

Mikrotvrdost' kovov

Bc. Radek Matula

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek MATULA**

Osobní číslo: **T09692**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Mikrotvrdost kovů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava vzorků pro zkoušky mikrotvrdosti
3. Provedení zkoušek mikrotvrdosti
4. Vyhodnocení naměřených výsledků



Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

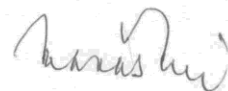
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Mañas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

Ve Zlíně dne 7. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cieľom tejto diplomovej práce je riešiť problematiku mikrotvrdosti kovov, kde hlavným bodom nášho skúmania je vplyv tepelného spracovania ocelí na už spomínanú mikrotvrdosť zadaných materiálov.

V teoretickej časti sa sústreďujem na základné rozdelenie a charakteristiku ocelí, spôsoby ich tepelného spracovania, podstatu a spôsoby merania tvrdosti a mikrotvrdosti.

V praktickej časti sú štatisticky spracované a následne vyhodnotené namerané hodnoty. Ďalej hodnotím vplyv tepelného spracovania na mikrotvrdosť zadaných materiálov. A toto reprezentujem pomocou merania mikrotvrdosti a to metódou podľa Vickersa.

Kľúčové slová: Rozdelenie ocelí, Spôsoby tepelného spracovania, Tvrdosť, Mikrotvrdosť, Vickers,

ABSTRACT

The aim of this graduation theses is to solve the problem of microhardness metals where primary item our investigation is influence heat treatment of steels on microhardness of our scheduled materials.

In the theoretical part I am focusing on basic classification and characteristic of steels, different methods of heat treatment them, principal and methods measurement of the hardness and microhardness.

In the practical part I statistically processed and consequently analysed measured data. Next I describe influence heat treatment on microhardness of our scheduled materials. And this I represent by means of measurment of microhardness according to the Vickers method.

Keywords: Classification of steels, Methods of heat treatment, Hardness, Microhardness, Vickers

Pod'akovanie:

Chcel by som sa osobne pod'akovať vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za odborné vedenie, cenné rady a sústavnú pozornosť a pomoc, ktorú mi pri vypracovaní mojej diplomovej práce venoval. Taktiež sa chcem pod'akovať aj ostatným ľuďom, ktorý mi tiež podali pomocnú ruku pri vypracovaní mojej diplomovej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahratá do IS/STAG portálu UTB sú totožné. Taktiež prehlasujem, že som na diplomovej práci pracoval samostatne a použitú literatúru som citoval. Súhlasím s tým, že s výsledkami mojej práce môže byť naložené podľa uváženia vedúceho diplomovej práce a riaditeľa ústavu. V prípade publikácie výsledkov, ak je to uvedené na základe licenčnej zmluvy, budem uvedený ako spoluautor.

V Zlíne 13.5.2011

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČASŤ	12
1 OCELE	13
1.1 ROZDELENIE OCELÍ PODĽA CHEMICKÉHO ZLOŽENIA	13
1.1.1 Nelegované ocele	13
1.1.2 Legované ocele.....	13
1.2 ROZDELENIE OCELÍ PODĽA SKUPÍN AKOSTÍ	14
1.2.1 Hlavné skupiny akosti nelegovaných ocelí	14
1.2.2 Hlavné skupiny akosti legovaných ocelí	15
1.3 TRIEDY OCELÍ.....	16
1.3.1 Ocele triedy 10	16
1.3.2 Ocele triedy 11	17
1.3.3 Ocele triedy 12	18
1.3.4 Ocele triedy 13	18
1.3.5 Ocele triedy 14	18
1.3.6 Ocele triedy 15	19
1.3.7 Ocele triedy 16	19
1.3.8 Ocele triedy 17	19
1.3.9 Ocele triedy 19	19
2 SPÔSOBY TEPELNÉHO SPRACOVANIA MATERIÁLU	20
2.1 ŽÍHANIE.....	21
2.1.1 Žíhanie bez prekryštalizácie	22
2.1.2 Žíhanie s prekryštalizáciou.....	23
2.2 KALENIE.....	24
2.2.1 Martenzitické kalenie	26
2.2.2 Bainitické kalenie	28
2.3 POPÚŠŤANIE	29
2.3.1 Popúšťanie za nízkych teplôt (100 až 350 °C)	29
2.3.2 Popúšťanie za vysokých teplôt (350 až 700 °C).....	29
2.4 CHEMICKY – TEPELNÉ SPRACOVANIE.....	30
2.4.1 Cementovanie.....	31
2.4.2 Nitridovanie.....	32
2.4.3 Nitrocementovanie	33
2.4.4 Karbonitridovanie.....	33
2.4.5 Sulfonitridovanie a sulfonizovanie	34
2.4.6 Difúzne chrómovanie	34
2.4.7 Boridovanie	34
2.4.8 Difúzne hliníkovanie	34
2.5 TEPELNE – MECHANICKÉ SPRACOVANIE.....	34
2.5.1 Nízkotepelné tepelne – mechanické spracovanie.....	35
2.5.2 Vysokotepelné tepelne – mechanické spracovanie	35
2.5.3 Izoforming	36

2.5.4	Riadené valcovanie a ochladzovanie.....	36
2.5.5	Zerolling.....	36
3	TVRDOSŤ.....	37
3.1	SKÚŠKA TVRDOSTI PODEA BRINELLA.....	37
3.2	SKÚŠKA TVRDOSTI PODEA VICKERSA.....	39
3.3	SKÚŠKA TVRDOSTI PODEA ROCKWELLA.....	40
4	MIKROTVRDOSŤ.....	41
4.1	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI PODEA VICKERSA.....	42
4.2	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI PODEA KNOOPA.....	43
4.3	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI PODEA CHRUSČOVA A BERKOVIČA.....	45
4.4	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI PODEA MEINCKA A ATTINGERA.....	46
4.5	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI NA DVOJKUŽELI.....	46
4.6	SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI PODEA HANEMANNA.....	47
II	PRAKTICKÁ ČASŤ.....	48
5	STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE.....	49
6	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	50
6.1	SPÔSOBY TEPELNÉHO A CHEMICKY - TEPELNÉHO SPRACOVANIA SKÚŠOBNÝCH VZORIEK.....	50
6.1.1	Cementovanie.....	50
6.1.2	Kalenie.....	51
6.1.3	Nitridovanie.....	51
6.1.4	Zušťacht'ovanie.....	51
6.2	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH TYPOV OCELÍ PRE SKÚŠOBNÉ VZORKY.....	52
6.2.1	Oceľ 12 060.....	52
6.2.2	Oceľ 14 220.....	52
6.3	POUŽITÉ SKÚŠOBNÉ VZORKY PRE MERANIE MIKROTVRDOSTI.....	53
6.4	POUŽITÉ PRÍSTROJE PRE PRÍPRAVU SKÚŠOBNÝCH VZORIEK A MERANIE MIKROTVRDOSTI.....	54
6.4.1	Prístroj použitý na leštenie skúšobných vzoriek.....	54
6.4.2	Prístroj použitý na meranie mikrotvrlosti skúšobných vzoriek.....	55
6.5	POSTUP PRÍPRAVY A MERANIA MIKROTVRDOSTI.....	57
6.5.1	Príprava skúšobných vzoriek.....	57
6.5.2	Meranie mikrotvrlosti.....	57
6.5.3	Vyhodnotenie.....	58
7	VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT MIKROTVRDOSTI.....	59
7.1	MATERIÁL 14 220 NESPRACOVANÝ.....	59
7.1.1	Namerané hodnoty mikrotvrlosti materiálu 14 220 nespracovaného.....	59
7.1.2	Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 nespracovaný.....	61
7.2	MATERIÁL 14 220 CEMENTOVANÝ.....	63
7.2.1	Namerané hodnoty mikrotvrlosti materiálu 14 220 cementovaného.....	63

7.2.2	Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 cementovaný.....	65
7.3	MATERIÁL 14 220 KALENÝ	67
7.3.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości materiálu 14 220 kaleného	67
7.3.2	Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 kalený.....	69
7.4	MATERIÁL 14 220 NITRIDOVANÝ.....	72
7.4.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości materiálu 14 220 nitridovaného	72
7.4.2	Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 nitridovaný.....	74
7.5	MATERIÁL 12 060 ZUŠLACHŤOVANÝ	76
7.5.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości materiálu 12 060 zušľacht'ovaného.....	76
7.5.2	Grafické vyhodnotenie pre materiál 12 060 zušľacht'ovaný	78
8	DISKUSIA VÝSLEDKOV	81
8.1	POROVNANIE MIKROTVRDOŠTI SKÚŠOBNÝCH VZORIEK PRI ZAŤAŽENÍ 0,5N.....	81
8.2	POROVNANIE MIKROTVRDOŠTI SKÚŠOBNÝCH VZORIEK PRI ZAŤAŽENÍ 1N.....	82
8.3	POROVNANIE MIKROTVRDOŠTI SKÚŠOBNÝCH VZORIEK PRI ZAŤAŽENÍ 3N.....	82
8.4	POROVNANIE MIKROTVRDOŠTI SKÚŠOBNÝCH VZORIEK PRI ZAŤAŽENÍ 5N.....	83
8.5	VYHODNOTENIE A POROVNANIE HODNÔT MIKROTVRDOŠTI	83
	ZÁVER	85
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	86
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	87
	ZOZNAM OBRÁZKOV	89
	ZOZNAM TABULIEK	91

ÚVOD

Diplomová práca rieši problematiku mikrotvrdości kovov a hlavnou podstatou tejto diplomovej práce je vplyv tepelného spracovania ocelí na už spomínanú mikrotvrdosť zadaných materiálov. Skúšky mikrotvrdości sú veľmi výhodné, pretože zatiaľ, čo pri makrotvrdości sa zisťuje tvrdosť kovu ako kryštalického celku, je možno pri mikrotvrdości stanoviť tvrdosť jednotlivých štruktúrnych súčastí kovu. Pri použití veľmi malého zaťaženia, akého sa používa pri meraní mikrotvrdości, je odtlačok tak malých rozmerov, že nepresiahne oblasť jednej štruktúrnej oblasti. Skúškami mikrotvrdości je teda možné určiť tvrdosť jednotlivých štruktúrnych súčastí a z nej určovať nerovnorodosť materiálu v závislosti na jeho chemickom zložení, spôsobe spracovania a mikroskopickom usporiadaní.

Tepelným spracovaním rozumieme zámerné využívanie fázových a štruktúrnych premien v tuhom stave ku zmene štruktúry a tým získanie požadovaných mechanických alebo štruktúrnych vlastností výrobku alebo polotovaru. Tepelné spracovanie spočíva v princípe ohrevu na požadovanú teplotu, výdrži na tejto teplote a ochladzovaní určitou rýchlosťou, tzn. požadované zmeny štruktúry a vlastností sa dosiahnu riadenými zmenami teploty.

Mikrotvrdosť použitých materiálov, ktoré sú rôzne tepelne ovplyvnené následne skúmam metódou merania mikrotvrdości, konkrétne metódou podľa Vickersa. V diplomovej práci sa tiež zaoberám základným rozdelením použitých ocelí, rozborom jednotlivých metód tepelného spracovania materiálov ako i podstatou a metódami merania tvrdosti a mikrotvrdości.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 OCELE

Ocele sú najčastejšie používanými kovovými materiálmi. Legovaním uhlíkom a ďalšími prvkami a kombináciou tepelného a tepelne - mechanického spracovania je možno ovplyvniť vlastnosti ocele v širokom rozmedzí a tak ich vlastnosti prispôbiť zamýšľanému použitiu. Štruktúrne zložky sú popísané v binárnom diagramu železo - uhlík. Hustota ocele je 7,85 g/cm³. V súčasnej dobe sa vyrába asi 2 500 druhov ocelí. V normách (ČSN, DIN, atd.) sú ocele rozdelené do skupín jednak podľa chemického zloženia, jednak podľa štruktúry, mechanických a fyzikálnych vlastností.

[1]

Pre svoje mechanické a technologické vlastnosti je oceľ dodnes najdôležitejším technickým materiálom. Jej všestrannosť ako materiálu pre stavbu strojov, zariadení, nástrojov a pod. vedie k výrobe ocelí o najrôznejších vlastnostiach. Doterajšie ČSN stanovujúce klasifikáciu, zloženie a vlastnosti ocelí sú prepracovávané a upravované z hľadiska medzinárodných a európskych noriem (ISO a EN). Zmyslom toho je dosiahnuť hlavne podstatného zlepšenia stavu noriem na základe skúseností zhromaždených v minulosti a najnovšieho vývoja v hutnom a oceliarskom priemysle, prispôsobenie noriem ČSN normám ISO a EN. Ocele k tváreniu sú materiály, ktorých hmotnostný podiel železa je väčší než ktoréhokoľvek iného prvku a ktoré všeobecne majú obsah uhlíku $C < 2\%$ a obsahujú i iné prvky.

[2]

1.1 Rozdelenie ocelí podľa chemického zloženia

1.1.1 Nelegované ocele

Nelegované ocele nazývané taktiež uhlíkové oceli. Obsah legujúcich prvkov je nižší než 2%. Spravidla nie sú tepelne spracované.

[1]

1.1.2 Legované ocele

Legované ocele sa ďalej delia na :

Nízko legované ocele - Obsah legujúcich prvkov po odčítaní obsahu uhlíka je nižší než 5%. Majú podobné vlastnosti ako ocele nelegované, ale sú vhodné pre tepelné spracovanie. Tepelným spracovaním je u nich možno ovplyvniť mechanické vlastnosti.

Vysoko legované ocele - Obsah legujúcich prvkov je vyšší než 5%. Kombináciou legujúcich prvkov sa dosahuje potrebných mechanických, fyzikálnych a chemických vlastností.

[1]

1.2 Rozdelenie ocelí podľa skupín akostí

1.2.1 Hlavné skupiny akosti nelegovaných ocelí

Ocele obvyklých akostí – Sú to tie druhy nelegovaných ocelí, kde požiadavky na akosť nevyžadujú zvláštne opatrenia pri výrobe, musia však spĺňať tieto podmienky:

- nie sú určené pre tepelné spracovanie
- požiadavky, ktoré je nutné dodržať pre nespracovaný alebo normalizačný žihavý stav
- nie sú predpísané ďalšie zvláštne kvalifikačné charakteristiky
- s výnimkou obsahu Si a Mn nie sú predpísané žiadne ďalšie obsahy legovacích prvkov

[2]

Nelegované akostné ocele – Sú to druhy nelegovaných ocelí, pre ktoré všeobecne nie je predpísaná rovnomerná reakcia na tepelné spracovanie ani požiadavky na stupeň čistoty. Sú však na ne kladené prísnejšie alebo dodatočné požiadavky než na ocele obvyklých akostí, takže výroba ocelí vyžaduje väčšiu pozornosť.

[2]

Nelegované ušľachtilé ocele – Sú to druhy ocelí, ktoré vykazujú na rozdiel od akostných ocelí vyšší stupeň čistoty. Sú určené hlavne pre zušľachtovanie alebo povrchové kalenie. Majú rovnomernejšiu reakciu na tepelné spracovanie a presné chemické zloženie. Týchto vlastností je dosiahnuté zvláštnymi podmienkami výroby a skúšaniami. Patria sem:

- ocele s požiadavkami na nárazovú prácu v zušľachtenom stave
- ocele s požiadavkami na hĺbku zakalenej vrstvy alebo povrchovú tvrdosť
- ocele s požiadavkami na obzvlášť nízke obsahy nekovových častí
- ocele s predpísaným max. obsahom fosforu a s min. obsahom síry (napr. drôty pre vysoko namáhané pružiny, prídavné zvaracie drôty, drôty na kordy pneumatík atď.)
- ocele s hodnotami nárazovej práce min. KV > 27 J pri – 50 °C
- ocele pre jadrové reaktory

- ocele s predpísanou hodnotou elektrickej vodivosti
- feriticko – perlitické ocele s predpísaným obsahom uhlíku
- ocele pre predpínaciu výstuž do betónu

[2]

1.2.2 Hlavné skupiny akosti legovaných ocelí

Legované akostné ocele – Ide o ocele určené pre podobné účely ako nelegované akostné ocele. Aby ale vyhovovali zvláštnym podmienkam použitia, obsahujú legovacie prvky v obsahoch, ktoré z nich ďalej robia legované ocele. Nie sú všeobecne určené pre zušľachťovanie alebo povrchové kalenie.

Patria sem:

- zvärateľné jemnozrnné konštrukčné ocele pre ocel'ové konštrukcie vrátane tlakových nádob a potrubí
- ocele legované iba kremíkom alebo kremíkom a hliníkom so zvláštnymi požiadavkami na magnetické a elektrické vlastnosti
- ocele určené na výrobu koľajníc
- ocele pre ploché výrobky valcované za tepla alebo za studena, ktoré sú určené pre náročnejšie tvárenie za studena a legované jednotlivo alebo v kombinácií bór, niob, titan, vanád alebo zirkón
- ocele legované iba meďou

[2]

Legované ušľachtilé ocele – Ide o ocele, u ktorých je dosahované požadovaných spracovateľských a úžitných vlastností. Patria sem hlavne nehrdzavejúce ocele, žiaruvzdorné a žiarupevné ocele, ocele na valivé ložiská, nástrojové ocele, ocele pre ocel'ové konštrukcie a pre stavbu strojov, ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami a iné. Rozdeľujeme ich na nasledovné skupiny:

- nehrdzavejúce ocele s obsahom uhlíku $C \leq 1,20 \%$ a obsahom chrómu $Cr \geq 10,5 \%$. Podľa obsahu niklu $Ni < 2,5 \%$ alebo $Ni \geq 2,5 \%$
- rýchlorezné ocele so stanoveným obsahom $C \geq 0,6 \%$ a $Cr = (3 \text{ až } 6) \%$
- ostatné legované ušľachtilé ocele

[2]

1.3 Triedy ocelí

Ocele k tváreniu sú rozdelené do deviatich tried akosti podľa chemického zloženia. Sú to triedy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19.

Číselné označovanie ocelí k tváreniu sa skladá zo základnej číselnej značky a spravidla ešte z doplnkových číslic (tab. 1). Uvádza sa aspoň prvá doplnková číslica.

Prvá číslica je 1 a vyjadruje, že ide o oceľ k tváreniu.

Druhá číslica označuje v spojení s prvou číslicou triedu akosti ocele.

Význam **tretej** a **štvrtej číslice** je rôzny podľa triedy ocele.

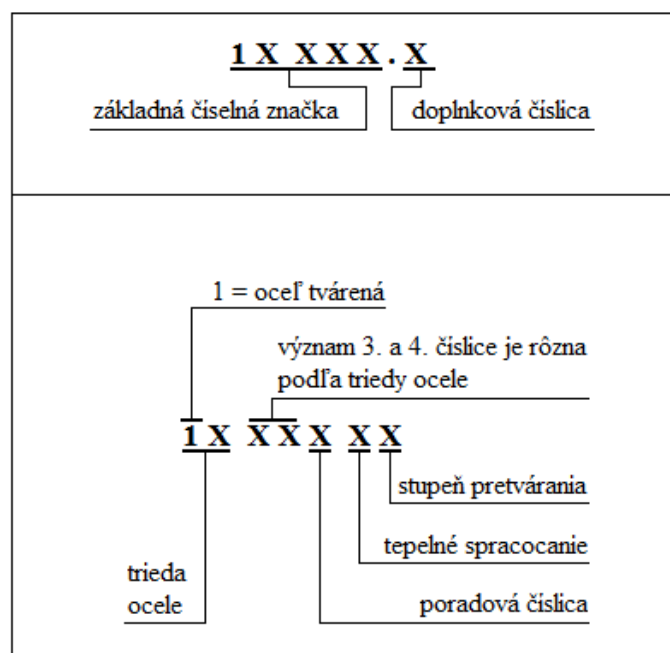
Piata číslica má význam poradový.

Doplnkové číslice sú oddelené od základnej číselnej značky bodkou.

Prvá doplnková číslica vyjadruje konečný stav ocele, t.j. druh tepelného spracovania.

Druhá doplnková číslica vyjadruje konečný stupeň pretvárania u oceľových plechov a pásov.

[3]



Tab. 1 Číselné označenie ocelí [2]

1.3.1 Ocele triedy 10

Ocele pevnostnej rady 00 nemajú zaručené chemické zloženie a čistotu. Dosahujú pevnosti v ťahu 400 až 790 MPa. Používajú sa na najmenej náročné práce stavebné a zámočnicke.

Sú to ocele 10 000, 10 004, 10 005.

Ocele pevnostnej rady 37 a 42 sú dobre tvárne a zvariteľné, ale nie pre nosné zvary. Používajú sa na rôzne konštrukcie, súčasti strojov, šróby, matice, nýty a drobné koľajnice. Sú to najmä ocele 10 370, 10 420.

Ocele pevnostnej rady 50, 65, 75 predstavujú najväčšiu skupinu s odstupňovanou pevnosťou v ťahu. Sú vhodné najmä pre rôzne druhy koľajníc podľa druhu zaťaženia.

Ocele pre betónovú výstuž sa používajú na výrobu hladkých tyčí (10 216) alebo rebierkových tyčí.

[3]

1.3.2 Ocele triedy 11

Oproti oceliam triedy 10 majú predpísanú čistotu, zaručenú pevnosť v ťahu, medzu klzu a ťažnosť. Sú odstupňované podľa obsahu uhlíka, s najmenšou pevnosťou v ťahu od 280 MPa do 900 MPa. Hute ich dodávajú vo forme tvárených profilov, drátov, plechov, výkovkov a výliskov.

[3]

Ocele pevnostnej rady 30, 32, 33 s max. obsahom C = 0,13% sú dobre tvárne za studena (hlboké ťaženie), niektoré druhy majú zaručenú zvariteľnosť, zvýšenú odolnosť proti stárnutiu a sú vhodné pre niektoré povrchové úpravy (lakovanie, pokovovanie, smaltovanie). Vyrábajú sa z nich najmä karosárske výlisky, nádrže, vane, riad. Najviac sa používajú ocele 11 300, 11 305, 11 320 a pre mierne ťaženie a ohýbanie ocele 11 330, 11 331.

Ocele pevnostnej rady 34 až 45 s max. obsahom C = 0,24% sú väčšinou zaručene zvariteľné, dobre tvárne za studena i za tepla. Sú vhodné na výkovky, výlisky, výťažky, na zvarované konštrukcie strojov, čapy, páky, svorníky, puzdra, hriadele, osy, ozubená kolesá.

Ocele pevnostnej rady 50 s obsahom C \leq 0,45% majú pevnosť v ťahu od 500 do 650 MPa. Sú to najrozšírenejšie ocele pre strojné súčasti najmä 11 500 (hriadele, čapy, šróby, kolíky, matice, málo namáhané ozubené kolesá).

Ocele pevnostnej rady 60, 70, 80 s obsahom C \geq 0,4% sa používajú pre náročnejšie strojné súčasti, napríklad vodiace hriadele, vretená lisov, klíny a pod.

Ocele automatové sú ocele ľahko obrobiteľné.

[3]

1.3.3 Ocele triedy 12

Ocele k cementovaniu majú nízky obsah C (do 0,2%). Patria sem napríklad ocele 12 010, 12 020 a 12 024. Používajú sa na čapy motorových vozidiel, zasúvacie vidlice, reťazové kolesá a pod.

Ocele k zušľachtovaniu majú obsah C od 0,2 do 0,6%, čo im zaručuje dostatočnú tvrdosť po zakalení. Používajú sa najčastejšie pre súčasti strojov, ako sú kľukové hriadele čerpadiel, lisov, veľkých spaľovacích motorov, vretená obrábacích strojov a ozubené kolesá.

Ocele k povrchovému kaleniu sú ocele, u nich sa požaduje vysoká tvrdosť povrchu. Hodí sa najmä na čapy, čeľuste, šúpatka, ozubené kolesá, kladky, vahadla a vidlice.

[3]

1.3.4 Ocele triedy 13

Ocele s obsahom $C \leq 0,2\%$, majú zaručenú zvariteľnosť (13 220, 13 221).

Ocele pružinové (13 180, 13 251, 13 270), majú zvýšenú medzu únavy a majú pevnosť v ťahu 1000 až 1400 MPa.

Ocele pre transformátorové a dynamové plechy sa vyznačujú malými hysteréznymi stratami a stratami vírivými prúdmi.

Ocele na nádoby pre stlačené plyny (13 124, 13 123) sú legované manganom (1 až 5%).

[3]

1.3.5 Ocele triedy 14

Sú ocele legované Cr, Mn, Si, poprípade ešte Ni, Al, Ti. Je to ušľachtilá, zliatinová, nízko legovaná oceľ, určená pre ďalšie tepelné spracovanie. Je vhodná k cementovaniu, nitridovaniu, zušľachtovaniu alebo povrchovému kaleniu.

[2]

Ocele k cementovaniu majú nízky obsah C a až 1,3% Cr.

Ocele k nitridovaniu, vhodná oceľ je 14 340. Používa sa na súčasti s čo najväčšou povrchovou tvrdosťou.

Ocele k zušľachtovaniu sa používajú na výrobu vačiek, ozubených kolies, pastorkov, čapov, ojníc, kľukových hriadeľov.

Ocele k povrchovému kaleniu sú ocele, ktoré majú menšiu prekaliteľnosť, ale vyššiu pevnosť v ťahu.

Ocele na valivé ložiská tvoria zvláštnu skupinu. Vyznačujú sa vysokou tvrdosťou a pevnosťou v tlaku. Sú to ocele 14 109, 14 209.

[3]

1.3.6 Ocele triedy 15

Sú to nízko legované ocele. Sú veľmi dobre prekaliteľné, vhodné k zušľachtovaniu a majú zvýšenú odolnosť voči korózii.

[3]

1.3.7 Ocele triedy 16

Sú to ocele legované hlavne niklom (až 5%) v kombinácii s chrómom. Patria medzi nízko a stredne legované ocele. ČSN uvádza 22 druhov týchto ocelí.

[3]

1.3.8 Ocele triedy 17

Sú to ocele stredne a vysoko legované. Súčet legovaných prvkov je vyšší než 10%. Používajú sa na súčasti elektrických a energetických zariadení v priemysle potravinárskom, farmaceutickom, chemickom a na chirurgické nástroje.

[3]

1.3.9 Ocele triedy 19

Sú to ocele nástrojové. Požaduje sa u nich vysoká tvrdosť a pevnosť, dostatočná húževnatosť, odolnosť proti opotrebeniu, vhodná prekaliteľnosť a lešiteľnosť. Ocele nástrojové nelegované – 11 druhov. Sú to najmä ručné nástroje na kovové materiály, malé vretenové nástroje, priebojníky, nástroje na spracovanie potravín, dreva, kože a pod.

