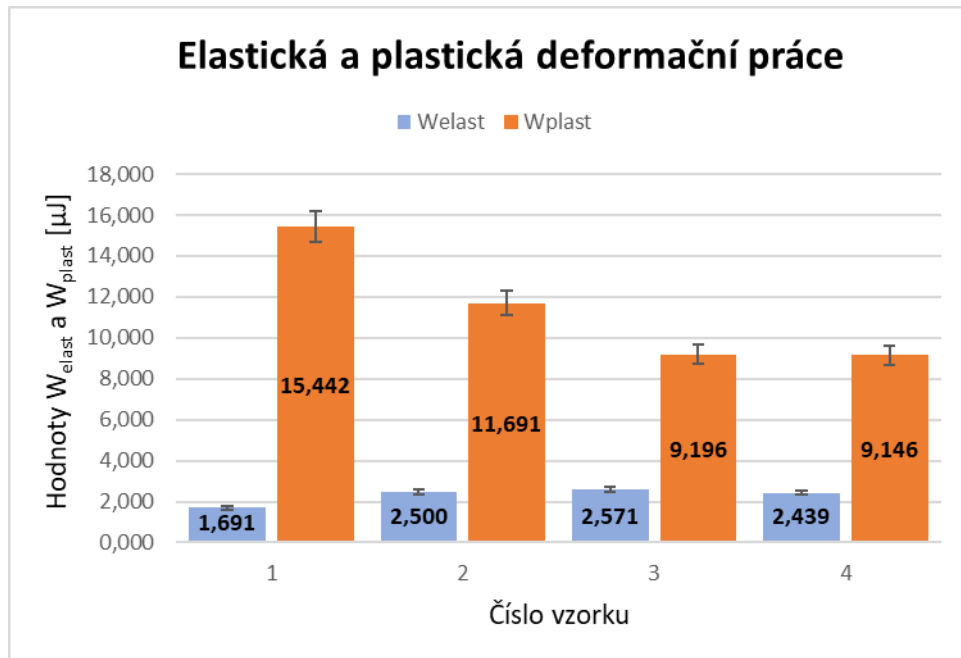
Co se týče struktury materiálu, tak tepelně nezpracovaný vzorek tvoří perlit hrubý. U tepelně zpracovaných vzorků vykazoval nejmenší hodnotu tvrdosti vzorek č.2, který se nachází v oblasti horního bainitu. Vzorky č.3 a 4 se nachází v oblasti dolního bainitu. Strukturní složky byly opět určeny pomocí tabulky 6.

Obr. 42 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 850 °C

Rozdíly mezi naměřenými hodnotami vtiskového modulu E_{IT} se v tomto případě příliš neliší. Nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku č.4, u kterého byla zároveň naměřena i nejvyšší hodnota tvrdosti. Největší rozdíl byl zaznamenán mezi tepelně nezpracovaným vzorkem a vzorkem č.4. Hodnota tu vzrostla o 12 %.

Obr. 43 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 850°C

Z předešlého grafu lze vyčíst, že i v tomto případě s růstem tvrdosti oceli dojde k poklesu maximální hloubky vpichu. Z toho plyne, že nejmenší hloubka tvrdosti byla naměřena u vzorku č.4. V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tato hodnota klesla o 32 %.



Obr. 44 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 850 °C

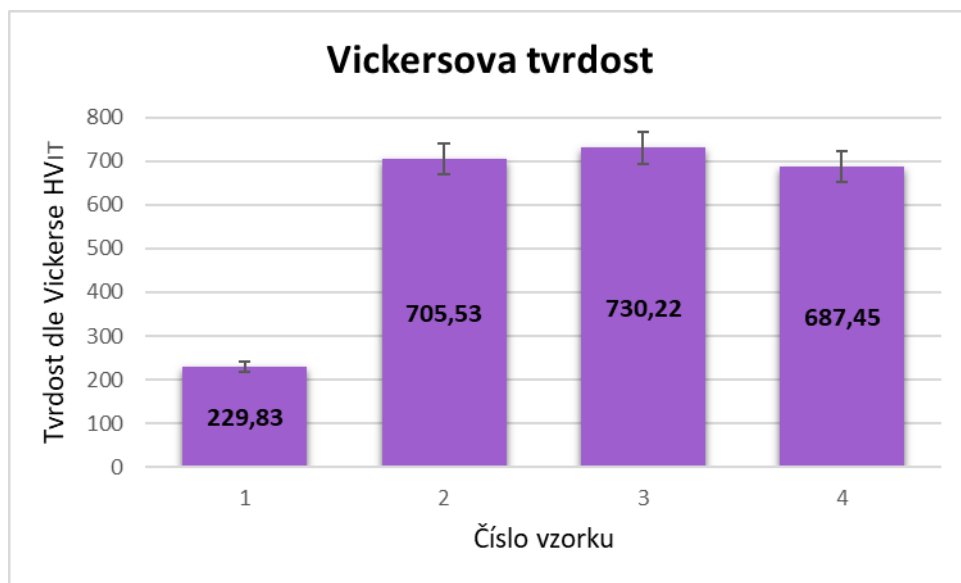
Z grafu elastické a plastické deformační práce lze vidět, že s růstem tvrdosti oceli klesá plastická deformační práce. Nejvyšší hodnota plastické deformační práce byla tedy naměřena u vzorku č.1, což byl tepelně nezpracovaný vzorek. Hodnoty elastické deformační práce se u tepelně zpracovaných vzorků příliš nemění. Nejvyšší naměřená hodnota elastické deformační práce byla naměřena u vzorku č.3 kaleného za teploty 850°C po dobu 90 minut.

