

Mikrotvrdost kovů

Bc. Radek Šašinka

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek ŠAŠINKA**
Osobní číslo: **T10554**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Mikrotvrdost kovů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles pro zkoušku mikrotvrdosti**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených dat**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. David Maňas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

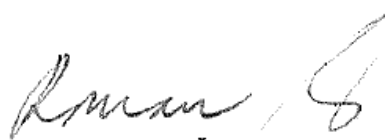
Datum zadání diplomové práce:

13. února 2012

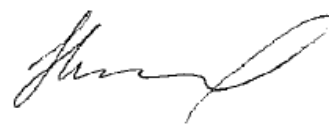
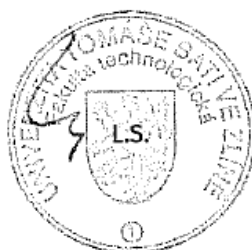
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: Šašínska Radek

Obor: Řízení jakosti

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít 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 15.5.2012



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 nevdělečně 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

Cílem mé diplomové práce je řešit problematiku mikrotvrlosti kovů, kde hlavním bodem mého zkoumání je vliv tepelného zpracování oceli na už vzpomínanou mikrotvrlost zadaných materiálů.

V teoretické části se soustředím na základní rozdělení a charakteristiku oceli, způsoby jejich tepelného zpracování, podstatu a způsoby měření tvrdosti a mikrotvrlosti.

V praktické části jsou statisticky zpracované a následně vyhodnocené naměřené hodnoty. Dále hodnotím vliv tepelného zpracování na mikrotvrlost zadaných materiálů. A toto reprezentuji pomocí měření mikrotvrlosti a to metodou podle Vickerse.

Klíčová slova: Vickers, způsoby tepelného zpracování, mikrotvrlost, rozdělení oceli, tvrdost

ABSTRACT

The aim 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 characteristics of steels, different methods of heat treatment them, principle and methods measurement of the hardness and microhardness.

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

Keywords:

Vickers, Methods of heat treatment, Microhardness, Classification of Steels, Hardness

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při řešení diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 MIKROTVRDOST	13
1.1 MIKROTVRDOST	15
1.2 MIKROTVRDOST DLE VICKERSE.....	15
1.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	15
1.2.2 Podstata zkoušky	16
1.2.3 Označování tvrdosti	17
1.2.4 Zkušební těleso.....	17
1.2.5 Provedení zkoušky	18
1.3 MIKROTVRDOST DLE KNOOPA.....	19
1.3.1 Zkouška tvrdosti dle Knoopu	19
1.3.2 Podstata zkoušky	19
1.3.3 Označování tvrdosti	20
1.3.4 Zkušební těleso.....	20
1.3.5 Provedení zkoušky	20
2 TVRDOST	22
3 NANOTVRDOST	23
4 OCELE	25
4.1 ROZDĚLENÍ OCELÍ DLE CHEMICKÉHO SLOŽENÍ	25
4.1.1 Nelegované ocele	25
4.1.2 Legované ocele.....	25
4.2 ROZDĚLENÍ OCELÍ DLE SKUPIN JAKOSTÍ	26
4.2.1 Hlavní skupiny jakosti nelegovaných ocelí.....	26
4.2.2 Hlavní skupiny jakosti legovaných ocelí.....	27
5 ZPŮSOBY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLU	28
5.1 ŽIHÁNÍ.....	29
5.1.1 Žihání bez překrytalizace.....	30
5.1.2 Žihání s rekrystalizací	30
5.2 KALENÍ.....	32
5.2.1 Martenzitické kalení.....	33
5.2.2 Bainitické kalení.....	35
5.3 POPOUŠTĚNÍ	37
5.3.1 Popouštění za nízkých teplot (100 až 350°C).....	37
5.3.2 Popouštění za nízkých teplot (100 až 350°C).....	37
5.4 CHEMICKY-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	38
5.4.1 Cementování	38
5.4.2 Nitridování	39
5.4.3 Nitrocementování	40
5.4.4 Karbonitridování	41

5.4.5	Sulfonitridování a sulfonizování	41
5.4.6	Difúzní chromování	41
5.4.7	Boridování.....	41
5.4.8	Difúzní hliníkování	41
5.5	TEPELNĚ – MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ	41
5.5.1	Nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování	42
5.5.2	Vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování.....	42
5.5.3	Izoforming	43
5.5.4	Řízené válcování a ochlazování	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
6	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	45
6.1	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	46
6.2	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	47
6.2.1	Žíhaní na měkko.....	47
6.2.2	Kalení a následné popuštění.....	47
6.3	POUŽITÉ TYPY MATERIÁLŮ	48
6.4	PŘÍPRAVA MATERIÁLŮ.....	48
7	MATERIÁL OCEL ČSN 419436.....	49
7.1	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ.....	49
7.2	VLASTNOSTI A POUŽITÍ MATERIÁLU.....	49
7.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI OCELI 419436.....	50
7.3.1	Kalené a následné popuštěné zkušební tělesa ocel 419436.....	50
7.3.2	Zkušební tělesa ocel 419436 tepelně nezpracované.....	53
7.3.3	Zkušební tělesa ocel 419436 žíhané na měkko	57
8	MATERIÁL OCEL ČSN 419573.....	61
8.1	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ.....	61
8.2	VLASTNOSTI A POUŽITÍ MATERIÁLU.....	61
8.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI OCELI 419573	62
8.3.1	Kalené a následné popuštěné zkušební tělesa ocel 419573.....	62
8.3.2	Zkušební tělesa ocel 419436 tepelně nezpracované.....	66
8.3.3	Zkušební tělesa ocel 419573 žíhané na měkko	69
9	DISKUSE VÝSLEDKŮ	73
9.1	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	73
9.2	VTISKOVÝ MODUL PRUŽNOSTI E_{IT}	74
9.3	CREEP	75
9.4	ELASTICKÁ A PLASTICKÁ DEFORMAČNÍ PRÁCE W_E A W_P	75
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80

SEZNAM OBRÁZKŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	83

ÚVOD

Diplomová práce řeší problematiku mikrotvrlosti kovů, hlavní podstatou práce je vliv tepelného zpracování ocelí na už zmiňovanou mikrotvrlost zadaných materiálů. Zkoušky mikrotvrlosti jsou velmi výhodné, protože zatím, co při makrotvrlosti se zjišťuje tvrdost kovů jako krystalického celku, je možné při mikrotvrlosti stanovit tvrdost jednotlivých struktur součástí kovu. Při použití velmi malého zatížení, jaké se používá při měření mikrotvrlosti, je výlisek tak malých rozměrů, že nepřesáhne oblast jednotné strukturní oblasti. Zkouškami mikrotvrlosti je možné určit tvrdost jednotlivých strukturních součástí a z něj určovat nerovnorodost materiálu v závislosti na jeho chemické složení, způsoby zpracování a mikroskopické uspořádání.

Tepelným zpracováním rozumíme záměrné využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu ke změně struktury a tím získání požadovaných mechanických a nebo strukturních vlastností výrobku, polotovaru. Tepelné zpracování spočívá na principu ohřevu na požadovanou teplotu, vydrží na této teplotě a ochlazování určitou rychlostí, tzn. požadované změny struktury a vlastností se dosáhnou řízenými změnami teploty.

Mikrotvrlost použitých materiálů, které jsou různě tepelně ovlivněné následně zkoumám metodou měření mikrotvrlosti, konkrétně metodou podle Vickerse. V diplomové práci se též zabírám základním rozdělením použitých ocelí, rozborem jednotlivých metod tepelného zpracování materiálů jako i podstatou a metodami měření tvrdosti a mikrotvrlosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MIKROTVRDOTOST

Mikrotvrdotost patří mezi významné mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů a je velmi často využívána v technické praxi. Hlavní předností zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a dále také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku a jeho polotovarech nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek. [1]

Tvrdotost lze definovat jako odolnost materiálu (povrchu materiálu v měřené lokalitě) proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vakacím tělesem - indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace. [3]

Jeden z nejstarších způsobů zkoušení tvrdosti realizoval v roce 1722 Reamur pomocí tyče s proměnlivou tvrdostí od jednoho konce k druhému, přičemž hodnota tvrdosti byla určována podle polohy vrypu, kterou zkoušený materiál na měrné tyči zanechal. Dalším stupínkem ve vývoji měření tvrdosti byla známá Mohsova stupnice (v roce 1822) relativní povrchové tvrdosti, která zahrnovala deset materiálů, v rozsahu od 1 do 10. Autorem vrypové zkoušky je Martens. Ta spočívala v tažení raménka opatřeného diamantovým hrotem (s vrcholovým úhlem 90°) po vyleštěném povrchu zkušební vzorku a měření šířky výsledného vrypu. Číslem tvrdosti bylo aplikované zatížení, které na povrchu vzorku vytvořilo vryp široký 0,1 mm. Výhodou byla možnost využít jediného záznamu k měření relativní tvrdosti různých fází a složek obsažených v mikrostruktuře včetně změn tvrdosti na hranicích zrn. Kvantitativní měření tvrdosti bylo postupně rozvíjeno až do dnešní doby, kdy jsme schopni hodnotit tvrdost pomocí přesně daných podmínek měření, což umožňuje řadu aplikací. [3]

Zkoušky tvrdosti lze dělit podle různých hledisek: Podle principu rozeznáváme zkoušky vrypové, vnikací, nárazové a odrazové, podle rychlosti působení zátěžné síly dělíme zkoušky tvrdosti na statické a dynamické, rozeznáváme zkoušky makro i mikrotvrdotosti.

Nejpoužívanější, tj. statické zkoušky tvrdosti jsou charakteristické tím, že vznikající těleso tvrdoměru je vtlačováno do povrchu zkušební vzorku monotónně se zvyšující silou do dosažení předepsaného zatížení, které je pak udržováno na konstantní úrovni po určitou stanovenou dobu. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoop. V současné technické praxi u kovových

materiálů převládají zkoušky vznikající měřením tvrdosti podle Vickerse (název pochází od anglické firmy Vickers, výrobce tvrdoměrů, autory zkoušky byli G.E. Sanland a L. Smith v roce 1925). Základním a společným znakem těchto metod je vtlačování vnikajícího tělesa (indentoru) přesně definovaného tvaru přesně definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. [3]

V průběhu zkoušky vznikne na povrchu tělesa trvalý vtisk v důsledku rozvoje plastických deformací v okolí vnikajícího tělesa. Po odlehčení se geometrie vtisku proměňuje a jeho velikost je mírou odporu materiálu proti vnikání cizího tělesa. Hodnota tvrdosti se vypočte jako velikost trvalé deformace (plochy nebo hloubky vtisku) v relaci k působící zátěžné síle. Vnikající těleso při tom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat co nejvyšší tvrdost, modul a mez pružnosti. [1]

Tvrdost není možné charakterizovat jako jednoznačně definovanou fyzikální veličinu, protože výsledek měření tvrdosti závisí na celé řadě vlivů, například:

- na elastických vlastnostech měřeného materiálu, zejména na modulu pružnosti v tahu a ve smyku
- na plastických vlastnostech zkoušeného materiálu, zejména na mezi kluzu a charakteru deformačního zpevnování
- na velikosti zátěžové síly působící na vnikající těleso

Tvrdost stejného kovu může mít různou tvrdost v závislosti:

- na velikosti zrna (jemnozrnné materiály vykazují vyšší hodnoty tvrdosti v důsledku vyššího odporu hranic zrn vůči vnikání cizího tělesa)
- na teplotě (v důsledku vyšší teploty se vlivem roztažnosti stávají vazby mezi atomy méně pevné) množství cizích příměsí (veškeré příměsi, zejména heterogenně, snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat a zvyšují tak tvrdost)
- na vnitřním pnutí (způsobené např. tvářením za studena, nerovnoměrným ochlazením součástí atd. zvyšují tvrdost)

1.1 Mikrotvrдость

V tomto případě je měření tvrdosti realizováno vtačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807 N). Zatímco běžné zkoušky (makro)tvrdosti podle Vickerse jsou prováděny při zatíženích mezi 10 a 1200 N, první použití sil nižších než 10 N se datuje do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky provedeny v National Physical Laboratory ve Velké Británii. [1]

S klesajícími aplikovanými silami (se zmenšující se velikosti vtisku) při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Navíc s klesající zátěžnou silou do oblasti mikrotvrdsti již není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrdsti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení. [3]

Protože vtisky při zkoušení mikrotvrdsti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

- malé nebo tenké součásti
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušebního vzorku
- měření mikrotvrdsti strukturních složek a fází
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků
- hodnocení svarových spojů
- pro hodnocení oduhličujících procesů
- studium difúzních pochodů
- měření křehkých materiálů
- atd.

1.2 Mikrotvrдость dle Vickerse

1.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je předepsána evropskou normou ČSN ISO 6507-1, a to pro tři rozdílné oblasti zkušebního zatížení (viz. Tabulka). [3]

Tab. 1 Tvrdość dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály

Oblast zkušebního zatížení, F (N)	Symbol tvrdości	Počáteční zatížení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdości podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdości podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdości podle Vickerse

Poznámka:

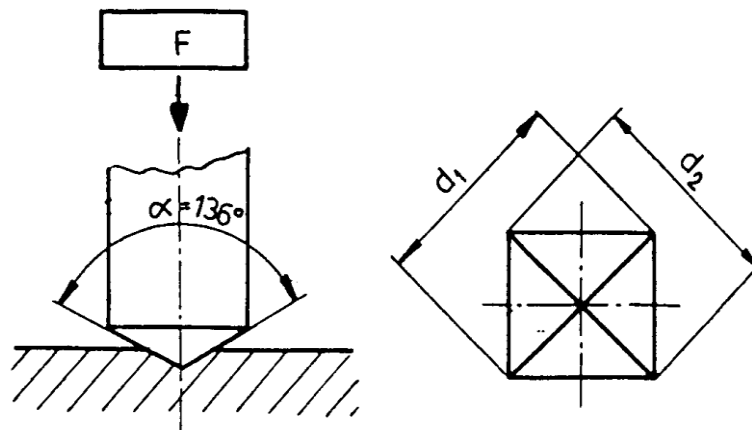
Hodnoty zkušebního zatížení uváděné v evropské normě jsou počítány ze zkušebního zatížení v kilogramech (tato jednotka zatížení byla pro tvrdość stanovena dříve, než byl přijat systém \SI). V současné době jsou v normě ponechány tyto jednotky (kilogramy), avšak při následující revizi se bude uvažovat o výhodnosti zaokrouhlených hodnot zkušebního zatížení a následných důsledků na stupnici tvrdości. [3]

To znamená, že při měření tvrdości dle Vickerse používáme zkušební zatížení v kilogramech, ale zátěžnou sílu použitou při měření uvádíme v newtonech.

Např. tvrdość HV 1 znamená, že působící zatížení na indentor je 1 kilogram, ale zátěžná síla se udává jako 9,807 N. [1]

1.2.2 Podstata zkoušky

Diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem (136°) mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního tělesa. [3]



Obr. 1 Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse

$$HV = 0,012 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

1.2.3 Označování tvrdosti

Tvrdost dle Vickerse se označuje symbolem HV za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby (10 – 15 s):

Př. 1: 60 HV 30 = tvrdost dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2 N působícím po dobu od 10 do 15 s.

Př. 2: 640 HV 30/20 = tvrdost dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2 N působícím po dobu 20 s.

1.2.4 Zkušební těleso

Zejména při měření tvrdosti při nízkém zatížení a při mikrotvrdosti musí být umožněno přesné měření úhlopříček vtisku. Hodnocený zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se připravuje jako metalografický výbrus, tzn. Nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu.

Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu.

Tloušťka zkušebního tělesa nebo vrstvy musí být nejméně 1,5násobek délky úhlopříčky vtisku. [1]

1.2.5 Provedení zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce tak, aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2 s a větší než 8 s. Tato doba nesmí u zkoušky u tvrdosti při nízkém zatížení a zkoušky mikrotvrdosti nesmí překročit 10 s a současně nesmí rychlost zatěžování překročit 0,2 mm/s. Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s.

Jednotlivé vtisky musí být umístěné tak, aby byla splněna podmínka, že vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenosti středů každého vtisku od okraje zkušebního vzorku musí být nejméně 2,5násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. [3]

Tab. 2 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
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		29,42	HV 0,1	0,9807

Zajímavost:

Vhledem k nutnosti velmi přesného měření úhlopříček vtisku musí být zajištěn přesný tvar vnikajícího tělesa (indentoru). Jak ji bylo uvedeno vnikajícím tělesem dle Vickerse je diamant pravidelného čtyřbokého jehlanu. Vrcholový úhel mezi protilehlými stěnami musí být $(136 \pm 0,5)^\circ$. Tento úhel se ověřuje dvoukruhovým goniometrem o přiměřené přesnosti. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být vzhledem k ose vnikajícího tělesa skloněny pod stejným úhlem (úhly se mohou lišit nejvýše o $0,5^\circ$) musí se protínat v jednom bodě, délka společné hrany mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí přesáhnout $0,5 \mu\text{m}$.