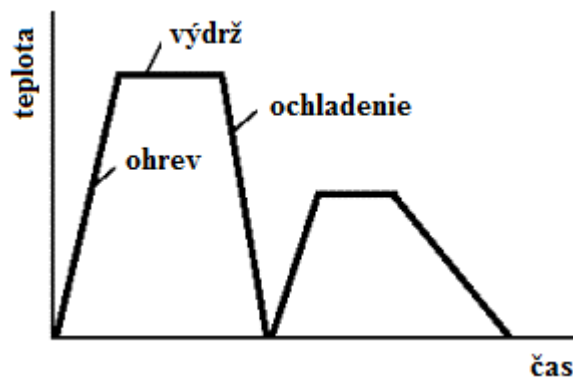
[3]

2 SPÔSOBY TEPELNÉHO SPRACOVANIA MATERIÁLU

Tepelné spracovanie ocelí prevádzame za účelom dosiahnutia vlastností, ktoré mal materiál napríklad pred tvárením za tepla alebo tvárením za studena, kedy v materiálu vznikajú určité napätia a nežiaduce pnutia, ktoré majú zlý vplyv na ďalšie spracovanie alebo pre ich konečné použitie. Tepelným spracovaním sa dá dosiahnuť požadovaných magnetických vlastností u materiálov so zvláštnymi magnetickými vlastnosťami.

Tepelné spracovanie ocelí je vlastne ohrev nad prekryštalizačné teploty alebo pod ne, a rýchlejšie či pomalšie ochladzovanie.

[4]



Obr. 1 Všeobecný cyklus tepelného spracovania [4]

Podľa výšky teploty, na ktorou spracovávaný materiál zahrejeme, a podľa rýchlosti ochladzovania (u chemicko-tepeľného spracovania taktiež za použitia vhodného difúzneho systému kovov alebo nekovov) rozoznávame tieto *spôsoby tepelného spracovania*:

- *žíhanie*
- *kalenie*
- *popúšťanie*
- *chemicky - tepelné spracovanie*
- *tepelne - mechanické spracovanie*

Tepelné spracovanie sa volí podľa požadovaných vlastností materiálu.

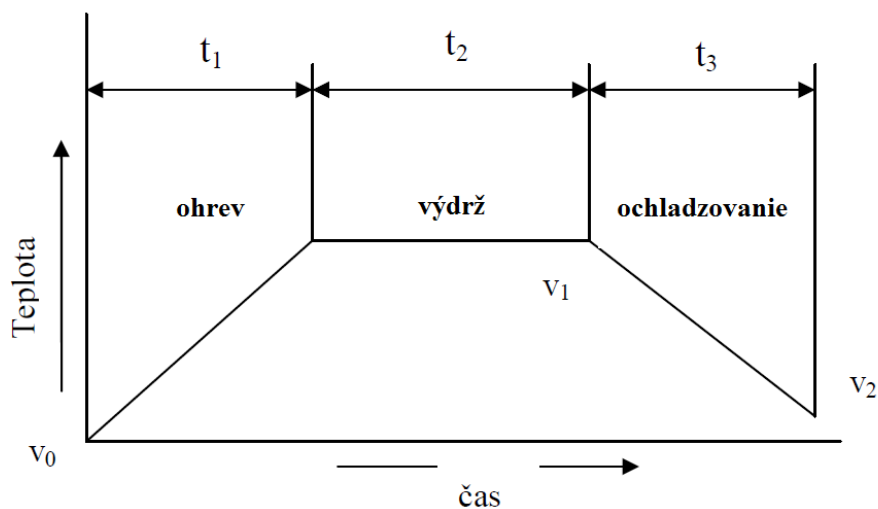
[4]

Tepelné spracovanie					
Žihanie		Kalenie		Popúšťanie	
<i>Bez prekryštalizácie:</i>	<i>S prekryštalizáciou:</i>	<i>Martenzitické:</i>	<i>Bainitické:</i>	<i>Pri nízkych teplotách:</i>	<i>Pri vysokých teplotách:</i>
- ku zníženiu pnútia	- homogenizačné	- do studeného kúpeľa (priame, lomené, prerušované)	- do studeného kúpeľa	- napušťanie	- (anizotermické) zušľachtovanie
- rekryštalizačné	- normalizačné	- do teplého kúpeľa (izotermické)	- do teplého kúpeľa (izotermické)		
- na mätko	- izotermické	- do teplého kúpeľa (termálne)	zušľachtovanie)		
- iné	- kombinované	- so zmrazovaním			
(protivločkové, rozpúšťacie, na odstránenie krehkosti, po morení, ...)		- povrchové			
Chemicko - tepelné spracovanie					
Vytvorenie tvrdých povrchových vrstiev					
Sýtenie povrchu nekovmi:			Sýtenie povrchu kovmi:		
- cementovanie			- difúzne chromovanie		
- nitridovanie			- difúzne hlinikovanie		
- nitrocementovanie			- kremikovanie		
- karbonitridovanie					
Tepelno - mechanické spracovanie					
Využitie účinkov plastickej deformácie a fázovej premeny					
Deformácia pred fázovou premenou:			Deformácia počas izotermickej fázovej premeny:		
- deformácia austenitu pred martenzitickou premenou (nízkoteplotná - NTMZ , vysokoteplotná - VTNZ)			- deformácia počas perlitickej, popr. bainitickej premeny		

Tab. 2 Prehľad hlavných spôsobov tepelného spracovania [5]

2.1 Žihanie

Snaha o dosiahnutie stavu súčasti, ktorý je blízky rovnovážnemu, je to miestny ohrev na teplotu žihania, výdrž na tejto teplote a veľmi pomalé ochladenie. [5]

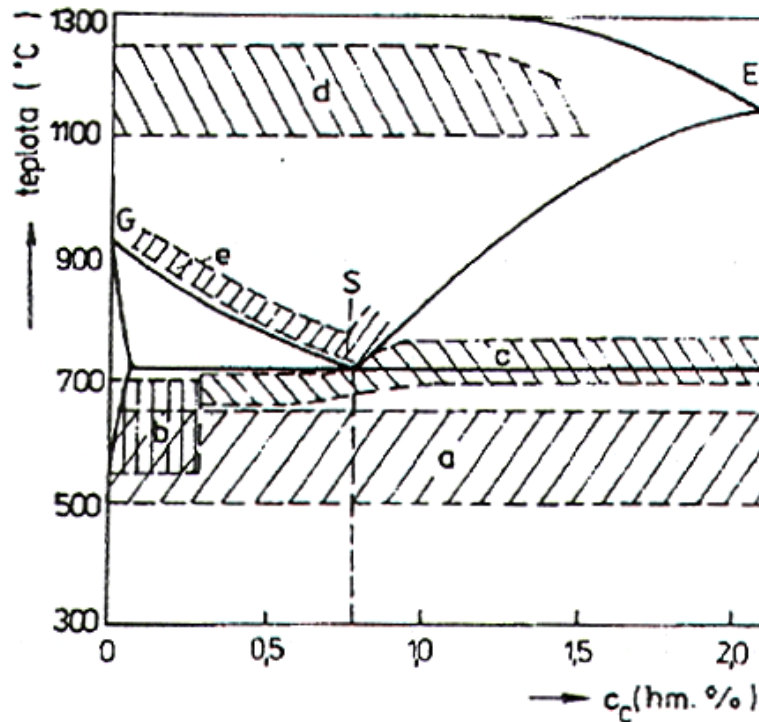


Obr. 2 Priebeh žihania [5]

Žíhanie ďalej delíme:

- *žíhanie bez prekryštalizácie*

- *žíhanie s prekryštalizáciou*



Obr. 3 Znárodnenie oblastí žihacích teplôt v diagramu Fe-Fe₃C (žíhanie: *a* - ku zníženiu pnutia, *b* – rekryštalizačné, *c* - na mätko, *d* - homogenizačné, *e* - normalizačné) [5]

2.1.1 Žíhanie bez prekryštalizácie

Žihacia teplota je pod teplotami (A_1) fázových premien. Nemení sa pri ňom teda typ kryštalizácie mriežky základných fáz zliatiny a počas ohrevu nedochádza teda k fázovým premenám, spôsob rozloženia cementitu a feritu sa však môže zmeniť. [4]

Druhy žíhania bez prekryštalizácie:

a) *žíhanie ku stabilizácii rozmerov* (100 – 150 °C) – použitie pre kalibry a meradla, výdrž na teplote niekoľko týždňov.

b) *rekryštalizačné žíhanie* (550 – 700 °C) – používa sa pri a po tvárení za studena, ohrev na teplotu v oblasti rekryštalizácie, výdrž a ochladenie spravidla pod ochrannou atmosférou.

c) *žihanie ku zníženiu vnútorného pnutia* (500 – 650 °C) – použitie po zváraní, obrábaní, tvárení za tepla, výdrž 1 - 10 hod, pomalé ochladenie v peci na 250 – 300 °C, dochladenie na vzduchu.

d) *žihanie na mäkko* (na A1) – pred obrábaním hlavne nástrojových, ale i konštrukčných ocelí za účelom zníženia tvrdosti – dosiahnutie globulárnej štruktúry.

e) *žihanie k odstráneniu krehkosti po morení*

[4]

2.1.2 Žihanie s prekryštalizáciou

Pri žíhaní s prekryštalizáciou je teplota vyššia ako A_{c1} , a preto dochádza k čiastočnej alebo úplnej prekryštalizácii ferito-cementitickej štruktúry na austenit. Vedľa odstránenia vnútorného pnutia, zníženia tvrdosti a zvýšenia obrobiteľnosti, ide žíhaním odstrániť vplyv primárnej kryštalizácie a upraviť sekundárnu štruktúru.

[4]

Druhy žíhaní s prekryštalizáciou:

a) *normalizačné žihanie* – používa sa ku zrovnomeniu štruktúry po tvárení za tepla a odlievání, ohrev 30 – 50 °C nad A1 A_{cm} , výdrž na teplote do dosiahnutí homogénneho austenitu, ochladenie na vzduchu na teplotu 650 °C a potom dochladenie v peci.

b) *homogenizačné žihanie* – slúži k vyrovnaniu chemického zloženia difúziou, (1000 – 1300), výdrž po dobu niekoľko desiatok hodín, potom normalizačné žihanie (jemnejšia štruktúra).

c) *základné žihanie* – obdoba normalizačného žíhaní – ochladzovanie pomaly v peci; nelegované oceli – 200°C h-1 , legované oceli – 50°C h-1 . Výsledná štruktúra je hrubozrnná.

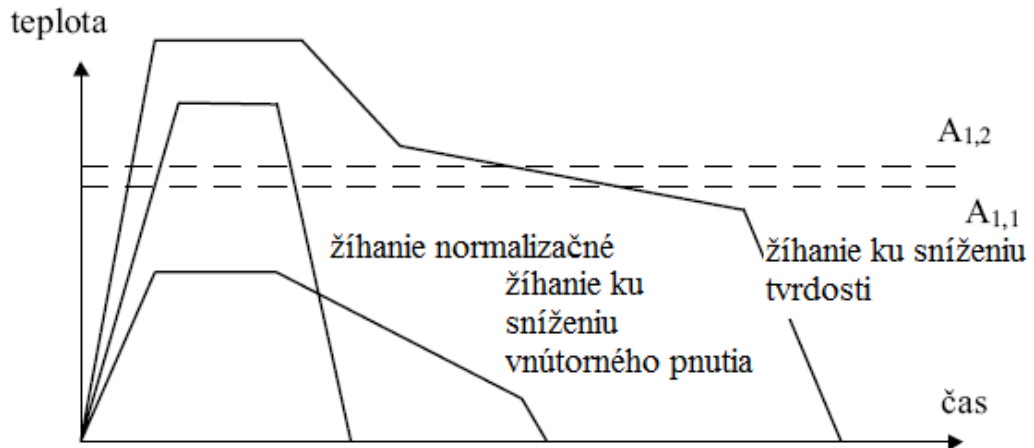
d) *žihanie s čiastočnou austenitizáciou* – ohrev medzi A1 a A_{cm} , výdrž k dosiahnutí heterogénnej zmesi A a F ochladení na vzduchu alebo v peci.

e) *žihanie ku zväčšeniu zrna*

f) žíhanie izotermické

g) žíhanie rozpúšťacie

[4]



Obr. 4 Niektoré druhy žíhania [5]

2.2 Kalenie

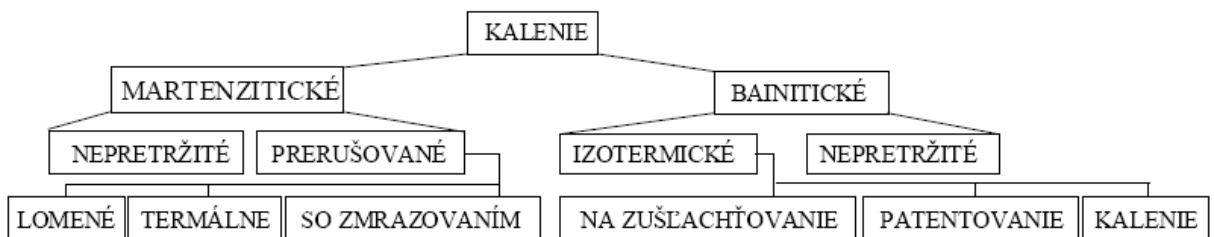
Ohrev na teplotu kalenia 30 – 70 °C nad Ar3 Ar1, výdrž a ochladzovanie tak rýchle, aby v štruktúre nevznikal *F* (*ferit*) a *P* (*perlit*), ale aby výsledná štruktúra bola tvorená iba *M* (*martenzitom*) alebo *B* (*bainitom*). [4]

Je to spôsob tepelného spracovania, ktorého cieľom je dosiahnuť stav odlišný od rovnovážneho. Podľa prevažujúcej štruktúrnej zložky sa kalenie delí na:

- *martenzitické kalenie*

- *bainitické kalenie*

[5]



Obr. 5 Druhy kalenia [5]

Kaliace prostredia:

a) **voda** - veľmi rýchle ochladenie, vytvorí sa parný vankúš, ktorý sa poruší v oblasti martenzitickej premeny. Použitie pre nelegované a nízkolegované oceli.

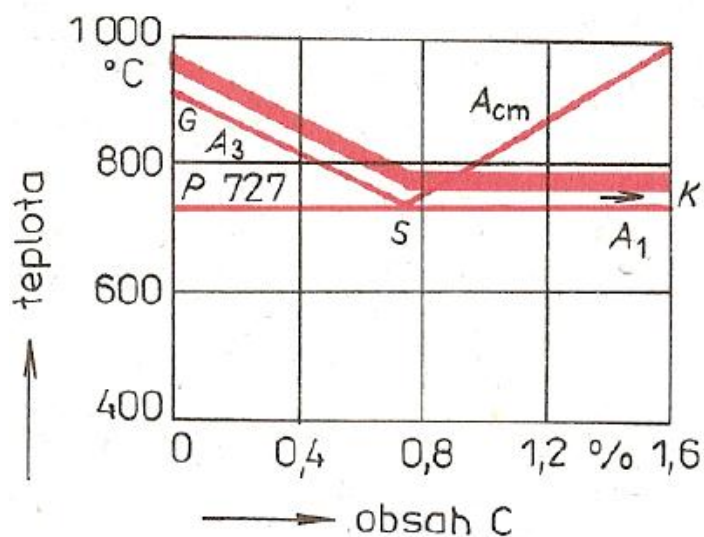
b) **olej** - veľmi rýchle ochladenie, vytvorí sa parný vankúš, ktorý sa poruší pri vhodnejších teplotách. Použitie legované oceli.

c) **sol'ná kúpeľ** – ochladzovanie plynulé spočiatku intenzívnejšie ako u oleja, v oblasti martenzitickej premeny je pomalšie

- **kovová kúpeľ** - obdoba soľnej, používa sa pre olovo

d) **vzduch** – použitie rýchloreznej oceli

[4]



Obr. 6 Oblasti vhodných kaliacich teplôt v diagrame Fe–Fe₃C [4]

Kaliteľnosť – schopnosť materiálu vytvoriť novú štruktúru.

- nekaliteľné oceli (0,2% C)

- dobre kaliteľné oceli (0,35% C)

Prekaliteľnosť – schopnosť oceli dosiahnuť po kalení v určitej hĺbke pod povrchom tvrdosti odpovedajúcej 50% obsahu martenzitu v štruktúre.

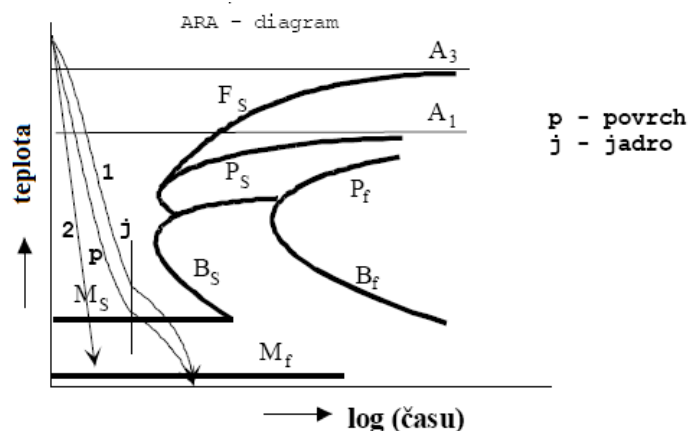
[4]

2.2.1 Martenzitické kalenie

Účelom je získanie vysokej tvrdosti a odolnosti proti opotrebeniu. Pri tomto spôsobe kalenia ochladzujeme dielce tak rýchlo, aby ochladzovacie krivky jeho povrchu i stredu míňali krivky počiatku difúzneho rozpadu austenitu. Kaliace teploty podeutek. ocelí ležia 30 °C až 50 °C nad A_3 , nadeutek. ocelí sa kalia z teplôt 30 °C až 50 °C nad A_1 . Po zakalení tvorí štruktúru podeutek. ocelí martenzit s podielom zostatkového austenitu. U nadeutek. ocelí sa v zakalenej štruktúre vyskytuje martenzit, väčší podiel zostatkového austenitu a nerozpustený sekundárny cementit, ktorý zlepšuje odolnosť materiálu voči opotrebeniu. Pri kalení nadeutek. ocelí z teplôt nad A_{cm} by došlo k rozpusteniu sekundárneho cementitu do austenitu a pretože rastúce množstvo uhlíku rozpusteného v austenitu spôsobuje pokles teploty M_s a M_f , zvýšilo by sa množstvo zostatkového austenitu v štruktúre. [4]

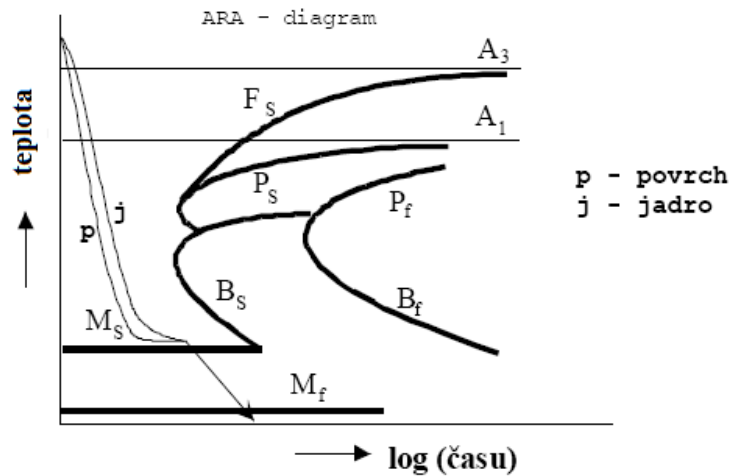
Druhy martenzitického kalenia:

- a) **nepretržité** - ohrev 30 – 70 °C nad A_3 A_1 výdrž a ochladenie vo vode alebo v oleji na teplotu nižšiu ako M_f , nasleduje popúšťanie.
- b) **pretržité**
- c) **lomené** - ochladenie vo dvoch rôznych kaliacich prostrediach (voda a olej alebo olej a vzduch), prvé k potlačeniu bainitickej premeny, druhé pre zmiernenie pnutia (zložitejšie predmety). [4]



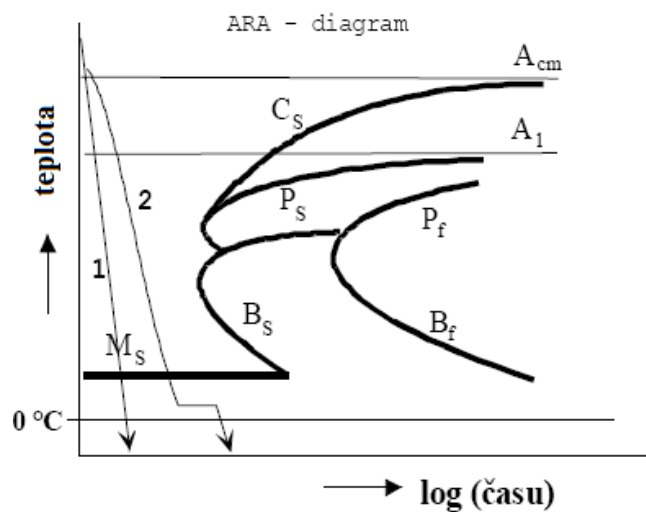
Obr. 7 Lomené kalenie (krivka 1) a spojité martenzitické kalenie (krivka 2) [5]

d) *termálne* - izotermická výdrž na teplote 20 – 30 °C nad M_s , pre zníženie prnutia a odstránenie deformácií a k vyrovnaniu teplôt na povrchu a vo vnútri materiálu, ochladenie a výdrž v soľnom kúpeli a potom voľné dochladenie na vzduchu, použitie pre nelegované a nízkolegované ocele. [4]



Obr. 8 Termálne kalenie [5]

e) *so zmrazovaním* - iba u nadeutektoidných ocelí, kde je M_f pod bodom mrazu, zvyšuje sa rozpad A_z na M , zmrazenie musí prebehnúť hneď po zakalení, inak dôjde k stabilizácii A_z , použitie ku stabilizácii rozmerov, valivých ložísk a meradiel. [4]



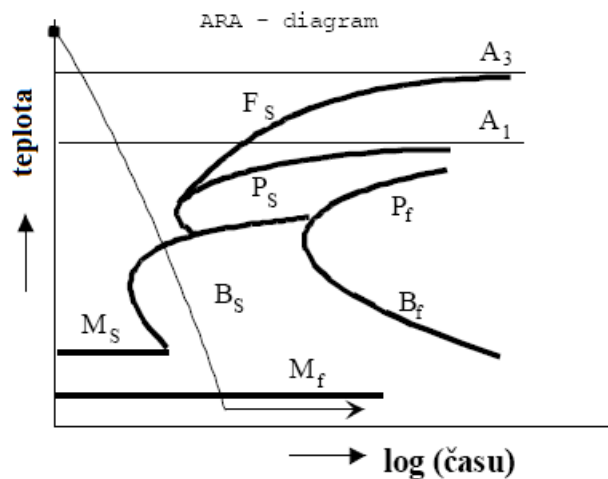
Obr. 9 Kalenie so zmrazovaním [5]

2.2.2 Bainitické kalenie

Pri bainitickom kalení sa transformuje austenit na bainit, buď v priebehu plynulého ochladzovania, t.j. pri poklese teploty alebo izotermicky, t.j. pri konštantnej teplote. [5]

Druhy bainitického kalenia:

a) **nepretržité** – môže prebehnúť iba u ocelí s predsunutou bainitickou oblasťou v diagrame ARA – plynulý rozpad pres celú bainitickú oblasť, A (austenit) sa mení na B (bainit) alebo B a M (martenzit), nasleduje popúšťanie. [4]

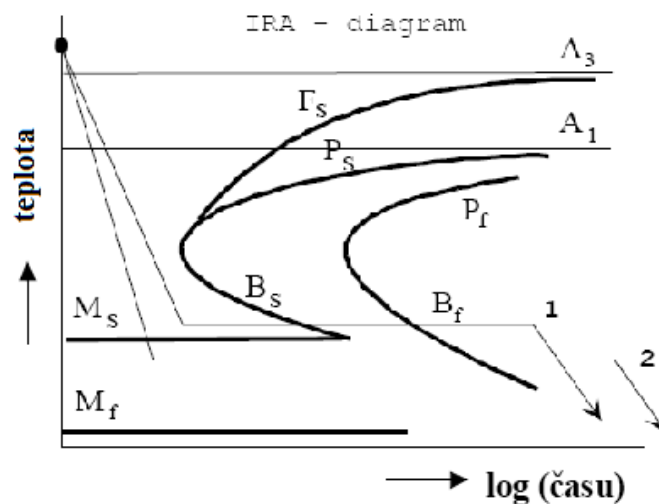


Obr. 10 Nепretržité bainitické kalenie [5]

b) **izotermické**

- **zušľachtovanie** - je ochladenie v soľných alebo kovových kúpeľoch, výdrž na teplote nad M_s pres celú bainitickú oblasť – štruktúra tvorená **B (+Az)** – deformácie malé, nepopúšťa sa, pre nízko legované a legované oceli. [4]

- **kalenie** - je ochladenie v soľných alebo kovových kúpeľoch, výdrž na teplote pod M_s – štruktúra tvorená **B + M (+Az)**, popúšťa sa, dochladenie na vzduchu. [4]



Obr. 11 Izotermické banitické zušľachtovanie (krivka 1) - výsledná štruktúra: B+AZ a izotermické bainitické kalenie (krivka 2) - výsledná štruktúra: B+M+AZ [5]

2.3 Popúšťanie

Následné spracovanie po kalení – ohrev pod A_1 – sa prevádza za účelom zníženia pnutia, krehkosti a čiastočného zníženia tvrdosti. [4]

2.3.1 Popúšťanie za nízkych teplôt (100 až 350 °C)

Pre nástrojové oceli a oceli na zápustky, ku zníženiu citlivosti na nárazy, zmiernenie krehkosti, tvrdosť príliš neklesá, najväčšia tvrdosť je pri ohreve na 100 – 180 °C, zníži sa iba vnútorné pnutie. Popúšťanie môže byť miestne alebo celkové. [4]

2.3.2 Popúšťanie za vysokých teplôt (350 až 700 °C)

Prevádza sa pre získanie vysokých R_m , R_e a odolnosti na nárazy. Kalenie + popúšťanie za vysokých teplôt nazývame zušľachtovanie. Zušľachtovanie pri 400 – 550 °C používame na pružiny, dosahujeme tak vysokých medzí pružnosti. Legovacie prvky spomaľujú pokles tvrdosti pri vysokých teplotách. Pochody pri popúšťaní sú riadené difúziou. [4]

Výsledné struktúry:

- 100 až 180 °C nízkopopustený martenzit

- 200 až 400 °C vysokopopustený martenzit

- 500 °C sorbid (globulárny cementit)

- pod A1 globulárny perlit

[4]