6.2.5 Kalící teplota 870°C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Vzorky byly kaleny za teploty 870°C a měnila se doba výdrže na dané kalící teplotě. Bylo změněno také kalící médium na olej. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 10.

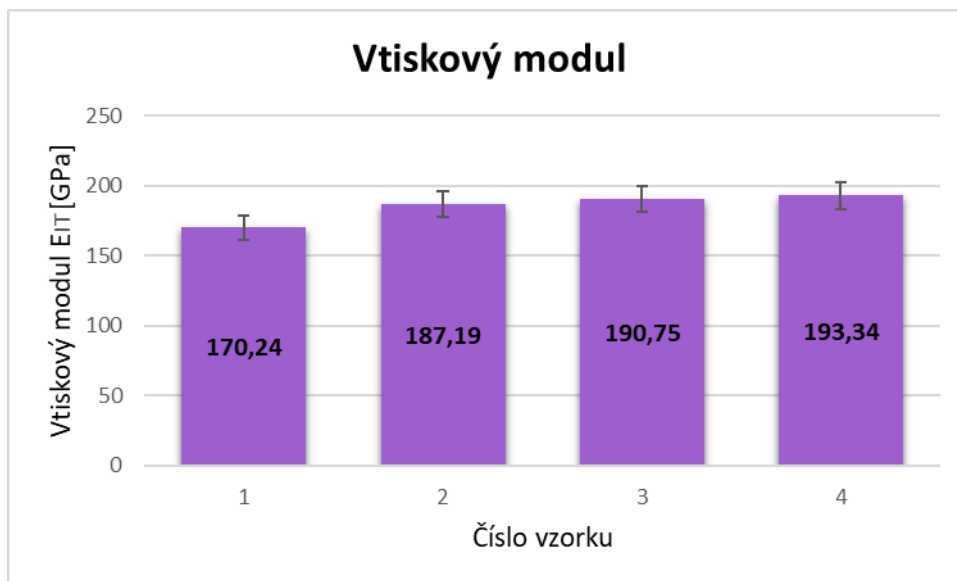
Tabulka 10 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 870°C

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	870	60	olej	600	120	vzduch
	3	870	90	olej	600	120	vzduch
	4	870	120	olej	600	120	vzduch

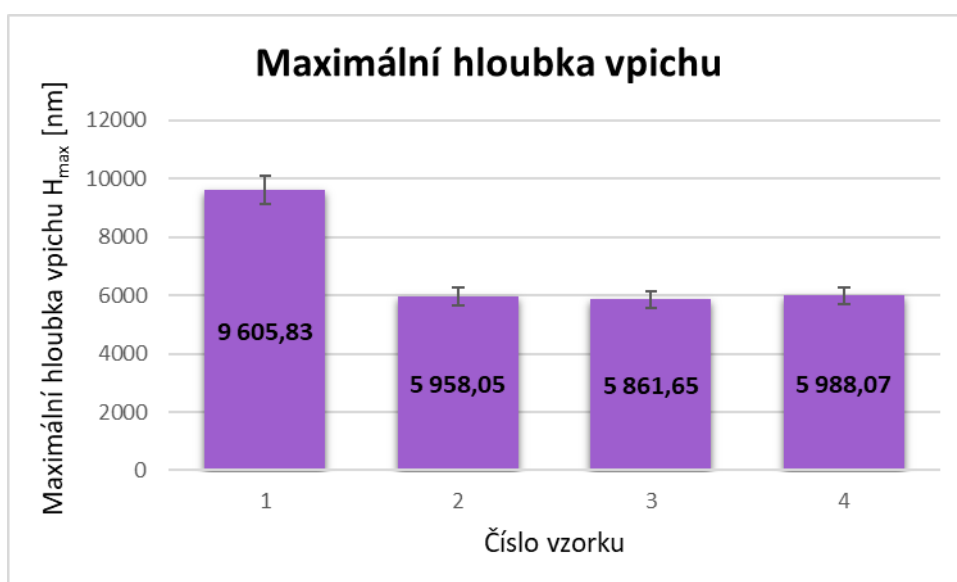
Obr. 45 Vickersova tvrdość HV_{IT} pro kalení při teplotě 870°C

Z předchozího grafu lze vyčíst, že Vickersova tvrdość HV_{IT} byla nejvyšší u vzorku č.3. Tedy u vzorku zpracovaného za kalící teploty 870°C po dobu 90 minut viz. tabulka 10. Z tepelně zpracovaných vzorků dosáhl nejnižší hodnoty tvrdości vzorek č.4, u kterého byla oproti vzorku č.3 delší výdrž na kalící teplotě. V porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem tedy nejvíce vzrostla tvrdość u vzorku č.3 a to o 218 %.

Hodnoty tvrdości dle Vickerse i v tomto případě posloužily k určení strukturních složek. Pomocí tabulky 6 bylo zjištěno, že tepelně zpracované vzorky č.2 a 3 se nachází v oblasti vysokouhlíkového martenzitu. Vzorek č. 4 se nachází v oblasti nízkouhlíkového martenzitu.