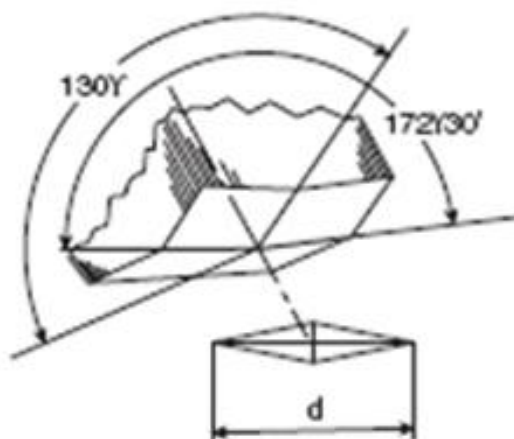
„Mikrotvrdot dle Knoopa

1.2.6 Zkouška tvrdosti dle Knoopa

Zkouška tvrdosti dle Knoopa pro kovové materiály je předepsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545 a zahrnuje zkušební zatížení do 9,807 N včetně.

1.2.7 Podstata zkoušky

Diamantové vnikající těleso ve tvaru jehlanu s kosočtvercovou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran je vlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení F (viz.obr. 2) [1]



Obr. 2 Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoopa

Tvrдост dle Knoopa je následně vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž se uvažuje jako jehlan s kosočtvercovou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlem vnikajícího tělesa:

$$HK = \frac{P}{C_p \cdot L^2}$$

1.2.8 Označování tvrdosti

Tvrдост dle Knoopa se označuje symbolem HK za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby (10 – 15 s):

Př.: 640 HK 0,1 = tvrdost dle Knoopa 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu od 10 do 15 s.

Př.: 640 HK 0,1/20 = tvrdost dle Knoopa 640, stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu 20 s.

1.2.9 Zkušební těleso

Obdobně jako při měření tvrdosti dle Vickerse musí být umožněno přesné měření delší úhlopříčky vtisku. Hodnocený zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se připravuje jak metalografický výbrus, tzn., že nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu. [3]

1.2.10 Provedení zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce tak, aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od začátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí být v rozmezí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 $\mu\text{m/s}$. Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s. [3]

Jednotlivé vtisky musí být umístěny tak, aby byla splněna podmínka, že vzdálenost střed dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek kratší úhlopříčky vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenosti středů každého vtisku od okraje zkušební vzorku musí být nejméně 2,5násobek kratší úhlopříčky vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. [1]

Zajímavost:

Stejně jako v případě tvrdosti dle Vickerse i u tvrdosti dle Knoopu musí být zajištěn přesný tvar vnikajícího tělesa (indentoru). Jak již bylo uvedeno vnikajícím tělesem dle Knoopu kolmý diamantový jehlan s kosočtvercovou podstavou. Vrcholové úhly mezi protilehlými stěnami musí být $(172,5 \pm 0,3)^\circ$ a $(130 \pm 0,3)^\circ$. Tyto úhly se ověřují dvoukruhovým gonio- metrem o přiměřené přesnosti. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být vzhledem k ose vnikajícího tělesa skloněny pod stejným úhlem (úhly se mohou lišit nejvýše o $0,5^\circ$) a musí se protínat v jednom bodě, délka společné hrany mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí přesáhnout $1,0 \mu\text{m}$.

2 TVRDOST

Tvrdot se dá definovat jako odolnost materiálu (povrchu materiálu v měřené lokalitě) proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vnikajícím tělesem - indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatěžování. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace. [1]

Tvrdot však není žádnou fyzikální definovatelnou vlastností, ale je výsledkem celé řady vlastností hmoty a to hlavně vlastností povrchu.

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší a nejrozšířenější zkoušky kovů a jiných technických materiálů (jedná se prakticky o zkoušky nedestruktivní, protože funkční a vzhledové porušení zkoušených dílů je většinou bezvýznamné). [3]

Z tvrdosti často usuzujeme některé další vlastnosti materiálu (pevnost tahu, obrábitelnost apod.). Zkoušky se provádí na zkušebních vzorcích nebo přímo na hotových výrobcích.

Zkoušky tvrdosti jde dělit podle různých hledisek:

- podle principu rozeznáváme zkoušky: vrypové, vnikající, nárazové, odrazové
- podle rychlosti působení zatěžující síly: statické, dynamické
 - statické: Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell, IR HD a Shore A, D
 - dynamické: Poldi Kladivo, Baumannovo kladivo, Duroskop
- podle způsobu zatěžování a typu deformací: staticko-plastické, dynamicko-plastické, dynamicko-elastické
- zkoušky marko a mikrotvrdoti

3 NANOTVRDOST

Při dalším snižování zátěžových sil se dostáváme do oblasti tzv. nanotvrdomi, kde měření tvrdosti se provádí pomocí instrumentované zkoušky umožňující získat závislost velikosti působícího zatížení a hloubky vtisku. Jedná se o velmi malá zatížení velikosti až 1 nN, kde hloubky vtisků se mohou pohybovat v hodnotách 0,1 nm. [3]

Záznam závislosti zatížení a hloubky vtisku je využíván při měření velmi tenkých vrstev, povlaků, filmů, a také strukturních složek ve slitinách. V řadě případů je získaný záznam využíván k měření dalších mechanických veličin, např. základních mechanických vlastností včetně modulu pružnosti v tahu, lomové houževnatosti křehkých materiálů atd.

Při měření nanotvrdomi se používá řada vnikajících tělísek vyrobených z různých materiálů, nejčastějším materiálem je diamant vzhledem k jeho tvrdosti a vysokému modulu pružnosti, což významně snižuje vliv deformace indentoru na výsledky měření. Jako vnikající těleso se v oblasti nanotvrdomi přednostně používá trojboký jehlan dle Berkoviche, který zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku jako Vickersův jehlan, ale oproti jehlanu podle Vickerse (který je zakončen krátkým – u nejlepších hrotů jen cca 0,5 mikron dlouhým – příčným ostřím) má výhodu v možnosti vybrousit jeho špičku do bodu a zachovat tak geometrickou podobnost různě velkých a tedy i těch nejmenších vtisků. Jiným používaným indentorem je kulička, která oproti Berkovichovu vnikajícímu tělesu má výhodu postupného nárůstu zatížení nejprve v rozsahu elastických deformací a umožňuje tak identifikovat přechod od elastických k plastickým deformacím a vyhodnotit mez kluzu a zpevňování materiálu. Problémy s výrobou kulových indentorů pro měření nanotvrdomi z tvrdých materiálů jsou příčinou, proč je v oblasti nanotvrdomi přednostně používána Berkovichova metoda. Někdy se jako vnikající těleso používá také hrot ve tvaru rohu krychle, což je ostřejší hrot v porovnání s hrotem podle Berkoviche, tím tento hrot vyvolává větší napětí a deformace v okolí vtisku, čímž v okolí vtisku u křehkých materiálů vznikají dobře definovatelné trhlinky. To je mnohdy s výhodou využíváno při měření lomové houževnatosti v mikroobjemech. Nanoindentory ve tvaru kužele mají výhodu vyplývající ze skutečnosti, že u tohoto tvaru nevzniká koncentrace napětí na ostrých hranách jako u ostatních indentorů. Malý rozsah použití konických tvarů indentorů je způsoben potížemi při výrobě diamantového hrotu s bodovým zakončením. [1]

Vlastní proces zkoušení probíhá pro všechny tvary vnikajících těles následovně:

Při vtlačování vnikajícího tělesa do materiálu vznikají jak elastické, tak plastické deformace a tvar vtisku je dán tvarem vnikajícího tělíska. Po odlehčení zůstanou jen nevratné plastické deformace, což umožňuje rozlišit velikost elastických a plastických deformací. [1]

4 OCELE

Ocele jsou nejčastěji používanými kovovými materiály. Legováním uhlíkem a dalšími prvky a kombinací tepelného a tepelně-mechanického zpracování je možné ovlivnit vlastnosti ocele v širokém rozmezí a tak jejich vlastnosti přizpůsobit zamýšlenému použití. Strukturální složky jsou popsány v binárním diagramu železo-uhlík. Hustota ocele je $7,85 \text{ g/cm}^3$. V současné době se vyrábí asi 2500 druhů oceli. V normách (ČSN, DIN atd.) jsou ocele rozdělené do skupin jednak dle chemického složení, jednak dle struktury, mechanických a fyzikálních vlastností. [2]

Pro svoje mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším technickým materiálem. Její všestrannost jako materiálu pro stavbu strojů, zařízení, nástrojů apod. vede k výrobě ocelí o nejrůznějších vlastnostech. Doteď ČSN stanovující klasifikaci, složení a vlastnosti ocelí jsou přepracované a upravované z hlediska mezinárodních a evropských norem (ISO a EN). Smyslem toho je dosáhnout podstatného zlepšení stavu norem na základě zkušeností shromážděných v minulosti a nejnovějšího vývoje v hutním a ocelářském průmyslu, přizpůsobení norem ČSN normám ISO a EN. Ocele k tváření jsou materiály, které hmotnostní podíl železa je větší než kterýkoliv jiný prvek a které všeobecně mají obsah uhlíku menší než 2% a obsahují i jiné prvky. [2]

4.1 Rozdělení ocelí dle chemického složení

4.1.1 Nelegované ocele

Nelegované ocele nazývané také uhlíkové ocele. Obsah legujících prvků je nižší než 2%. Zpravidla nejsou tepelně zpracované.

4.1.2 Legované ocele

Legované ocele se dělí dále na:

Nízko legované ocele – obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je nižší než 5%. Mají podobné vlastnosti jako ocele nelegované, ale jsou vhodné pro tepelné zpracování. Tepelným zpracováním je u nich možnost ovlivnit mechanické vlastnosti. [4]

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

4.2 Rozdělení ocelí dle skupin jakostí

4.2.1 Hlavní skupiny jakosti nelegovaných ocelí

Ocele obvyklých jakostí – jsou to druhy nelegovaných ocelí, kde požadavky na jakost nevyžadují zvláštní opatření při výrobě, musí však splňovat tyto podmínky:

- Nejsou určeny pro tepelné zpracování
- Požadavky, které je nutné dodržet pro nezpracovaný, nebo normalizační žíhavý stav
- Nejsou předepsané další zvláštní kvalifikační charakteristiky
- S výjimkou Si a Mn nejsou předepsané žádné další obsahy legovacích prvků

Nelegované jakostní ocele – jsou to druhy nelegovaných ocelí, pro které všeobecně není předepsaná rovnoměrná reakce na tepelné zpracování, ani požadavky na stupeň čistoty. Jsou však na ně kladeny přísnější anebo dodatečné požadavky než na ocele obvyklých jakostí, takže výroba ocele vyžaduje větší pozornost. [2]

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

- ocele s požadavky na nárazovou práci v zušlechtěném stavu
- ocele s požadavky na hloubku zakalené vrstvy nebo povrchovou tvrdost
- ocele s požadavky na obzvlášť nízké obsahy nekovových částí
- ocele s předepsaným max. obsahem fosforu a s min. obsahem síry (např. dráty pro vysoko namáhané pružiny, přídavné svářecí dráty, dráty na kordy pneumatik atd.)
- ocele s hodnotami nárazové práce min. KV větší než 27 J při -50°C
- ocele pro jadrové reaktory
- ocele s předepsanou hodnotou elektrické vodivosti
- feriticko - perlitické ocele s předepsaným obsahem uhlíku
- ocele pro předpínací výztuž do betonu

4.2.2 Hlavní skupiny jakosti legovaných ocelí

Legované jakostní ocele – jde o ocele určené pro podobné účely jako nelegované jakostní ocele. Aby ale vyhovovaly zvláštním podmínkám použití, obsahují legovací prvky v obsazích, které z nich dále dělají legované ocele. Nejsou všeobecně určené pro zušlechťování a nebo povrchové kalení. [5]

Patří sem:

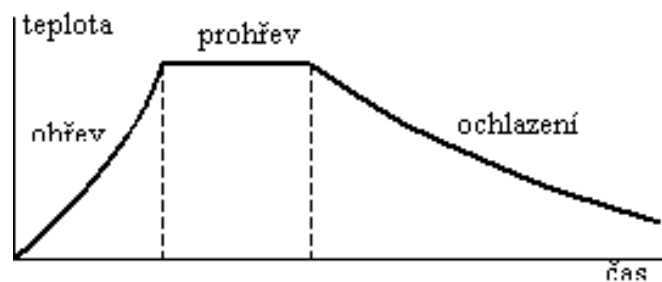
- svařovatelné jemnozrnné konstrukční ocele pro ocelové konstrukce tlakových nádob a potrubí
- ocele legované jen křemíkem, nebo křemíkem a hliníkem se zvláštními požadavky na magnetické a elektrické vlastnosti
- ocele určené pro výrobu kolejnic
- ocele pro ploché výrobky válcované za tepla, anebo za studena, které jsou určené pro náročnější tváření za studena a legované jednotlivě, nebo v kombinaci bór, niob, titan, vanad, zirkon
- ocele legované jen mědí

Legované ušlechtilé ocele – jde o ocele, u kterých je dosahováno požadovaných zpracovatelských a užitných vlastností. Patří sem hlavně nerezavějící ocel, žáruvzdorné a žáropevné ocele, ocele na valivá ložiska, nástrojové ocele pro ocelové konstrukce a pro stavbu strojů, ocele se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a jiné. Rozdělujeme je na následující skupiny:

- Nerezavějící ocel s obsahem uhlíku $C \leq 1,20\%$ a obsahem chromu $Cr \geq 10,5\%$. Podle obsahu Niklu $< 2,5\%$ nebo $Ni \geq 2,5\%$
- Rychlořezné ocele se stanoveným obsahem $C \geq 0,6\%$ a $Cr=(3 \text{ až } 6)\%$
- Ostatní legované ušlechtilé ocele

5 ZPŮSOBY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLU

Tepelné zpracování ocelí provádíme za účelem dosažení vlastností, které měl materiál například před tvářením za tepla a nebo tvářením za studena, kdy v materiálu vzniká určité napětí a nežádoucí pnutí, které mají špatný vliv na další zpracování, nebo pro jejich konečné použití. Tepelným zpracováním se dá dosáhnout požadovaných magnetických vlastností u materiálu se zvláštními magnetickými vlastnostmi. [2] Tepelné zpracování ocelí je ohřev nad překryštalizační teplotu a nebo pod ni, a rychlejší či pomalejší ochlazování.



Obr. 3 Všeobecný cyklus tepelného zpracování

Podle výšky teploty, na kterou zpracovávaný materiál zahřejeme a podle rychlosti ochlazování (u chemicko-tepelného zpracování taktéž za použití vhodného difúzního síťování kovů a nebo nekovů) rozeznáváme tyto způsoby tepelného zpracování:

- Žihání
- Kalení
- Popouštění
- Chemicko-tepelné zpracování
- Tepelné-mechanické zpracování

Tepelné zpracování se volí dle požadovaných vlastností materiálu.

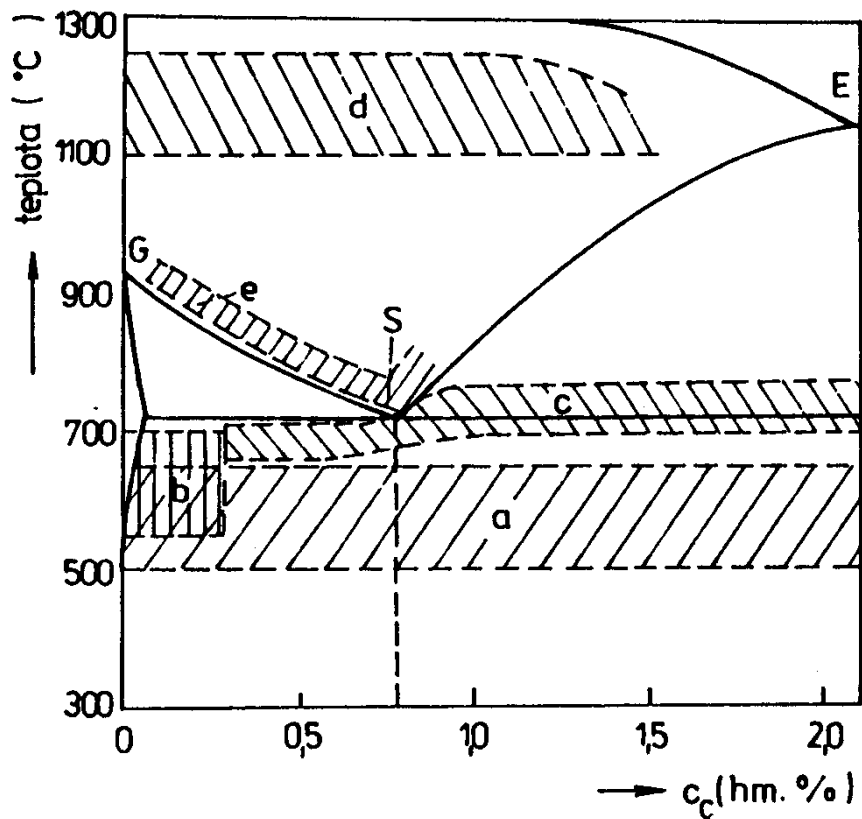
5.1 Žihání

Snaha o dosažení stavu součásti, který je blízký rovnovážnému, je to místní ohřev na teplotu žihání, výdrž na této teplotě a velmi pomalé ochlazení. [2]

Obr. 4 Průběh žihání

Žihání dále dělíme:

- Žihání bez překrystalizace
- Žihání s překrystalizací



Obr. 5 Znáznornění oblastí žihanych teplot v diagramu Fe-Fe₃C

(žihání: a – ke snížení pnutí, b – rekrystalizační, c – na měkko,

d – homogenizačně, e – normalizačně)

5.1.1 Žihání bez překrytalizace

Žihací teplota je pod teplotami (A_1) fázových přeměn. Nemění se při něm typ krystalizační mřížky základních fází slitiny a po dobu ohřevu nedochází k fázovým přeměnám, způsob rozložení cementitu a feritu se však může změnit. [4]

Druhy žihání bez překrytalizace:

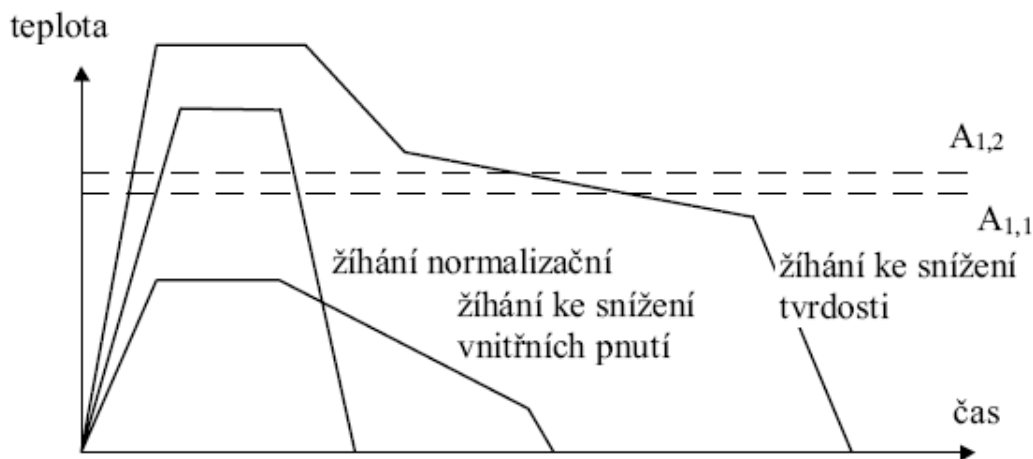
- a) Žihání ke stabilizaci rozměrů ($100 - 150^{\circ}\text{C}$) – použití pro kalibry a měřidla, výdrž na teplotě několik týdnů
- b) Rekrystalizační žihání ($550 - 700^{\circ}\text{C}$) – používá se při a po tváření za studena, ohřev na teplotu v oblasti rekrystalizace, výdrž a ochlazení zpravidla pod ochrannou atmosférou
- c) Žihání ke snížení vnitřního pnutí ($500 - 650^{\circ}\text{C}$) – použití po sváření, obrábění, tváření za tepla, výdrž 1 – 10 hod., pomalé ochlazení v peci na $250 - 300^{\circ}\text{C}$, dochlazení na vzduchu
- d) Žihání na měkko (na A_1) – před obráběním hlavně nástrojových, ale i konstrukčních ocelí za účelem snížení tvrdosti – dosažení globulární struktury
- e) Žihání k odstranění křehkosti po moření

5.1.2 Žihání s rekrystalizací

Při žihání s rekrystalizací je teplota vyšší jako A_{c1} , a proto dochází k částečné, nebo úplné rekrystalizaci ferito-cementické struktury na austenit. Vedle odstranění vnitřního pnutí, snížení tvrdosti a zvýšení obrobiteľnosti, jde žiháním odstranit vliv primární krystalizace a upravit sekundární strukturu. [5]

Druhy žíhání s překrystalizací:

- a) Normalizační žíhání – používá se ke zrovnoměrnění struktury po tváření za tepla a odlévání, ohřev 30 – 50⁰C nad A1 Ac_m, výdrž na teplotě do dosažení homogenního austenitu, ochlazení na vzduchu na teplotu 650⁰C a potom dochlazení v peci.
- b) Homogenizační žíhání – slouží k vyrovnání chemického složení difúzí, (1000 – 1300), výdrž po dobu několika desítek hodin, potom normalizační žíhání (jemnější struktura)
- c) Základní žíhání – obdoba normalizačního žíhání – ochlazování v peci, nelegované ocele – 200⁰C h⁻¹, legované ocele – 50⁰C h⁻¹. Výsledná struktura je hrubozrná.
- d) Žíhání s částečnou austenitizací – ohřev mezi A1 a Ac_m, výdrž k dosažení heterogenní směsi A a F ochlazení na vzduchu a nebo v peci.
- e) Žíhání ke zvětšení zrna
- f) Žíhání izotermické
- g) Žíhání rozpouštěcí



Obr. 6 Některé druhy žíhání

5.2 Kalení

Ohřev na teplotu kalení 30 – 70⁰C nad Ar3 Ar1, výdrž a ochlazování tak rychle, aby ve struktuře nevznikal F (ferit) a P (perlit), ale aby výsledná struktura byla tvořená jen M (martenzitem) a nebo B (bainitem). [2]

Je to způsob tepelného zpracování, jehož cílem je dosáhnout stav odlišný od rovnovážného. Podle převažující struktury složky se kalení dělí na:

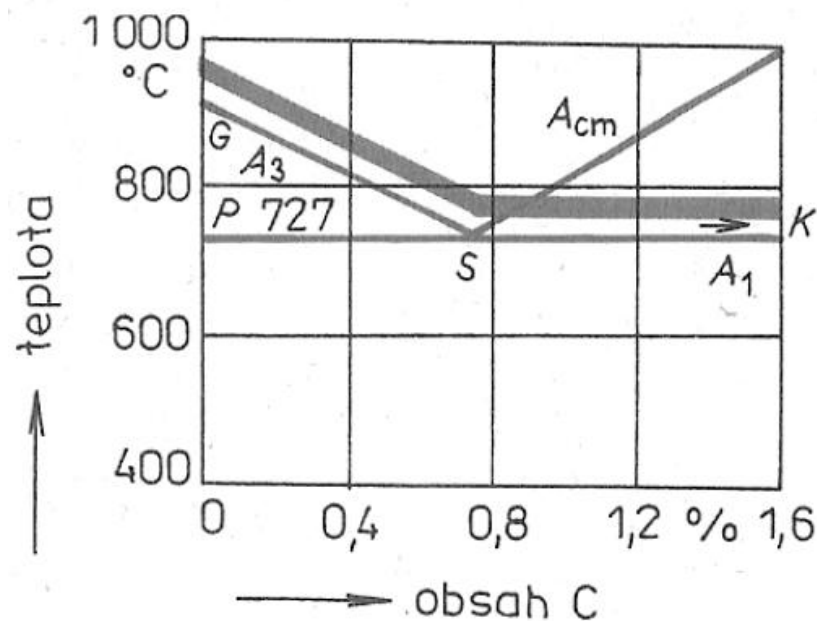
- Martenzitické kalení
- Bainitické kalení

Tab. 3 *Druhy kalení*

Kalení	
<p><i>Martenzitické:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • do studené lázně (přímé, lomené, přerušované) • do teplé lázně (termální) • se zmrazováním • povrchové 	<p><i>Bainitické:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • do studené lázně • do teplé lázně (izotermické zušlechťování)

Kalící prostředí:

- a) Voda – velmi rychlé ochlazení, vytvoří se parní polštář, který se poruší v oblasti martenzitické přeměny. Použití pro nelegované a nízkolegované oceli
- b) Olej – velmi rychlé ochlazení, vytvoří se parní polštář, který se poruší při vhodnějších teplotách. Použití legované oceli
- c) Solná koupel – ochlazování plynulé, z počátku intenzivnější jak u oleje, v oblasti martenzitické přeměny je pomalejší
- d) Kovová koupel – obdoba solné, používá se pro olovo
- e) Vzduch – použití rychlořezné oceli [2]



Obr. 7 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C

Kalitelnost – schopnost materiálu vytvořit novou strukturu

- Nekalitelné ocele (0,2% C)
- Dobře kalitelné ocele (0,35% C)

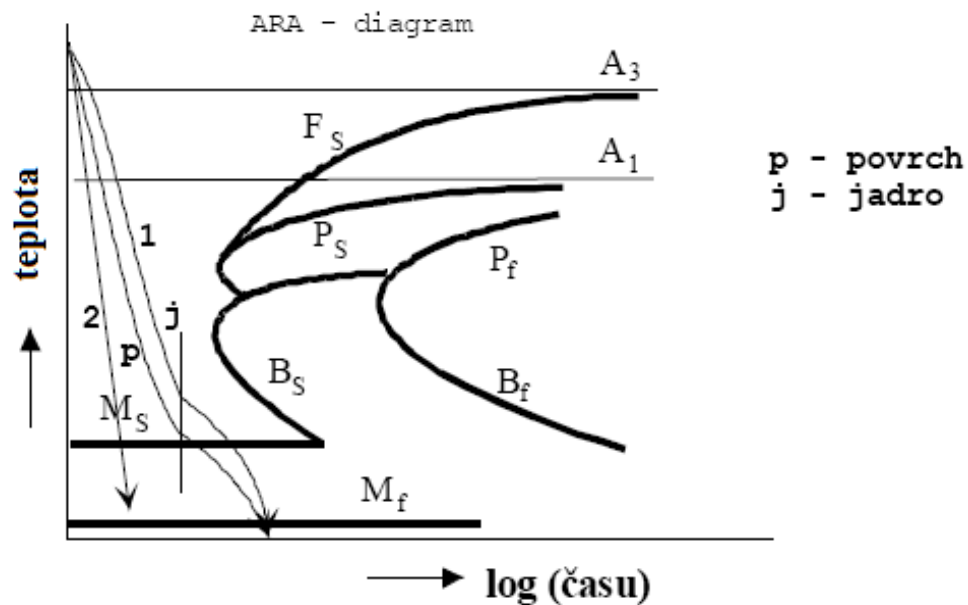
Překalitelnost – schopnost ocele dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem tvrdosti odpovídající 50% obsahu martenzitu ve struktuře. [4]

5.2.1 Martenzitické kalení

Účelem je získání vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Při tomto způsobu kalení ochlazujeme dílky tak rychle, aby ochlazovací křivky jeho povrchu i středu protínali křivky počátku difúzního rozpadu austenitu. Kalící teploty podeutek. ocelí leží 30°C až 50°C nad A₃, nadeutek. oceli se kalí z teplot 30°C až 50°C nad A₁. Po zakalení tvoří strukturu podeutek. celí martenzit s podílem zůstatkového austenitu. U ocelí se v zakalené struktuře vyskytuje martenzit, vyšší podíl zůstatkového austenitu a nerozpuštěný sekundární cementit, který zlepšuje odolnost materiálu vůči opotřebení. Při kalení oceli z teplot nad A_{cm} by došlo k rozpuštění sekundárního cementitu do austenitu a protože rostoucí množství uhlíku rozpuštěného v austenitu způsobuje pokles teploty M_s a M_f, zvýšilo by se množství zůstatkového austenitu ve struktuře. [4]

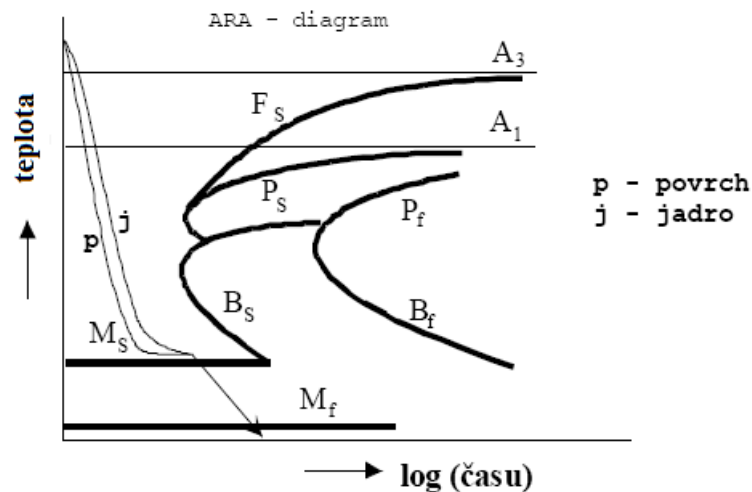
Druhy martenzitického kalení:

- a) Nepřetržité – ohřev 30 – 70°C nad A3 A1, výdrž a ochlazení ve vodě nebo v oleji na teplotu nižší jako M_f, následuje popouštění
- b) Přetržité
- c) Lomené – ochlazení ve dvou různých kalících prostředcích (voda a olej nebo olej a vzduch), první k potlačení bainitické přeměny, druhé při zmírnění pnutí (složitější předměty)



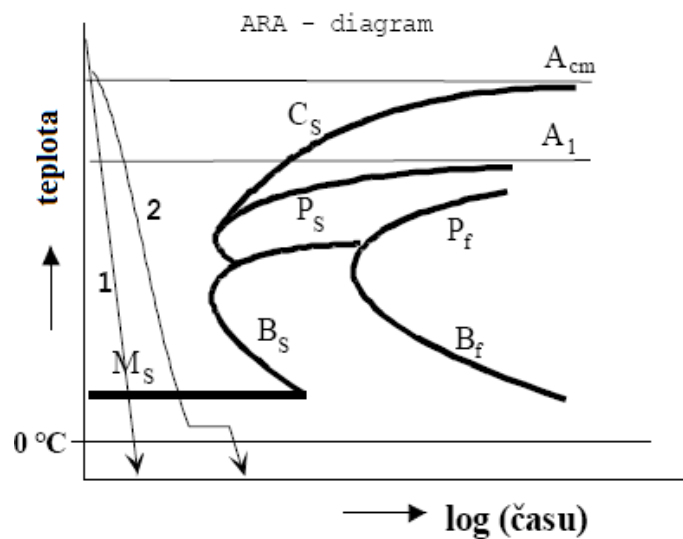
Obr. 8 Lomené kalení (křivka 1) a spojité martenzitické kalení (křivka 2)

- d) Termálně – izotermická výdrž při teplotě 20 – 30°C nad M_s, pro snížení pnutí a odstranění deformací a k vyrovnání teplot na povrchu a ve vnitru materiálu, ochlazení a výdrž v solné koupeli a potom volné dochlazení na vzduchu, použití pro nelegované a nízkolegované ocele.



Obr. 9 Termální kalení

- e) Se zmrazováním – používá se jen u nadeutektoidních ocelí, kde je M_f pod bodem mrazu, zvyšuje se rozpad A_z a M , zmrazení musí proběhnout hned po zakalení, jinak dojde ke stabilizaci A_z , použití ke stabilizaci rozměrů, valivých ložisek a měřidel.



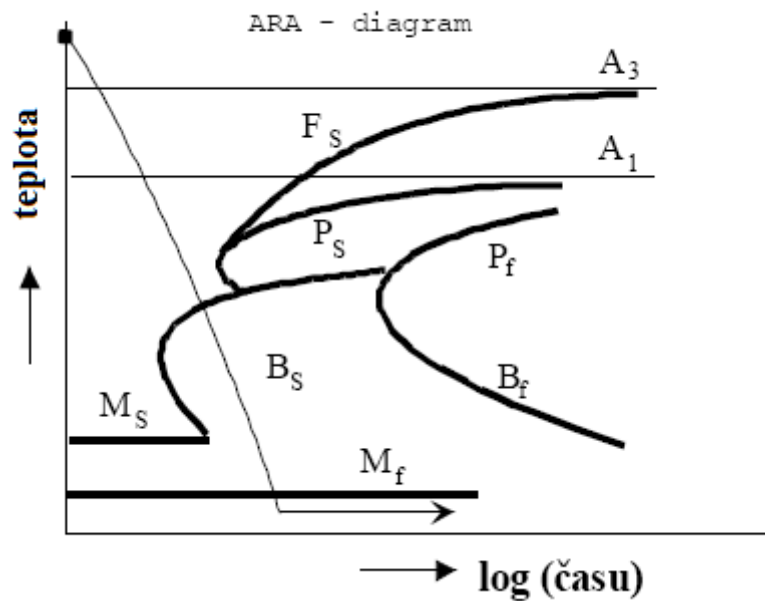
Obr. 10 Kalení se zmrazováním

5.2.2 Baitické kalení

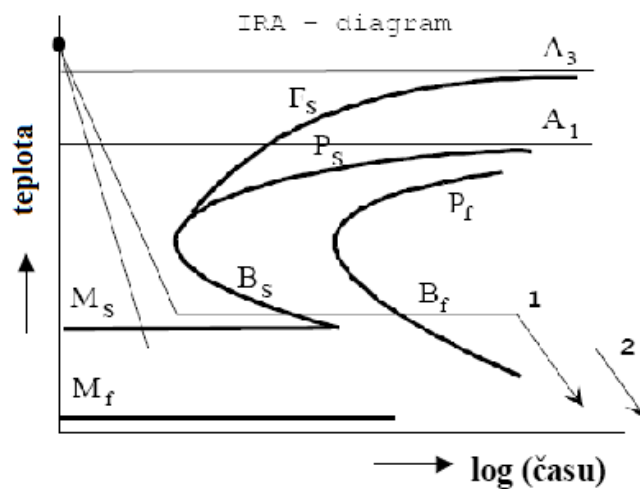
Při baintickém kalení se transformuje austenit na bainit, buď v průběhu plynulého ochlazování, tj. při poklesu teploty a nebo izotermicky, tj. při konstantní teplotě. [2]

Druhy bainitického kalení:

- a) nepřetržitě – může přeběhnout jen u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu
- ARA – plynulý rozpad přes celou bainitickou oblast, A (austenit) se mění na B (bainit) nebo B a M (martenzit), následuje popouštění. [2]

Obr. 11 *Nepřetržitě bainitické kalení*

- b) izotermické
- zušlechťování – je ochlazení v solných nebo kovových koupelích, výdrž na teplotě nad M_s přes celou bainitickou oblast – struktura tvořená B (+Az) - deformace malé, nepopouští se, pro nízko legované a legované ocele.
 - Kalení – je ochlazení v solných nebo kovových koupelích, výdrž při teplotě pod M_s – struktura tvořená B + M (+Az), popouští se, dochlazení na vzduchu.