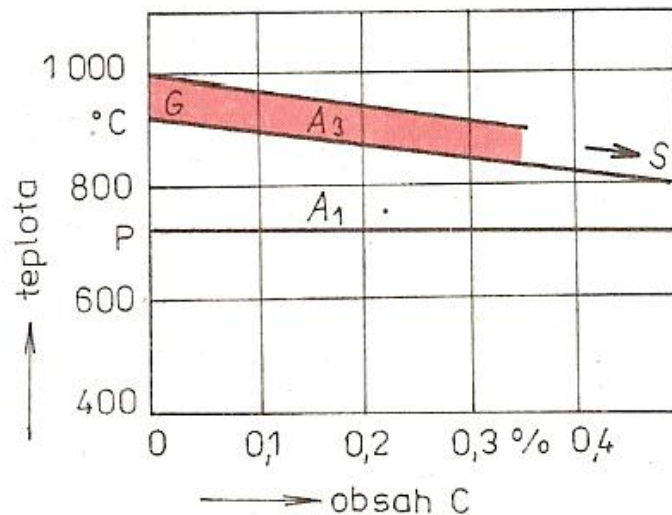
2.4 Chemicky – tepelné spracovanie

Chemicko-tepelným spracovaním rozumieme spôsoby difúzneho sýtenia povrchu oceli rôznymi prvkami (C, N, C+N, B, Si, Al a iné, teda nekovmi i kovmi) s cieľom dosiahnuť rozdielných mechanických alebo fyzikálne chemických vlastností povrchu a jadra súčastí. Spravidla sa jedná o zvýšenie tvrdosti a odolnosti povrchu proti opotrebeniu pri zachovaní húževnatosti jadra. Požadovaných vlastností sa dosahuje buď priamo, teda len obohatením povrchovej vrstvy príslušným prvkom za zvýšených teplôt a pomalým ochladením alebo nasledujúcim tepelným spracovaním, ktorým obvykle býva kalenie a nízkoteplotné popúšťanie. [5]

Za základné dielčie pochody pri chemicko-tepelnom spracovaní sa považuje disociácia, absorpcia a difúzia. Pri dostatočne vysokej teplote a v styku s povrchom oceli uvoľňujú použité prostredia (plynné, kvapalné alebo tuhé) rozkladom (disociáciou) molekúl zlúčenín požadovaný prvok v atomárnom stave (aktívne atómy), ktorý je absorbovaný povrchom oceli a pohybuje sa mriežkou železa difúznym mechanizmom spravidla vo smere koncentračného spádu (vo smeru od povrchu). Intenzita uvedených dielčích pochodov závisí na druhu oceli, chemickom zložení prostredia, druhu prvku, ktorým je jej povrch sýtený, teplotne sýtený atd. [5]

2.4.1 Cementovanie

Je sýtenie povrchu súčasti uhlíkom (C) tak, aby ju bolo možno po ukončení pochodu zakaľiť na vysokú tvrdosť. Jadro pritom zostane húževnaté. [5]



Obr. 12 Časť rovnovážneho diagramu Fe-Fe₃C s vyznačeným pásmom obvyklých cementačných teplôt [4]

Cementovať je možno v prostredí plynnom, kvapalnom i sypkom. [5]

Cementovanie v plynnom prostredí – využíva sa reakcie oxidu uhoľnatého ($2 \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$) alebo rozpadu metánu ($\text{CH}_4 \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{C}$), kde C je rozpustený v austenitu. Po ustanovení rovnováhy v sústave sýtiaca atmosféra – sýtený materiál je po určitej dobe ustanovený rovnovážny stav, ktorý pri konštantnom tlaku závisí iba na teplote. Je zrejmé, že uvedené reakcie môžu prebiehať v smere zľava doprava (sýtenie povrchu uhlíkom) i sprava doľava (odsycovanie povrchu materiálu). Sýtenie povrchu prebieha pri teplote okolo 900°C. Cementovanie v plynnej atmosfére je rýchlejšia než v sypkej hmote, výhodou je taktiež čistý povrch súčasti. [5]

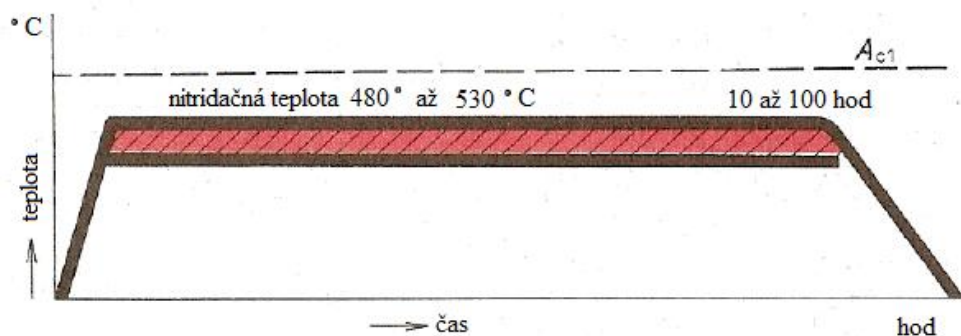
Cementovanie v kvapalnom prostredí – prevádza sa v kyanidových kúpeľoch. Prebieha veľmi rýchlo, povrch je nasýtený rovnomerne. [5]

Cementovanie v sypkom prostredí – prevádza sa v zmesi, kde hlavnými zložkami sú drevené uhlie a uhličitan barnatý BaCO_3 . Dielce sa vložia do krabice, zasypú sa zmesou, veko krabice sa pevne uzavrie a vsadí do pece. Pri ohreve sa z dreveného uhlia uvoľní oxid uhličitý, reaguje na oxid uhoľnatý a ten sa rozpadá na uhlík a ďalší oxid uhličitý. Cementovanie v prášku teda prebieha pres plynnú fázu; prítomnosť BaCO_3 urýchľuje reakciu. [5]

Cementačné teploty sa pohybujú okolo $800\text{ }^\circ\text{C}$ až $950\text{ }^\circ\text{C}$; pri teplotách nad $950\text{ }^\circ\text{C}$ je možné cementovať oceli s prísadou titanu, u ktorých nehrubne ani po dlhých výdržiach na vysokej teplote zrno. Dobu výdrže na teplote je nutné voliť podľa požadovanej hrúbky cementovanej vrstvy. Je možné získať nasýtenú vrstvu o hrúbke do 2 až 3 mm. Pred cementáciou sa diely normalizujú, po nasýtení povrchu je dielec vždy zakalený. [5]

2.4.2 Nitridovanie

Sýtenie povrchu súčasti dusíkom v plynnom alebo kvapalnom prostredí. Povrchová vrstva obsahuje vysoko disperzné tvrdé nitrídy vhodných prvkov – najčastejšie sa používa kombinácia Al, V, Cr; nitríd hliníku je vo forme veľmi jemných častíc rozptýlený vo ferite, takže nitrídované ocele s hliníkom majú najvyššiu tvrdosť. Tvrdosť povrchu po nitrídaní je vyššia než po cementácii alebo povrchovom kalení. Deformácie súčasti sú minimálne, pretože nitrídačné teploty sú relatívne nízke – pohybujú sa okolo $550\text{ }^\circ\text{C}$. Hrúbka nasýtenej vrstvy je menšia ako po cementovaní; rádovo sa pohybuje v desatinách milimetra. Pred nitrídaním sa dielce zušľachtujú, obrábajú na konečný rozmer. Po nitrídácii sa už súčasť tepelne nespracováva, poprípade iba leští. [5]



Obr. 13 Priebeh času a teplôt pri nitrídaní [4]

Nitridovacie prostredia :

- *plynné* : zdrojom dusíku je čpavok (amoniak)

- *kvapalné (kúpele)* : tvorí ju zmes kyanidu sodného a kyanatanu draselného [4]

2.4.3 Nitrocementovanie

Sa prevádza najčastejšie pri teplotách 820 °C až 840 °C (okolí teploty A_3) v atmosfére tvorenej zmesou uhl'ovodíkov a čpavku (amoniaku). Hĺbka vrstvy býva zvyčajne 0,3 až 0,4 mm a získa sa za 1 až 2 hod. V kvapalných kúpeľoch (sol'né kúpele s prísadou kyanidov) sa dá použiť d'ob kratších (asi do 1 h) a hĺbka vrstvy býva do 0,2 mm. Pre tento postup sa niekedy používa názvu kyanovanie. Oceli k nitrocementovaniu majú obsah uhlíku zvyčajne v rozmedzí 0,25 až 0,40 hm. % a po nitrocementovaniu sa kalia a popúšťajú (180 °C / 1 až 2 hod.). Štruktúra vrstvy po tepelnom spracovaní je tvorená uhlíko - dusíkovým martenzi-
tom, zostatkovým austenitom a karbonitridami. Tvrdosť vrstvy (700 až 800 HV) je nižšia než po cementovaní, doba sýtenia povrchu je však podstatne kratšia (dusík urýchľuje difú-
ziu uhlíku v dôsledku ich kladnej interakcie). Menšia tvrdosť vrstvy je však „kompenzova-
ná“ vyššou pevnosťou jadra v dôsledku vyššieho obsahu uhlíku v oceli. Pre rovnakú únos-
nosť potom stačí i menšia hrúbka nitrocementovanej vrstvy. [5]

2.4.4 Karbonitridovanie

Sa uskutočňuje najčastejšie v atmosférach tvorených zmesou čpavku (amoniaku) s prídav-
kom uhl'ovodíkov pri teplotách 600 °C až 630 °C (pod A_1) po dobu až 4 hod. Cieľom toh-
to postupu je vytvorenie súvislej povrchovej vrstvy karbonitridov o hrúbke približne 0,05
mm s tvrdosťou až 1000 HV, ktorá je odolná voči zadieraniu a niektorým mechanizmom
opotrebenia. Vrstva karbonitridov sa taktiež využíva pre zvýšenie odolnosti proti opotrebe-
niu a zadieraniu u rezných nástrojov, lisovadiel, nástrojov pre pretlačovanie, a i. Karbonit-
ridované súčasti sa nekalia, deformácie súčastí sú teda menšie ako po nitrocementovaní.

[5]

2.4.5 Sulfonitridovanie a sulfonizovanie

Ide o postupy, pri ktorých sa vytvárajú vrstvy sulfidov, karbonitridov a oxidov o hrúbke 10^{-3} až 10^{-2} mm s veľmi dobrými trecími vlastnosťami a odolnosti proti zadieraniu. [5]

2.4.6 Difúzne chrómovanie

Sýtenie povrchu chrómom, pričom vznikajú vrstvy hrúbky 0,1 až 0,2 mm s vysokou tvrdosťou, odolné voči opotrebeniu a s dobrou odolnosťou proti korózii a opalu. [5]

2.4.7 Boridovanie

Sýtenie povrchu bórom. Teploty 900 °C až 1050 °C. Pre zvýšenie trvanlivosti nástrojov. Potom už nekalíme. [4]

2.4.8 Difúzne hliníkovanie

Získavame vrstvy žiaruvzdorné a koróziivzdorné. Patria sem operácie: alitovanie, alume-tovanie, kremíkovanie. [5]

2.5 Tepelne – mechanické spracovanie

Vlastnosti ocelí je možné zlepšiť kombinovaným účinkom tvárenia a tepelného spracovania - tepelne mechanickým spracovaním. Tvárením austenitu môže dojsť k podstatnému zjemneniu jeho zrna, teda i produkty jeho nasledujúcich premien (martenzit, ferit, perlit) budú jemnejšie. Ďalším dôsledkom tvárenia je zvýšená hustota dislokácií v austenitu, ktoré prechádzajú do produktov premeny austenitu, popr. modifikujú aj kinetiku a mechanizmus jeho premien. [5]

Medzi najznámejšie postupy tepelne – mechanického spracovania patria tieto technologické varianty :

- ⇒ nízkoteplotné tepelne - mechanické spracovanie - NTMS,
- ⇒ vysokoteplotné tepelne - mechanické spracovanie - VTMS,
- ⇒ izoforming,
- ⇒ riadené valcovanie a ochladzovanie,
- ⇒ zerolling vedúci k transformačne indukovanej plasticite - tzv. TRIP efekt.

[5]

2.5.1 Nízkoteplotné tepelne – mechanické spracovanie

Spočíva v austenitizácii nad teplotu A_{c1} , v prudkom ochladení do oblasti metastabilného austenitu (asi 500 až 600 °C), kde sa oceľ plasticky deformuje spravidla kovaním alebo valcovaním (deformácie až 50 %), a potom nasleduje kalenie.

Nízkoteplotné tepelne - mechanické spracovanie ide použiť u ocelí so širokou oblasťou metastabilného austenitu (teda u ocelí legovaných), je však technologicky náročné zaistiť prudké ochladenie na tváriacu teplotu a udržať podmienky tvárnenia tak, aby nedošlo k perlitickej či bainitickej premene. Technologické problémy so sebou nesú i vysoký pretvárnny odpor spojený s nízkou tváriacou teplotou. [5]

2.5.2 Vysokoteplotné tepelne – mechanické spracovanie

Oceľ sa tvárni nad teplotou A_{c3} , teda v oblasti stabilného austenitu, pričom stupeň deformácie sa pohybuje v rozmedzí 40 až 90 %. Po tvárnení (spravidla valcovaní) nasleduje kalenie. Vysokoteplotné tepelne - mechanické spracovanie sa dá použiť i u uhlíkových ocelí s tým, že limitujúcim faktorom pre zlepšenie vlastností ocelí je proces rekryštalizácie. Úplná rekryštalizácia je nežiadúca, pretože by došlo ku strate deformačného spevnenia.

Polotovary alebo súčasti po VTMS a NTMS sa spravidla popúšťajú pri teplotách 200 °C až 300 °C a výsledná štruktúra je tvorená veľmi jemným popusteným martenzitom. [5]

2.5.3 Izoforming

Kombinácia izotermickej perlitickej premeny a deformácie, pričom deformácia sa môže uskutočniť pred alebo v priebehu uvedenej premeny. Izoforming vedie ku zjemneniu a k čiastočnej sferoidizácii perlitu, jeho mechanické vlastnosti sú lepšie než u perlitu získaného izotermickým žíhaním. [5]

2.5.4 Riadené valcovanie a ochladzovanie

Varianta TMS, ktorá sa používa hlavne pri valcovaní mikrolegovaných zvariteľných ocelí. Valcovacou i dovalcovacou teplotou a veľkosťou úberu ide riadiť procesy dynamickej a statickej rekryštalizácie austenitu. Vhodne zvolenou rýchlosťou ochladzovania austenitu z dovalcovacej teploty ide ovplyvniť transformáciu jemnozrnného austenitu (čiastočne alebo úplne rekryštalizovaného) na tzv. cirkulárny (ihlicovitý) ferit alebo na ferit a perlit s výhodnou kombináciou pevnosti a ostatných mechanických vlastností. Teplotou zvinovania ide ovládať i úroveň precipitačného spevnenia plechov z mikrolegovaných ocelí. [5]

2.5.5 Zerolling

Uplatňuje sa u vysoko legovaných ocelí so štruktúrou metastabilného austenitu, ktorého teplota M_s leží v oblasti záporných teplôt. Plastická deformácia austenitu zjednodušuje vznik zárodkov martenzitu, čo sa prejavuje zvýšením teploty počiatku martenzitickej premeny na teplotu M_d . V intervale teplôt $M_d - M_s$ ($M_d > M_s$) sa plastická deformácia využíva k premene austenitu na martenzit. Táto premena vedie ku zvýšeniu hodnôt medze klzu pri malej strate húževnatosti a ku značnému zvýšeniu plasticity (transformačne indukovaná plasticita - TRIP). Tento efekt súvisí s potlačením lokalizácie plastickej deformácie (napr. tvorby tzv. krčku pri ťahovej skúške) v dôsledku transformačného spevnenia [5]

Zvýšenie pevnostných charakteristík konštrukčných ocelí ide dosiahnuť i opakovaným rýchlym ohrevom a kalením, ktoré je označované ako reaustenitizácia. Reaustenitizácia vyžaduje rýchly, spravidla indukčný alebo odporový ohrev, a ide ju aplikovať len u malých súčastiach jednoduchých tvarov. Pri tomto spracovaní sa dosiahne výrazného zjemnenia martenzitickej štruktúry s priaznivou disperziou karbidov nerozpustených behom austenitizácie. [5]

3 TVRDOSTĚ

Tvrdość sa dá definovať ako odolnosť materiálu (povrchu materiálu v meranej lokalite) proti miestnej deformácii vyvolanej konkrétnym zaťažovacím telesom (vnikajúcim telesom - indentorom) presného geometrického tvaru pôsobením presne definovaného zaťaženia. Mierou tvrdosti je konkrétna veľkosť trvalej plastickej deformácie.

Tvrdość však nie je žiadnou fyzikálne definovateľnou vlastnosťou, ale je výslednicou celej rady vlastností hmoty, a to najmä vlastnosťou povrchu. [6]

Skúšky tvrdosti patria medzi najstaršie a najrozšírenejšie skúšky kovov a iných technických materiálov (jedná sa prakticky o skúšky nedeštruktívne, pretože funkčné a vzhľadové porušenie skúšaných dielov je väčšinou bezvýznamné). [7]

Z tvrdosti často usudzujeme aj na niektoré ďalšie vlastnosti materiálu (pevnosť v ťahu, obrábiteľnosť a pod.). Skúšky sa prevádzajú na skúšobných vzorkách, alebo priamo na hotových výrobkoch. [7]

Skúšky tvrdosti ide deliť podľa rôznych hľadísk:

- **podľa princípu rozoznávame skúšky:** vrypové, vnikacie, nárazové a odrazové
- **podľa rýchlosti pôsobenia zaťažujúcej sily:** statické a dynamické
 - statické: Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell, IR HD a Shore A, D
 - dynamické: Poldi kladivko, Baumannovo kladivko, Durosokop, Shoreho skleroskop
- **podľa spôsobu zaťažovania a typu deformácie:** staticko – plastické, dynamicko - plastické a dynamicko - elastické
- **ďalej rozoznávame skúšky:** makro i mikrotvrdości [6]

3.1 Skúška tvrdosti podľa Brinella

Tvrdość podľa Brinella (ČSN 42 0371) zisťujeme vtlačovaním ocelevej kalenej guľôčky o priemeru $D = 10; 5; 2.5; 2$ a 1 mm rovnomerne stupňovanou silou F ($F = 300 D^2; 100 D^2; 50 D^2$ a $25 D^2$ N) po dobu t ($t = 10; 30; 120; 180$ s) do lesklej rovnej plochy skúšobného vzorku alebo skúšanej súčasti. Skúša sa na Brinellovom tvrdomere. Guľôčka vytvorí na

skúšobnom vzorku guľovitý odtlačok. Tvrdosť určujeme podľa priemeru odtlačku, ktorý meriame dvakrát (kolmo na seba), aby sme vylúčili chyby vzniknuté nepresnosťou odtlačku. Pre praktickú potrebu sú zostavené tabuľky, v ktorých podľa priemeru odtlačku d a veľkosti použitej sily F nájdeme priamo odpovedajúcu tvrdosť a pevnosť.

[8]

Skladá sa zo značky tvrdosti **HB** a k nej pripojených údajov podmienok skúšky, t.j. priemeru guľôčky D , sily F a doby zaťaženia t . Tieto údaje sú od seba oddelené šikmou zlomkovou čiarou (napríklad HB 5/7500/30 = 320)

[8]

Vyjadrenie tvrdosti je definované vzájomným pomerom zaťaženia ku ploche guľovitého odtlačku a stanoví sa zo vzťahu:

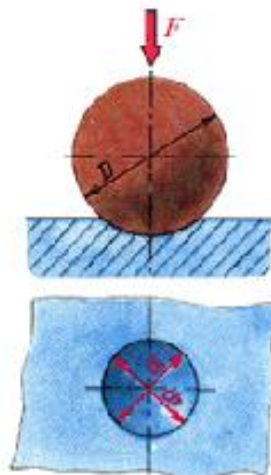
$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} \quad , \quad HB = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

prípadne

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

Kde: F – záťažová sila (N), A – plocha odtlačku (mm^2), d – priemer odtlačku (mm).

[9]



Obr. 14 Podstata skúšky tvrdosti podľa Brinella [8]

3.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Tvrdosť podľa Vickersa (ČSN 42 0374) sa skúša na Vickersovom tvrdomere. Podstatou tejto skúšky je vnikanie štvorbokého ihlanu o vrcholovom uhle 136° do povrchu skúšaného materiálu. Do materiálu vtlačujeme diamantový ihlan so štvorcovou základňou a okuliarkom mikroskopu alebo projekciou zisťujeme strednú dĺžku u oboch uhlopriečok (obr. 15). Skúšobná zaťažujúca sila býva od 10 do 1000 N. Doba zaťaženia sa volí od 10 do 180 s. Použité zaťaženie píšeme do označenia, napríklad HV 100 (HV 100 = 215).

Pre bežne skúšobné zaťaženie 300 N používame označenie HV (napr. HV 250).

Pre praktickú potrebu používame tabuľky, v ktorých podľa dĺžky uhlopriečky u a použitej sily F nájdeme priamo odpovedajúcu tvrdosť. Túto metódu môžeme použiť pre všetky tvrdosti. Je veľmi presná a nie je temer závislá na zaťažení. [8]

Tvrdosť je vyjadrená ako pomer zaťažujúcej sily telieska F k ploche odtlačku a je daná:

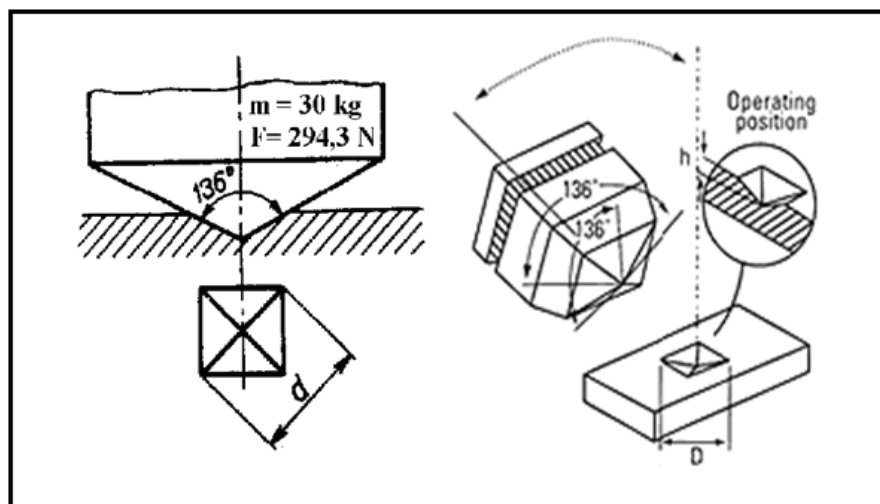
$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}, \quad HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

prípadne

Kde: F – záťažová sila (N), d – aritmetický priemer dĺžky uhlopriečok odtlačku (mm).

[9]



Obr. 15 Podstata skúšky tvrdosti podľa Vickersa [10]

3.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella

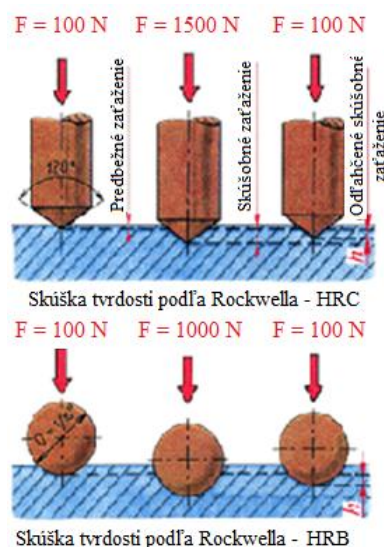
Tvrdosť podľa Rockwella (ČSN 42 0373) zisťujeme na Rockwellovom tvrdomere ako rozdiel hĺbky odtlačku oceľovej guľôčky alebo diamantového kužela medzi dvoma stupňami zaťaženia (predbežného a celkového, obr. 16). Účelom predbežného zaťaženia je vylúčiť z meranej hĺbky nepresnosti povrchových plôch. [8]

Pri tejto skúške je vnikajúcim telesom diamantový kužel s vrcholovým uhlom 120° a zaoblením hrotu 0,2 mm, alebo kalená oceľ. guľôčka o priemere $1/16''$ ($= 1,5875$ mm). [9] Meria sa hĺbka odtlačku dosiahnutého za definovaných podmienok vtlačovaním vnikajúceho telesa a pri vylúčení vplyvu povrchu skúšaného telesa a jeho odpruženia. Vnikajúce teleso sa najskôr zaťaží predbežným zaťažením F_0 . Stupnica hĺbkomeru sa nastaví v zaťaženom stave do počiatkovej polohy. Potom začne pôsobiť prídavné zaťaženie F_1 (celkové zaťaženie $F = F_0 + F_1$). Po odľahčení na zaťaženie F_0 sa na hĺbkomere odčíta priamo tvrdosť na príslušnej stupnici. Tvrdosť je potom určená zo vzťahov pre rôzne prevedenia skúšky: [10]

$$HRA, HRC, HRD = 100 - \frac{h}{0,002} \quad , \quad HRN, HRT = 100 - \frac{h}{0,001}$$

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 130 - \frac{h}{0,002}$$

Kde h – trvalá hĺbka odtlačku pod predbežným zaťažením po odstránení prídavného zaťaženia (mm).