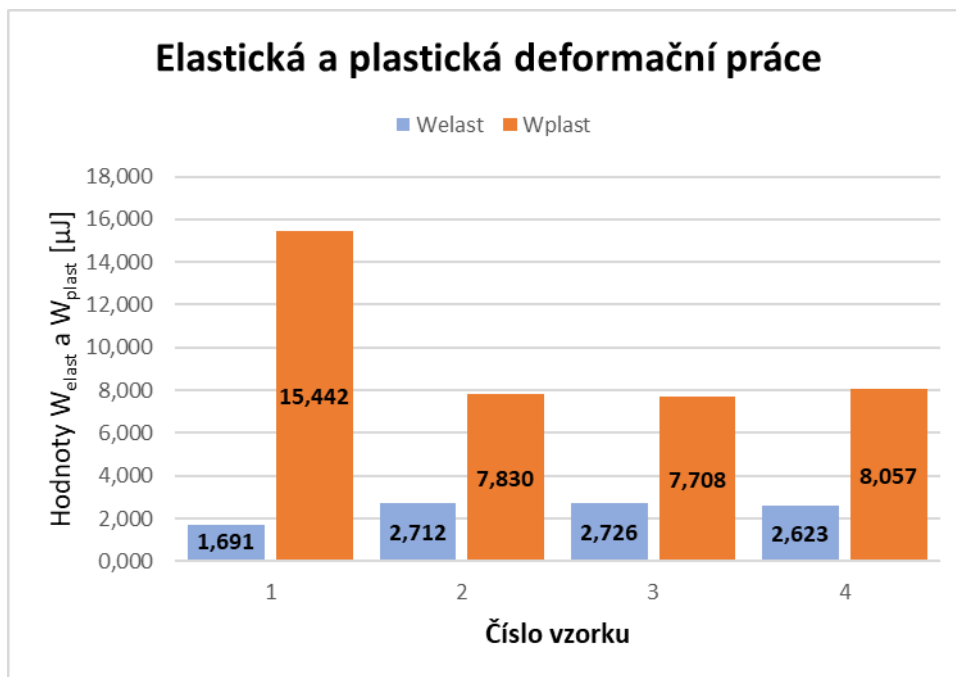
Obr. 46 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 870 °C

Hodnoty vtiskového modulu E_{IT} dle přechozího grafu vykazují, že rostou v závislosti na délce kalícího cyklu. Největší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u vzorku č.4, u kterého byla nejdelší výdrž na kalící teplotě viz. tabulka 10. Nejmenší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku.

Obr. 47 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 870°C

I v tomto případě lze vidět, že s růstem tvrdosti oceli dojde k poklesu maximální hloubky vpichu. Z tohoto důvodu byla nejmenší hloubka vpichu naměřena u vzorku č.3.

Z grafu lze také vyčíst, že mezi tepelně zpracovanými vzorky jsou malé stejné jako u předchozích grafů. Největší pokles hodnot byl mezi tepelně nezpracovaným vzorkem č.1 a vzorkem č.3. Pokles byl 39 %.



Obr. 48 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 870 °C

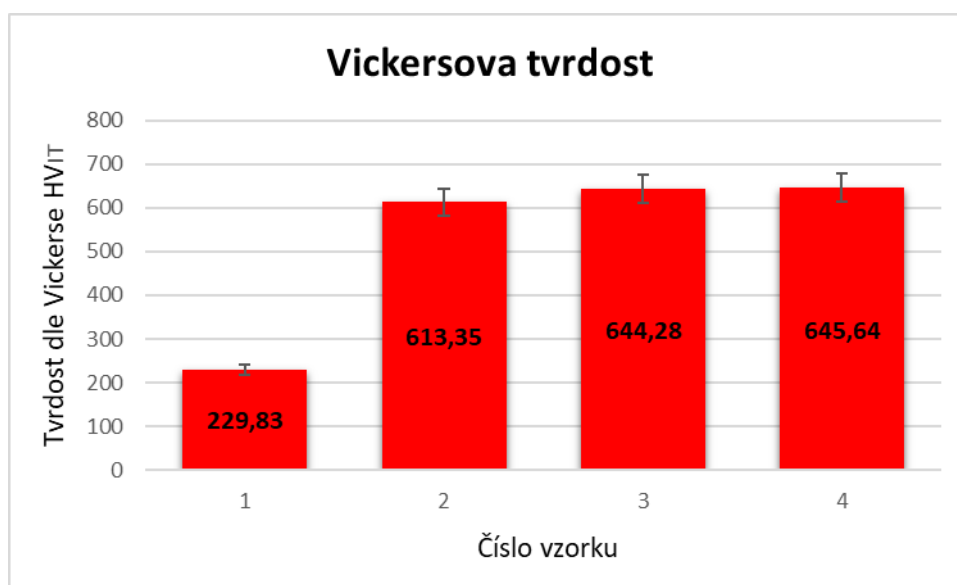
U tepelně zpracovaných vzorků byla nejvyšší naměřená plastická deformační práce u vzorku č.4. Nejvyšší elastická deformační práce byla zaznamenána u vzorku č.3.