Obr. 12 *Izotermické banitické zušlechťování*

5.3 Popouštění

Následné zpracování po kalení – ohřev pod A1 – se provádí za účelem snížení pnutí, křehkosti a částečného snížení tvrdosti. [2]

5.3.1 Popouštění za nízkých teplot (100 až 350°C)

Pro nástrojové ocele a ocele na zápustky, ke snížení citlivosti na nárazy, zmírnění křehkosti, tvrdost příliš neklesá, největší tvrdost je při ohřevu na 100 – 180°C, sníží se jen vnitřní pnutí. Popouštění může být místní a nebo celkové. [2]

5.3.2 Popouštění za nízkých teplot (100 až 350°C)

Provádí se pro získání vysokých R_m , R_e a odolnosti na nárazy. Kalení + popouštění za vysokých teplot nazýváme zušlechťování. Zušlechťování při 400 – 550°C používáme na pružiny, dosahujeme tak vysokých mezí pružnosti. Legovací prvky zpomalují pokles tvrdosti při vysokých teplotách. Pochody při popouštění jsou řízené difúzí.

Výsledné struktury:

- 100 až 180°C nízkopopouštěný materiál
- 200 až 400°C vysocepopouštěný materiál
- 500°C sorbit (globulární cementit)
- pod A1 globulární perlit

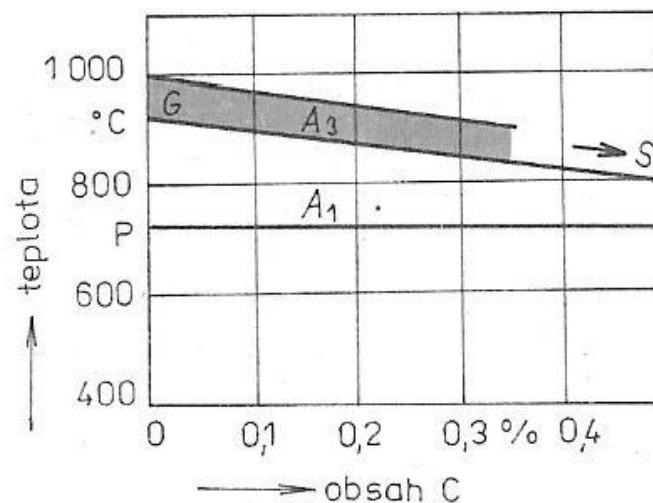
5.4 Chemicky-tepelné zpracování

Chemicko-tepelným zpracováním rozumíme způsoby difúzního sítění povrchu oceli různými prvky (C, N, C+ N, B, Si, Al a jiné, nekovy a kovy) s cílem dosáhnout rozdílných mechanických nebo fyzikálně-chemických vlastností povrchu a jádra součásti. Zpravidla se jedná o zvýšení tvrdosti a odolnosti povrchu proti opotřebení při zachování houževnatosti jádra. Požadovaných vlastností se dosahuje buď přímo, jen obohacením povrchové vrstvy příslušným prvkem za zvýšených teplot a pomalým ochlazením nebo následným tepelným zpracováním, kterým obvykle bývá kalení a nízkoteplotní popouštění.

Za základní dílčí pochody při chemicko-tepelném zpracování se považuje disociace, absorpce a difúze. Při dostatečně vysoké teplotě a ve styku s povrchem ocele uvolňují použité prostředí plynné, kapalně nebo tuhé rozkladem (disociací) molekul sloučením požadovaný prvek ve stavu (aktivní atomy), který je absorbovaný povrchem ocele a pohybuje se mřížkou železa difúzním mechanismem zpravidla ve směru koncentračního spádu (ve směru od povrchu). Intenzita uvedených dílčích pochodů závisí na druhu oceli, chemickém složení prostředí, druhu prvku, kterým je její povrch sycený, teplotně sycený atd. [4]

5.4.1 Cementování

Je sycení povrchu součástí uhlíkem (C) tak, aby bylo možné po ukončení pochodu zakalit na vysokou tvrdost. Jádro přitom zůstane houževnaté. [2]



Obr. 13 Část rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C s

vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot

Cementovat je možné v prostředí plynném, kapalném a sypkém.

Cementování v plynném prostředí – využívá se k reakci oxidu uhelnatého ($2 \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$) nebo rozpadu metanu ($\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2 + \text{C}$), kde C je rozpuštěný v austenitu. Po ustanovení rovnováhy v soustavě sytící atmosféra – sycený materiál je po určité době ustanoven rovnovážný stav, který při konstantním tlaku závisí jen na teplotě. Je zřejmé, že uvedené reakce mohou probíhat ve směru zleva doprava (sycení povrchu uhlíkem) i zprava doleva (odsycování povrchu materiálu). Sycení povrchu probíhá při teplotě okolo 900°C . Cementování v plynné atmosféře je rychlejší než v sypké hmotě, výhodou je taktéž čistý povrch součásti. [2]

Cementování v kapalném prostředí – provádí se za kyanidových koupelí. Probíhá velmi rychle, povrch je nasycený rovnoměrně.

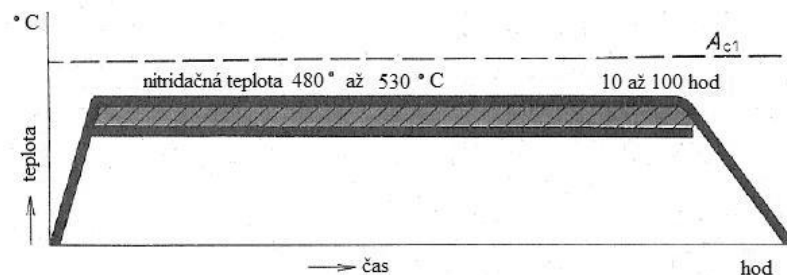
Cementování v sypkém prostředí – provádí se ve směsi, kde hlavními složkami jsou dřevěné uhlí a uhličitán barnatý BaCO_3 . Dílce se vloží do krabice, zasypou směsí, víko krabice se pevně uzavře a vsadí do pece. Při ohřevu se z dřevěného uhlí uvolní oxid uhličitý, reaguje na oxid uhelnatý a ten se rozpadá na uhlík a další oxid uhličitý. Cementování v prášku probíhá přes plynnou fázi – přítomnost BaCO_3 urychluje reakci. [2]

Cementační teploty se pohybují okolo 800°C až 950°C , při teplotách nad 950°C je možné cementovat ocele s přísadou titanu, u kterých nehrušne ani po dlouhých časech při vysoké teplotě zrno. Dobu výdrže na teplotě je nutné volit podle požadované hloubky cementové vrstvy. Je možné získat nasycenou vrstvu o hloubce do 2 až 3 mm. Před cementací se díly normalizují po nasycení povrchu je dílec vždy zakalený. [2]

5.4.2 Nitridování

Sycení povrchu součásti dusíkem v plynném, anebo kapalném prostředí. Povrchová vrstva obsahuje vysoce disperzní tvrdé nitridy vhodných prvků – nejčastěji se používá kombinace Al, V, Cr, nitrid hliníku je ve formě velmi jemných částic rozptýlený ve feritu, takže nitridované ocele s hliníkem mají nejvyšší tvrdost. Tvrdost povrchu po nitridování je vyšší než po cementaci, anebo povrchovém kalení. Deformace součásti jsou minimální, protože nitridační teploty jsou relativně nízké – pohybují se okolo 550°C . Hloubka nasycené vrstvy je menší než po cementování, pohybuje se v desetinách milimetru. Před nitrido-

váním se dílce zušlechťují, obrábějí na konečný rozměr. Po nitridaci se už součást tepelně nezpracovává, popřípadě jen leští. [4]



Obr. 14 Průběh času a teplot při nitridování

Nitridování prostředí:

- plynné – zdrojem dusíku je čpavek (amoniak)
- kapalně (koupele) – tvoří ji směs kyanidu sodného a kyanatanu draselného

5.4.3 Nitrocementování

Provádí se nejčastěji při teplotách 820°C až 840°C (okolí teploty A_3) v atmosféře tvořené směsí uhlovodíků a čpavku (amoniaku). Hloubka vrstvy bývá obvykle 0,3 až 0,4 mm a získá se za 1 až 2 hod. V kapalných koupelích (solné koupele s přísadou kyanidů) se dá použít kratších dob (asi do 1hod) a hloubka vrstvy bývá do 0,2 mm. Pro tento postup se někdy používá název kyanování. Ocele k nitrocementování mají obsah uhlíku obvykle v rozmezí 0,25 až 0,40 hm % a po nitrocementování se kalí a popouští (180°C/1 až 2 hod.). Struktura vrstvy po tepelném zpracování je tvořena uhlíko-dusíkovým martenzitem, zůstatkovým austenitem a karbonitridami. Tvrdost vrstvy (700 až 800 HV) je nižší než po cementování, doba sýtní povrchu je podstatně kratší (dusík urychluje difúzi uhlíku v důsledku jejich kladné interakce). Menší tvrdost vrstvy je však „kompenzovaná“ vyšší pevností jádra v důsledku vyššího obsahu uhlíku v oceli. Pro stejnou únosnost potom stačí i menší hrubost nitrocementové vrstvy. [4]

5.4.4 Karbonitridování

Uskutečňuje se nejčastěji v atmosférách tvořených směsí čpavku (amoniaku) s přídatkem uhlovodíků při teplotách 600°C až 630°C (pod A_1) po dobu až 4 hod. Cílem tohoto postupu je vytvoření souvislé povrchové vrstvy karbonitridů o hrubosti přibližně 0,05 mm s tvrdostí až 1000 HV, která je odolná vůči zadírání a některým mechanismům opotřebení. Vrstva karbonitridů se taktéž využívá pro zvýšení odolnosti proti opotřebení a zadírání u různých řezných nástrojů, lisovadel, nástrojů pro přetlačování a i karbonitridované součásti se nekalí, deformace součásti je menší než po nitrocementování. [4]

5.4.5 Sulfonitridování a sulfonizování

Jde o postupy, při kterých se vytváří vrstvy sulfidů, karbonitridů a oxidů o hloubce 10^{-3} až 10^{-2} mm s velmi dobrými třecími vlastnostmi a odolností proti zadírání.

5.4.6 Difúzní chromování

Sycení povrchu chromem, přičemž vznikají vrstvy hrubosti 0,1 až 0,2 mm s vysokou tvrdostí, odolné vůči opotřebení a s dobrou odolností proti korozi a opalu.

5.4.7 Boridování

Sycení povrchu bórem. Teploty 900°C až 1050°C. Pro zvýšení trvanlivosti nástrojů. Potom už nekalíme.

5.4.8 Difúzní hliníkování

Získáváme vrstvy žáruvzdorné a korozivzdorné. Patří sem operace – alitování, alu-metování, křemíkování

5.5 Tepelně – mechanické zpracování

Vlastnosti ocele je možné zlepšit kombinovaným účinkem tváření a tepelného zpracování – tepelně mechanickým zpracováním. Tvářením austenitu může dojít k podstatnému zjemnění jeho zrna, tedy i produkty jeho následujících přeměn (martenzit, ferit, perlit) budou jemnější. Dalším důsledkem tváření je zvýšená hustota dislokací v austenitu, které

předchází do produktů přeměny austenitu, popř. modifikují i kinetiku a mechanismus jeho přeměn. [2]

Mezi nejznámější postupy tepelně-mechanického zpracování patří tyto technologické varianty:

- nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování – NTMS
- vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování – VTMS
- izoforming
- řazené válcování a ochlazování
- zerolling vedoucí k transformačně indukované plasticitě – tzv. TRIP efekt

5.5.1 Nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování

Spočívá v austenizaci nad teplotu A_{c1} , v prudkém ochlazení do oblasti metastabilního austenitu (asi 500 až 600°C), kde se ocel plasticky deformuje kováním nebo válcováním (deformace až 50%) a potom následuje kalení. [2]

Nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování jde použít u ocele se širokou oblastí metastabilního austenitu (u ocele legovaných), je však technologicky náročné zajistit prudké ochlazení na tvářecí teplotu a udržet podmínky tváření tak, aby nedošlo k perlitické či bainitické přeměně. Technologické problémy se sebou nesou i vysoký odpor spojený s nízkou tvářecí teplotou. [2]

5.5.2 Vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování

Ocel se tváří nad teplotou A_{c3} , teda v oblasti stabilního austenitu, přičemž stupeň deformace se pohybuje v rozmezí 40 až 90%. Po tváření (zpravidla válcování) následuje kalení. Vysokoteplotní tepelně-mechanické zpracování se dá použít i u uhlíkových ocelí s tím, že limitujícím faktorem pro zlepšení vlastností ocele je proces rekrytalizace. Úplná rekrytalizace je nežádoucí, protože by došlo ke ztrátě deformačního zpevnění. Polotovary nebo součásti po VTMS a NTMS se zpravidla popouští při teplotách 200°C až 300°C a výsledná struktura je tvořena velmi jemným popuštěným martenzitem. [5]

5.5.3 Izoforming

Kombinace izotermické perlitické přeměny a deformace, přičemž deformace se může uskutečnit před nebo v průběhu uvedené přeměny. Izoforming vede ke zjemnění a k částečné sferoidizácii perlitu, jeho mechanické vlastnosti jsou lepší než u perlitu získaného izotermickým žiháním.

5.5.4 Řízené válcování a ochlazování

Varianta TMS, která se používá při válcování mikrolegovaných ocelí. Válcovací i doválcovací teplotou a velikostí jde řídit procesy dynamické a statické rekrytalizace austenitu. Vhodně zvolenou rychlostí ochlazování austenitu z doválcovací teploty jde ovlivnit transformaci jemnozrného austenitu (částečně nebo úplně rekrytalizovaného) na tzv. cirkulární ferit nebo na ferit a perlit s výhodnou kombinací pevnosti a ostatních mechanických vlastností. Teplotou svinování jde ovládat i úroveň precipitační zpevnění plechů z mikrolegovaných ocelí. [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

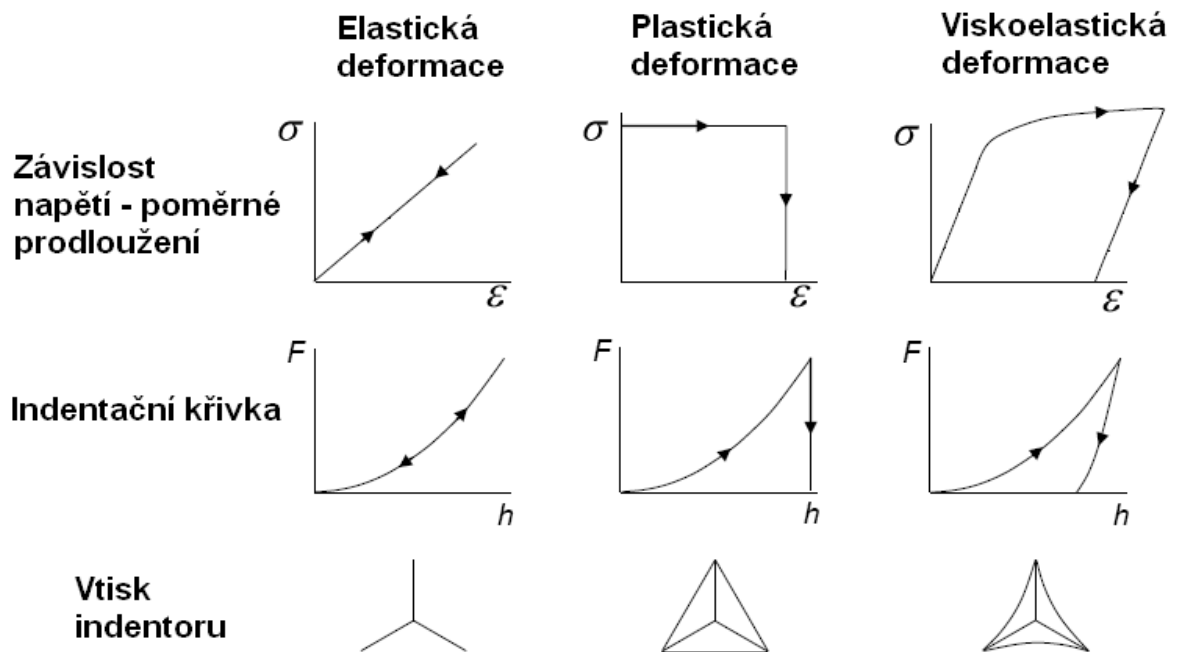
Cílem praktické části diplomové práce bylo měření mikrotvrdosti na vybraných typech ocelí třídy 19 (19 436 a 19573). Vlastnosti a struktura zvolených materiálů byla modifikována tepelných zpracování. Tepelně nezpracovaný základní materiál byl modifikován žiháním na měkko. Druhé tepelné zpracování bylo zvoleno kalení s následným popouštěním. Na připravených zkušebních tělesech (tepelně nezpracované, žihané na měkko a kalené) bylo provedena zkouška mikrotvrdosti. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny. Cílem diplomové práce bylo:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro zkoušku mikrotvrdosti
3. Provedení zkoušky mikrotvrdosti
4. Vyhodnocení výsledků měření

6.1 Zkouška mikrotvrlosti

Měření mikrotvrlosti bylo realizováno na přístroji Micro Combi Testeru od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Aplikované zatížení pro samotnou zkoušku mikrotvrlosti bylo zvoleno 1N, 5N a 10N s výdrží 15 s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla použita 2 N/min. Měření byla prováděna metodou DSI (Depth Sensing Indentation – metoda Oliver & Pharr) pro niž byl zvolen český ekvivalent Instrumentovaná vnikající zkouška tvrdosti. Poissonovo číslo bylo použito 0,3 z důvodu, že nebylo možné změřit jeho hodnotu u testovaných zkušebních těles.