Obr. 16 Podstata skúšky tvrdosti podľa Rockwella [8]

4 MIKROTVRDOŠŤ

MikrotvrdošŤ je predovšetkým určovaná pre tenké vrstvy, definícia je rovnaká ako u „klasickej“ tvrdošti, ale hlavný rozdiel je vo voľbe veľkosti maximálneho zaťaženia. Maximálna záťaž pri meraní mikrotvrdošti sa pohybuje v rozsahu od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N). Zatiaľ, čo bežné skúšky (makro)tvrdošti podľa Vickersa sú prevádzané pri zaťaženiach medzi 10 a 1200 N. [6]

Dôvodom použitia tak nízkych záťažových síl spočíva v nutnosti merania tvrdošti samotnej vrstvy bez vplyvu materiálu, na ktorom je vrstva nanosená. Pretože pri meraní mikrotvrdošti klesá aplikovaná sila, znižuje sa i veľkosť odtlačku a tým klesá i presnosť merania. [6]

Keďže odtlačky pri skúšaní mikrotvrdošti sú malé, je použitie tejto metódy vhodné pre :

- malé alebo tenké súčiastky;
- meranie tvrdošti malých, vybraných oblastí skúšaného vzorku;
- meranie mikrotvrdošti štruktúrnych zložiek a fáz;
- hodnotenie vrstiev po chemicko-tepelnom spracovaní;
- meranie tvrdošti veľmi tenkých kovových a iných anorganických povlakov;
- hodnotenie zvarových spojov;
- pre hodnotenie oduhlčujúcich procesov;
- štúdium difúzných pochodov;
- meranie krehkých materiálov;
- atď. [6]

Oblasť praktického použitia skúšok mikrotvrdošti je veľmi široká. Napríklad pri zisťovaní tvrdošti v brite nástroja, alebo veľmi blízko hrany, zisťovanie tvrdošti jemných drôtov, najjemnejších plechov, povrchových tvrdých vrstiev, pokovovaných predmetov, ochranných náterov atď. [6]

4.1 Skúška mikrotvrlosti podľa Vickersa

Skúška tvrdosti podľa Vickersa je predpísaná európskou normou ČSN EN ISO 6507-1, a to pre tri rozdielne oblasti skúšobného zaťaženia (viz. tab. 3)

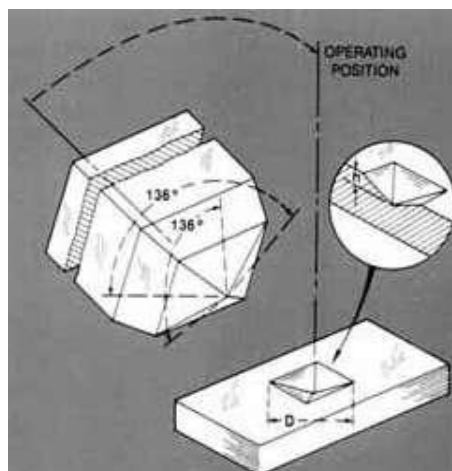
Oblasť skúšobného zaťaženia, F (N)	Symbol tvrdosti	Predchádzajúce zaťaženie (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Skúška tvrdosti podľa Vickersa
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Skúška tvrdosti podľa Vickersa pri nízkom zaťažení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Skúška mikrotvrlosti podľa Vickersa

Tab. 3 Tvrdosť podľa Vickersa - oblasti skúšob. zaťaženia pre kovové materiály [6]

Podstatou skúšky je vnikanie diamantového telesa v tvare pravidelného štvorbokého ihlanu so štvorcovou základňou a daným vrcholovým uhlom (136°) medzi protiľahlými stenami. Teleso je vtláčované do povrchu skúšaného vzorku a následne je meraná uhlopriečka odtlačku, ktorá zostane po odľahčení skúšobného telesa. [6]

Mikrotvrdosť podľa Vickersa je následne vyjadrená ako pomer skúšobného zaťaženia k ploche odtlačku, ktorý sa uvažuje ako pravidelný štvorboký ihlan so štvorcovou základňou a s vrcholovým uhlom rovnajúcim sa uhlu vnikajúceho telesa (136°) :

$$HV = \frac{0,102.2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad , \quad HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad [6]$$



Obr. 17 Podstata skúšky mikrotvrlosti podľa Vickersa [6]

Skúška tvrdosti		Skúška tvrdosti pri nízkom zaťažení		Skúška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Tab. 4 Skúšobné zaťaženie pre skúšku tvrdosti podľa Vickersa [6]

4.2 Skúška mikrotvrdosti podľa Knoop

Skúška tvrdosti podľa Knoop pre kovové materiály je predpísaná medzinárodnou normou ČSN ISO 4545, a zahŕňa skúšobné zaťaženie do 9,807 N. [6]

Skúška tvrdosti podľa Knoop je určená pre meranie veľmi tenkých (napr. nitrídaných) vrstiev, pretože u tejto metódy je pomer dĺžky uhlopriečky k hĺbke odtlačku je 30 (u metódy Vickers je 7).

Metóda je založená na vtlačovaní diamantového vnikacieho telesa vo tvaru štvorbokého ihlanu s vrcholovými uhlami 172,5° a 130° do skúšobného materiálu definovanou silou. Odtlačok má tvar pretiahnutého kosoštvorca a na rozdiel od metódy Vickers sa meria iba dlhšia uhlopriečka. [7]

Diamantové vnikajúce teleso v tvare ihlanu s kosoštvorcovou základňou s predpísanými uhlami protiľahlých strán je vtlačované do povrchu skúšaného telesa. Následne je meraná dlhšia uhlopriečka odtlačku, ktorá zostane po odľahčení skúšobného zaťaženia F .

[6]

Tvrdosť podľa Knoop je následne vyjadrená ako pomer skúšobného zaťaženia k ploche odtlačku, ktorý sa uvažuje ako ihlan s kosoštvorcovou základňou a s vrcholovými uhlami rovnajúce sa uhlom vnikajúceho telesa:

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{l^2 \cdot c} = 0,102 \cdot \frac{F}{0,07028 \cdot l^2} = 1,451 \cdot \frac{F}{l^2}$$

Kde: l - dĺžka uhlopriečky [mm], F - skúšobné zaťaženie [N], konštanta - $\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$, konštanta vnikajúceho telesa - $c = \frac{\tan \beta/2}{2 \cdot \tan \alpha/2} = 0,07028$.

[6]

Tvrdosť podľa Knoop sa označuje symbolom HK , za ktorým nasleduje číslica charakterizujúca veľkosť skúšobného zaťaženia a doba pôsobenia skúšobného zaťaženia v sekundách, ak sa líši od predpísanej doby (10-15 s).

Pr.1 : 640 HV 0,1 = tvrdosť podľa Knoop 640 stanovená pri skúšobnom zažení 0,9807 N pôsobiacom po dobu od 10 do 15 s.

Pr.2: 640 HV 0,1/20 = tvrdosť podľa Knoop 640 stanovená pri skúšobnom zažení 0,9807 N pôsobiacom po dobu 20 s.

[6]

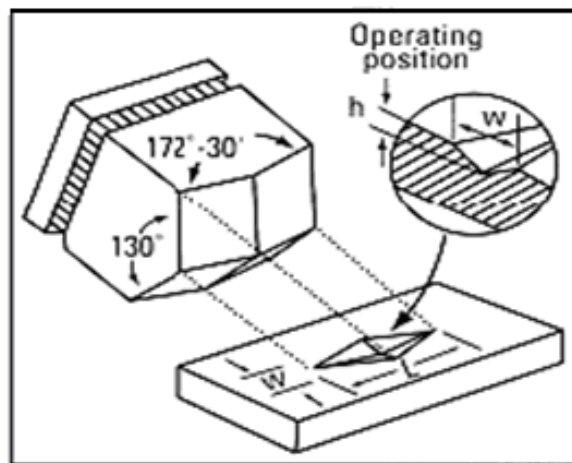
Skúška tvrdosti podľa Knoop	
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

Tab. 5 Skúšobné zaťaženie pre skúšku tvrdosti podľa Knoop [6]

Rovnako ako pri meraní tvrdosti podľa Vickersa musí byť umožnené presné meranie dĺžky uhlopriečky odtlačku. Hodnotená skúšobná vzorka musí mať hladký a rovný povrch, bez mazadiel a cudzích teliesok. Hodnotená vzorka sa teda pripravuje ako metalografický výbrus, tzn. nesmie dôjsť k deformačnému, alebo tepelnému ovplyvneniu povrchu. Bežne sa

príprava prevádza brúsením za mokra a leštením na diamantových pastách, prípadne elektroleštením. Presná metodika prípravy vzorku sa volí podľa príslušného materiálu. Skúšobné teleso musí byť uložené na tuhej podložke tak, aby sa behom skúšky nepohlo. Vnikajúce teleso sa zatlačuje do skúšobného telesa skúšobným zaťažením smerujúcim kolmo k jeho povrchu. Doba od začiatku zaťažovania až do jeho plnej hodnoty nesmie prekročiť 10 sekúnd. Rýchlosť približovania vnikajúceho telesa musí byť v rozmedzí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 $\mu\text{m/s}$. Doba plného skúšobného zaťaženia musí byť v rozmedzí 10 až 15 sekúnd.

[6]



Obr. 18 Podstata skúšky mikrotvrlosti podľa Knoopa [6]

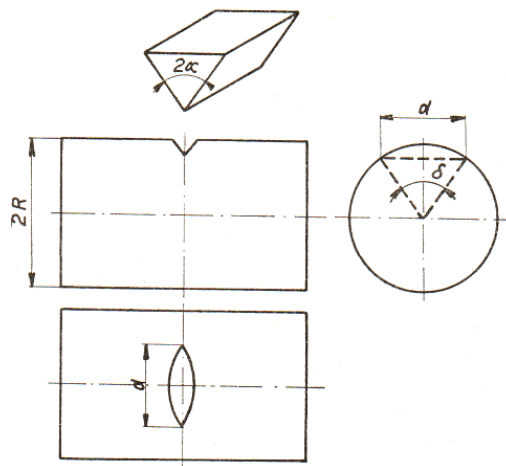
4.3 Skúška mikrotvrlosti podľa Chruščova a Berkoviča

Metóda Chruščova a Berkoviča je založená na podobnom princípe ako metóda Vickersova. Skúšobné teliesko je vtlačované na rozdiel od tejto metódy tvaru trojbokého ihlanu o uhle 65° medzi bočnými stenami a výškou. Hodnota mikrotvrlosti sa stanovuje zo vzorca: $H_{Ch} = \frac{1570 \cdot F}{l^2}$ kde F značí zaťaženie na ihlan v kilogramoch, l výšku zmeranú na trojuholníkovom odtlačku v μ . Výhodou tejto metódy možno vidieť v tom, že výroba odtlačného telesa uvedeného tvaru z diamantu je jednoduchšia, než je tomu u Vickersovho ihlanu a preto i presnosť vypracovania je tu väčšia. Rovnako pri prevádzkovom namáhaní je tento tvar kryštálu menej citlivý na nárazy a neopatrné zaobchádzanie.

[11]

4.4 Skúška mikrotvrlosti podľa Meincka a Attingera

Táto metóda je vhodná pre zisťovanie tvrdosti na jemných valcových predmetoch. Vtlačované skúšobné teleso má tvar klina s vrcholovým uhlom 2α a je vybrúsené z diamantu. Vtlačovanie sa prevádza tak, aby hrana klina bola kolmá k povrchovému vláknu predmetu. Tvar vzniknutého odtlačku je zobrazený na nasledujúcom obrázku na predmete o polomere R je dĺžka tohto odtlačku rovná d . [11]



Obr. 19 Podstata skúšky mikrotvrlosti podľa Meincka a Attingera [11]

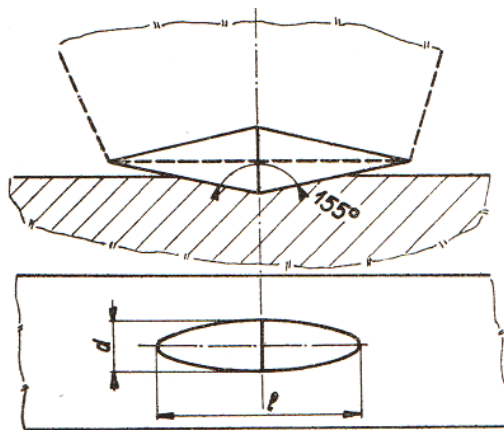
Tvrdosť podľa Attingera je pomer záťažovej sily F k ploche odtlačku A za tých okolností, kedy $d=1/2 R$. Pretože je náročné previesť prakticky odtlačok s touto veľkosťou d , je nutné túto hodnotu získať extrapoláciou z vynesenej závislosti „ $F - d^6$ “, získanej z niekoľkých odtlačkov. Táto závislosť má v logaritmickej tvare priamkový charakter. Za týchto okolností sa plocha odtlačku približne vypočíta z dĺžky odtlačku d a polomeru skúšobného predmetu R :
$$A = \frac{d^3}{6 \cdot R \cdot \cos \alpha}$$

Ak je vrcholový uhol klina $2\alpha=100^\circ$, tak pri $d=1/2 \cdot R$ je povrch odtlačku $A=0,033R^2$ a tvrdosť podľa Attingera:
$$H_A = \frac{F}{0,033 \cdot R^2} \left[\frac{kg}{mm^2} \right]$$
 [11]

4.5 Skúška mikrotvrlosti na dvojkuželi

V poslednej dobe sa dostáva do popredia metóda stanovenia mikrotvrlosti pomocou dvojkužela (Grodzinski). Skúšobné teleso má tvar dvojitého kužela, spojeného základňou a

vtlačuje sa do skúšobného materiálu kolmo na smer osi súmernosti (na ležato). Týmto vznikajú odtlačky podobné odtlačkom Knoopovho ihlanu. Plášte oboch kužeľov na základni zvierajú uhol 155° , takže vzniknutý odtlačok má pomer dĺžky k šírke 22:1 a pomer dĺžky k hĺbke odtlačku asi 80:1. Tento tvar skúšobného telesa dovoľuje skúšky tvrdosti na veľmi tvrdých materiáloch, ako sú karbidy bóru, kremíka a pod. [11]



Obr. 20 Podstata skúšky mikrotvrdosti pomocou dvojkužeľa [11]

4.6 Skúška mikrotvrdosti podľa Hanemanna

Skúšobné zaťaženie pre skúšku mikrotvrdosti podľa Vickersa na mikrotvrdomere podľa Hanemanna uvádza tab. 6. V porovnaní s normovanou metódou možno merať na tomto type mikrotvrdomeru veľmi nízke hodnoty (HV 0,005), ale chýba tu možnosť merať mikrotvrdosť HV 0,015 a HV 0,025. [6]

Skúška mikrotvrdosti		
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Hmotnosť závažia [g] = zaťaženie [p]
HV 0,005	0,04903	5
HV 0,01	0,09807	10
HV 0,02	0,1961	20
HV 0,05	0,4903	50
HV 0,1	0,9807	100

Tab. 6 Skúšobné zaťaženie podľa Hanemanna [6]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

5 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom tejto diplomovej práce je riešiť problematiku mikrotvrdosti kovov, kde hlavným bodom nášho skúmania je vplyv tepelného spracovania ocelí na mikrotvrdosť zadaných materiálov. Niektoré vzorky boli tepelne, iné chemicky – tepelne spracované a jedna vzorka zostala tepelne nespracovaná. Mikrotvrdosť zadaných materiálov zisťujem pomocou metódy Vickersa.

Samotné meranie mikrotvrdosti bude prebiehať na piatich zadaných oceľových vzorkách, ktoré sú rôzne tepelne ovplyvnené. Pre meranie používam dva typy ocelí, a to 14 220 a 12 060. Vzorky ešte pre meranie treba pripraviť, a to znamená, že sa vzorky najprv vybrúsia a následne vyleštia, aby sa mohli, čo najlepšie previesť skúšky mikrotvrdosti. Tak tiež je veľmi dôležité mať povrch dobre vyleštený kvôli viditeľnosti odtlačkov na povrchu oceľovej vzorky pri meraní. Meranie bude prebiehať na mikrotvrdomere od firmy CSM Instruments. Mikrotvrdosť podľa Vickersa budeme merať pri rôznych zaťaženiach, a to pri 0,5 N ; 1N ; 3N a 5N.

Po nameraní konkrétnych hodnôt mikrotvrdosti budú namerané hodnoty štatisticky a prehľadne spracované do tabuliek a vynesené do príslušných grafov. Výsledky merania budú slovne vyhodnotené a porovnané medzi sebou v diskusii výsledkov.

Hlavné zásady pri vypracovaní:

1. Vypracovanie literárnej štúdie na danú tému.
2. Príprava vzoriek pre meranie mikrotvrdosti.
3. Prevedenie samotného merania mikrotvrdosti u pripravených vzoriek.
4. Vyhodnotenie výsledkov merania mikrotvrdosti.

6 EXPERIMENTÁLNÁ ČASŤ

V experimentálnej časti bolo skúmané, aký vplyv má tepelné spracovanie zadaných materiálov na ich mikrotvrdosť. Bolo mi zadaných niekoľko skúšobných vzoriek, ktoré boli vyrobené z iných materiálov a tiež boli inak tepelne, chemicky – tepelne spracované resp. jedna vzorka bola tepelne nespracovaná. Príprava vzoriek spočívala v brúsení a leštení ich povrchu v univerzitných dielňach Ústavu výrobného inžinierstva na UTB v Zlíne a meranie mikrotvrdości bolo realizované v školských laboratóriách Ústavu výrobného inžinierstva na UTB v Zlíne.

Výsledky merania boli graficky i numericky vyhodnotené v programe Microsoft Excel.

Pre experimentálne vyhodnotenie som použil štatistické vzorce a to:

- Vzorec pre výpočet priemernej nameranej hodnoty:

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

- Vzorec pre výpočet strednej kvadratickej odchýlky resp. smerodajnej odchýlky:

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

6.1 Spôsobý tepelného a chemicky - tepelného spracovania skúšobných vzoriek

6.1.1 Cementovanie

Cementovanie je sytenie povrchu nízko uhlíkovej ocele uhlíkom a následné zakalenie. Pri tomto procese dochádza k vytvoreniu vrstvy obohatenej o uhlík až na eutektoidnú alebo mierne nadeutektoidnú koncentráciu. Podľa druhu prostredia, z ktorého difunduje uhlík do ocele, rozlišujeme 3 spôsoby cementovania (v tuhom prostredí, v kvapalnom prostredí, v plynnom prostredí). Nacementovaná súčasť získa teraz po zakalení v povrchovej vrstve tetragonálny martenzit o vysokej tvrdosti, ktorý sa popúšťaním (na 200°C) transformuje na kubický martenzit. Výsledný povrch materiálu je tvrdý a odolný voči opotrebeniu pri zachovaní húževnatosti základného materiálu pod touto vrstvou. Cementuje sa nad teplotou

AC3 (850° - 950°). Tvrdosť vrstvy dosahuje 50 až 60 HRC. Kalenie sa prevádza buď z priamo cementačnej teploty, jednoduchým kalením po novom ohreve alebo dvojitým kalením (zjemnenie zrna). [12]

6.1.2 Kalenie

Je to spôsob tepelného spracovania, ktorého cieľom je dosiahnuť stav odlišný od rovnovážneho. Podľa prevažujúcej štruktúrnej zložky sa kalenie delí na martenzitické kalenie a bainitické kalenie. Kalíme do rôznych prostredí, a to do vody, oleja, do solného a kovového kúpeľa a taktiež na vzduchu. [5]

Ohrev na teplotu kalenia 30 – 70 °C nad Ar3 Ar1, výdrž a ochladzovanie tak rýchle, aby v štruktúre nevznikal *F* (*ferit*) a *P* (*perlit*), ale aby výsledná štruktúra bola tvorená iba *M* (*martenzitom*) alebo *B* (*bainitom*). [4]

6.1.3 Nitridovanie

Sýtenie povrchu súčasti dusíkom v plynnom alebo kvapalnom prostredí. Povrchová vrstva obsahuje vysoko disperzné tvrdé nitrídy vhodných prvkov – najčastejšie sa používa kombinácia Al, V, Cr; nitríd hliníku je vo forme veľmi jemných častíc rozptýlený vo ferite, takže nitridované ocele s hliníkom majú najvyššiu tvrdosť. Tvrdosť povrchu po nitridovaní je vyššia než po cementácii alebo povrchovom kalení. Deformácie súčasti sú minimálne, pretože nitridačné teploty sú relatívne nízke – pohybujú sa okolo 550 °C. Hrúbka nasýtenej vrstvy je menšia ako po cementovaní; rádovo sa pohybuje v desatinách milimetra. Pred nitridovaním sa dielce zušľachtujú, obrábajú na konečný rozmer. Po nitridácii sa už súčasť tepelne nespracováva, poprípade iba leští. [5]

6.1.4 Zušľachtovanie

Zušľachtovanie ocele je martenzitické kalenie s nasledujúcim popúšťaním na teplotu 350 až 650 °C, pri ktorých sa pôvodný martenzit rozpadá na tzv. prechodové štruktúry – troostit (zmes perlitu a martenzitu), osmondit, sorbit, čo je veľmi jemný perlit a ferit. Je to veľmi časté tepelné spracovanie súčastí (napríklad hriadeľov, čapov, ozubených kolies). Rozpad austenitu popisujú transformačné diagramy IRA a ARA. [12]

6.2 Charakteristika použitých typov ocelí pre skúšobné vzorky

6.2.1 Oceľ 12 060

Táto oceľ predstavuje konštrukčnú uhlíkovú oceľ legovanú s nezaručenými vlastnosťami. Je to oceľ určená k zušľachtovaniu. Používajú sa najčastejšie pre súčasti strojov (napr. turbokompresorov), kľukové hriadele čerpadiel, lisov, veľkých spaľovacích motorov, vretená obrábacích strojov, ozubené kolesá, vretená, spojky, lamely, šróby a iné spojovacie súčasti.

Označenie : ČSN - EN - 41 2060

[14]

Chemické zloženie :

Trieda ocele	Chemické zloženie (hmotnosť v %)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	P	S
12 060 (podľa ČSN)	0,52 - 0,60	0,50 - 0,80	0,15 - 0,40	max 0,25	max 0,30	max 0,30		max 0,040	max 0,040

Tab. 7 Chemické zloženie ocele 12 060 [14]

6.2.2 Oceľ 14 220

Je to mangan chrómová oceľ k cementovaniu. Používa sa pre súčasti do priemeru 35 mm k zušľachtovaniu, k cementovaniu s veľkou pevnosťou v jadre, napríklad hriadele, ozubené kolesá, piestne čapy, zubové spojky.

Označenie : ČSN 41 4220

[13]






Chemické zloženie :

Trieda ocele	Chemické zloženie (hmotnosť v %)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	P	S
14 220 (podľa ČSN)	0,14 - 0,19	1,10 - 1,40	0,17 - 0,37	0,80 - 1,10				max 0,035	max 0,035

Tab. 8 Chemické zloženie ocele 14 220 [13]

6.3 Použité skúšobné vzorky pre meranie mikrotvrlosti

Pre meranie mikrotvrlosti som mal zadaných 5 oceľových vzoriek, ktoré boli každá inak spracovaná resp. jedna z nich nebola vôbec tepelne spracovaná. Ak sa aj materiály týchto zadaných oceľových vzoriek opakovali, tak každý z nich bol inak tepelne resp. chemicky – tepelne spracovaný a to spôsobilo iné vlastnosti a tým aj inú mikrotvrdosť skúšobných vzoriek. *Použité skúšobné vzorky :*

Vzorka	Materiál - trieda ocele	Spracovanie	Tvar
1	14 220	Nespracované (základný materiál)	
2	14 220	Cementované	
3	14 220	Kalené	
4	14 220	Nitridované	
5	12 060	Zušľachtované	

Tab. 9 Prehľad použitých skúšobných vzoriek

6.4 Použité přístroje pro přípravukušobných vzoriek a meranie mikrotvrdoosti

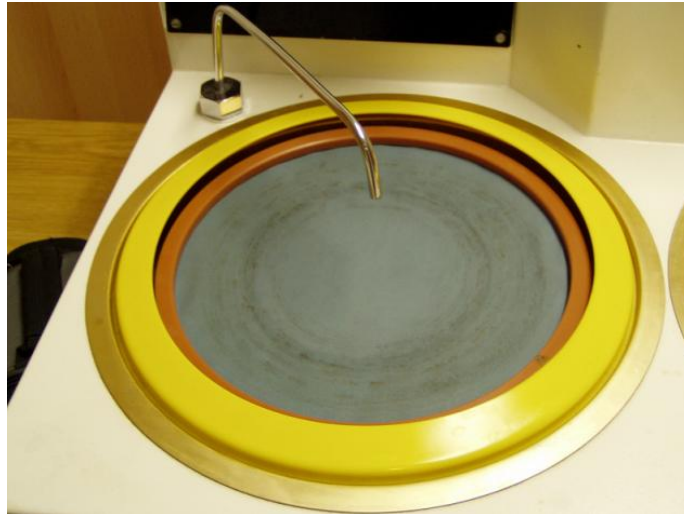
6.4.1 Přístroj použitý na lešteniekušobných vzoriek

Veľmi dôležitou súčasťou celého merania mikrotvrdoosti kovov je prípravakušobných vzoriek. Povrch vzoriek musí byť dôkladne vyleštený, aby získal tzv. kovový lesk, kedy drsnosť jeho povrchu nesmie byť väčší ako $Ra 0,2$ ($Ra \leq 0,2$).

Leštenie prebieha na leštiacom přístroji MTH, je to tzv. metalografická brúska MTH (obr. 21), ktorý sa nachádza v dielňach Ústavu výrobného inžinierstva na UTB v Zlíne. Přístroj sa skladá z dvoch rotačných bubnov, do ktorých je možné umiestniť leštiace papiere. Po spustení rotácie bola tiež na papiere pomocou sústavy kanálov pripojených na prívod vody rovnomerne nanášaná vrstva vody, ktorá je potrebná na dobré konštantné leštenie a odplavovanie nečistôt vzniknutých oddeľovaním mikročastíc zo vzorku. Na leštiace papiere boli postupne prikladané vzorky plochou, ktorá mala byť leštená. Leštené boli až pokiaľ nemali potrebný lesk, aby bol odtlačok jasne vidieť na povrchu meranej vzorky.



Obr. 21 Přístroj MTH na leštenie kovovýchkušobných vzoriek



Obr. 22 Prístroj MTH na leštenie kovových skúšobných vzoriek s nainštalovaným metalografickým pieskovým papierom

6.4.2 Prístroj použitý na meranie mikrotvrdości skúšobných vzoriek

Prístroj, ktorý som použil na meranie mikrotvrdości zadaných skúšobných vzoriek je mikrotvrdomer CSM Instruments MHT zameraný na mikroindentáciu. Tento sofistikovaný prístroj dokáže zmerať tvrdosť, a to jak nanotvrdosť, tak aj mikrotvrdosť, elastické vtiskové moduly a tiež creep. Má širokú škálu hodnôt zaťaženia, ktoré možno použiť pri meraní, a to od minimálnej hodnoty 10 mN až do maximálnej hodnoty zaťaženia 30 N, pričom záťažové rozlíšenie je 0,3 mN. Po dokončení merania nám prístroj automaticky vypíše určité hlavné hodnoty, a to hodnoty vtiskovej tvrdosti HIT (MPa), vtiskového modulu EIT (GPa), modulu redukovaného E_r (GPa), modulu komplexného E^* (GPa), mikrotvrdości podľa Vickersa HV (Vickers) a tiež nám vykreslí krivky zátáže a odľahčenia. Samozrejme sa dá vždy urobiť fotodokumentácia odtlačku po indentore na povrchu skúšobného telieska. Na toto zaznamenanie fotky odtlačku je prispôsobená kamera s niekoľkonásobným zväčšením (200x , 2000x). Pokiaľ chceme merať mikrotvrdosť aj inými spôsobmi, ako len podľa Vickersa, je veľmi jednoduché vymeniť indentor. Potom môžeme merať mikrotvrdosť podľa Knoopu, Berkoviča a iné podľa potreby.

Tento mikrotvrdomer ma veľkú oblasť použitia, dá sa použiť pre mäkké i tvrdé materiály, napr. pre kovy, polyméry, keramiku.