6.2.6 Kalicí teplota 890°C

Měření tvrdosti probíhalo na třech vzorcích s různými parametry tepelného zpracování. Vzorky byly kaleny za teploty 890°C a měnila se doba výdrže na dané kalicí teplotě. Bylo změněno také kalicí médium na olej. Pro porovnání byla provedena zkouška tvrdosti i na vzorku, který nebyl podroben tepelné úpravě. Parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 890°C

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Výdrž na popouštěcí teplotě [min]	Dochlazení
Ocel 15 330	1	bez tepelného zpracování					
	2	890	60	olej	600	120	vzduch
	3	890	90	olej	600	120	vzduch
	4	890	120	olej	600	120	vzduch

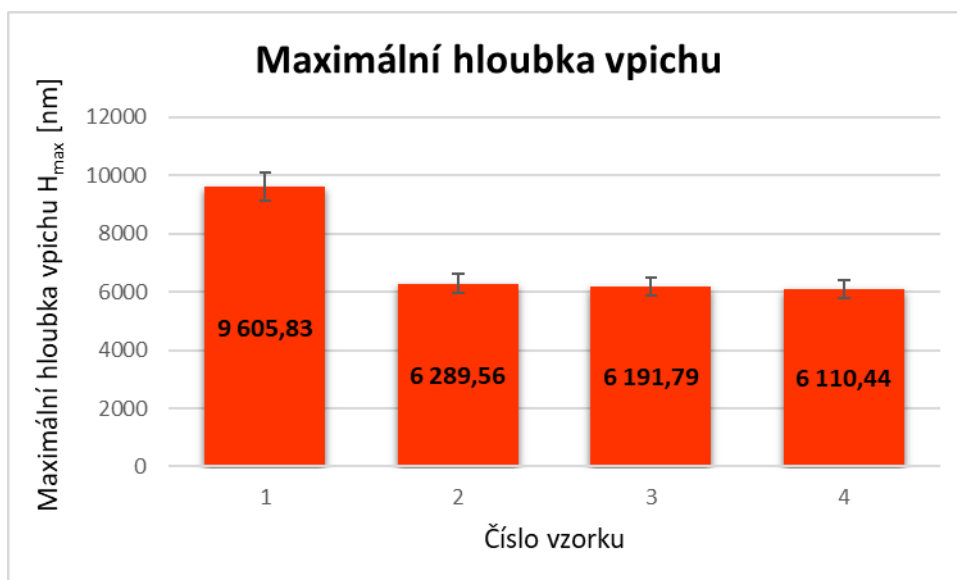
Obr. 49 Vickersova tvrdość HV_{IT} pro kalení při teplotě 890°C

Z grafu Vickersovi tvrdości lze vyčíst, že s rostoucí dobou kalícího cyklu roste i tvrdość vzorků. Nejvyšší hodnota tvrdości byla naměřena u vzorku č.4. Dále lze z grafu vidět, že rozdíl tvrdości mezi vzorkem č.3 a vzorkem č.4 je velmi malý a to 0,21 %.

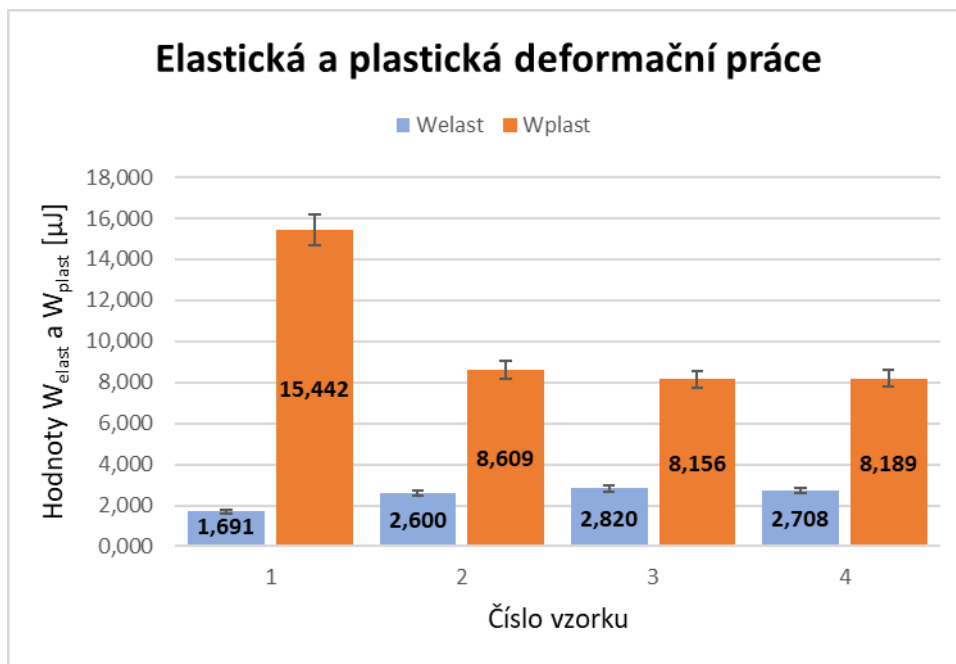
Tabulka 6 i v tomto případě posloužila k určení strukturních složek. Pomocí tabulky bylo zjištěno, že tepelně zpracované vzorky se nachází v oblasti nízkouhlíkového martenzitu.

Obr. 50 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 890 °C

Hodnota vtiskového modulu byla dle předchozího grafu nejvyšší u vzorku č.4, tedy u vzorku, u kterého byla naměřena i nejvyšší hodnota tvrdosti dle Vickerse. Nejmenší rozdíl byl mezi vzorkem č.2 a vzorkem č.3. tento rozdíl činil 3,17 GPa. Nejmenší hodnota vtiskového modulu byla naopak naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku.

Obr. 51 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 890°C

Hodnoty maximální hloubky vpichu u tepelně zpracovaných vzorků vykazují dle grafu velmi malé rozdíly. Nejmenší hloubka byla naměřena u vzorku č.4. Z grafu lze vyčíst, že s růstem tvrdosti dojde k poklesu maximální hloubky vpichu.