Metoda DSI (Depth Sensing Indentation) má své počátky v sedmdesátých letech 20 století. Zásadní vylepšení metodologie, analýzy a shromáždění dat provedli až Oliver & Pharr na počátku let osmdesátých. Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu / poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu (Obr. 15.). Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku. Díky možnosti napojení měřicího přístroje na PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány současně s vyhodnocením některých materiálových parametrů.



Obr. 15 Indentační křivky

6.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování vybraných typů ocelí zahrnuje technologické postupy, pro které je charakteristický přenos tepla mezi materiálem v tuhém stavu a okolním prostředím v tepelných cyklech za účelem zlepšení užitečných vlastností výrobků. Každý cyklus se skládá z ohřevu na požadovanou teplotu, výdrž na této teplotě a ochlazení příslušnou rychlostí ochlazování. Parametry cyklu (rychlost ohřevu i ochlazení, teplota, čas) závisí nejen na účelu zpracování, ale i na materiálu výrobku, jeho tvaru a rozměrech.

6.2.1 Žihání na měkko

při žihání na měkko dochází ke sferoidizaci eutektoidních karbidických částic v důsledku povrchového napětí. Změnou lamelárního perlitu na zrnitý lze u nízkouhlíkatých ocelí zlepšit tvářitelnost za studena a u ocelí s obsahem nad 0,4 %C obrobitelnost. Rovněž lze žiháním připravit vhodnou výchozí strukturu pro následné kalení, zejména u eutektoidních a neeutektoidních ocelí. Rovnoměrné rozložení zrnitých karbidů v základní feritické hmotě ulehčuje následnou austenitizaci a zlepšuje celkové vlastnosti po zakalení, čehož se úspěšně využívá zejména u ložiskových ocelí.

Teplota žihání je blízká eutektoidní teplotě (v našem případě 800 – 840°C), případně se pohybuje v jejím okolí. Zvýšení teploty na A_{c1} resp. její kolísání kolem této hodnoty usnadňuje a urychluje sbalování karbidických částic. Doba žihání je různá podle druhu oceli i předchozího tepelného zpracování a pohybuje se od 4 h (4 h byly použity pro naše tělesa) u uhlíkových ocelí po 16 h pro vysokolegované ocele. Žihání je zpravidla ukončeno pozvolným ochlazováním v peci.

6.2.2 Kalení a následné popuštění

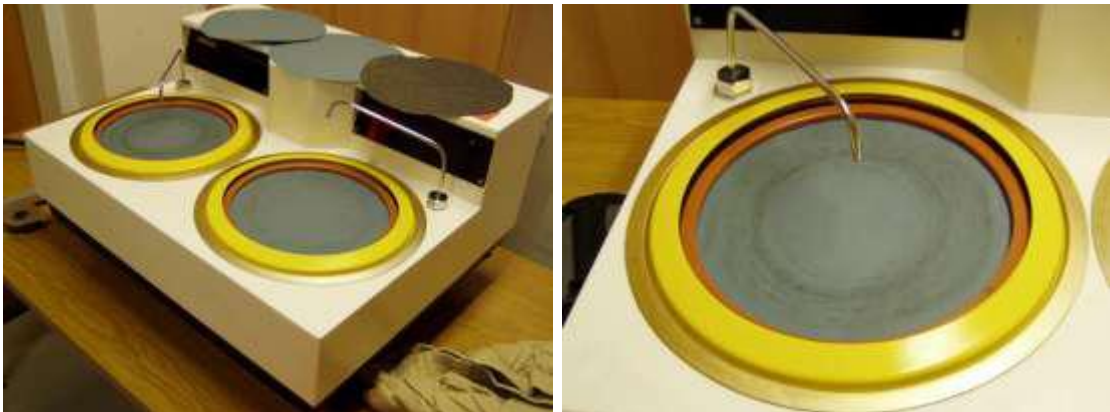
Tepelné zpracování nástrojové oceli má za úkol zajistit rovnoměrné jemné vyloučení karbidů k dosažení nejvhodnějších mechanických vlastností. Díky vysokému obsahu legujících prvků vyžadují nástrojové oceli odlišný způsob zpracování. Ohřev na kalící teplotu musí být stupňovitý (850 a 1050°C), kalení následně probíhá na vzduchu (suchý popel jako izolační materiál) nebo termálně v solné lázni (550°C/15min) a závěrem probíhá několikanásobné popuštění.

6.3 Použité typy materiálů

Pro experimentální část byly použity dva typy kovových materiálů. Jedná se o materiály oceli třídy 19. Prvním materiálem byla ocel 419436 a jako druhý materiál byla použita ocel 419573. Vybrané typy materiálu byly dodány v surovém stavu. Na obou typech materiálů bylo provedeno tepelné zpracování žíhání na měkko a kalení s následným popuštěním.

6.4 Příprava materiálů

Jedním ze základních požadavků při měření mikrotvrdomosti je kovových lesk povrchu zkušebních těles ($R_a \leq 0,2$). Proto musely být všechny měřené zkušební tělesa perfektně vyleštěné. Leštění bylo realizováno na leštícím přístroji MTH, v budově U5 (Ústav výrobního inženýrství) UTB ve Zlíně. Přístroj je složen ze dvou rotačních bubnů, na které je možné umístit brusné papíry s různými drsnostmi povrchu. Pomocí brusných papírů s různou drsností bylo na rotujících kotoučích chlazených vodou dosaženo kovového lesku u zkušebních těles.



Obr. 16 *Leštící přístroj*

7 MATERIÁL OCEL ČSN 419436

7.1 Charakteristika materiálů

Vysoce legovaná chromová ocel s velkou prokalitelností ke kalení v oleji a na vzduchu, zvlášť vysoká odolnost proti opotřebení jak kovovými tak minerálními látkami, dobrá řezivost, velmi vysoká pevnost v tlaku, značně nízká houževnatost zejména v příčném směru, výrazná karbidická řádkovitost. Tato ocel vykazuje dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování, avšak změna rozměrů je větší než u oceli 1.2842. Ocel je citlivá na rychlý a nestejněměrný ohřev, vhodná ke kalení na sekundární tvrdost (možnost nitrídování). Dále se ocel velmi obtížně brousí, obtížně tváří za tepla a má poněkud ztíženou obrobiteľnost v žíhaném stavu.

7.2 Vlastnosti a použití materiálu

Nástroje pro stříhání za studena tj. všechny druhy nástrojů s velkou životností pro stříhání na lisech a děrování materiálů menších tlouštěk a materiálů vysoké pevnosti (zejména tvarově složité nástroje pro stříhání např. transformátorových plechů a plechů z nerezavějících ocelí), nože pro tabulové nůžky na plech a pásovou ocel do tl. stříhaného materiálu cca 4 mm, nože na stříhání drátu apod. Nástroje pro tváření jako jsou např. menší průvlastky a nástroje pro tažení, všechny druhy jednoduchých nástrojů na přetváření a ražení materiálů menších tlouštěk, u kterých nedochází k přídavnému namáhání ohybem nebo na roztržení. Dále je ocel vhodná na jednoduché a symetrické nástroje na protlačování a tlačení, nástroje na válcování závitů, hladké a profilové válce, kovařky i pro práce za tepla. Nástroje řezné jako jsou protahovací a protlačovací trny, profilové nože a tvarově složité frézy pro menší řezné rychlosti a pro obrábění nekovových abrazivních materiálů. Dále ocel nachází uplatnění při výrobě malých forem s velkou životností pro tváření plastických a práškových hmot, skla, porcelánu a keramických materiálů. U nástrojů na drcení a mletí se používá na kladiva drtičů a čelisti pro jemné mletí a drcení.

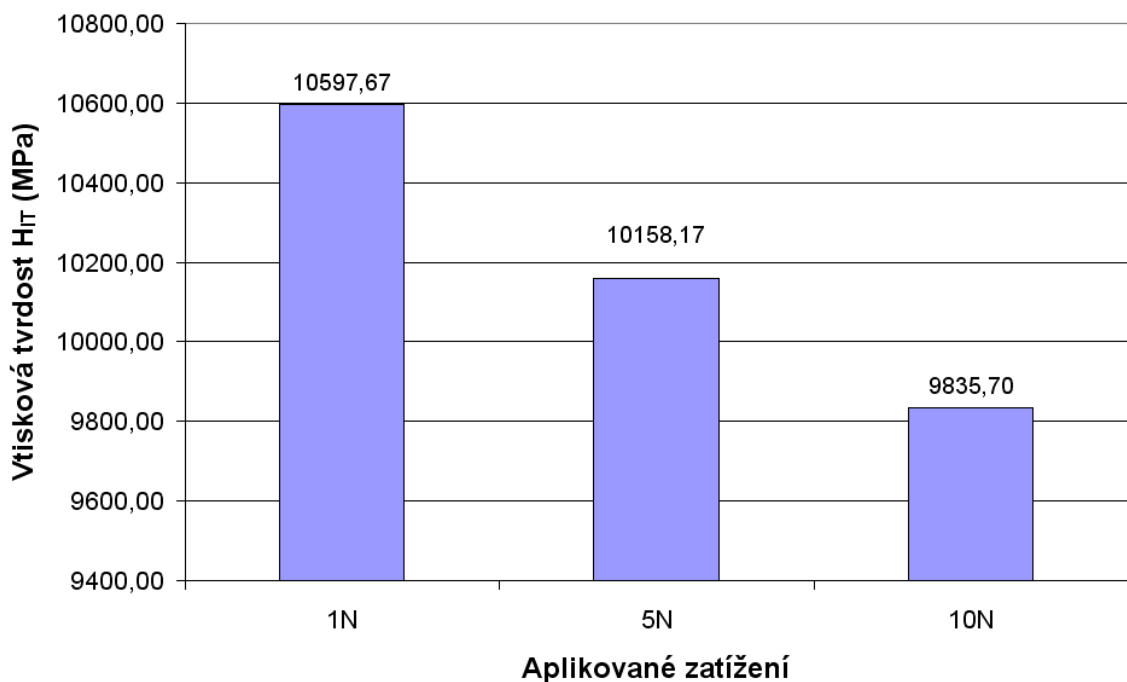
Tab. 4 Chemické složení

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
1,8 – 2,05	0,2 – 0,45	0,2 – 0,45	Max. 0,03	Max. 0,035	11 – 12,5	Max. 0,5

7.3 Výsledky měření mikrotvrdomosti oceli 419436

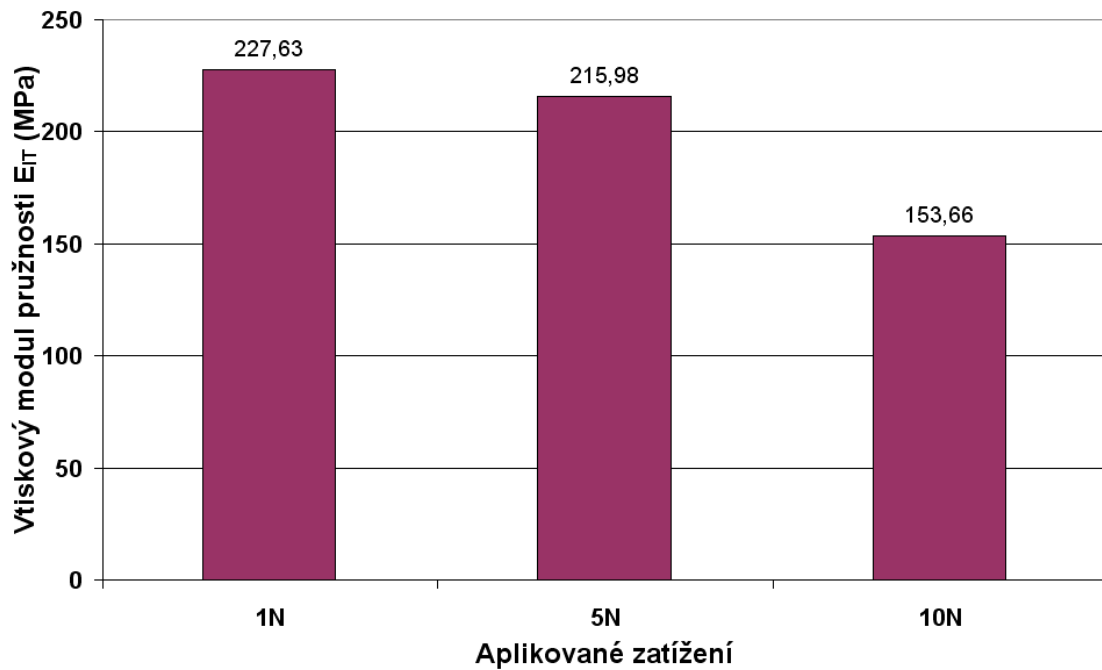
Zkouška mikrotvrdomosti byla na každém zkušebním tělese provedena vždy 9x formou maticových vtisků. Výsledky měření testu mikrotvrdomosti byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

7.3.1 Kalené a následné popuštěné zkušební tělesa ocel 419436



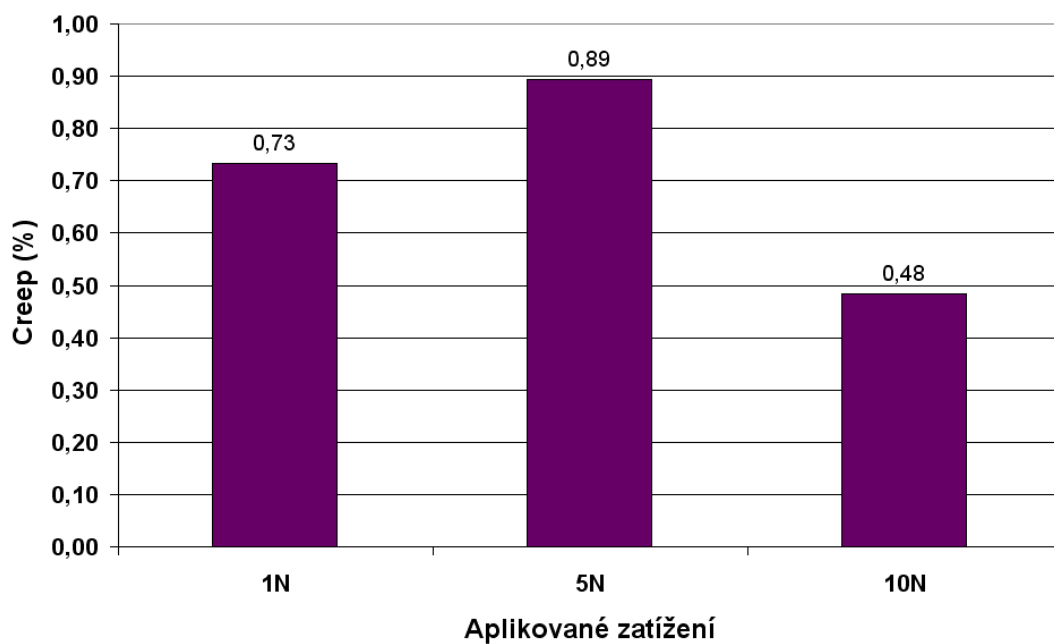
Obr. 17 Vtisková tvrdost zakalené oceli 419436

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 1N (10597,67 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 10 N (9835,7 MPa) jak je patrné z obr. 17.