Obr. 23 Mikrotvrdomer CSM Instruments – pohľad 1



Obr. 24 Mikrotvrdomer CSM Instruments – pohľad 2

6.5 Postup prípravy a merania mikrotvrlosti

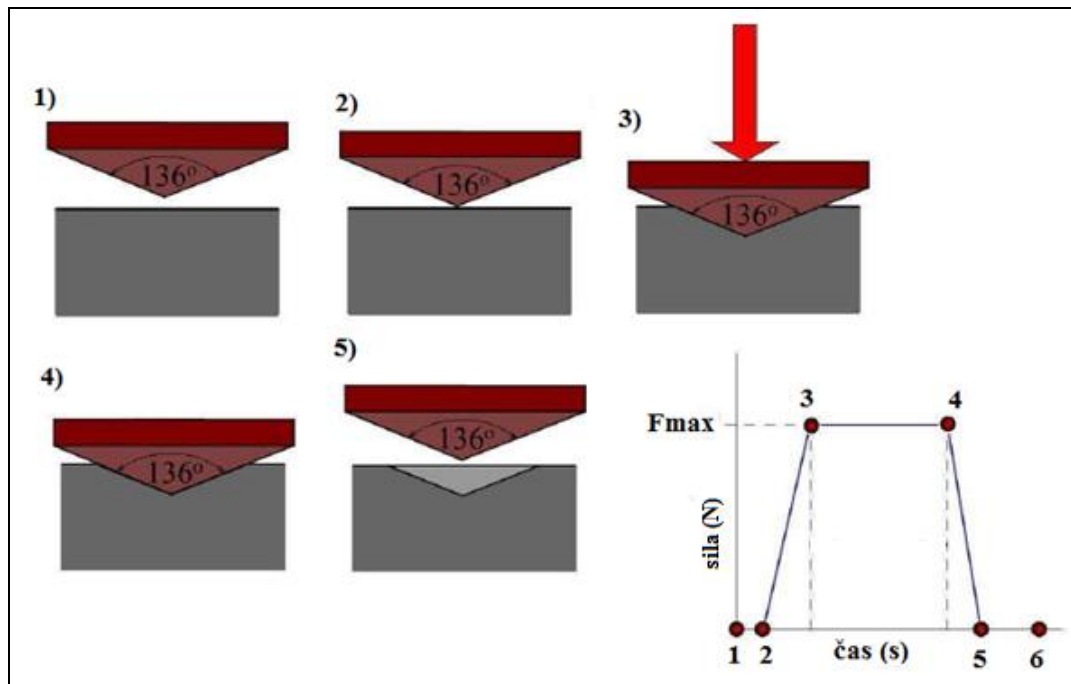
6.5.1 Príprava skúšobných vzoriek

Rôzne vzorky vyrobené z rôznych použitých materiálov, teda ocelí som dostal zadané od vedúceho mojej diplomovej práce. Každá oceľová vzorka bola vyrobená iným spôsobom, takže bola inak tepelne ovplyvnená. Prvá vzorka bola bez tepelného spracovania, takže to bol pôvodný materiál. Ďalšie dve vzorky boli tepelne spracované a to kalené a zušľachtované. A posledné dve vzorky boli chemicky – tepelne ovplyvnené a to cementované a nitrídované. Všetky tieto vzorky bolo nutné dôkladne pripraviť na meranie. Príprava spočívala vo vyleštení všetkých vzoriek na metalografickej brúske MTH v dielňach Ústavu výrobného inžinierstva fakulty technologickej UTB. Na vyleštenie som použil metalografický pieskový papier o rôznych drsnostiach. Na tento metalografický pieskový papier bola púšťaná voda, ktorá napomáhala lešteniu a odvádzala resp. odplavovala oddelené častice z lešteného povrchu preč. Leštenie všetkých skúšobných vzoriek prebiehalo dovtedy, pokiaľ nebol povrch materiálu dokonale lesklý. Leštenie bolo veľmi dôležité z hľadiska toho, že na vyleštenom povrchu skúšobného vzorku bolo oveľa jasnejšie vidieť odtlačok hrotu indentoru.

6.5.2 Meranie mikrotvrlosti

Po dokončení prípravy skúšobných vzoriek som pristúpil k meraniu mikrotvrlosti zadaných materiálov. Meranie bolo prevedené na mikrotvrdomeri CSM Instruments. Tomuto meraniu som podrobil všetkých 5 zadaných skúšobných vzoriek a hodnoty merania som ďalej vyhodnotil, ako popisujem v časti 6.5.3. Každú vzorku som meral pre 4 zaťaženia, a to zaťaženie 0,5N; 1N; 3N a 5N a pre každé jedno zaťaženie som spravil 9 meraní, takže 9 odtlačkov indentoru na povrchu meranej vzorky ocele. Po nastavení prístroja na požadované parametre som vzorky postupne vkladal na pracovný stôl prístroja, ktorý bol pohovateľný v pozdĺžnom i priečnom smere. Mikrotvrdomer som vždy nastavil pred spustením merania a už následne meral automaticky. Vždy som nastavil počet jednotlivých vpičov, ktoré boli od seba vzdialené vždy o danú nastavenú vzdialenosť. Pri každom odtlačku mikrotvrdomer vyhodnotil nasledujúce hlavné hodnoty: vtiskovú tvrdosť HIT (MPa), vtiskový modul EIT (GPa), modul redukovaný E_r (GPa), modul komplexný E^* (GPa), mikrotvrdosť podľa Vickersa HV (Vickers) a tiež CIT (%), RIT (%). Mimo číselných

hodnôt mi mikrotvrdomer tiež vykreslil krivku zátáže a odľahčenia. Pri sledovaní povrchu sa pracovalo pri optickom zväčšení a muselo teda dochádzať pri každom meraní k zaostrovaniu povrchu, aby bol odtlačok dokonale viditeľný. Meranie mikrotvrdoti a pozorovanie odtlačku bolo prevádzané pomocou otočnej hlavice mikrotvrdomeru, ktorá obsahovala niekoľko objektívov pre rôzne zväčšenia a sondu prevádzajúcu vtláčanie kužeľa do povrchu vzorku pre predvolené zaťaženie.



Obr. 25 Priebeh zaťažovania pri skúške mikrotvrdoti

6.5.3 Vyhodnotenie

Po dokončení merania mikrotvrdoti som všetky namerané hodnoty zaznamenal do prehľadných tabuliek v programe Microsoft Excel, kde som rozlíšil hodnoty pre rôzne typy tepelného a chemicky – tepelného spracovania, ako i pre rôzne zaťaženie, ktoré som pri meraní uvažoval. Následne som z hodnôt určil aritmetický priemer a smerodajnú odchýlku. Posledným bodom môjho vyhodnotenia bolo vynesenie týchto hodnôt do príslušných grafov a slovný popis, v ktorom hodnotím a porovnávam namerané hodnoty mikrotvrdoti.

7 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT MIKROTVRDOSTI

HIT (MPa)	EIT (GPa)	Er (GPa)	E* (GPa)	HV (Vickers)	CIT (%)	RIT (%)
--------------	--------------	-------------	-------------	-----------------	------------	------------

Tab. 10 Jednotky nameraných veličín

7.1 Materiál 14 220 nespracovaný

7.1.1 Namerané hodnoty mikrotvrdoosti materiálu 14 220 nespracovaného

NESPRACOVANÉ - zaťaženie 0,5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	4763,80	328,00	274,23	360,44	449,63	1,42	-0,11
Vtisk # 2	622,49	112,41	111,51	123,52	58,75	1,56	-0,11
Vtisk # 3	4194,10	287,63	247,78	316,08	395,87	1,54	-0,10
Vtisk # 4	1309,40	150,50	144,53	165,38	123,59	1,17	-0,12
Vtisk # 5	961,78	102,23	102,32	112,34	90,779	1,61	-0,10
Vtisk # 6	3118,20	246,95	219,44	271,37	294,31	1,18	-0,13
Vtisk # 7	2542,10	195,77	181,14	215,13	239,94	1,74	-0,13
Vtisk # 8	2225,40	178,62	167,60	196,29	210,04	0,85	-0,10
Vtisk # 9	2899,80	235,43	211,09	258,71	273,70	0,73	-0,15
\bar{x}	2515,23	204,17	184,40	224,36	237,40	1,31	-0,12
$\bar{\sigma}$	1410,698	77,07322	59,11765	84,69735	133,1496	0,351228	0,017321

Tab. 11 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 0,5 N

NESPRACOVANÉ - zaťaženie 1 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	3332,00	233,53	209,69	256,62	314,49	1,15	-0,12
Vtisk # 2	753,20	106,46	106,16	116,99	71,092	0,96	-0,13
Vtisk # 3	4992,70	284,23	245,47	312,34	471,24	1,72	-0,09
Vtisk # 4	4758,50	305,80	259,88	336,04	449,13	1,99	-0,09
Vtisk # 5	2175,10	166,73	157,98	183,22	205,30	1,11	-0,13
Vtisk # 6	1572,10	152,23	145,99	167,28	148,38	0,91	-0,12
Vtisk # 7	5551,90	300,85	256,61	330,60	524,02	2,13	-0,13
Vtisk # 8	2124,90	173,62	163,57	190,79	200,56	1,59	-0,11
Vtisk # 9	1645,30	185,22	172,85	203,54	155,29	1,37	-0,12
\bar{x}	2989,52	212,07	190,91	233,05	282,17	1,44	-0,12
$\bar{\sigma}$	1733,965	71,87153	54,49911	78,97847	163,6614	0,445618	0,015899

Tab. 12 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 1 N

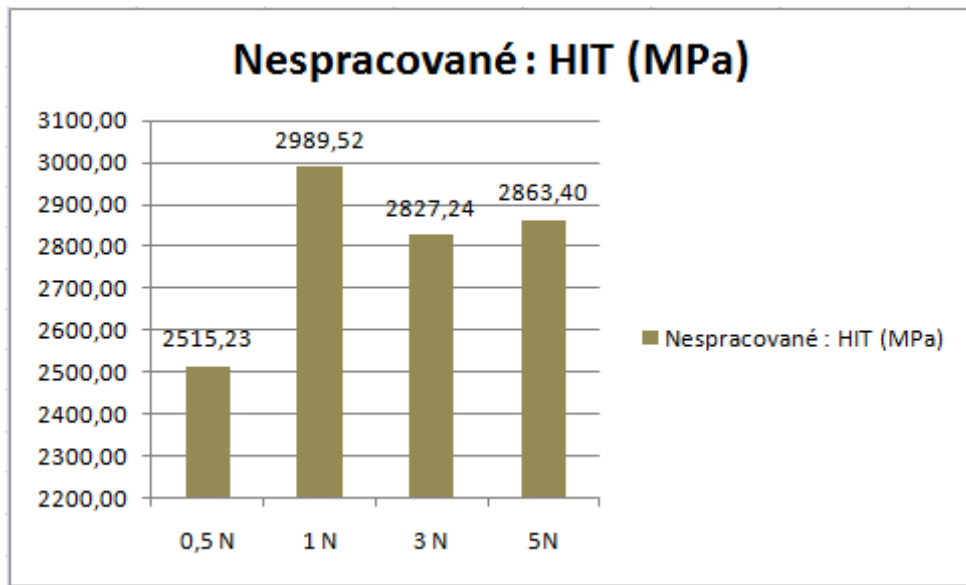
NESPRACOVANÉ - zaťaženie 3 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	3157,40	229,57	206,78	252,27	298,01	1,05	-0,12
Vtisk # 2	3180,30	245,71	218,55	270,01	300,17	1,33	-0,12
Vtisk # 3	3005,00	194,77	180,36	214,03	283,63	1,56	-0,13
Vtisk # 4	2402,30	182,05	170,33	200,05	226,75	1,20	-0,12
Vtisk # 5	3717,50	228,08	205,68	250,64	350,88	1,47	-0,11
Vtisk # 6	2394,70	174,70	164,45	191,98	226,02	1,51	-0,12
Vtisk # 7	2886,20	195,65	181,05	215,00	272,42	1,51	-0,13
Vtisk # 8	2399,20	184,26	172,09	202,49	226,45	1,61	-0,12
Vtisk # 9	2302,60	174,14	163,99	191,36	217,33	1,38	-0,11
\bar{x}	2827,24	200,99	184,81	220,87	266,85	1,40	-0,12
$\bar{\sigma}$	485,7243	26,61877	20,34096	29,25099	45,84524	0,182536	0,007071

Tab. 13 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťaženi 3 N

NESPRACOVANÉ - zaťaženie 5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	2160,20	152,68	146,37	167,78	203,89	1,15	-0,12
Vtisk # 2	2317,50	169,72	160,42	186,51	218,74	1,19	-0,12
Vtisk # 3	4301,50	248,98	220,89	273,60	406,00	1,43	-0,12
Vtisk # 4	2066,50	149,76	143,92	164,57	195,04	1,15	-0,12
Vtisk # 5	3410,60	208,07	190,64	228,65	321,91	1,25	-0,12
Vtisk # 6	1859,80	136,73	132,84	150,25	175,54	1,44	-0,12
Vtisk # 7	2846,40	174,51	164,30	191,77	268,66	1,31	-0,11
Vtisk # 8	4095,30	229,81	206,96	252,54	386,54	1,38	-0,11
Vtisk # 9	2712,80	190,56	177,07	209,41	256,05	1,41	-0,12
\bar{x}	2863,40	184,54	171,49	202,79	270,26	1,30	-0,12
$\bar{\sigma}$	890,4259	38,11582	29,9072	41,88538	84,04449	0,119734	0,00441

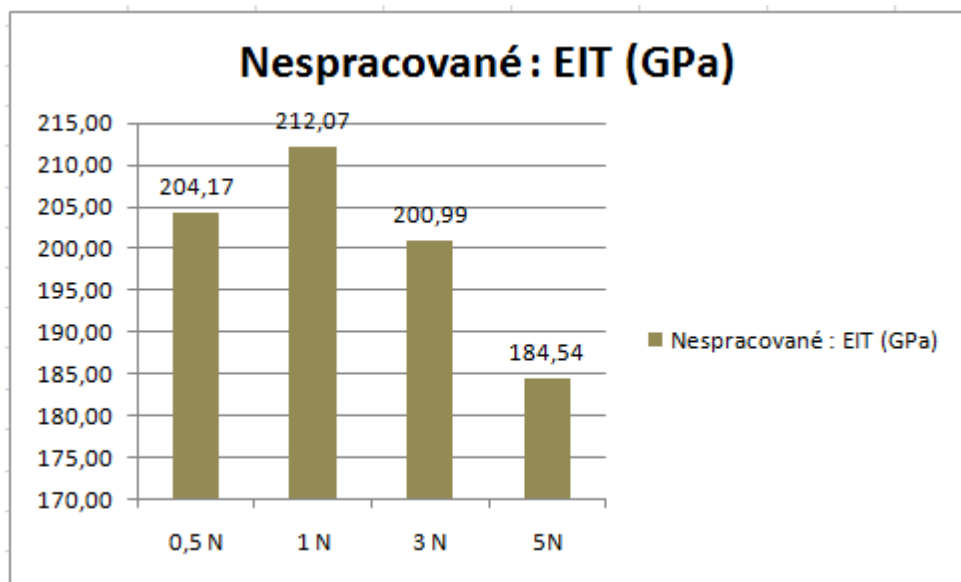
Tab. 14 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťaženi 5 N

7.1.2 Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 nespracovaný



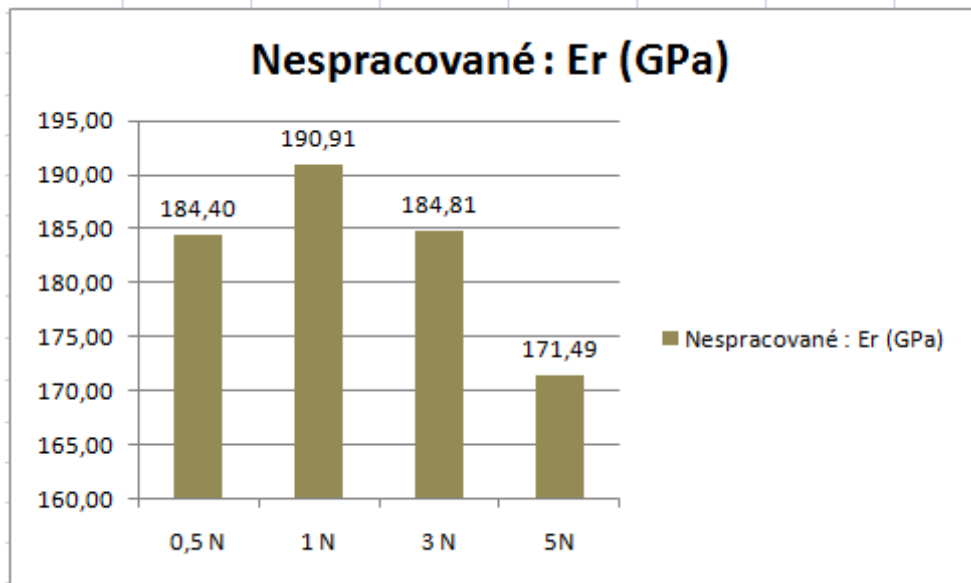
Obr. 26 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 nespracovaný

Z výsledkov merania je zrejmé, že najvyššia hodnota vtiskovej tvrdosti HIT bola nameraná pre daný materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 1N a to 2989,52 MPa. Najnižšia hodnota pre tento materiál bola nameraná pri zaťažení 0,5N a to 2515,23 MPa (obr. 26).



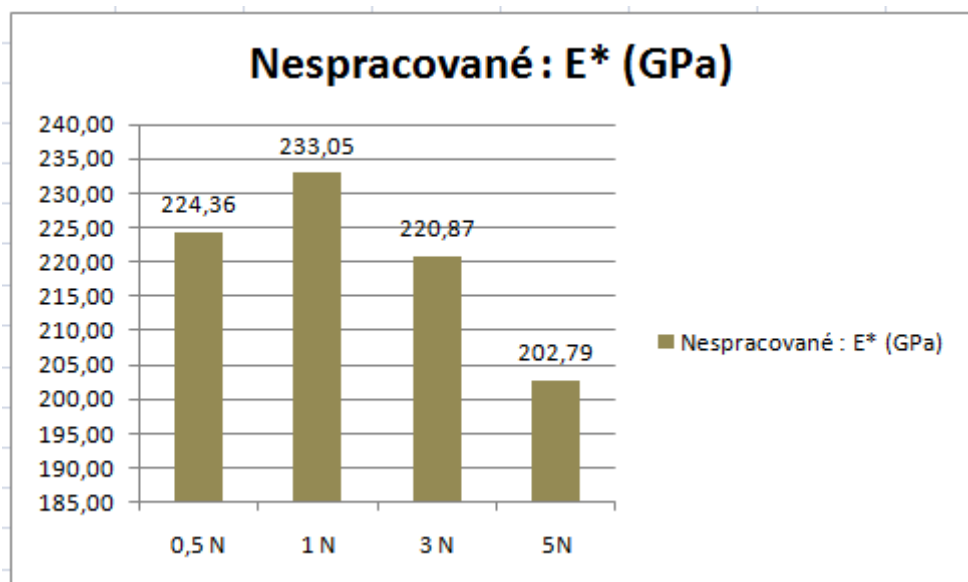
Obr. 27 Priebeh vtisk. modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný

Z nameraných výsledkov je zrejmé, že najvyššia hodnota vtiskového modulu EIT bola nameraná pre daný materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 1N a to 212,07 GPa. Naopak najnižšia hodnota bola nameraná pri zaťažení 5N a to 184,54 GPa (obr. 27).



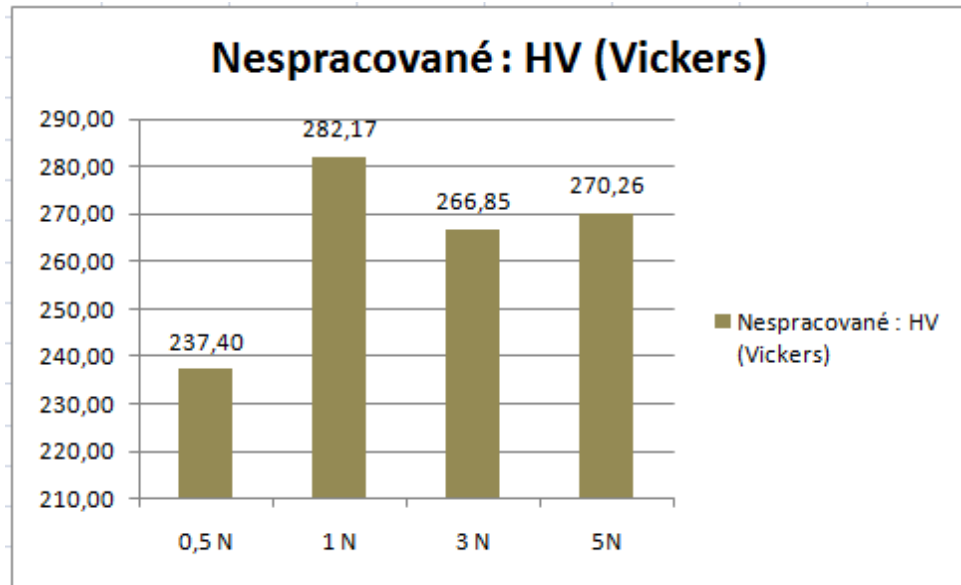
Obr. 28 Priebeh modulov reduk. Er (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný

Z výsledkov merania pre materiál 14 220 nespracovaný plynie záver, že najvyššia hodnota modulu redukovaného Er bola nameraná pri zaťažení 1N a to 190,91 GPa, zatiaľ čo najnižšia nameraná hodnota bola 171,49 GPa pri zaťažení 5N (obr. 28).



Obr. 29 Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný

Z výsledkov merania pre materiál 14 220 nespracovaný jasne vyplýva, že najvyššia hodnota modulu komplexného E* bola nameraná pri zaťažení 1N a to 233,05 GPa, zatiaľ čo najnižšia nameraná hodnota bola 202,79 GPa pri zaťažení 5N (obr. 29).



Obr. 30 Priebeh mikrotvrdostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 nespracovaný

Najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdosti podľa Vickersa pre oceľ 14 220 nespracovanú je 282,17 HV a to pri zaťažení 1N. Naopak najnižšia nameraná hodnota je 237,40 HV pri zaťažení 0,5N (obr. 30).

7.2 Materiál 14 220 cementovaný

7.2.1 Namerané hodnoty mikrotvrdosti materiálu 14 220 cementovaného

CEMENTOVANÉ - zaťaženie 0,5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	6816,50	260,65	229,18	286,43	643,39	2,04	-0,10
Vtisk # 2	7537,90	248,74	220,72	273,34	711,47	0,68	-0,12
Vtisk # 3	6313,80	253,05	223,80	278,08	595,94	1,35	-0,10
Vtisk # 4	6727,70	254,12	227,94	291,46	639,15	1,64	-0,12
Vtisk # 5	7145,40	256,19	228,17	289,18	669,74	1,32	-0,11
Vtisk # 6	7326,90	263,45	222,48	274,36	705,45	1,69	-0,12
Vtisk # 7	6947,50	263,78	228,55	279,32	654,89	1,27	-0,12
Vtisk # 8	7218,70	260,47	224,47	282,91	687,43	1,89	-0,10
Vtisk # 9	6744,30	251,58	219,13	284,61	638,49	1,46	-0,12
\bar{x}	6889,40	254,15	224,57	279,28	650,27	1,36	-0,11
$\bar{\sigma}$	615,2975	6,03026	4,281791	6,627445	58,07118	0,680025	0,011547

Tab. 15 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 0,5 N

CEMENTOVANÉ - zaťaženie 1 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	7296,40	237,26	212,42	260,73	688,68	1,07	-0,12
Vtisk # 2	7672,30	239,88	214,33	263,60	724,15	0,85	-0,15
Vtisk # 3	6557,30	243,67	217,08	267,77	618,91	1,44	-0,12
Vtisk # 4	6648,70	241,56	213,89	266,36	629,48	1,26	-0,12
Vtisk # 5	7169,50	240,89	215,46	265,48	663,14	1,21	-0,13
Vtisk # 6	7483,40	236,19	211,81	260,19	714,23	1,39	-0,13
Vtisk # 7	7433,10	237,37	214,23	261,45	693,56	0,94	-0,12
Vtisk # 8	6692,40	240,11	212,02	265,37	641,66	0,84	-0,13
Vtisk # 9	7112,60	242,19	213,63	260,89	659,28	1,41	-0,12
\bar{x}	7175,33	240,27	214,61	264,03	677,25	1,12	-0,13
$\bar{\sigma}$	567,2734	3,222747	2,342584	3,539948	53,54349	0,298161	0,017321

Tab. 16 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 1 N

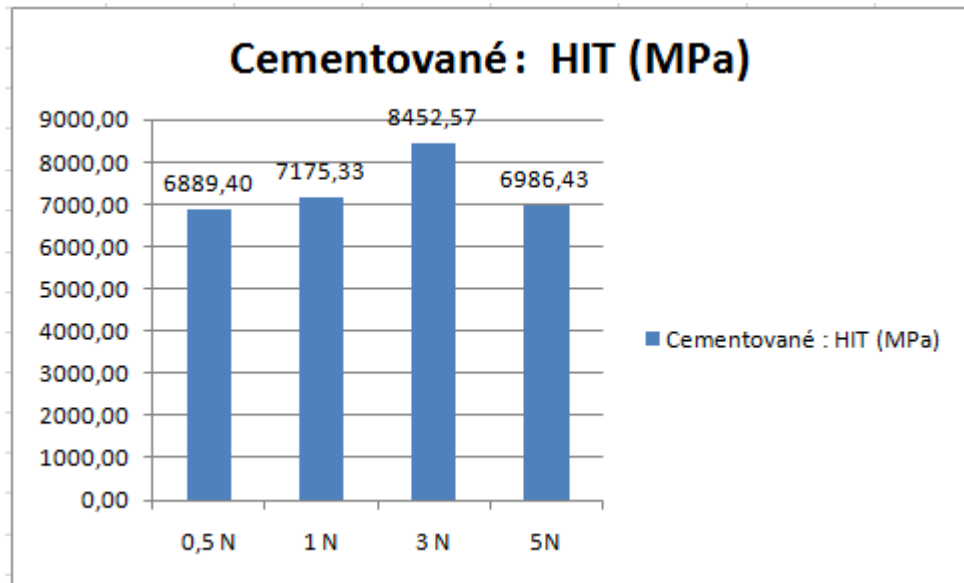
CEMENTOVANÉ - zaťaženie 3 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	9378,20	227,64	205,35	250,15	885,17	0,94	-0,12
Vtisk # 2	7830,20	229,16	206,48	251,83	739,06	0,94	-0,13
Vtisk # 3	8149,30	215,31	196,13	236,61	759,18	1,20	-0,13
Vtisk # 4	7912,60	226,39	203,12	246,89	748,97	1,21	-0,13
Vtisk # 5	8258,30	224,71	206,78	241,46	777,14	1,03	-0,12
Vtisk # 6	8219,70	216,11	204,22	240,12	763,62	0,98	-0,13
Vtisk # 7	9259,30	225,97	203,39	241,61	863,36	0,93	-0,13
Vtisk # 8	9078,90	228,33	199,78	234,62	822,45	0,97	-0,12
Vtisk # 9	8278,10	226,31	203,99	247,37	781,19	1,20	-0,12
\bar{x}	8452,57	224,04	202,65	246,20	797,80	1,03	-0,13
$\bar{\sigma}$	817,3457	7,595633	5,677555	8,344683	77,14599	0,150111	0,005774