Obr. 52 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 890 °C

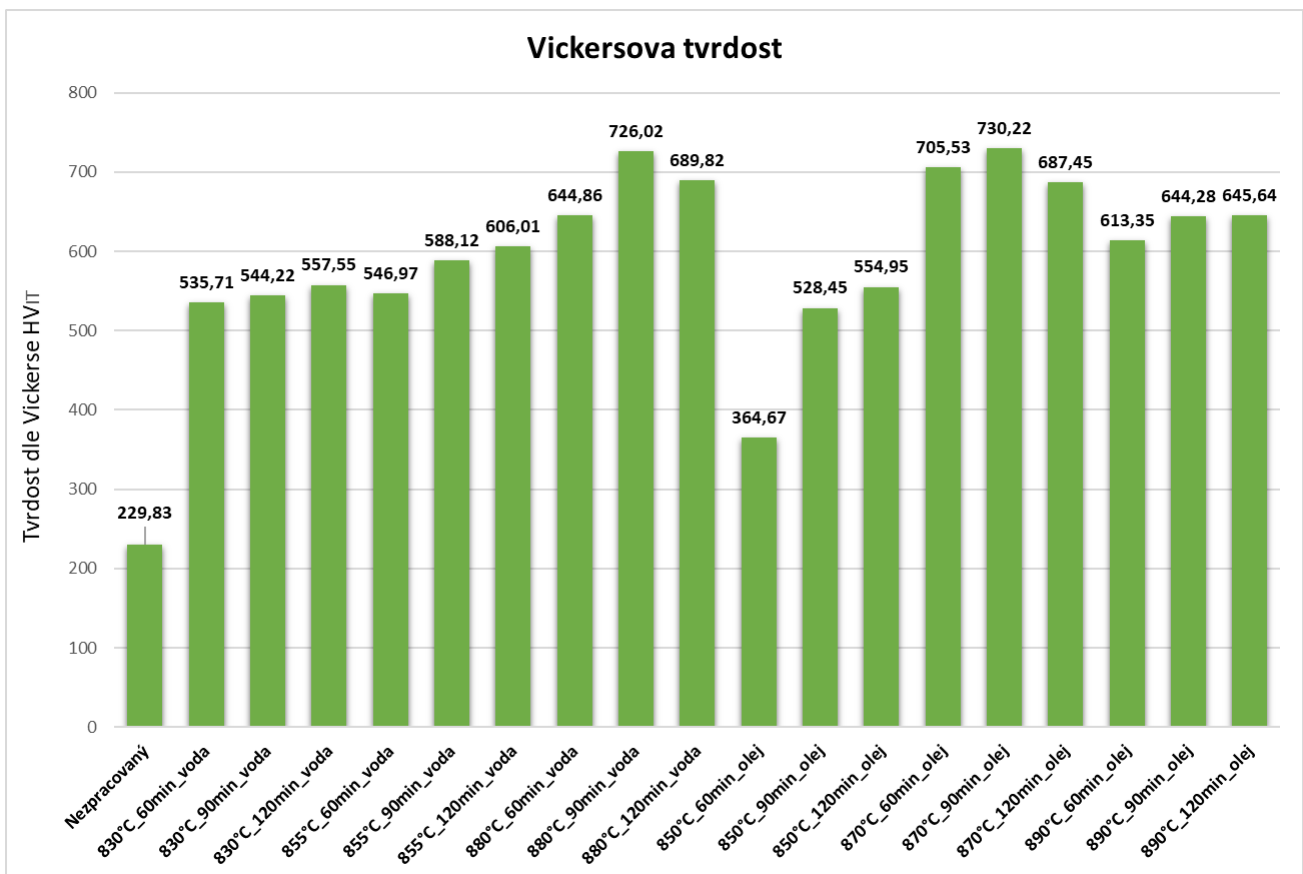
U předchozího grafu elastické a plastické deformační práce lze vypočítat stejné výsledky, jako u předchozích grafů vzorků kalených za teploty 890°C. Rozdíly mezi jednotlivými vzorky, které byly podrobeny tepelnému zpracování jsou i v tomto případě velmi malé. Nejmenší rozdíl tepelně zpracovaných vzorků můžeme zaznamenat u vzorku č.3 a č.4, a to o 0,4 %. Hodnoty elastické deformační práce u tepelně zpracovaných vzorků mají opět minimální rozdíly. Oproti plastické deformační práci se nejvyšší hodnota elastické deformační práce naměřila u vzorku č.3.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Náplní praktické části bylo provedení měření mikro-tvrdomosti metodou DSI. Měření probíhalo na zkušebních vzorcích vybraného materiálu. Zkušební vzorky byly za rozdílných kalících teplot tepelně zpracovány. Tvrdomost jednotlivých vzorků byla poté porovnána s tvrdostí tepelně nezpracovaného vzorku. Výsledky byly graficky vyhodnoceny.

V následujících kapitolách byly vzorky navzájem porovnány. K porovnání slouží i tvrdost tepelně nezpracovaného vzorku.