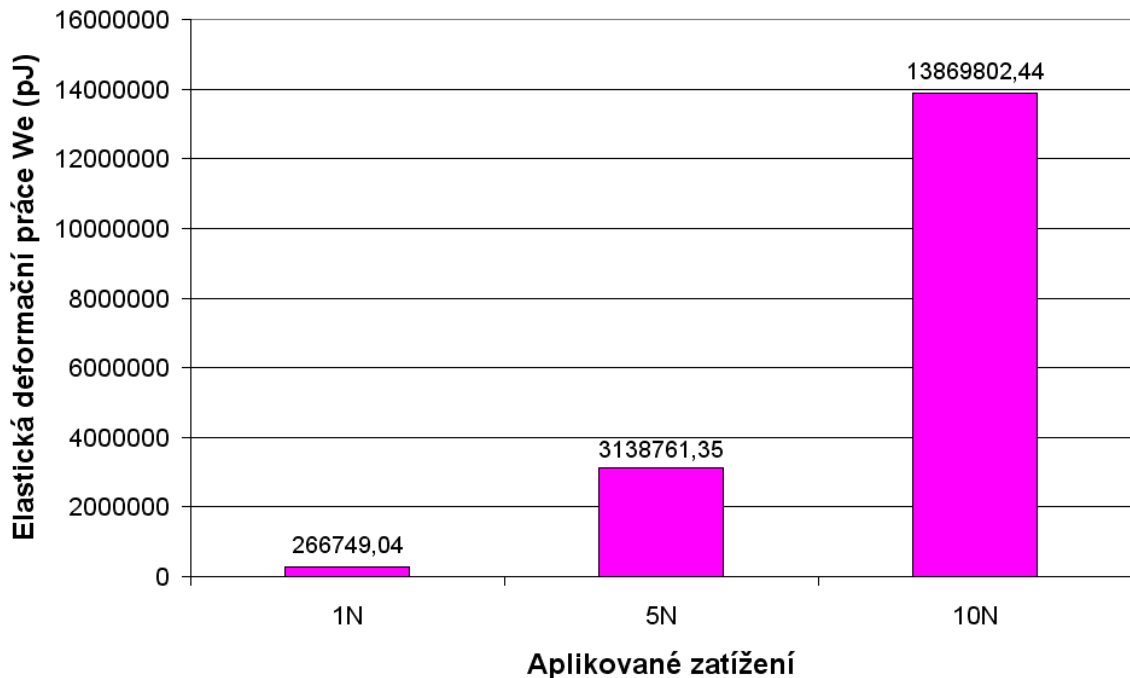
Obr. 18 *Vtiskový modul pružnosti zakalené oceli 419436*

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (227,63 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (153,66 GPa), jak je patrné z obr. 18.



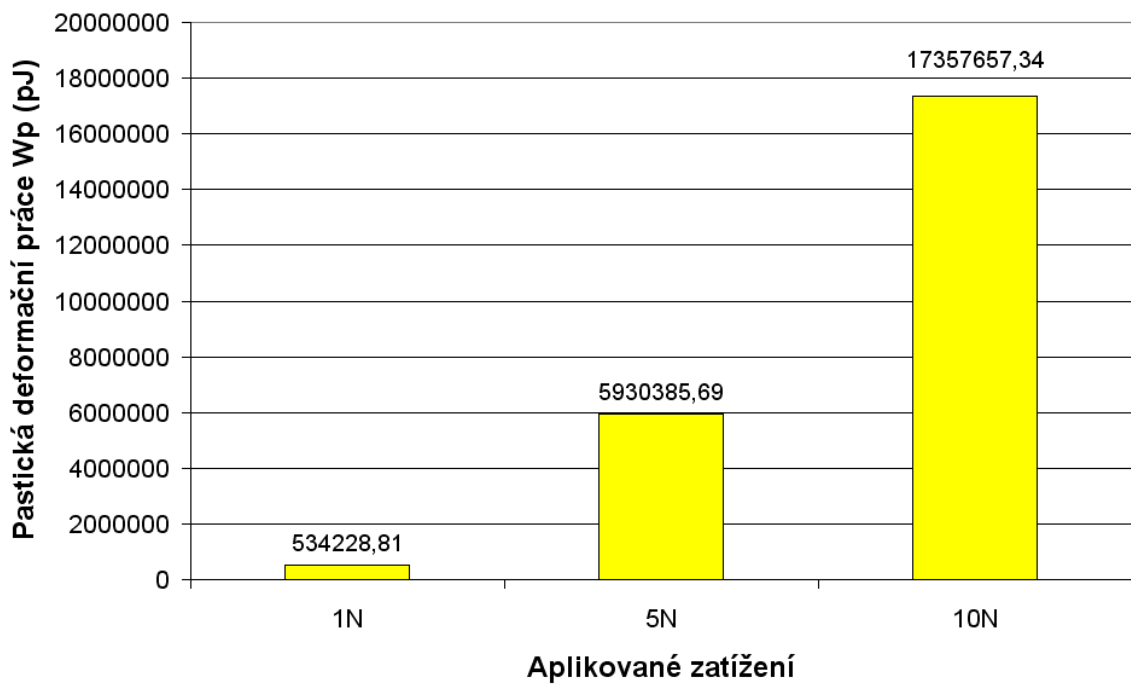
Obr. 19 *Creep zakalené oceli 419436*

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 5 N (0,89%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 10N (0,48%), jak je uvedeno na obr. 19.



Obr. 20 *Elastická deformační práce zakalené oceli 419436*

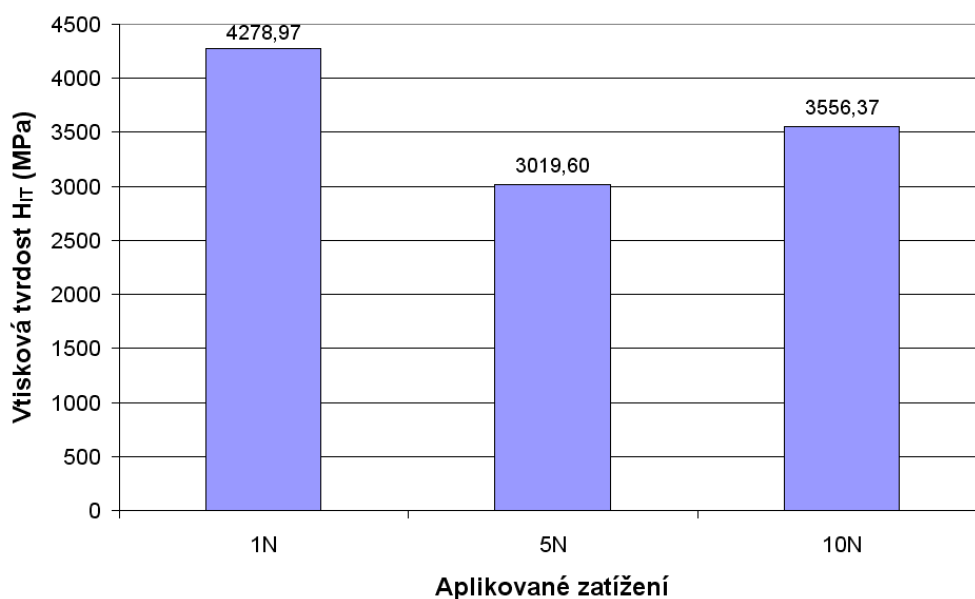
Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrdomosti změřena při zatížení 1N (266749,04 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (13869802,44 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 20.



Obr. 21 *Plastická deformační práce zakalené oceli 419436*

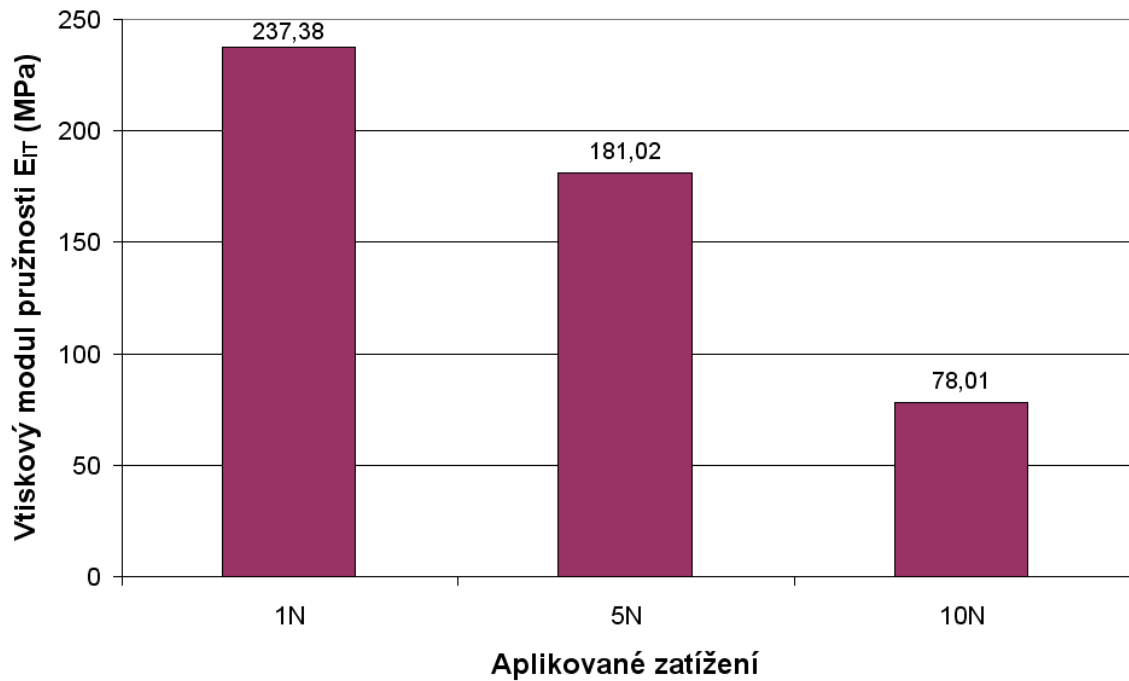
Při měření mikrotvrdomosti zkušebních těles kalené oceli 419436 byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (17357657,34 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (534228,81 pJ), jak je patrné z obr. 21.

7.3.2 Zkušební tělesa ocel 419436 tepelně nezpracované



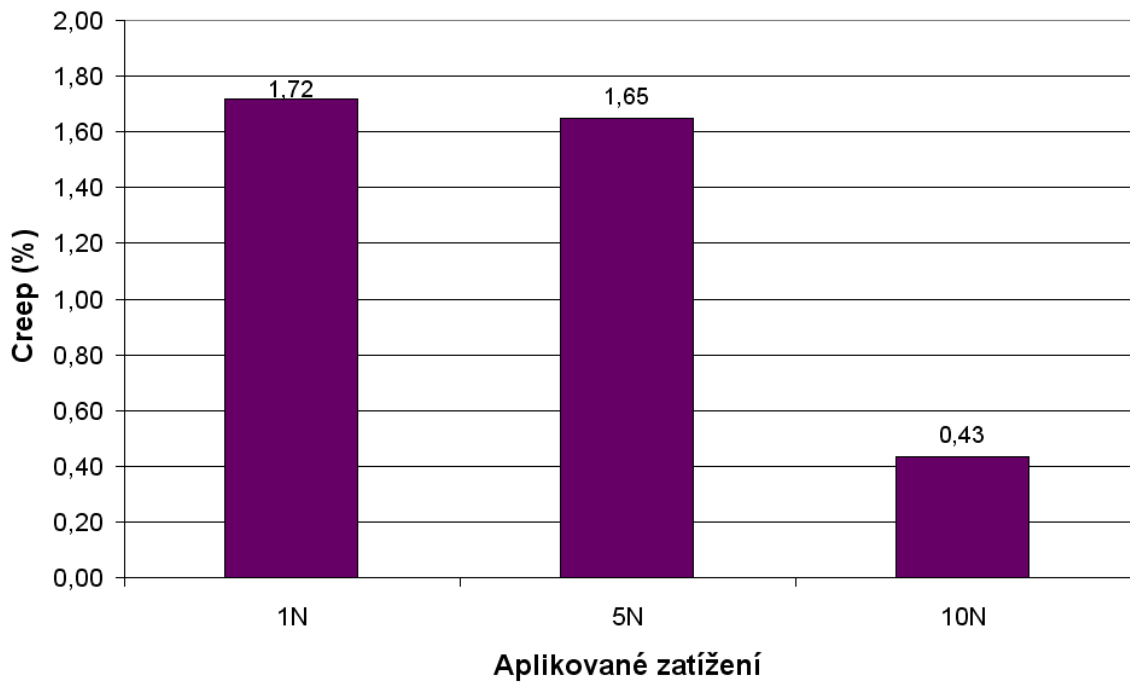
Obr. 22 *Vtisková tvrdost tepelně nezpracované oceli 419436*

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 1N (4278,97 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 5 N (3019,6 MPa) jak je patrné z obr. 22.



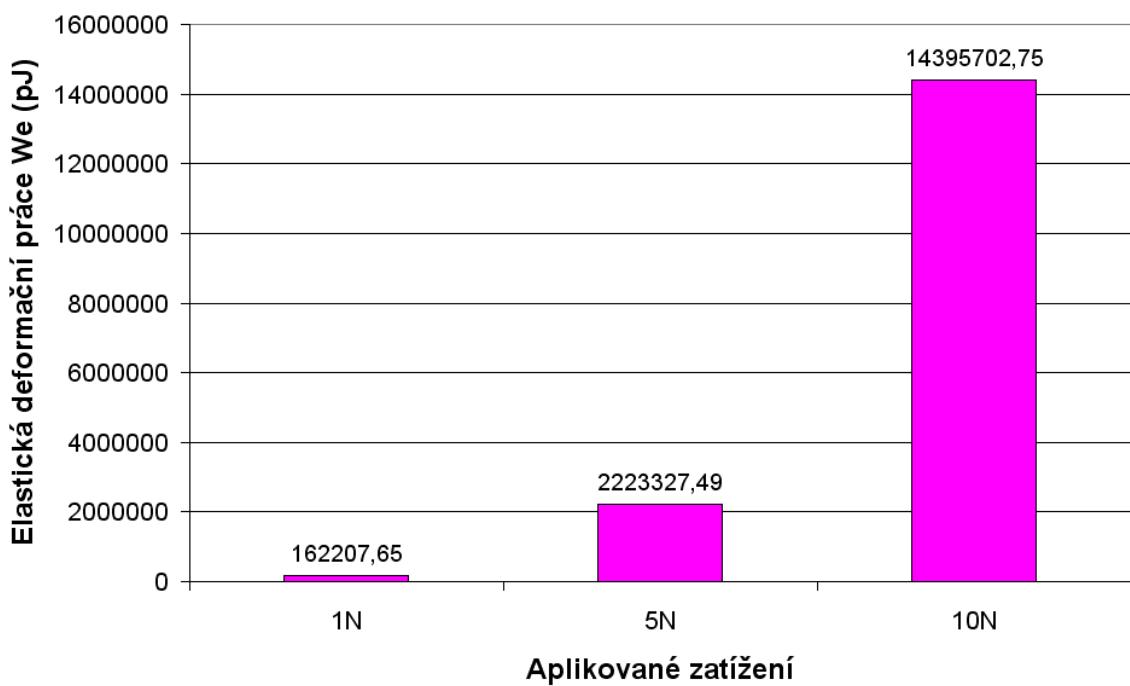
Obr. 23 Vtiskový modul pružnosti tepelně nezpracované oceli 419436

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (237,38 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (78,01 GPa), jak je patrné z obr. 23.



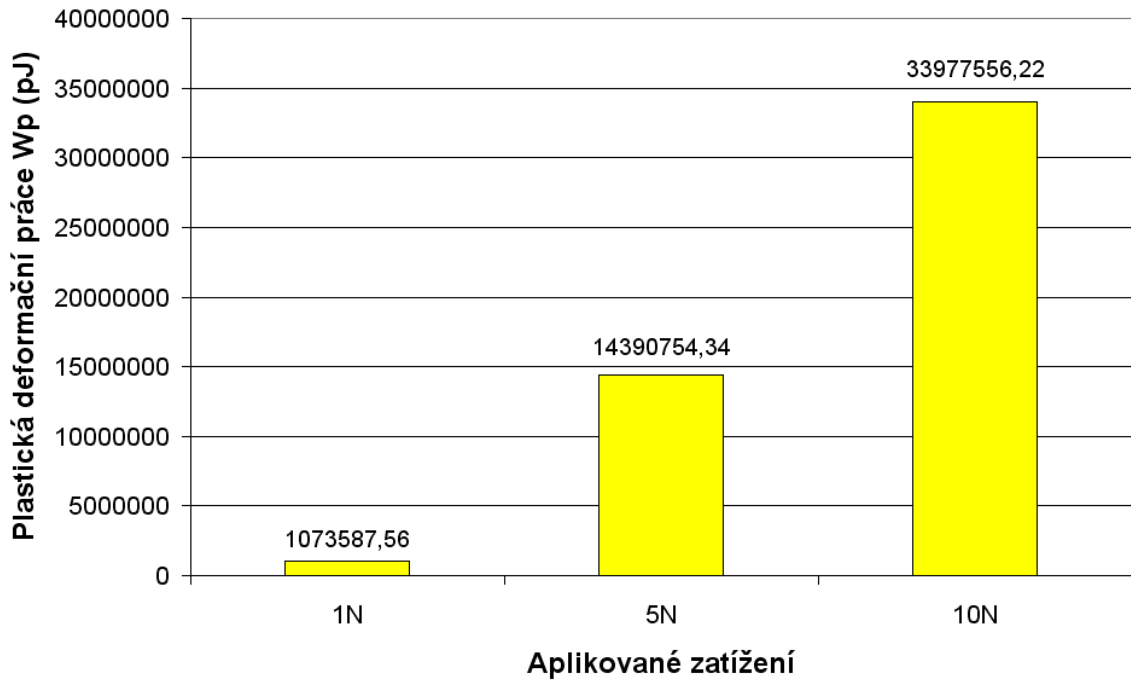
Obr. 24 Creep tepelně nezpracované oceli 419436

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 1N (1,72%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 10N (0,43%), jak je uvedeno na obr. 24.