Tab. 17 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 3 N

CEMENTOVANÉ - zaťaženie 5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	6921,10	227,16	205,00	249,63	653,25	0,70	-0,13
Vtisk # 2	8009,20	234,45	210,37	257,64	755,95	0,88	-0,12
Vtisk # 3	7245,20	225,62	203,85	247,93	683,84	0,71	-0,12
Vtisk # 4	6931,00	228,24	205,80	250,82	659,19	1,01	-0,13
Vtisk # 5	6330,20	231,03	207,85	253,88	597,48	0,90	-0,13
Vtisk # 6	6481,90	223,00	201,91	245,06	611,80	0,92	-0,13
Vtisk # 7	6529,60	231,12	203,46	251,13	629,59	0,84	-0,12
Vtisk # 8	7529,40	230,66	209,48	255,36	731,16	0,89	-0,13
Vtisk # 9	6927,90	227,87	206,97	249,91	656,79	0,72	-0,12
\bar{x}	6986,43	228,25	205,80	250,83	659,42	0,85	-0,13
$\bar{\sigma}$	600,9242	4,04564	2,98871	4,445707	56,71689	0,123234	0,005164

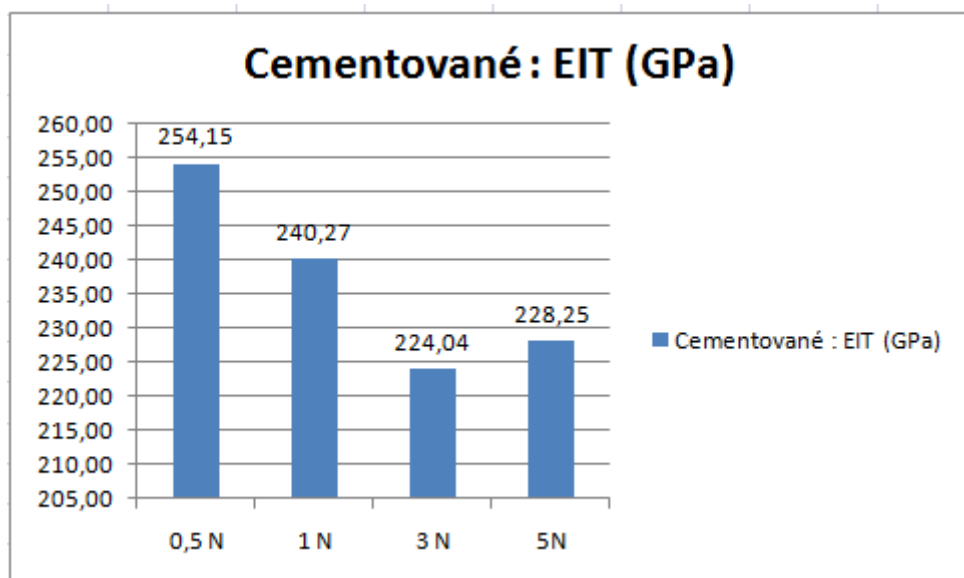
Tab. 18 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 5 N

7.2.2 Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 cementovaný



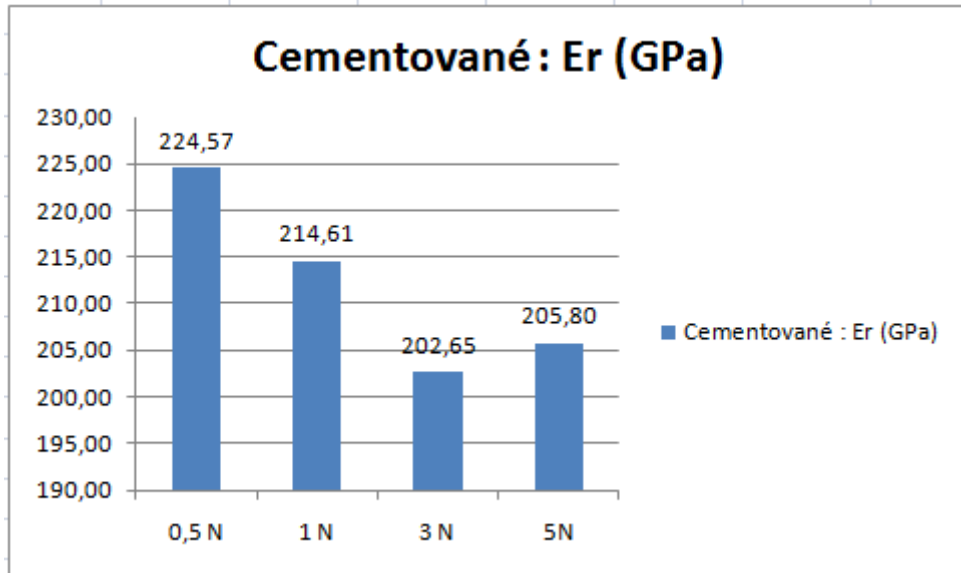
Obr. 31 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 cementovaný

Najvyššia nameraná hodnota vtiskovej tvrdosti HIT pre oceľ 14 220 cementovanú je 8452,57 MPa a to pri zaťažení 3N. Naopak najnižšia nameraná hodnota HIT je 6889,40 MPa pri zaťažení 0,5N (obr. 31).



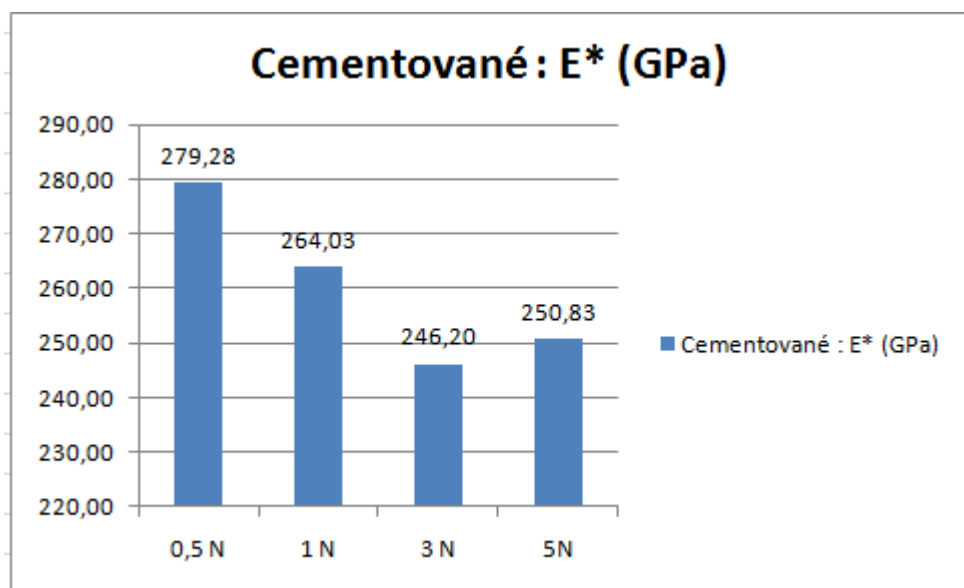
Obr. 32 Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný

Z nameraných výsledkov je zrejmé, že najvyššia hodnota vtiskového modulu EIT bola nameraná pre daný materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 0,5N a to 254,15 GPa. Najnižšia hodnota EIT bola nameraná pri zaťažení 3N a to 224,04 GPa (obr. 32).



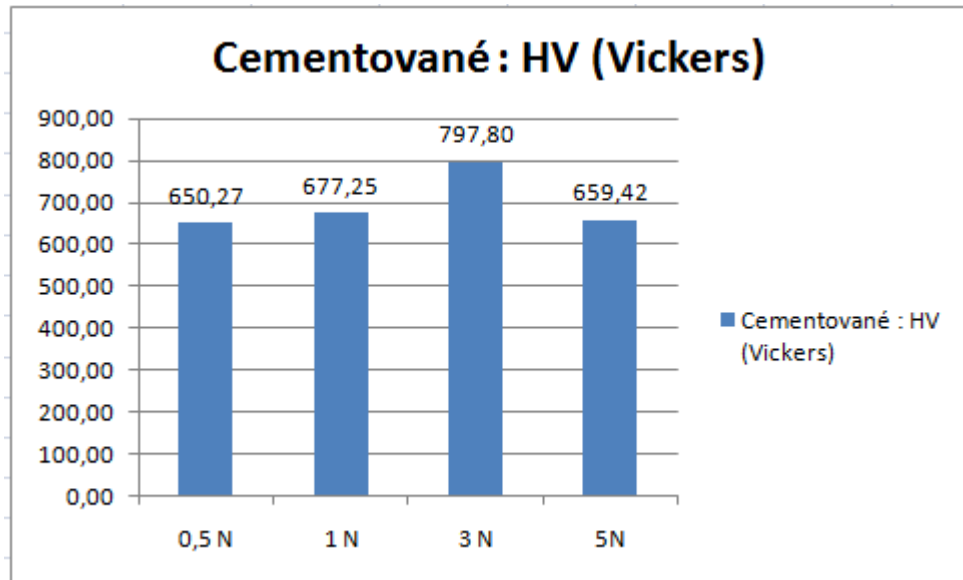
Obr. 33 Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný

Z obr. 33 jednoznačne vyplýva, že najnižšia nameraná hodnota modulu redukovaného Er pre danú oceľ 14 220 cementovanú je 202,65 GPa pri zaťažení 3N. Najvyššou nameranou hodnotou je 224,57 GPa a to pri zaťažení 0,5N (obr. 33).



Obr. 34 Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný

Z výsledkov merania pre materiál 14 220 cementovaný jasne vyplýva, že najvyššou hodnotou komplexného modulu E^* je 279,28 GPa pri zaťažení 0,5N, zatiaľ čo najnižšou nameranou hodnotou je 246,20 GPa pri zaťažení 3N (obr. 34).



Obr. 35 Priebeh mikrotvrdostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 cementovaný

U cementovanej ocele 14 220 bola najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdosti podľa Vickersa presne 797,80 HV pri zaťažení 3N a naopak najnižšia hodnota bola 650,27 HV pri zaťažení 0,5N (obr. 35).

7.3 Materiál 14 220 kalený

7.3.1 Namerané hodnoty mikrotvrdosti materiálu 14 220 kaleného

KALENÉ - zaťaženie 0,5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	6245,80	287,33	247,57	315,75	589,51	1,24	-0,12
Vtisk # 2	5824,50	249,16	221,03	273,81	549,75	1,37	-0,15
Vtisk # 3	5649,30	273,41	238,07	300,45	533,21	1,12	-0,13
Vtisk # 4	5553,20	271,36	239,86	311,46	525,13	1,26	-0,12
Vtisk # 5	5987,10	254,13	232,38	309,99	574,96	1,21	-0,15
Vtisk # 6	5741,20	271,36	241,53	310,37	542,23	1,26	-0,15
Vtisk # 7	5993,70	269,23	246,61	297,37	578,39	1,23	-0,12
Vtisk # 8	6023,10	257,81	234,09	306,23	582,17	1,31	-0,12
Vtisk # 9	6047,90	262,31	236,83	301,31	584,92	1,25	-0,13
\bar{x}	5906,53	269,97	235,56	296,67	557,49	1,24	-0,13
$\bar{\sigma}$	306,5945	19,31656	13,44732	21,22398	28,93706	0,125033	0,015275

Tab. 19 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 0,5 N

KALENÉ - zaťaženie 1 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	5893,50	236,72	212,03	260,13	556,27	1,37	-0,12
Vtisk # 2	5730,80	249,67	221,39	274,36	540,90	1,32	-0,11
Vtisk # 3	5958,80	228,97	206,33	251,61	562,42	0,86	-0,12
Vtisk # 4	5741,60	241,23	214,36	254,63	542,41	0,93	-0,13
Vtisk # 5	5786,40	244,69	220,63	263,19	545,18	1,17	-0,12
Vtisk # 6	5896,30	235,61	212,69	266,79	557,45	1,09	-0,12
Vtisk # 7	5901,50	238,16	210,97	265,46	559,78	1,37	-0,11
Vtisk # 8	5743,60	238,99	213,12	260,31	543,19	1,23	-0,11
Vtisk # 9	5983,30	233,71	221,03	254,32	564,91	1,31	-0,12
\bar{x}	5861,03	238,45	213,25	262,03	553,20	1,18	-0,12
$\bar{\sigma}$	117,4162	10,45829	7,603762	11,49381	11,0843	0,281129	0,005774

Tab. 20 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 1 N

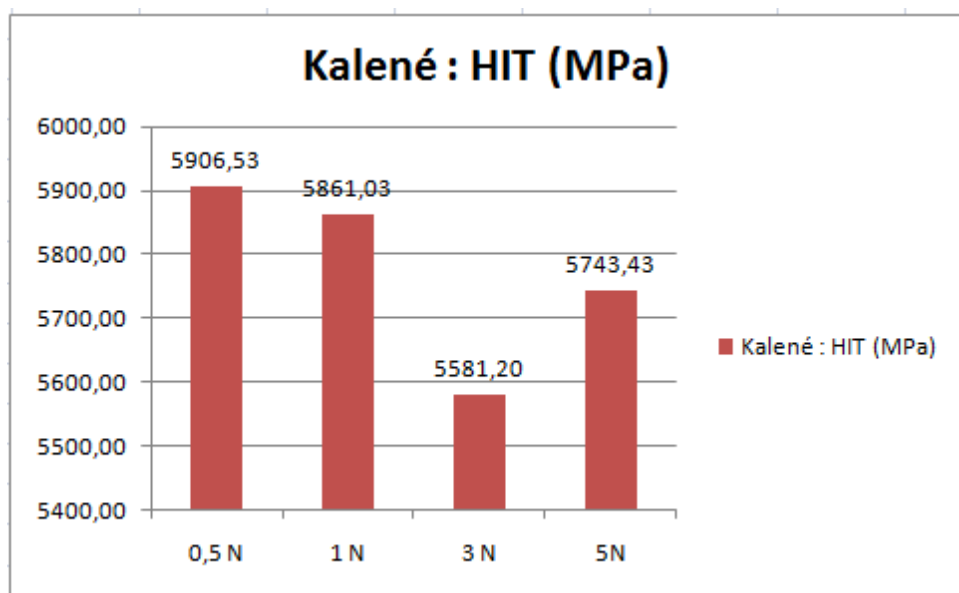
KALENÉ - zaťaženie 3 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	5675,10	221,49	200,78	243,40	535,65	0,97	-0,12
Vtisk # 2	5537,40	223,79	202,50	245,93	522,65	0,98	-0,12
Vtisk # 3	5531,10	210,02	192,12	230,79	522,05	1,02	-0,11
Vtisk # 4	5561,30	219,12	201,59	243,19	525,16	0,99	-0,12
Vtisk # 5	5689,10	214,22	202,37	240,93	537,97	0,97	-0,13
Vtisk # 6	5615,30	220,69	197,37	243,11	534,92	1,06	-0,11
Vtisk # 7	5542,90	217,39	198,09	239,07	523,19	1,01	-0,12
Vtisk # 8	5589,10	222,81	194,66	236,52	527,34	0,97	-0,12
Vtisk # 9	5604,70	221,67	193,54	237,08	532,89	0,98	-0,11
\bar{x}	5581,20	218,43	198,47	240,04	526,78	0,99	-0,12
$\bar{\sigma}$	81,38077	7,376356	5,563248	8,11	7,684617	0,026458	0,005774

Tab. 21 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 3 N

KALENÉ - zaťaženie 5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	5534,60	216,02	196,67	237,38	522,39	0,95	-0,12
Vtisk # 2	5923,90	218,49	198,53	240,10	559,13	0,83	-0,12
Vtisk # 3	5771,80	211,15	192,98	232,04	544,78	0,82	-0,12
Vtisk # 4	5597,70	215,28	195,59	242,97	528,38	0,89	-0,12
Vtisk # 5	5569,40	216,13	194,07	233,16	526,09	0,88	-0,12
Vtisk # 6	5571,90	214,79	193,84	238,97	526,82	0,94	-0,12
Vtisk # 7	5960,30	211,39	194,93	237,08	561,03	0,84	-0,12
Vtisk # 8	5751,80	215,08	194,01	241,58	540,25	0,87	-0,12
Vtisk # 9	5891,50	216,87	197,65	236,33	552,69	0,90	-0,12
\bar{x}	5743,43	215,22	196,06	236,51	542,10	0,87	-0,12
$\bar{\sigma}$	196,1941	3,734823	2,824836	4,100358	18,51604	0,072342	0

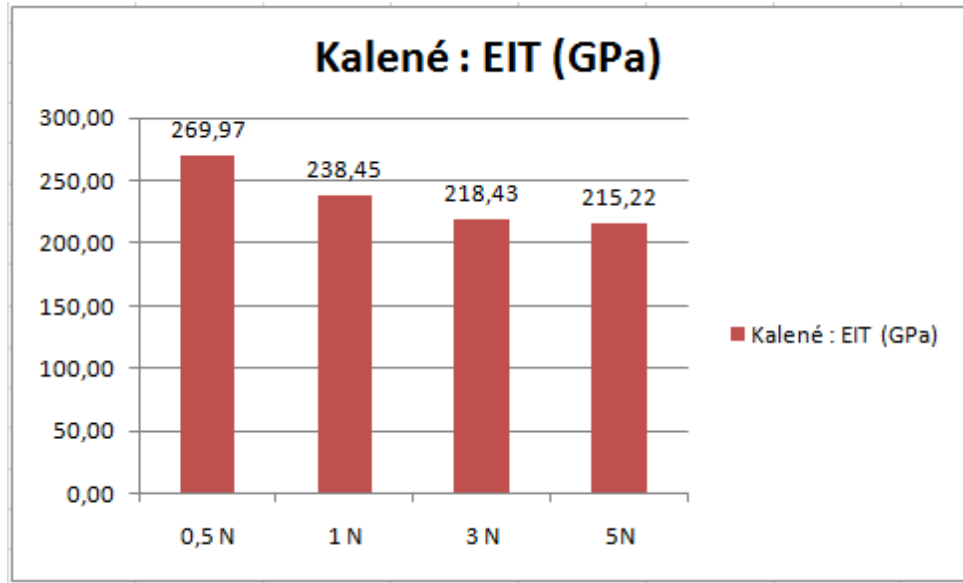
Tab. 22 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 5 N

7.3.2 Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 kalený



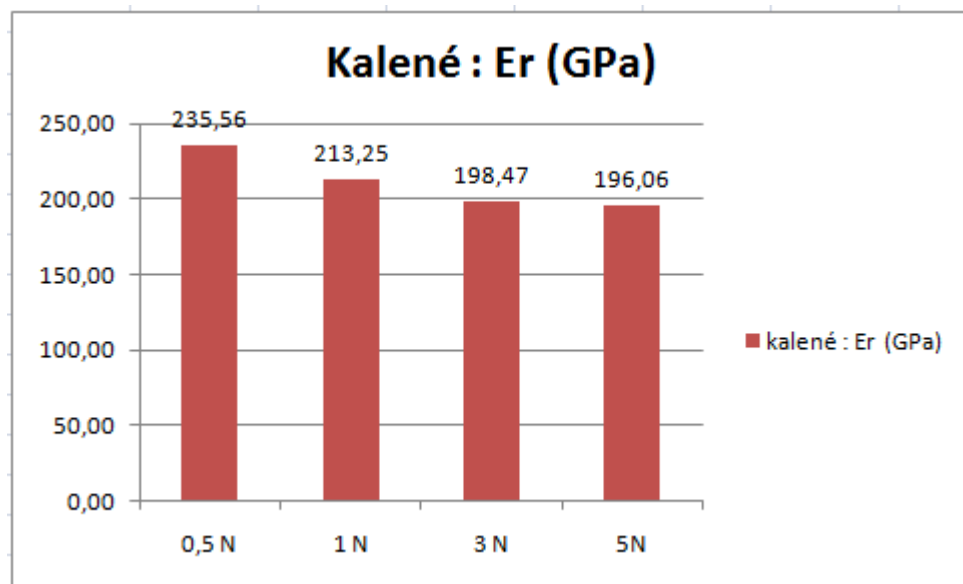
Obr. 36 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 kalený

Najvyššou nameranou hodnotou vtiskovej tvrdosti HIT pre oceľ 14 220 kalenú bola 5906,53 MPa pri zaťažení 0,5N. Naopak najnižšia hodnota HIT bola 5581,20 MPa pri zaťažení 3N (obr. 36).



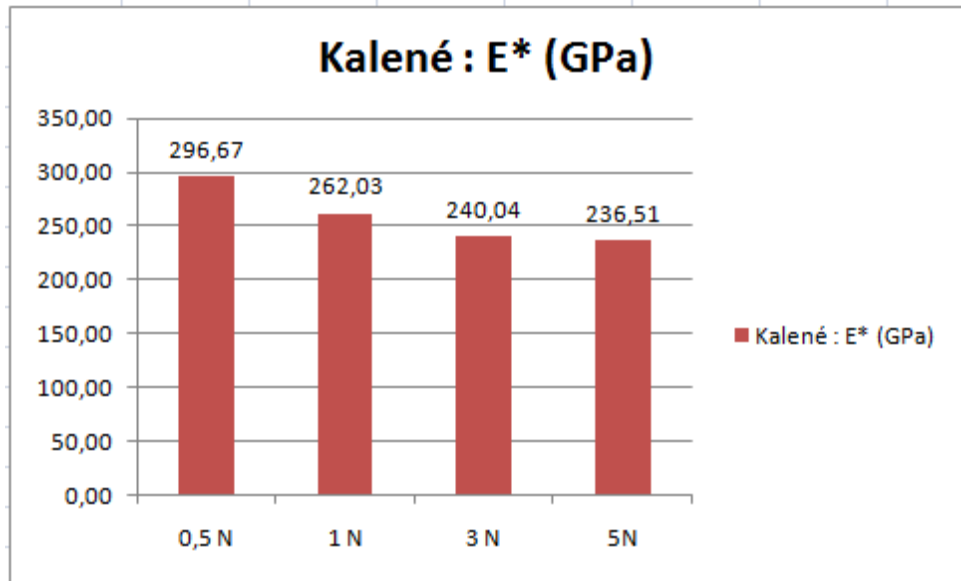
Obr. 37 Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 kalený

Z výsledkov merania pre materiál 14 220 kalený plynie záver, že najvyššia hodnota vtiskového modulu EIT bola nameraná pri zaťažení 0,5N a to 269,97 GPa, zatiaľ čo najnižšia nameraná hodnota bola 215,22 GPa pri zaťažení 5N (obr. 37).



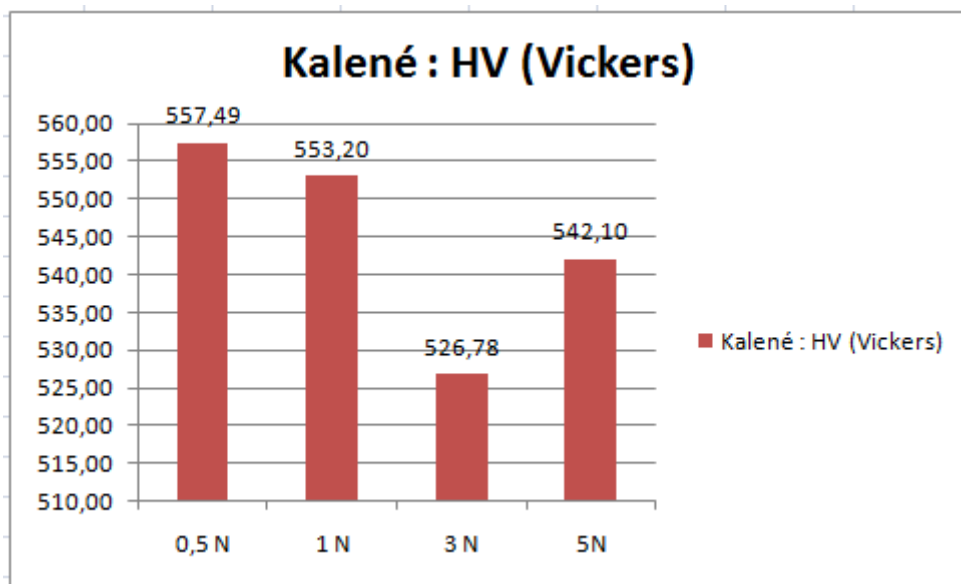
Obr. 38 Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 kalený

Najvyššou nameranou hodnotou modulu redukovaného Er pre danú oceľ 14 220 kalenú je 235,56 GPa, ktorá bola nameraná pri zaťažení 0,5N. Najnižšou hodnotou Er je 196,06 GPa pri zaťažení 5N (obr. 38).



Obr. 39 Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 kalený

U kalenej ocele 14 220 bola najvyššia nameraná hodnota modulu komplexného E* 296,67 GPa pri zaťažení 0,5N a naopak najnižšia hodnota bola 236,51 GPa pri zaťažení 5N (obr. 39).



Obr. 40 Priebeh mikrotvrdostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 kalený

Z výsledkov merania pre danú ocel' 14 220 kalenú plynie, že najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdosti podľa Vickersa bola 557,49 HV pri zaťažení 0,5N, zatiaľ čo najmenšia hodnota mikrotvrdosti bola 526,78 HV pri použitom zaťažení 3N (obr. 40).