7.1 Vickersova tvrdost



Obr. 53 Porovnání maximální Vickersovi tvrdosti jednotlivých vzorků

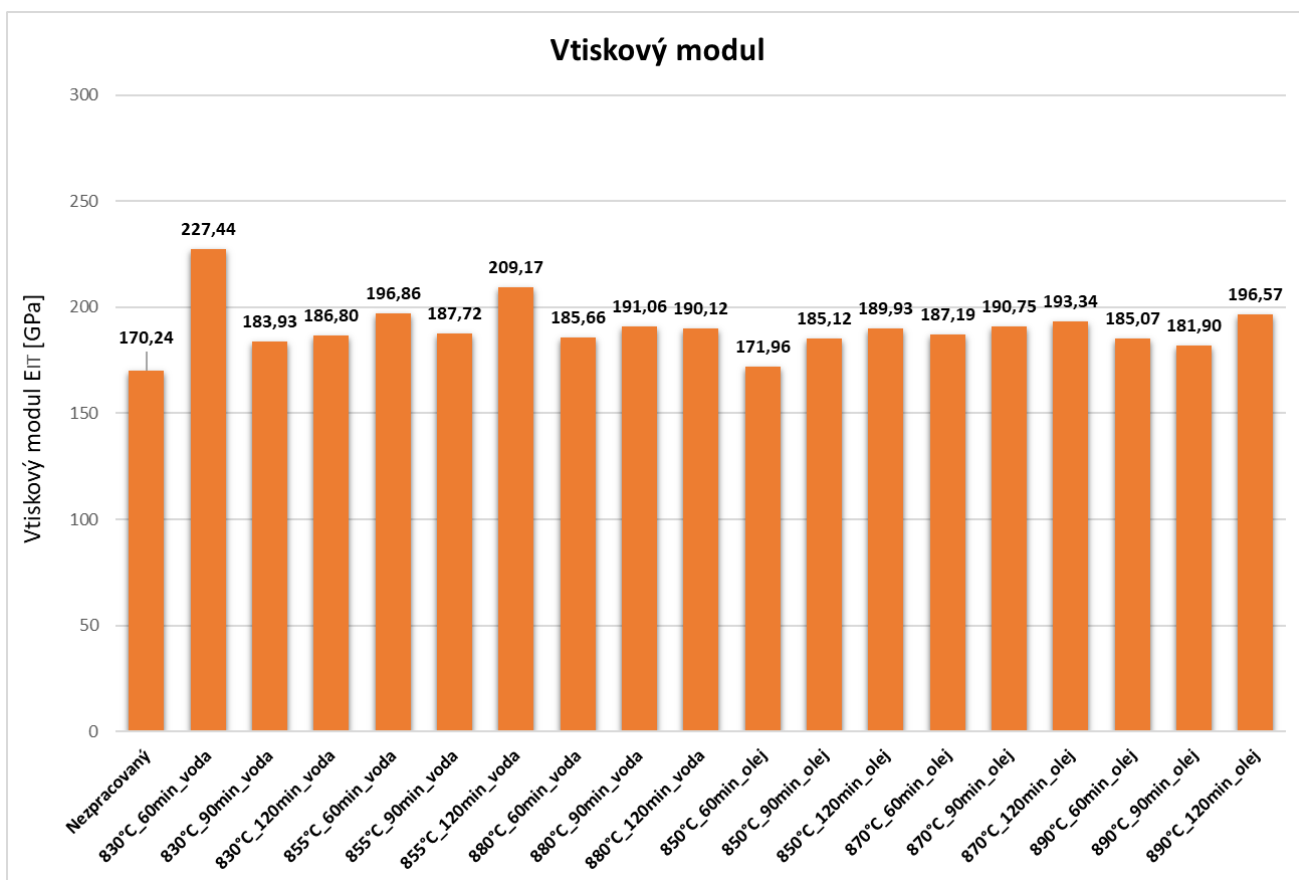
Z grafu lze vyčíst, že nejvyšší hodnoty tvrdosti dosáhl vzorek, který byl kalen za kalící teploty 870°C. Naopak nejnižší hodnotu tvrdosti tepelně zpracovaných vzorků dosáhl vzorek, který byl kalen za kalící teploty 850 °C.

U vody se jako optimální teplota jeví teplota 880 °C a výdrž na teplotě 90 minut, kde byla naměřena hodnota tvrdosti dle Vickerse 726,02. U oleje je to kalící teplota 870 °C a výdrž na teplotě 90 minut. Zde byla naměřena hodnota tvrdosti dle Vickerse 730,22, což byla zároveň i nejvyšší naměřená tvrdost.

Nižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny převážně u vzorků, které byly zpracovány za nižší kalící teploty a kratší doby austenitizace. U těchto vzorků nedošlo k dostatečné homogenizaci austenitu, což vedlo k naměření nižších mikro-mechanických vlastností. Z těchto naměřených hodnot tvrdosti byly určeny strukturní složky jednotlivých vzorků dle tabulky 6. Z tabulky plyne, že kalení za nižších kalících teplot se projevilo na výsledné struktuře, která byla bainitická. Naopak u vysokých kalících teplot se zpracované vzorky nachází v oblasti martenzitu.

Lze tedy vyhodnotit, že jako ideální kalící teplota se jeví teplota 870 °C, výdrž na kalící teplotě 90 minut a následné chlazení v oleji. U tohoto vzorku došlo k dobré homogenizaci austenitu a výsledná struktura je tvořena martenzitem.

7.2 Vtiskový modul



Obr. 54 Porovnání maximálního vtiskového modulu jednotlivých vzorků

Porovnání hodnot vtiskového modulu probíhalo totožně jako u Vickersovi tvrdosti. Pro porovnání byl opět zvolen i vzorek bez tepelné úpravy.