Obr. 25 Elastická deformační práce nezpracované oceli 419436

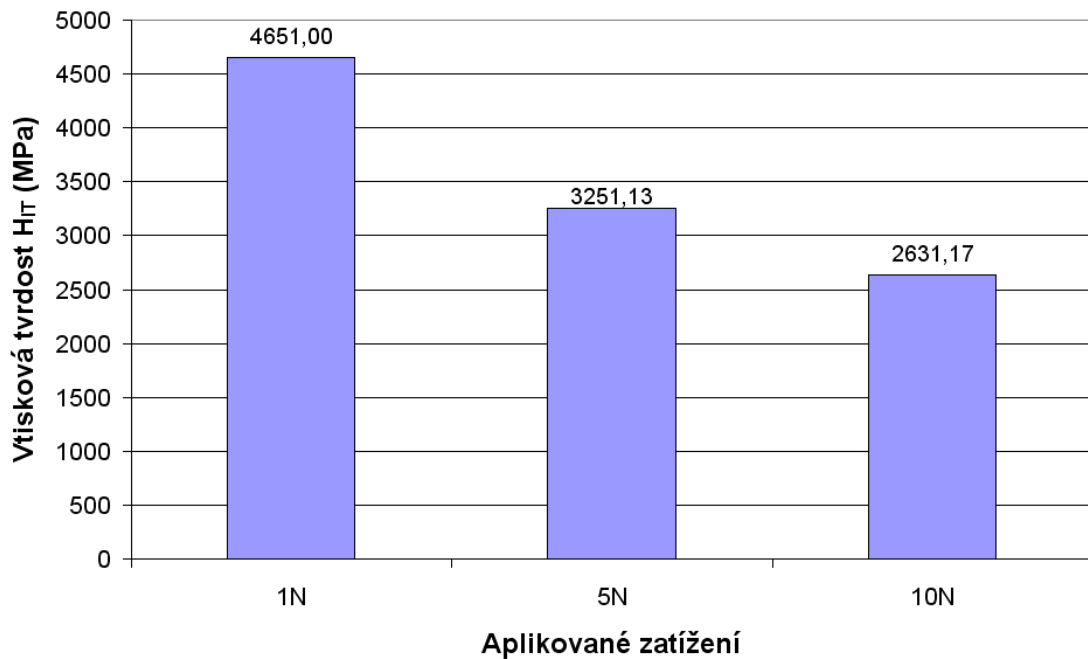
Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrdosti změřena při zatížení 1N (162207,65 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (14395702,75 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 25.



Obr. 26 *Plastická deformační práce nezpracované oceli 419436*

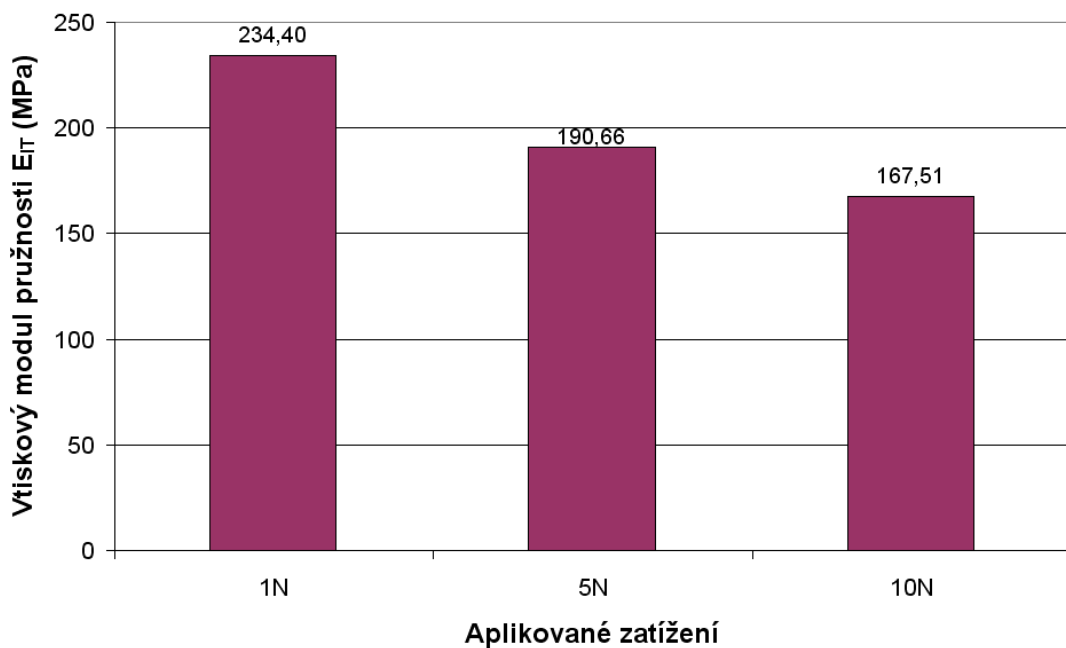
Při měření mikrotvrdosti zkušebních těles tepelně nezpracované oceli 419436 byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (33977556,22 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (1073587,56 pJ), jak je patrné z obr. 26.

7.3.3 Zkušební tělesa ocel 419436 žíhané na měkko



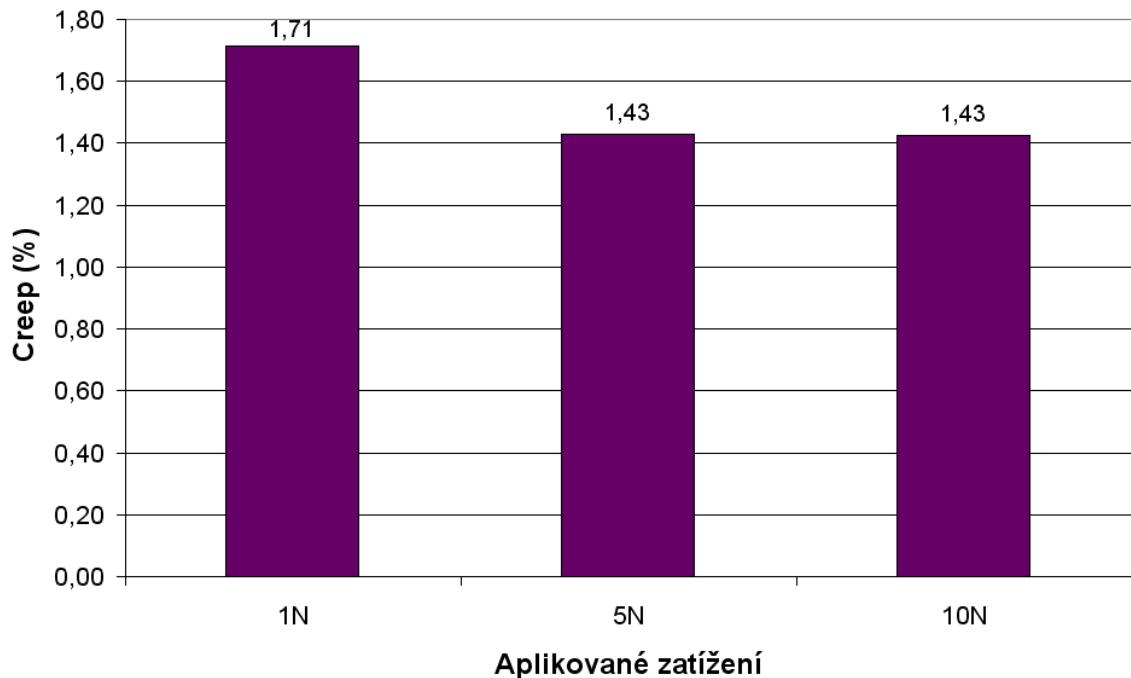
Obr. 27 Vtisková tvrdost oceli 419436 žíhané na měkko

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 1N (4651 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 5 N (2631,17 MPa) jak je patrné z obr. 27.



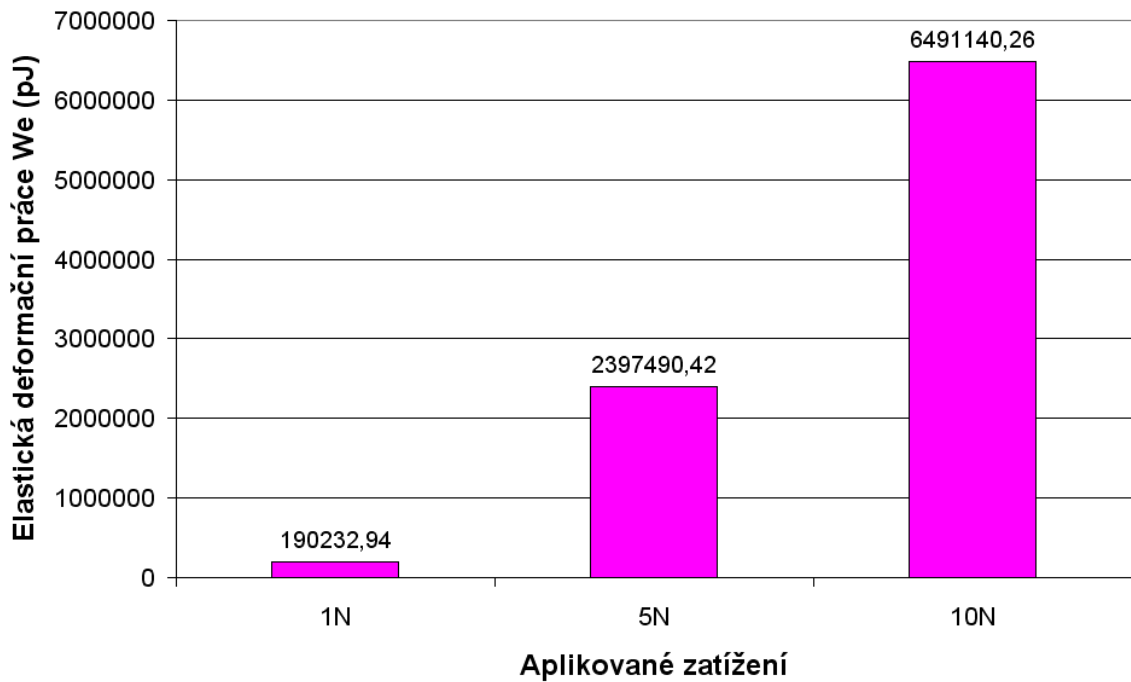
Obr. 28 Vtiskový modul pružnosti oceli 419436 žíhané na měkko

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (234,4 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (167,51 GPa), jak je patrné z obr. 28.



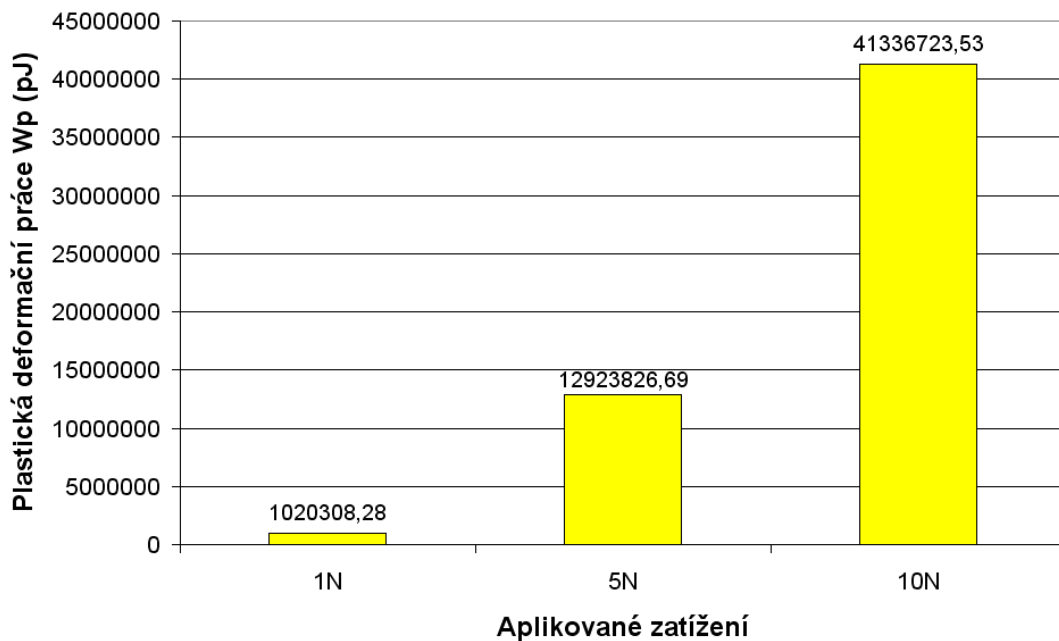
Obr. 29 Creep oceli 419436 žíhané na měkko

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 1N (1,71%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 10N (0,43%), jak je uvedeno na obr. 29.



Obr. 30 *Elastická deformační práce oceli 419436 žíhané na měkko*

Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrdosti změřena při zatížení 1N (190232,94 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (6491140,26 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 30.



Obr. 31 *Plastická deformační práce oceli 419436 žíhané na měkko*

Při měření mikrotvrdomosti zkušebních těles žíhaných na měkko oceli 419436 byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (41336723,63 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (1020308,28 pJ), jak je patrné z obr. 31.

8 MATERIÁL OCEL ČSN 419573

8.1 Charakteristika materiálů

Vysoce legovaná chrom - uhlíková ocel s velkou prokalitelností ke kalení v oleji a na vzduchu, zvláště vysoká odolnost proti opotřebení jak kovovými tak minerálními látkami, dobrá řezivost, velmi vysoká pevnost v tlaku, výrazná karbidická řádkovitost. Tato ocel vykazuje dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování, avšak změna rozměrů je větší než u oceli 1.2842. Ocel je citlivá na rychlý a nestejný ohřev, vhodná ke kalení na sekundární tvrdost (možnost nitridování). Dále se ocel velmi obtížně brousí, obtížně tváří za tepla a má poněkud ztíženou obrobitelnost v žíhaném stavu.

8.2 Vlastnosti a použití materiálu

Nástroje pro stříhání za studena tj. všechny druhy nástrojů s velkou životností pro stříhání na lisech a děrování materiálů menších tlouštěk a materiálů vysoké pevnosti (zejména tvarově složité nástroje pro stříhání např. transformátorových plechů a plechů z nerezavějících ocelí), nože pro tabulové nůžky na plech a pásovou ocel do tl. stříhaného materiálu cca 4 mm, nože na stříhání drátu apod. Nástroje pro tváření jako jsou např. menší průvlaky a nástroje pro tažení, všechny druhy jednoduchých nástrojů na přetváření a ražení materiálů menších tlouštěk, u kterých nedochází k přidavnému namáhání ohybem nebo na roztržení. Dále je ocel vhodná na jednoduché a symetrické nástroje na protlačování a tlačení, nástroje na válcování závitů, hladké a profilové válce, kovačka i pro práce za tepla. Nástroje řezné jako jsou protahovací a protlačovací trny, profilové nože a tvarově složité frézy pro menší řezné rychlosti a pro obrábění nekovových abrazivních materiálů. Dále ocel nachází uplatnění při výrobě malých forem s velkou životností pro tváření plastických a práškových hmot, skla, porcelánu a keramických materiálů. U nástrojů na drcení a mletí se používá na kladiva drtičů a čelisti pro jemné mletí a drcení.