7.4 Materiál 14 220 nitridovaný

7.4.1 Namerané hodnoty mikrotvrdoosti materiálu 14 220 nitridovaného

NITRIDOVANÉ - zaťaženie 0,5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	2580,40	136,94	133,03	150,49	243,55	1,53	-0,13
Vtisk # 2	3736,60	153,13	146,74	168,28	352,68	1,52	-0,12
Vtisk # 3	1636,60	146,30	141,00	160,76	154,47	0,80	-0,12
Vtisk # 4	2897,30	144,13	134,25	154,57	272,96	0,97	-0,12
Vtisk # 5	2745,60	151,89	131,33	151,08	261,28	1,47	-0,13
Vtisk # 6	2158,90	137,63	139,38	162,09	204,27	1,16	-0,12
Vtisk # 7	1793,70	149,22	145,87	168,61	165,96	1,51	-0,12
Vtisk # 8	3445,80	148,97	142,51	159,17	331,56	1,34	-0,13
Vtisk # 9	2865,10	131,14	138,92	154,63	267,01	1,40	-0,12
\bar{x}	2651,20	145,46	140,26	159,84	250,23	1,28	-0,12
$\bar{\sigma}$	1051,789	8,12788	6,88516	8,930355	99,27387	0,418609	0,005774

Tab. 23 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 0,5 N

NITRIDOVANÉ - zaťaženie 1 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	1773,30	57,052	59,444	62,694	167,38	1,04	-0,13
Vtisk # 2	4094,40	160,37	152,76	176,23	386,45	1,75	-0,10
Vtisk # 3	4926,30	172,69	162,82	189,76	464,98	1,19	-0,12
Vtisk # 4	4456,20	164,39	154,63	166,53	434,25	1,21	-0,12
Vtisk # 5	1978,40	96,12	88,23	92,12	196,09	1,58	-0,12
Vtisk # 6	2416,70	178,89	159,03	123,36	247,36	1,42	-0,12
Vtisk # 7	4619,10	156,04	169,83	174,02	448,17	1,53	-0,13
Vtisk # 8	3921,80	121,06	92,13	74,59	341,90	1,09	-0,12
Vtisk # 9	3697,80	100,69	78,66	145,68	297,18	1,37	-0,13
\bar{x}	3598,00	130,037	125,008	142,895	339,60	1,33	-0,12
$\bar{\sigma}$	1634,063	63,50661	57,00245	69,78449	154,2316	0,37421	0,015275

Tab. 24 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 1 N

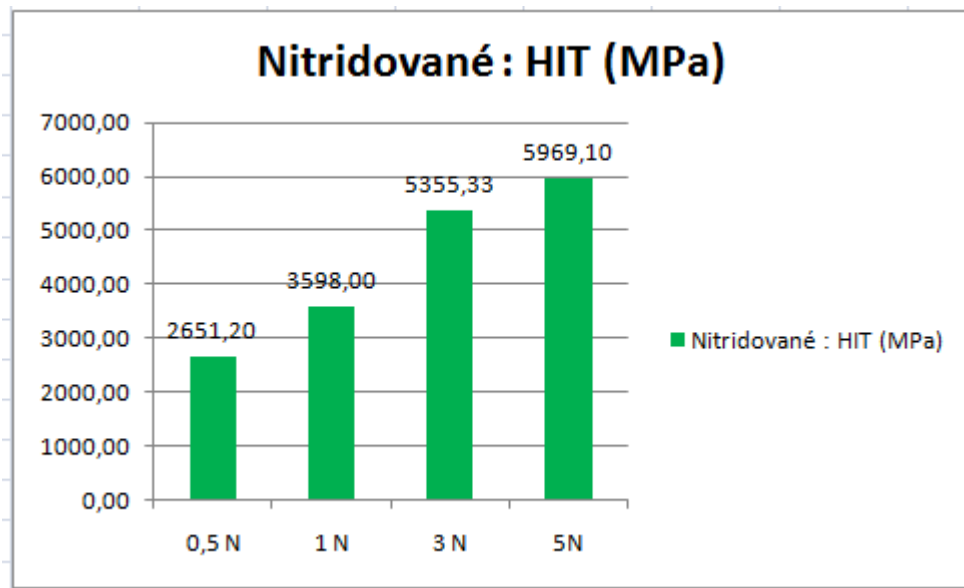
NITRIDOVANÉ - zaťaženie 3 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	4181,40	149,05	143,32	163,79	394,66	1,14	-0,12
Vtisk # 2	8779,20	261,18	229,55	287,01	828,63	1,32	-0,11
Vtisk # 3	3105,40	120,03	118,29	131,90	293,11	1,37	-0,12
Vtisk # 4	3225,60	154,13	130,45	144,59	299,37	1,22	-0,12
Vtisk # 5	8513,70	221,93	226,58	286,07	812,07	1,27	-0,11
Vtisk # 6	4312,50	150,71	147,09	154,11	427,55	1,17	-0,12
Vtisk # 7	4139,40	127,07	139,28	167,04	389,41	1,33	-0,11
Vtisk # 8	8674,60	233,51	219,36	261,38	819,94	1,19	-0,12
Vtisk # 9	3397,20	167,87	145,22	151,52	311,15	1,24	-0,12
\bar{x}	5355,33	176,75	163,72	194,23	505,47	1,28	-0,12
$\bar{\sigma}$	3013,568	74,54151	58,36794	81,91383	284,4363	0,120968	0,005774

Tab. 25 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 3 N

NITRIDOVANÉ - zaťaženie 5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	5614,10	187,73	174,84	206,30	529,89	1,19	-0,12
Vtisk # 2	6359,60	184,24	172,07	202,46	600,25	1,34	-0,12
Vtisk # 3	5933,60	175,83	165,35	193,22	560,05	1,31	-0,12
Vtisk # 4	5964,20	177,12	174,16	201,44	568,13	1,34	-0,12
Vtisk # 5	6458,50	186,56	178,26	205,81	612,74	1,27	-0,12
Vtisk # 6	6253,60	182,04	169,31	197,48	591,44	1,19	-0,12
Vtisk # 7	5542,30	178,85	164,24	195,66	524,99	1,32	-0,12
Vtisk # 8	5629,70	179,38	170,08	192,17	534,01	1,25	-0,12
Vtisk # 9	5789,40	173,67	163,97	192,58	541,61	1,31	-0,12
\bar{x}	5969,10	182,60	170,75	200,66	563,40	1,28	-0,12
$\bar{\sigma}$	374,0157	6,117164	4,880085	6,723214	35,29919	0,079373	0

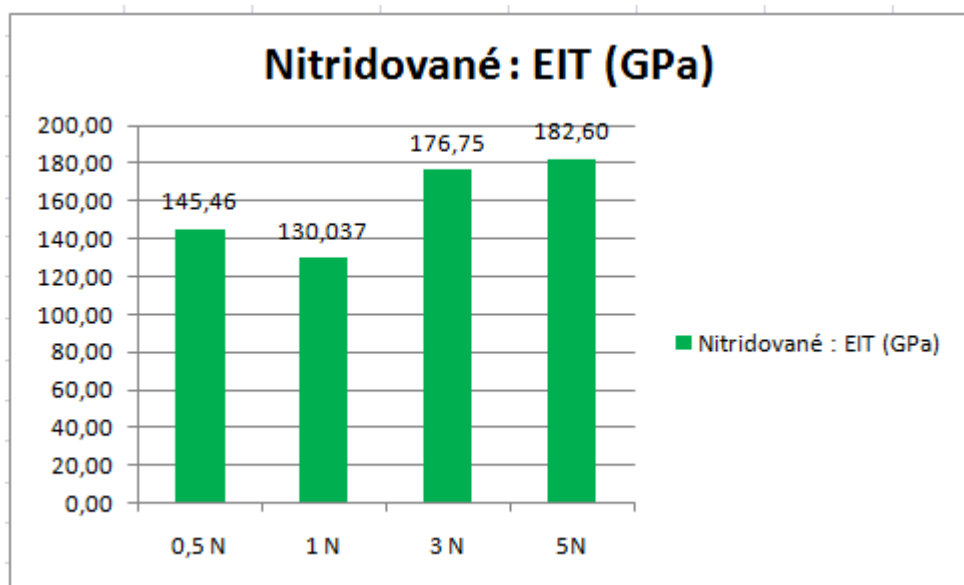
Tab. 26 Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 5 N

7.4.2 Grafické vyhodnotenie pre materiál 14 220 nitrídovaný



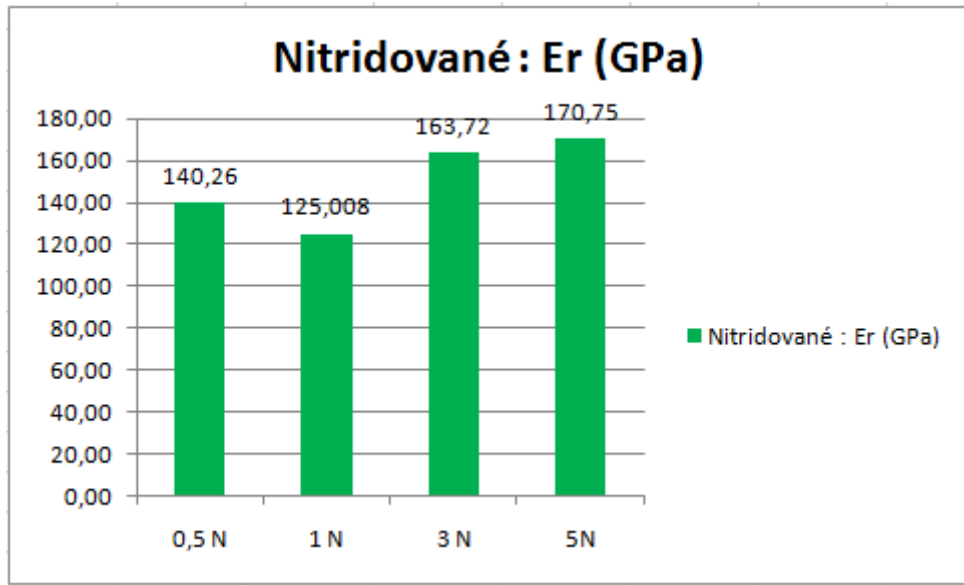
Obr. 41 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 nitrídovaný

Najvyššou nameranou hodnotou vtiskovej tvrdosti HIT pre oceľ 14 220 nitrídovanú bola 5966,10 MPa pri zaťažení 5N. Naopak najnižšia hodnota HIT bola 2651,20 MPa pri zaťažení 0,5N (obr. 41).



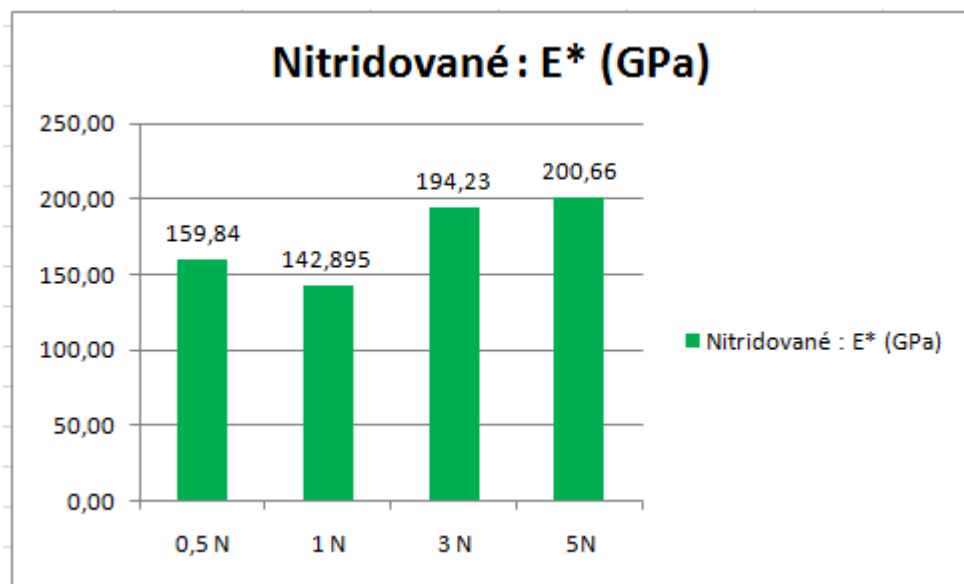
Obr. 42 Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 nitrídovaný

U nitrídovanej ocele 14 220 bola nameraná najvyššia hodnota vtiskového modulu EIT pri zaťažení 5N a to 182,60 GPa a naopak najmenšia hodnota EIT bola 130,037 GPa pri zaťažení 1N (obr. 42).



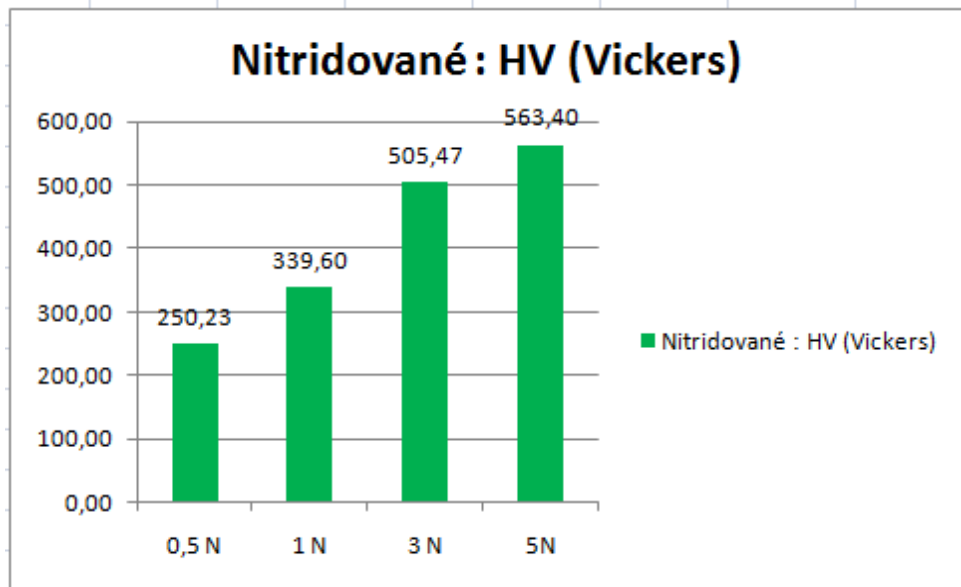
Obr. 43 Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 nitridovaný

Z výsledkov merania pre danú oceľ 14 220 nitridovanú vyplýva, že najvyššia nameraná hodnota redukovaného modulu Er bola 170,75 GPa a to pri zaťažení 5N, zatiaľ čo najmenšia hodnota Er bola 125,008 GPa pri použitom zaťažení 1N (obr. 43).



Obr. 44 Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 nitridovaný

U nitridovanej ocele 14 220 bola nameraná najvyššia hodnota komplexného modulu E* pri zaťažení 5N a to 200,66 GPa a naopak najmenšia hodnota E* bola 142,895 GPa pri zaťažení 1N (obr. 44).



Obr. 45 Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 nitridovaný

Najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdomosti podľa Vickersa pre ocel 14 220 nitridovanú je 563,40 HV a to pri zaťažení 5N. Naopak najnižšia nameraná hodnota je 250,23 HV pri zaťažení 0,5N (obr. 45).

7.5 Materiál 12 060 zušľachtovaný

7.5.1 Namerané hodnoty mikrotvrdomosti materiálu 12 060 zušľachtovaného

ZUŠĽACHŤOVANÉ - zaťaženie 0,5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	3202,50	297,68	254,51	327,12	302,27	1,84	-0,13
Vtisk # 2	3451,10	301,16	256,82	330,94	325,74	1,00	-0,11
Vtisk # 3	3069,70	292,98	251,37	321,95	289,74	1,51	-0,12
Vtisk # 4	3045,60	291,04	258,19	324,99	286,08	1,24	-0,13
Vtisk # 5	3450,70	300,04	253,94	330,11	325,35	1,58	-0,11
Vtisk # 6	3078,30	297,73	260,09	319,42	291,31	1,69	-0,11
Vtisk # 7	3246,80	297,95	255,01	326,86	309,93	1,81	-0,12
Vtisk # 8	3219,40	295,63	254,82	323,06	305,25	1,17	-0,13
Vtisk # 9	3076,50	295,18	259,63	328,74	290,67	1,46	-0,12
\bar{x}	3241,10	297,27	254,23	326,67	305,92	1,45	-0,12
σ	193,6077	4,105135	2,735513	4,511862	18,27495	0,423202	0,01

Tab. 27 Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 0,5 N

ZUŠLACHŤOVANÉ - zaťaženie 1 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	3027,40	276,99	240,53	304,39	285,74	1,14	-0,12
Vtisk # 2	3145,30	248,44	220,51	273,01	296,87	1,44	-0,13
Vtisk # 3	2991,00	276,69	240,32	304,05	282,31	1,31	-0,09
Vtisk # 4	2267,60	225,76	203,96	248,09	214,03	1,49	-0,13
Vtisk # 5	2884,70	250,01	221,63	274,74	272,27	0,86	-0,12
Vtisk # 6	2751,50	270,82	236,28	297,60	259,71	1,53	-0,11
Vtisk # 7	2664,00	245,28	218,24	269,54	251,44	1,42	-0,12
Vtisk # 8	2730,00	250,83	222,22	275,64	257,67	1,03	-0,09
Vtisk # 9	3015,10	242,87	216,50	266,89	284,58	1,22	-0,12
Vtisk # 10	2777,60	257,82	227,18	283,31	262,17	1,33	-0,13
Vtisk # 11	2697,50	255,25	225,37	280,50	254,61	1,38	-0,12
Vtisk # 12	2656,50	258,78	227,86	284,37	250,74	1,27	-0,12
\bar{x}	2800,68	254,96	225,05	280,18	264,35	1,29	-0,12
$\bar{\sigma}$	233,8723	14,79708	10,51421	16,25934	22,07301	0,197046	0,013706888

Tab. 28 Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachťovaný pri zaťažení 1 N

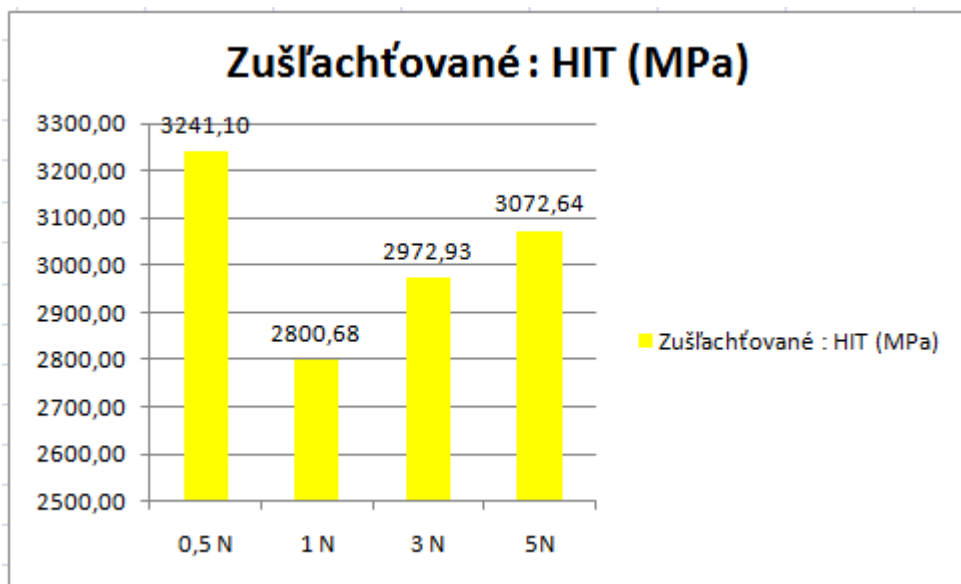
ZUŠLACHŤOVANÉ - zaťaženie 3 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	2979,60	229,41	206,66	252,10	281,24	1,23	-0,12
Vtisk # 2	2990,60	232,69	209,08	255,70	282,27	1,23	-0,13
Vtisk # 3	2948,60	235,24	210,95	258,50	278,30	1,20	-0,12
Vtisk # 4	2978,50	229,03	208,56	253,16	280,94	1,21	-0,13
Vtisk # 5	2990,10	232,55	208,93	255,04	282,06	1,23	-0,13
Vtisk # 6	2950,70	234,73	211,02	254,61	279,93	1,23	-0,12
Vtisk # 7	2977,30	229,53	209,15	250,10	280,52	1,21	-0,12
Vtisk # 8	2994,60	231,19	209,01	255,42	283,13	1,20	-0,13
Vtisk # 9	2938,40	233,25	211,08	257,07	277,34	1,23	-0,12
\bar{x}	2972,93	233,97	208,90	255,43	280,60	1,22	-0,12
$\bar{\sigma}$	21,77919	1,803122	2,150868	3,208323	2,060154	0,017321	0,005774

Tab. 29 Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachťovaný pri zaťažení 3 N

ZUŠĽACHŤOVANÉ - zaťaženie 5 N							
	HIT	EIT	Er	E*	HV	CIT	RIT
Vtisk # 1	3093,90	211,09	192,94	231,97	292,02	1,33	-0,12
Vtisk # 2	3062,50	223,15	202,02	245,22	289,06	1,28	-0,12
Vtisk # 3	3053,60	225,62	203,85	247,93	288,22	1,13	-0,12
Vtisk # 4	3091,50	221,13	200,51	243,00	291,79	1,13	-0,12
Vtisk # 5	3054,70	219,15	199,02	240,82	288,32	1,16	-0,12
Vtisk # 6	3093,40	224,72	203,19	246,95	291,97	1,25	-0,12
Vtisk # 7	2991,90	219,39	199,20	241,09	282,40	1,31	-0,12
Vtisk # 8	3153,70	229,37	206,63	252,05	297,67	1,26	-0,12
Vtisk # 9	3058,60	224,75	203,21	246,98	288,69	1,30	-0,12
\bar{x}	3072,64	222,04	201,17	244,00	290,02	1,24	-0,12
$\bar{\sigma}$	43,7502	5,225049	3,915198	5,740428	4,128296	0,078493	0,00

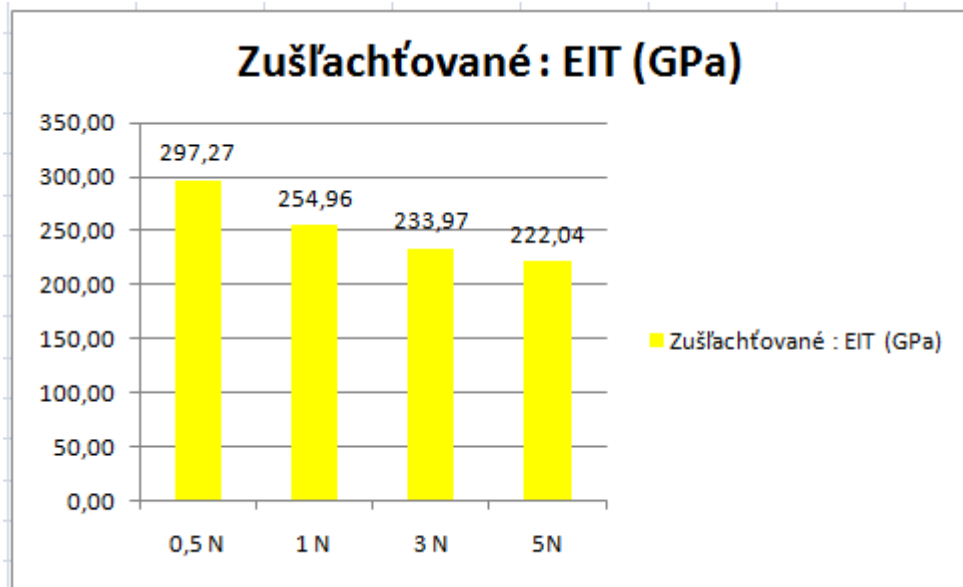
Tab. 30 Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 5 N

7.5.2 Grafické vyhodnotenie pre materiál 12 060 zušľachtovaný



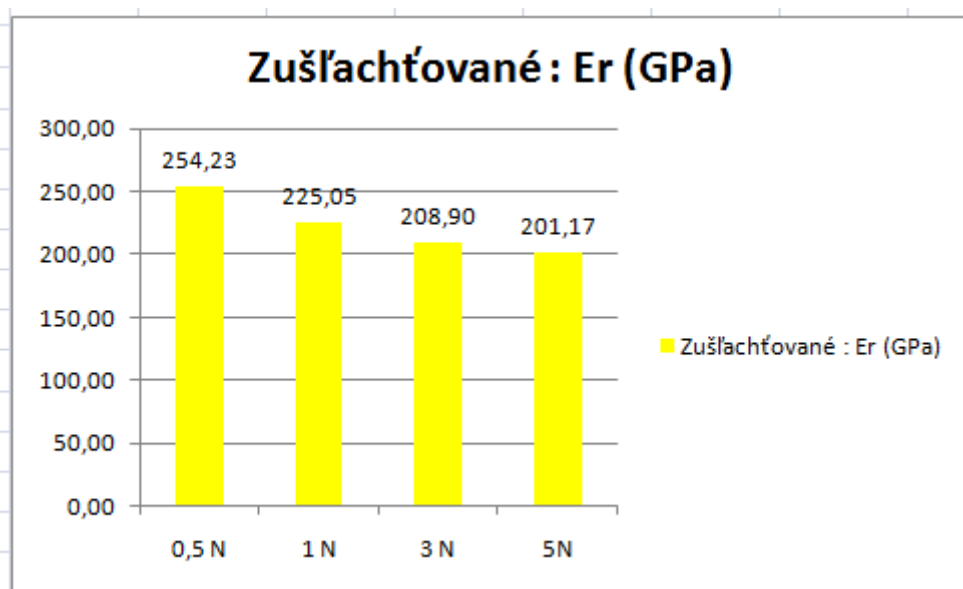
Obr. 46 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný

U zušľachtenej ocele 12 060 bola nameraná najvyššia hodnota vtiskovej tvrdosti HIT pri zaťažení 0,5N a to 3241,10 MPa. Naopak najnižšia hodnota HIT bola nameraná pri zaťažení 1N a to presne 2800,68 MPa (obr. 46).



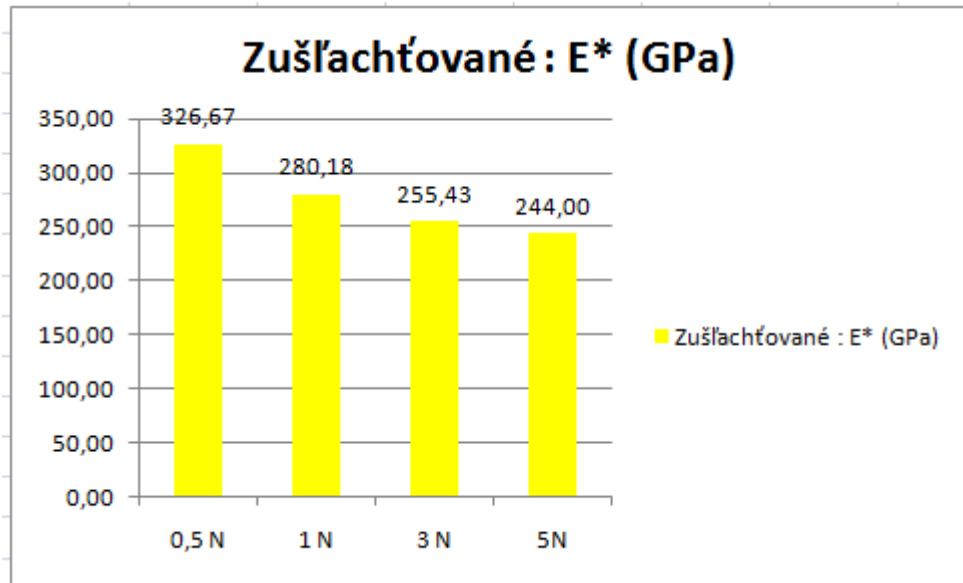
Obr. 47 Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 12 060 zušľachťovaný

Maximálna hodnota vtiskového modulu EIT pre zušľachtenú oceľ 12 060 je 297,27 GPa a to pri zaťažení 0,5N. Najmenšia hodnota EIT pre danú oceľ je 222,04 GPa pri zaťažení 5N (obr. 47).