Z grafu lze vyčíst, že hodnoty vtiskového modulu u zkušebních vzorků, které byly kaleny za rozdílných kalících teplot jsou téměř totožné. Nejvyšší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u vzorku tepelně zpracovaného za kalící teploty 830 °C po dobu 60 minut, u kterého je zaznamenán také největší nárůst oproti tepelně nezpracovanému vzorku. Jednalo se o vzorek, který byl zpracován za nejnižší kalící teploty a nejkratšího času výdrže. Tím došlo k nedostatečné homogenizaci austenitu.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce popisovala vliv působení tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti vzorků z vybrané oceli. Konkrétně se jednalo o ocel 15 330. Z vybraného materiálu bylo nařezáno devatenáct zkušebních vzorků, které byly následně zalisovány a leštěny. Připravené zkušební vzorky byly zpracovány kalením a popouštěním. Popouštění probíhalo u všech vzorků za stejných podmínek, jednotlivé vzorky se od sebe lišily kalící teplotou, výdrží na kalící teplotě a kalícím médiem. Příprava vzorků a tepelné zpracování probíhalo v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC.

Teoretická část popisovala vlastnosti a rozdělení technických slitin železa. V další kapitole jsou popsány způsoby tepelného a chemicko – tepelného zpracování ocelí. V následující části jsou popsány jednotlivé metody měření tvrdosti a měření metodou DSI.

V praktické části byly z vybraného materiálu nařezány zkušební vzorky, které se následně zalisovaly z důvodu upnutí do metalografické leštičky, kde byly poté leštěny na leštícím stroji. Následovalo tepelné zpracování jednotlivých vzorků na kalícím pracovišti. Byly vždy vybrány tři vzorky, u kterých byla stanovena stejná kalící teplota, kalící médium a proměnným parametrem byla výdrž na kalící teplotě. Celkově bylo tepelně zpracováno osmnáct vzorků, při šesti různých kalících teplotách. Popouštění probíhalo u všech vzorků za stejných podmínek. Jeden vzorek zůstal tepelně nezpracován z důvodu následného porovnání s tepelně zpracovanými vzorky. Měření mikro-tvrdosti bylo provedeno metodou DSI na měřícím přístroji MicroCombi Tester v laboratořích ústavu výrobního inženýrství FT UTB. Poté byly všechny naměřené hodnoty graficky zpracovány a vyhodnoceny

Z naměřených výsledků bylo vyhodnoceno, že nejvyšší hodnoty tvrdosti dosáhl vzorek, který byl zpracován za kalící teploty 870 °C s délkou výdrže na kalící teplotě 90 minut. Největší hodnota vtiskového modulu byla naměřena vzorku zpracovaného za kalící teploty 830°C. Maximální hloubka v pichu byla největší u vzorku zpracovaného za kalící teploty 850°C.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [4] MÍŠEK, Bohumil. *Konstrukční materiály*. 2018. Brno: TESIYO, 2018. ISBN 978-80-87102-20-6.
- [5] *Mechanical engineers handbook*. Fourth edition. Editor Myer KUTZ. Hoboken: Wiley, [2015]. ISBN 978-1-118-11282-3.
- [6] JURČI, Peter. *Tepelné zpracování nástrojových ocelí: Heat treatment of tool steels*. 2005. V Praze: České vysoké učení technické, 2005. ISBN 80-01-03370-8.
- [7] PALÁT, Hynek. *Strojírenská technologie, 1*. *Www.sspu-opava.cz* [online]. 2011 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.sspu-opava.cz/cs/studium/vyukove-materialy/>
- [8] DEY, Kumar. *Annealing Process of Steel* [online]. 2021 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://whatispiping.com/annealing/>
- [9] MACEK, Karel a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 8001022870.
- [10] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070825820.
- [11] METHAROM, Sunan. *Heat treatment: conventional and novel applications*. New York: Scitus academics, 2017. ISBN 978-1-68117-519-5.
- [12] HLUCHÝ, Miroslav, Oldřich MODRÁČEK a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 1–2. díl: Metalografie a tepelné zpracování*. 2. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-140-9.
- [13] VŘEŠTÁL, Jan. *Chemicko-tepelné zpracování materiálu* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/>

- [14] *HARDNESS TESTING* [online]. 2015, 4 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: web.itu.edu.tr
- [15] HERMANN, Konrad. *Hardness Testing – Principles and Applications*. ASM International, 2011. ISBN 978-1-61344-761-9.
- [16] TABOR, David. *The hardness of metals*. Oxford: Clarendon Press, 2007. ISBN 9780198507765.
- [17] MACHÁČ, Miroslav. *MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
- [18] JUDAS, Miroslav. *Měření mechanických vlastností modifikovaných polymerů*. Zlín, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Martin Ovsík.
- [19] KRYŠTŮFEK, Pavel. *Zkouška tvrdosti dle Martense* [online]. 2002 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-martens.htm>
- [20] MARTINÁK, Milan. *Kontrola a měření Učebnice pro 3. ročník stř. prům. škol strojnických*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00103-X.
- [21] *Měření tvrdosti* [online]. [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: www.spszengrova.cz
- [22] JIŘÍ, Dušek. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.
- [23] KUREČKA, Tomáš. *Vliv procesních parametrů tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti*. Zlín, 2021. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Martin Ovsík.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Fe	Železo
C	Uhlík
Mn	Mangan
Si	Křemík
Ni	Nikl
Al	Hliník
Mg	Hořčík
Mo	Molybden
Cu	Měď
W	Wolfram
Ac	Kritická teplota [°C]
Ms	Teplota martenzitické přeměny [°C]
Ps	Teplota perlitické přeměny [°C]
Bs	Teplota bainitické přeměny [°C]
IRA	Izotermický rozpad austenitu
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
F	Zatěžující síla
S	Plocha vtisku
D	Průměr kuličky [mm]
D	Průměr vtisku [mm]
F ₀	Předběžné zatížení
AS	Zbytková konstantní (styčná) plocha vtisku [mm ²]
g	gravitační síla
H	Tvrdost
HB	Tvrdost podle Brinella