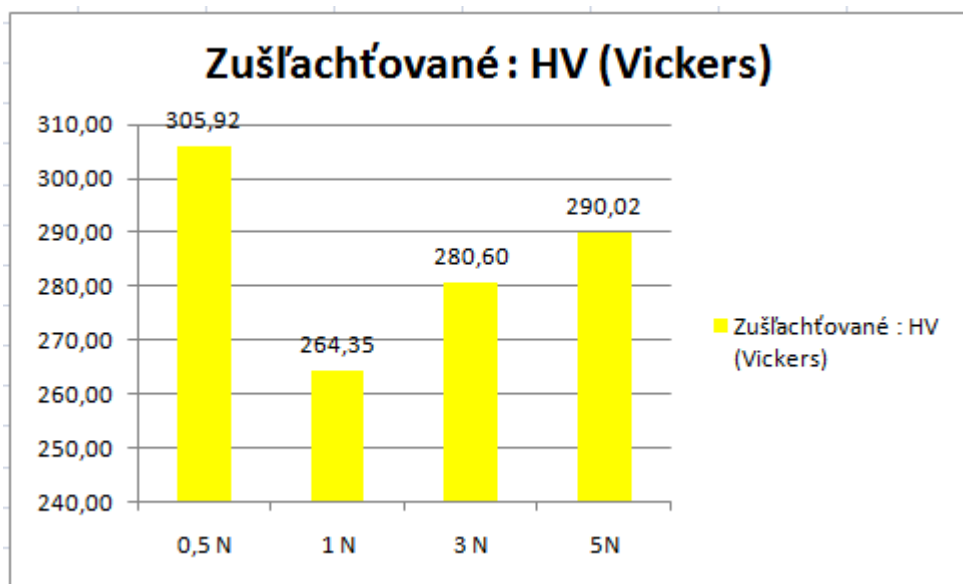
Obr. 48 Priebeh modulov reduk. Er (GPa) pre materiál 12 060 zušľachťovaný

Minimálna hodnota modulu redukovaného Er pre zušľachtenú oceľ 12 060 je 201,17 GPa pri zaťažení 5N. Naopak maximálna hodnota Er pre túto oceľ je 254,23 GPa pri zaťažení 0,5N (obr. 48).



Obr. 49 Priebeh modulov komplex. E^* (GPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný

Najvyššia nameraná hodnota modulu komplexného E^* pre ocel' 12 060 zušľachtenu bola 326,67 GPa a to pri zaťažení 0,5N. Naopak najnižšia nameraná hodnota pre tento materiál bola 244,00 GPa pri zaťažení 5N (obr. 49).



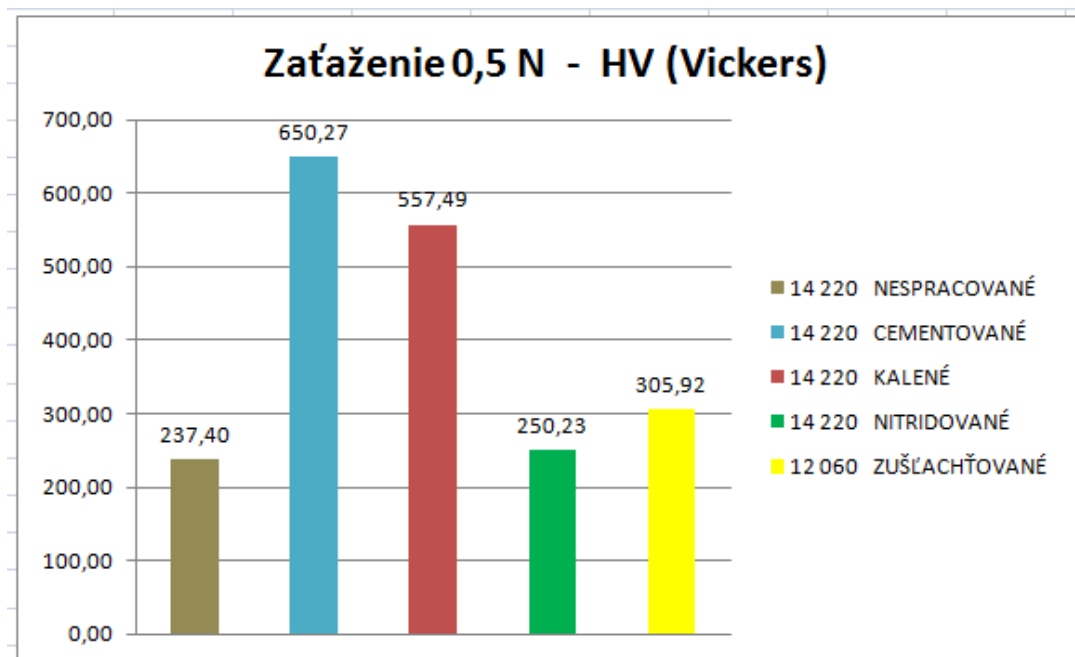
Obr. 50 Priebeh mikrotvrdošć HV (Vickers) pre materiál 12 060 zušľachtovaný

Z výsledkov merania je zrejmé, že najvyššia hodnota mikrotvrdošć podľa Vickersa u tejto zušľachtenej ocele 12 060 je 305,92 HV pri použitom zaťažení 0,5N. Najnižšia hodnota mikrotvrdošć bola nameraná pri zaťažení 1N a to presne 264,35 HV (obr. 50).

8 DISKUSIA VÝSLEDKOV

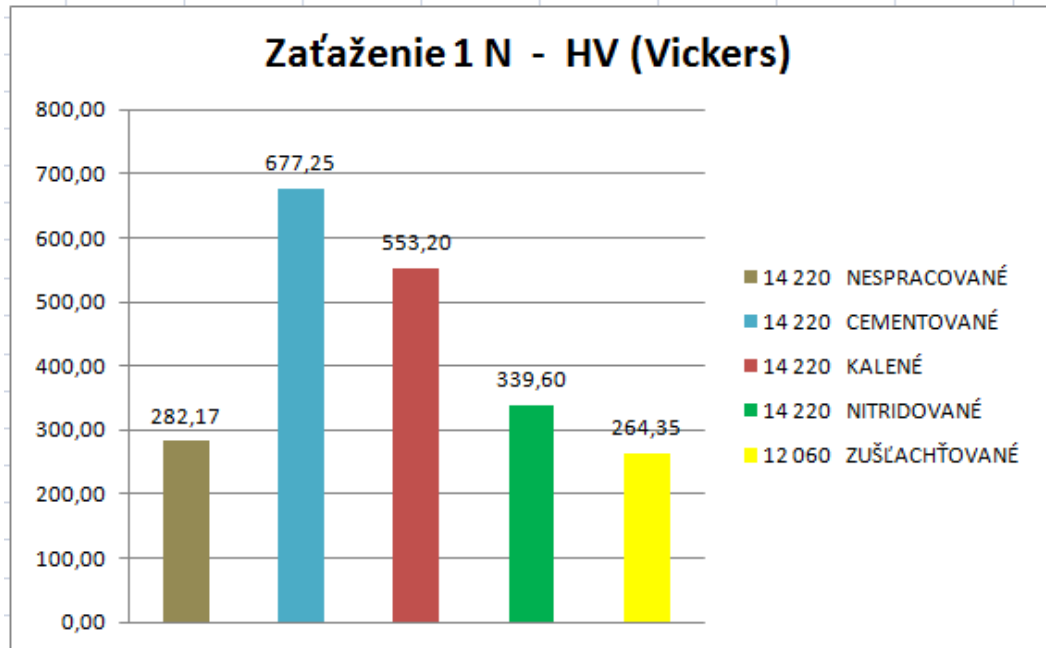
Táto diplomová práca sa zaoberá meraním mikrotvrdości u vybraných skúšobných vzoriek ocelí. Použité oceľové skúšobné vzorky boli tepelne a chemicky – tepelne spracované a porovnané so skúšobným vzorkom nespracovaným. Počet meraní bol na každom skúšobnom vzorku prevedený vždy **9x** pre dané zaťaženie. Meranie bolo prevádzané v univerzitných laboratóriách Ústavu výrobného inžinierstva UTB za použitia mikrotvrdomeru CSM Instruments. Každá použitá vzorka ocele bola zmeraná pre všetky štyri použité zaťaženia, a to **0,5N ; 1N ; 3N a 5N** .

8.1 Porovnanie mikrotvrdości skúšobných vzoriek pri zaťažení 0,5N



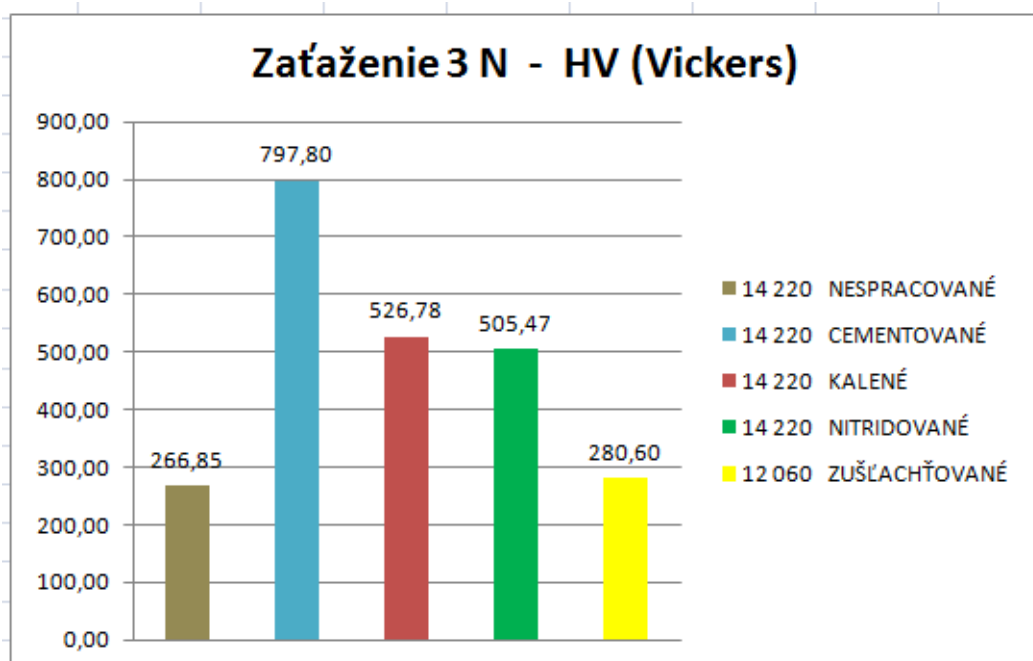
Obr. 51 Porovnanie hodnôt mikrotvrdości HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení 0,5N

8.2 Porovnanie mikrotvrdości skúšobných vzoriek pri zaťažení 1N



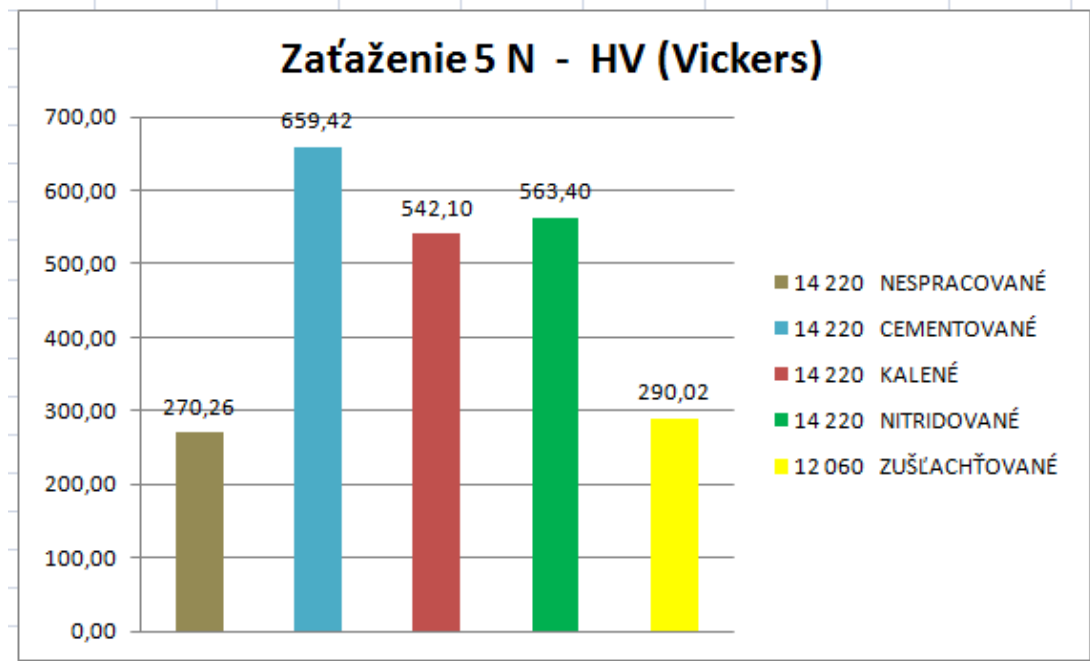
Obr. 52 Porovnanie hodnôt mikrotvrdości HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení 1N

8.3 Porovnanie mikrotvrdości skúšobných vzoriek pri zaťažení 3N



Obr. 53 Porovnanie hodnôt mikrotvrdości HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení 3N

8.4 Porovnanie mikrotrvdosti skúšobných vzoriek pri zaťažení 5N



Obr. 54 Porovnanie hodnôt mikrotrvdosti HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení 5N

8.5 Vyhodnotenie a porovnanie hodnôt mikrotrvdosti

Pri meraní mikrotrvdosti na skúšobných ocelových vzorkách pri zaťažení 0,5N sa ukázalo, že najvyšších hodnôt vtiskovej trvdosti a mikrotrvdosti podľa Vickersa bolo dosiahnuté u cementovanej a kalenej vrstvy (obr. 51). Najmenšie hodnoty boli namerané u tepelne nespracovaného skúšobného vzorku a nitridovaného vzorku. Táto skutočnosť sa javí, ako veľmi zaujímavá a nezvyčajná, pretože práve nitridované vrstvy dosahujú najvyšších hodnôt trvdosti. Takto výrazný pokles mohol byť spôsobený leštením povrchu skúšobného vzorku, u ktorého mohlo dojsť k odbrúseniu nitridovanej vrstvy. Cementovaná vrstva bola v porovnaní s nitridovanou dostatočne silná, o čom vypovedá nameraná hodnota mikrotrvdosti (obr. 51).

Pri pohľade na ďalšie grafické vyhodnotenie nameraných dát sa ukázalo, že namerané hodnoty mikrotrvdosti s rastúcim zaťažením sú približne rovnaké u skúšobných vzoriek, ktoré boli cementované, kalené a zušľachtené. Tento výsledok sa však nepotvrdil u vrstvy nitri-

dovanej. V tomto prípade došlo k nárastu hodnôt mikrotvrlosti so zvyšujúcim sa zaťaž-
ením pri skúške mikrotvrlosti metódou DSI. Z dôvodu, že všetky zvolené zaťaženia boli
aplikované maticovým systémom vpichov je možné, že nitridovaná vrstva nebola po celej
svojej ploche nanesená rovnomerne. To by znamenalo, že v určitých miestach na ploche
skúšobného ocelového vzorku budú hodnoty nitridovanej vrstvy naprosto odlišné. To je
jednoznačne vidieť na obrázkoch 51, 52, 53 a 54. V prípade, že by nitridovaná vrstva bola
nanesená na ploche skúšobného vzorku rovnomerne, tak pri vyšších zaťaženiach by určite
došlo k jej pretrhnutiu a tým tiež k poklesu hodnôt mikrotvrlosti. Pri nižších hodnotách
zaťaženia by boli hodnoty mikrotvrlosti určite odlišné a vykazovali by výrazný nárast.

ZÁVER

Diplomová práca rieši problematiku merania mikrotvrdości tepelne a chemicky – tepelne spracovaných skúšobných oceľových vzoriek. Zvolený materiál bola oceľ 14 220 a 12 060. Zaťaženie pri skúške mikrotvrdości podľa Vickersa bolo zvolené a použité 0,5N ; 1N ; 3N a 5N. Na každom skúšobnom vzorku bolo prevedené meranie mikrotvrdości metódou DSI vždy 9x pre zvolený typ zaťaženia. Namerané výsledky boli vyhodnotené a graficky znázornené.

Z nameraných výsledkov vyplýva, že najvyšších hodnôt mikrotvrdości bolo pri všetkých aplikovaných zaťaženiach dosiahnuté u cementovanej a kalenej vrstvy. Naopak najmenšie hodnoty mikrotvrdości vykazovali skúšobné vzorky, ktoré neboli žiadnym spôsobom spracované (základný materiál) a skúšobné vzorky, ktoré boli zušľachtené. Toto odpovedalo daným predpokladom.

Určitém prekvapením bolo meranie mikrotvrdości u nitridovanej vrstvy. V tomto prípade bolo dosiahnutých príliš nízkych hodnôt mikrotvrdości pri aplikácii najmenších zaťažení. S rastúcim zaťažením, ale dochádza ku zvýšeniu hodnôt mikrotvrdości, čo mohlo byť spôsobené nerovnomerným nanosením nitridovanej vrstvy na plochu daného skúšobného vzorku.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Z., LAMBOROVÁ, R.,: *Základy výrobních procesů, Konstrukční materiály - kovy*. Zlín, 2008, 72 s.
- [2] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J.,: *Strojírenská technologie 1, 1. díl*. Scienta Praha, 2007, 267 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [3] PTÁČEK, L. a kol.,: *Nauka o materiálu II*, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] DVOŘÁK, Z., LAMBOROVÁ, R.,: *Základy výrobních procesů, Tepelné zpracování ocelí a koroze*. Zlín, 2007, 20 s.
- [5] Prednášky z predmetu: *Nauka o materiálu II*.
- [6] DOLEŽAL, P., PACAL, B.,: *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. VUT Brno, 2006, 41 s.
- [7] TICHAVA, M.,: *Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví: Technická zpráva VUGPT Zlín*. Zlín, 1985.
- [8] RYBNIKÁŘ, F., DITRYCH, Z., KLÁCEL, Z. et al.,: *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha : SNTL, 1965.
- [9] PTÁČEK, L. a kol.,: *Nauka o materiálu I*, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001, 505 s.
- [10] PLUHAŘ, J. a kolektiv.,: *Nauka o materiálech*. SNTL Praha, 1989, 549 s. ISBN 04-205-89.
- [11] PÍŠEK, F.,: *Nauka o materiálu 2, 1. svazek*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1959, 658 s.
- [12] MACEK, K.,: *Tepelné zpracování kovových materiálů*. Praha : ČVUT, 2008.
- [13] UST.FME.VUTBR, [online]. 2004 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z WWW : <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_14220.pdf >
- [14] TECHNICKE-NORMY-CSN, [online]. 2006 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z WWW : <http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=%28412060%29-CSN-41-2060&kat=27337>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

D	Priemer oceleovej guľôčky. [mm]
h	Hĺbka odtlačku. [mm]
d	Guľový výsek skúšobnej guľôčky. [mm]
F	Zaťažujúca sila. [N]
F ₁	Sila predzaťaženia. [N]
F ₂	Sila zaťaženia. [N]
S	Plocha jamky. [mm ²]
h	Hĺbka jamky. [mm]
d ₁ , d ₂	Uhlopriečky. [mm]
a	Konštanta (Vickers).
HB	Tvrdosť určená podľa Brinella. [HB]
HV	Tvrdosť určená podľa Vickersa. [HV]
HK	Tvrdosť určená kužeľom. [HK]
HRA	Tvrdosť určená diamantovým kužeľom. [HRA]
HRB	Tvrdosť určená oceleovou guľôčkou. [HRB]
HRC	Tvrdosť určená diamantovým kužeľom. [HRC]
u	Dĺžka uhlopriečky. [mm]
x _i	I-tá hodnota meranej veličiny.
\bar{x}	Aritmetický priemer hodnôt meranej veličiny.
n	Počet meraní.
σ	Smerodajná odchýlka.
s	Sekunda.
π	Ludolfovo číslo.
Fe-C	Zlúčenina železa a uhlíka.

Fe ₃ C	Zlúčenina karbidu železa (cementit).
A	Austenit.
M	Martenzit.
F	Ferit.
P	Perlit.
B	Bainit.
ČSN	Česká štátna norma.
EN	Európska norma.
ISO	Medzinárodná norma.
HA	Mikrotvrdosť podľa Attingera.
HCH	Mikrotvrdosť podľa Chruščova.
HDC	Mikrotvrdosť podľa metódy dvojkužeľa.
KV	Tvar vrubu V.
HIT	Vtisková tvrdosť. [MPa]
EIT	Vtiskový modul. [GPa]
Er	Modul redukovaný. [GPa]
E*	Modul komplexný. [GPa]
HV	Mikrotvrdosť podľa Vickersa. [Vickers]
Ra	Priemerná aritmetická úchylka profilu. [μm]
Re	Medza klzu. [MPa]
Rm	Medza pevnosti. [MPa]
RE	Medza pružnosti. [MPa]
ARA	Anizotermický rozpad austenitu.
IRA	Izotermický rozpad austenitu.

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Všeobecný cyklus tepelného spracovania [4]	20
Obr. 2 Priebeh žihania [5]	21
Obr. 3 Znáznornenie oblastí žihacích teplôt v diagrame Fe-Fe ₃ C (žihanie: a - ku zníženiu pnutia, b – rekryštalizačné, c - na mätko, d - homogenizačné, e - normalizačné) [5].....	22
Obr. 4 Niektoré druhy žihania [5]	24
Obr. 5 Druhy kalenia [5].....	24
Obr. 6 Oblasti vhodných kaliacich teplôt v diagrame Fe –Fe ₃ C [4]	25
Obr. 7 Lomené kalenie (krivka 1) a spojité martenzitické kalenie (krivka 2) [5].....	26
Obr. 8 Termálne kalenie [5].....	27
Obr. 9 Kalenie so zmrazovaním [5]	27
Obr. 10 Nepretržité bainitické kalenie [5]	28
Obr. 11 Izotermické bainitické zušľachťovanie (krivka 1) - výsledná štruktúra: B+AZ a izotermické bainitické kalenie (krivka 2) - výsledná štruktúra: B+M+AZ [5]	29
Obr. 12 Časť rovnovážneho diagramu Fe-Fe ₃ C s vyznačeným pásmom obvyklých cementačných teplôt [4]	31
Obr. 13 Priebeh času a teplôt pri nitridovaní [4]	32
Obr. 14 Podstata skúšky tvrdosti podľa Brinella [8]	38
Obr. 15 Podstata skúšky tvrdosti podľa Vickersa [10]	39
Obr. 16 Podstata skúšky tvrdosti podľa Rockwella [8]	40
Obr. 17 Podstata skúšky mikrotvrdosti podľa Vickersa [6]	42
Obr. 18 Podstata skúšky mikrotvrdosti podľa Knoopu [6]	45
Obr. 19 Podstata skúšky mikrotvrdosti podľa Meincka a Attingera [11]	46
Obr. 20 Podstata skúšky mikrotvrdosti pomocou dvojkužeľa [11]	47
Obr. 21 Prístroj MTH na leštenie kovových skúšobných vzoriek	54
Obr. 22 Prístroj MTH na leštenie kovových skúšobných vzoriek s nainštalovaným metalografickým pieskovým papierom	55
Obr. 23 Mikrotvrdomer CSM Instruments – pohľad 1	56
Obr. 24 Mikrotvrdomer CSM Instruments – pohľad 2	56
Obr. 25 Priebeh zaťažovania pri skúške mikrotvrdosti	58
Obr. 26 Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 nespracovaný.....	61

Obr. 27 <i>Priebeh vtisk. modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný</i>	61
Obr. 28 <i>Priebeh modulov reduk. Er (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný</i>	62
Obr. 29 <i>Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 nespracovaný</i>	62
Obr. 30 <i>Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 nespracovaný</i>	63
Obr. 31 <i>Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 cementovaný</i>	65
Obr. 32 <i>Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný</i>	65
Obr. 33 <i>Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný</i>	66
Obr. 34 <i>Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 cementovaný</i>	66
Obr. 35 <i>Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 cementovaný</i>	67
Obr. 36 <i>Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 kalený</i>	69
Obr. 37 <i>Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 kalený</i>	70
Obr. 38 <i>Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 kalený</i>	70
Obr. 39 <i>Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 kalený</i>	71
Obr. 40 <i>Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 kalený</i>	71
Obr. 41 <i>Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 14 220 nitridovaný</i>	74
Obr. 42 <i>Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 14 220 nitridovaný</i>	74
Obr. 43 <i>Priebeh modulov redukovaných Er (GPa) pre materiál 14 220 nitridovaný</i>	75
Obr. 44 <i>Priebeh modulov komplexných E* (GPa) pre materiál 14 220 nitridovaný</i>	75
Obr. 45 <i>Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 14 220 nitridovaný</i>	76
Obr. 46 <i>Priebeh vtiskových tvrdostí HIT (MPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný</i>	78
Obr. 47 <i>Priebeh vtiskových modulov EIT (GPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný</i>	79
Obr. 48 <i>Priebeh modulov reduk. Er (GPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný</i>	79
Obr. 49 <i>Priebeh modulov komplex. E* (GPa) pre materiál 12 060 zušľachtovaný</i>	80
Obr. 50 <i>Priebeh mikrotvrdomostí HV (Vickers) pre materiál 12 060 zušľachtovaný</i>	80
Obr. 51 <i>Porovnanie hodnôt mikrotvrdomosti HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení</i> <i>0,5N</i>	81
Obr. 52 <i>Porovnanie hodnôt mikrotvrdomosti HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení</i> <i>1N</i>	82
Obr. 53 <i>Porovnanie hodnôt mikrotvrdomosti HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení</i> <i>3N</i>	82
Obr. 54 <i>Porovnanie hodnôt mikrotvrdomosti HV (Vickers) skúšob. vzoriek pri zaťažení</i> <i>5N</i>	83

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1</i> Číselné označenie ocelí [2]	16
<i>Tab. 2</i> Prehľad hlavných spôsobov tepelného spracovania [5]	21
<i>Tab. 3</i> Tvrdosť podľa Vickersa - oblasti skúšob. zaťaženia pre kovové materiály [6]	42
<i>Tab. 4</i> Skúšobné zaťaženie pre skúšku tvrdosti podľa Vickersa [6]	43
<i>Tab. 5</i> Skúšobné zaťaženie pre skúšku tvrdosti podľa Knoopu [6]	44
<i>Tab. 6</i> Skúšobné zaťaženie podľa Hanemanna [6]	47
<i>Tab. 7</i> Chemické zloženie ocele 12 060 [14]	52
<i>Tab. 8</i> Chemické zloženie ocele 14 220 [13]	52
<i>Tab. 9</i> Prehľad použitých skúšobných vzoriek	53
<i>Tab. 10</i> Jednotky nameraných veličín	59
<i>Tab. 11</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 0,5 N	59
<i>Tab. 12</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 1 N	59
<i>Tab. 13</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 3 N	60
<i>Tab. 14</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nespracovaný pri zaťažení 5 N	60
<i>Tab. 15</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 0,5 N	63
<i>Tab. 16</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 1 N	64
<i>Tab. 17</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 3 N	64
<i>Tab. 18</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 cementovaný pri zaťažení 5 N	65
<i>Tab. 19</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 0,5 N	68
<i>Tab. 20</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 1 N	68
<i>Tab. 21</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 3 N	68
<i>Tab. 22</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 kalený pri zaťažení 5 N	69
<i>Tab. 23</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 0,5 N	72
<i>Tab. 24</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 1 N	72
<i>Tab. 25</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 3 N	73
<i>Tab. 26</i> Namerané hodnoty pre materiál 14 220 nitridovaný pri zaťažení 5 N	73
<i>Tab. 27</i> Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 0,5 N	76
<i>Tab. 28</i> Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 1 N	77
<i>Tab. 29</i> Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 3 N	77
<i>Tab. 30</i> Namerané hodnoty pre materiál 12 060 zušľachtovaný pri zaťažení 5 N	78