HV	Tvrдость podle Vickerse
HR	Tvrдость podle Rockwella
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrđosti
ČSN	Česká technická norma
H_{IT}	Vtisková tvrđost [Mpa]
HV_{IT}	Vickersova tvrđost
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]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Křivka chladnutí a ohřevu čistého železa	11
Obr. 2 Metastabilní rovnovážný diagram Fe – Fe ₃ C [1].....	12
Obr. 3 Tvorba a homogenizace austenitu	13
Obr. 4 IRA diagram eutektoidní oceli	14
Obr. 5 IRA diagram podeutektoidní nebo nadeutektoidní oceli	14
Obr. 6 ARA diagram eutektoidní oceli.....	15
Obr. 7 Schéma rozdělení oceli ke tváření dle chemického složení [2].....	17
Obr. 8 Obecný diagram tepelného zpracování [8].....	21
Obr. 9 Oblast žíhacích teplot [7].....	22
Obr. 10 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C [12].....	24
Obr. 11 Ochlazovací křivky středu ocelového válce o průměru 10 mm v uvedených prostředích [2].....	25
Obr. 12 Přehled způsobů kalení oceli [12]	26
Obr. 13 Schéma nepřetržitého kalení [12].....	27
Obr. 14 Schéma lomeného kalení [12]	27
Obr. 15 Schéma termálního kalení [12].....	28
Obr. 16 Závislost hloubky cementační vrstvy na době cementování [14].....	31
Obr. 17 Růst nitridační vrstvy [13].....	31
Obr. 18 Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování [1].....	32
Obr. 19 Shoreho zkouška [20]	34
Obr. 20 Zkouška tvrdosti podle Brinella [20].....	35
Obr. 21 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [21].....	37
Obr. 22 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [20]	38
Obr. 23 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky DSI (b) [23].....	40
Obr. 24 Kalící pracoviště SKM	45
Obr. 25 Kalící pec od firmy LAC	45
Obr. 26 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000.....	46
Obr. 27 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO	47
Obr. 28 Přístroj MICRO-COMBI TESTER od firmy CSM.....	48
Obr. 29 30 Vickersova tvrdost HV _{IT} pro kalení při teplotě 830°C	50
Obr. 30 Vtiskový modul E _{IT} pro kalení při teplotě 830 °C	51
Obr. 31 Maximální hloubka vpichu H _{max} pro kalení při teplotě 830°C	51
Obr. 32 Elastická W _{elasst} a plastická W _{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 830 °C.....	52

Obr. 33 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 855°C	53
Obr. 34 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 855 °C	54
Obr. 35 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 855°C	55
Obr. 36 Elastická W_{elasst} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 855 °C.....	55
Obr. 37 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 880°C	56
Obr. 38 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 880 °C	57
Obr. 39 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 880°C	57
Obr. 40 Elastická W_{elasst} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 880 °C.....	58
Obr. 41 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 850°C	59
Obr. 42 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 850 °C	60
Obr. 43 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 850°C	60
Obr. 44 Elastická W_{elasst} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 850 °C.....	61
Obr. 45 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 870°C	62
Obr. 46 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 870 °C	63
Obr. 47 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 870°C	63
Obr. 48 Elastická W_{elasst} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 870 °C.....	64
Obr. 49 Vickersova tvrdost HV_{IT} pro kalení při teplotě 890°C	65
Obr. 50 Vtiskový modul E_{IT} pro kalení při teplotě 890 °C	66
Obr. 51 Maximální hloubka vpichu H_{max} pro kalení při teplotě 890°C	66
Obr. 52 Elastická W_{elasst} a plastická W_{plast} deformační práce vzorků kalených za teploty 890 °C.....	67
Obr. 53 Porovnání maximální Vickersovi tvrdosti jednotlivých vzorků.....	68
Obr. 54 Porovnání maximálního vtiskového modulu jednotlivých vzorků.....	69
Obr. 55 Porovnání maximální hloubky vpichu jednotlivých vzorků	Chyba! Záložka není definována.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mezní hodnoty pro oceli obvyklých jakostí	18
Tabulka 2 Chemické složení oceli 15 330 [24]	43
Tabulka 3 Technologické údaje oceli 15 330 [24]	43
Tabulka 4 Parametry tepelného zpracování vzorků.....	44
Tabulka 5 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 830°C.....	49
Tabulka 6 Tvrdost strukturních složek	50
Tabulka 7 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 855°C.....	53
Tabulka 8 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 855°C.....	56
Tabulka 9 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 850°C.....	59
Tabulka 10 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 870°C.....	62
Tabulka 11 Parametry tepelného zpracování vzorků kalených za teploty 890°C.....	65

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Ocel 15 330

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST_OCEL 15 330