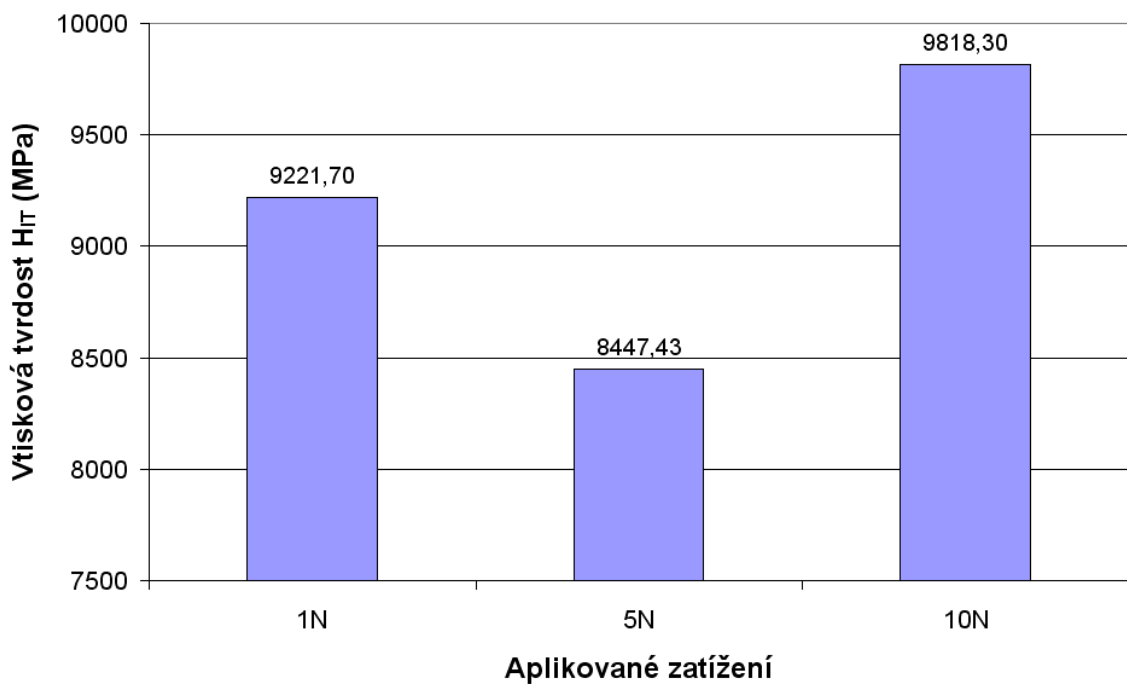
Tab. 5 Chemické složení

C	Mn	Si	Mo	V	Cr	Ni
1,55	0,3	0,4	0,8	0,8	11,8	Max. 0,5

8.3 Výsledky měření mikrotvrdomosti oceli 419573

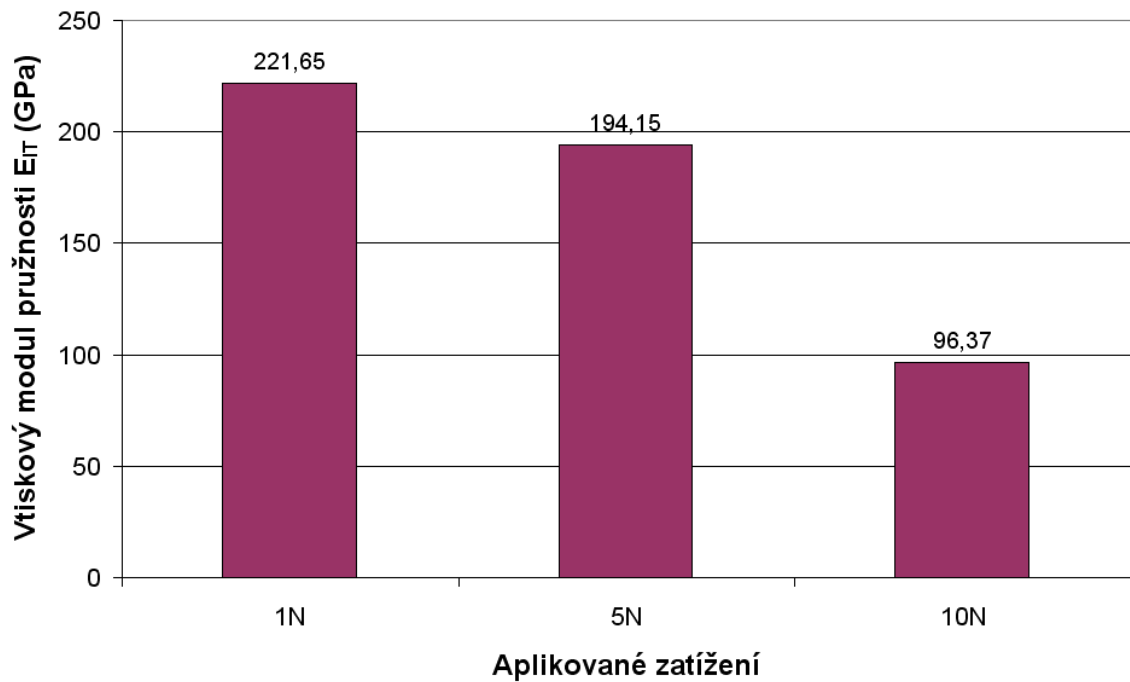
8.3.1 Kalené a následné popouštěné zkušební tělesa ocel 419573

Tepelné zpracování kalení spočívá o oceli 19 573 v ohřevu na kalicí teplotu (1000 – 1040°C). U kalení tohoto typu ocelí je nutné zařadit přehřev součásti v rozmezí teplot 650 – 750°C. Výdrž na kalicí teplotě trvá do doby, než dojde k vyrovnání teplot mezi jádrem a povrchem součásti. Povrch klané součásti je nutné v průběhu kalení chránit před možnou oxidací a oduhlíčením. Jako kalicí prostřední se volí solná lázeň v rozmezí teplot 180 – 500°C, poté následuje pomalé dochlazení na vzduchu. Popouštění je nutné zařadit po dosažení 50 – 70°C po kalicích teplotě. Popouštění je nutno aplikovat nejméně dvakrát s meziochlazením na teplotu 25°C. Nejvyšší popouštěcí teplota se volí 525°C a doba výdrže je 2 hodiny.



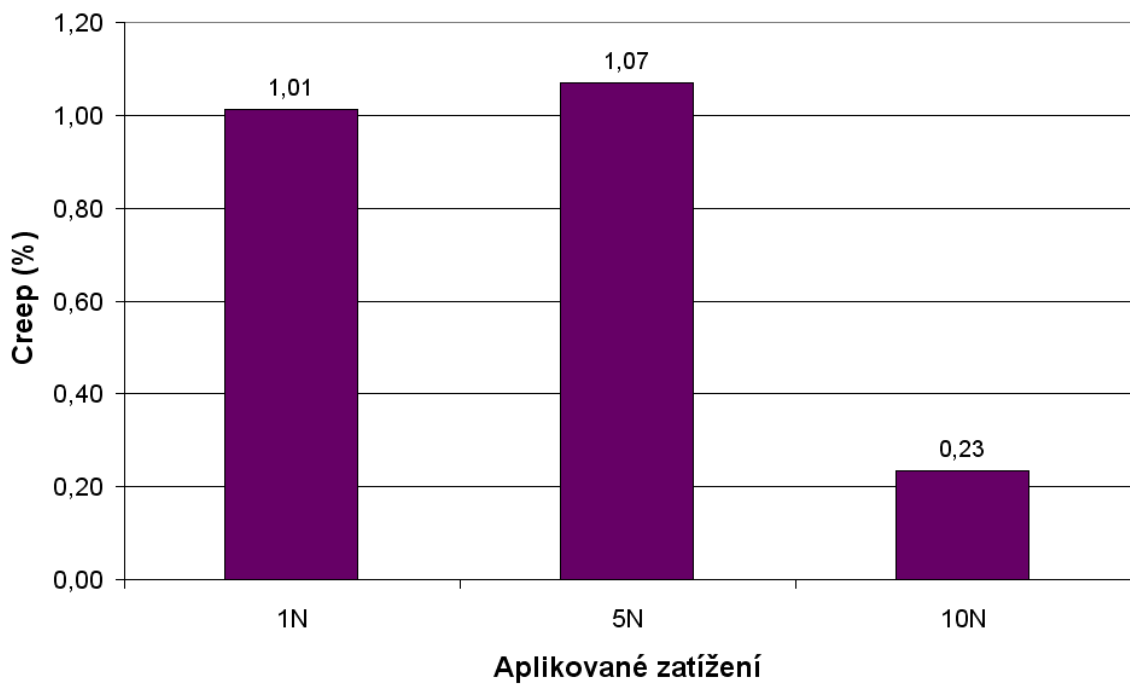
Obr. 32 Vtisková tvrdost kalené oceli 419573

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 10N (9818,3 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 5 N (8447,43 MPa) jak je patrné z obr. 32.



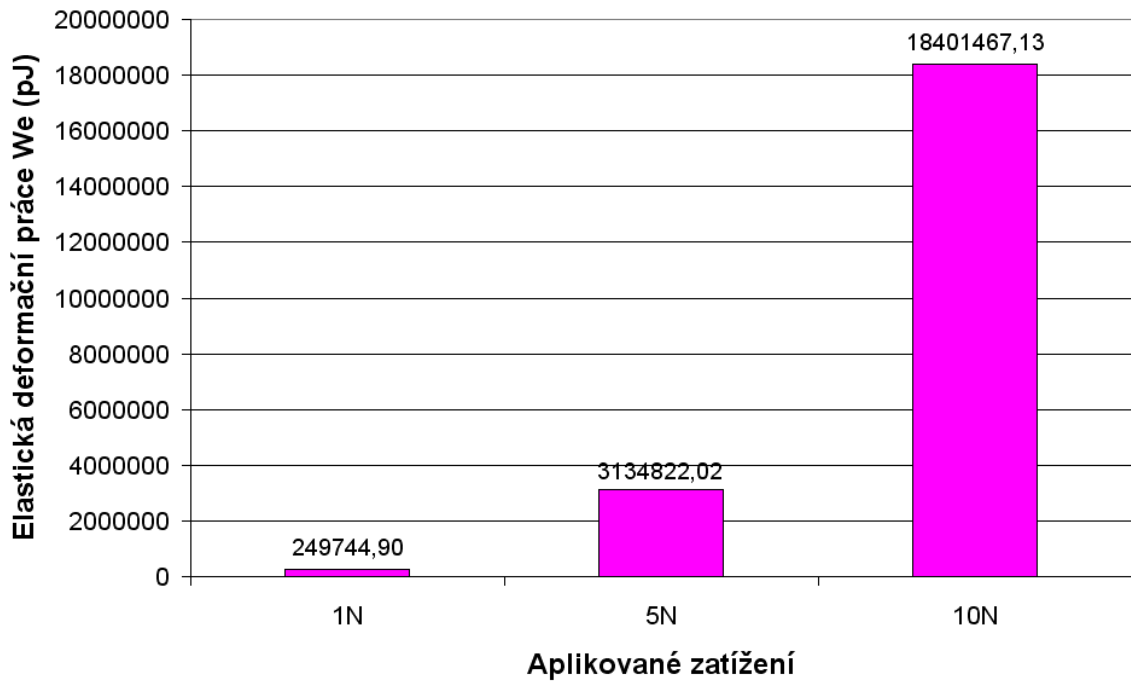
Obr. 33 Vtiskový modul pružnosti kalené oceli 419573

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (221,65 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (96,37 GPa), jak je patrné z obr. 33.



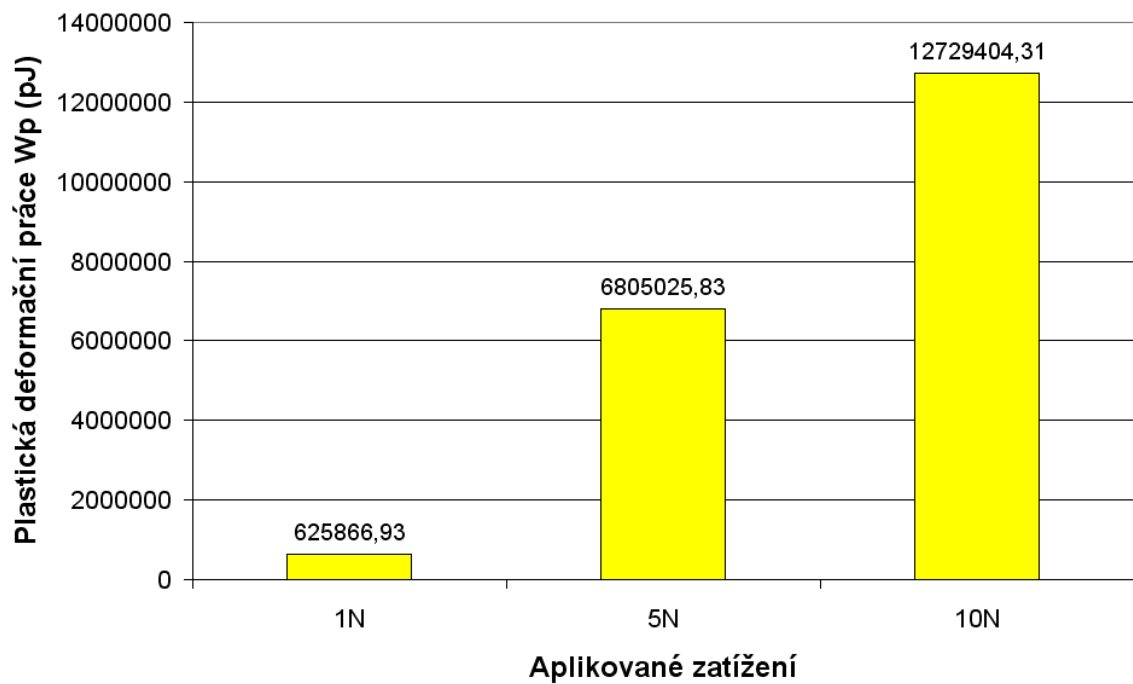
Obr. 34 Creep kalené oceli 419573

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrlosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 5N (1,07%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 10N (0,23%), jak je uvedeno na obr. 34.



Obr. 35 *Elastická deformační práce kalené oceli 419573*

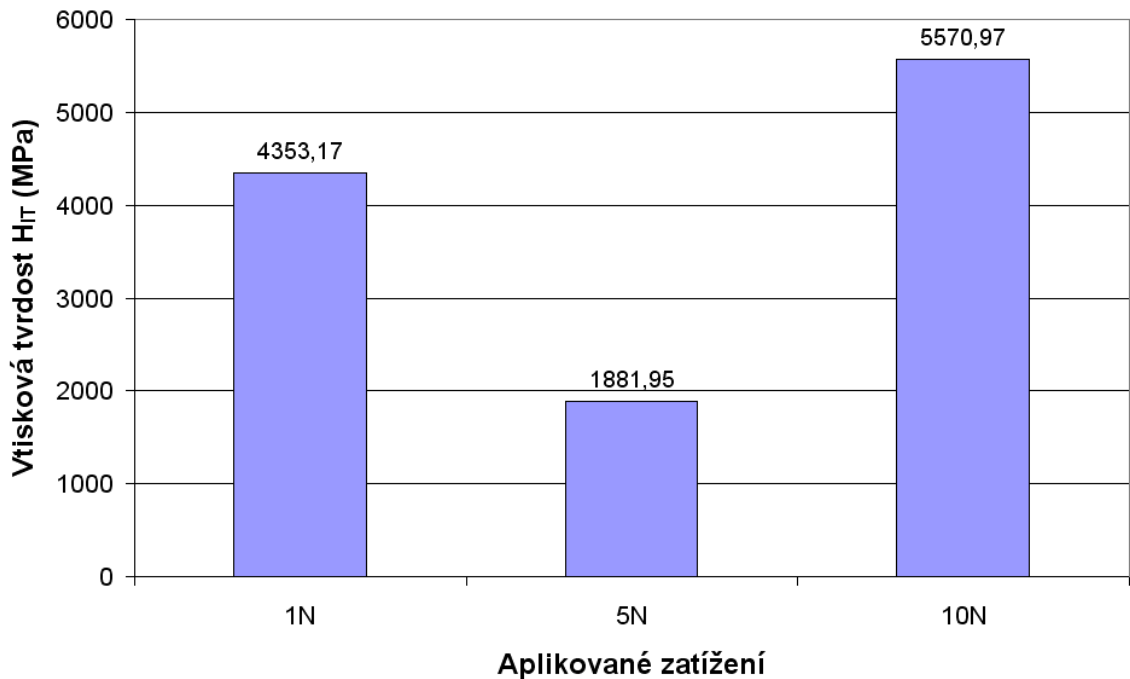
Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrlosti změřena při zatížení 1N (249744,9 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (18401467,13 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 35.



Obr. 36 *Plastická deformační práce kalené oceli 419573*

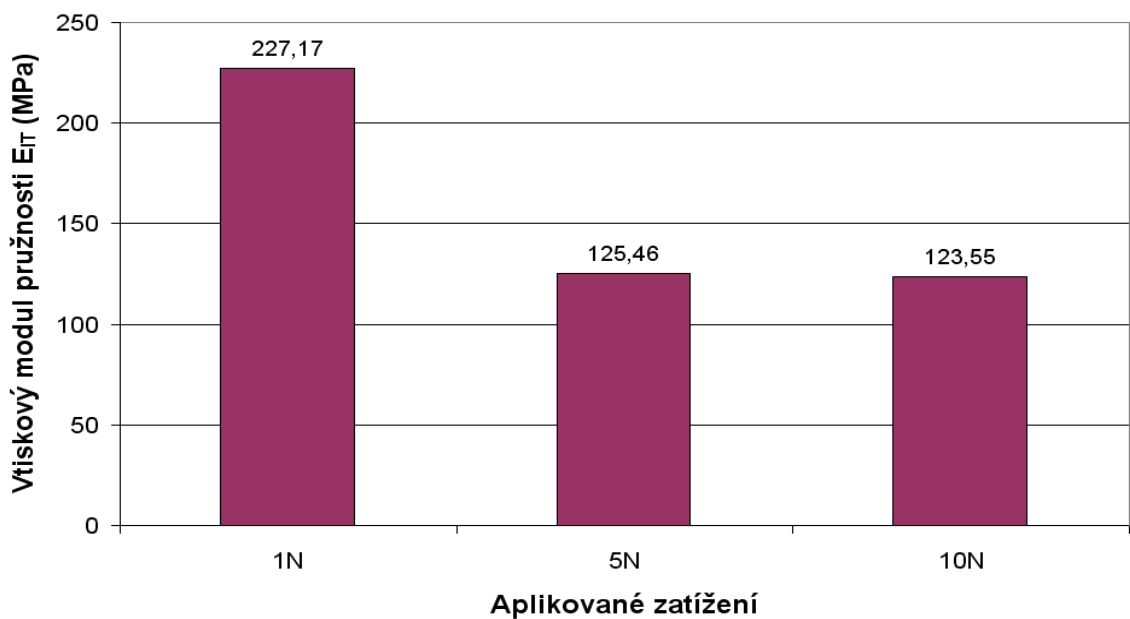
Při měření mikrotvrdosti zkušebních těles žíhaných na měkko oceli 419573 byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (625866,93 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (12729404,31 pJ), jak je patrné z obr. 36.

8.3.2 Zkušební tělesa ocel 419436 tepelně nezpracované



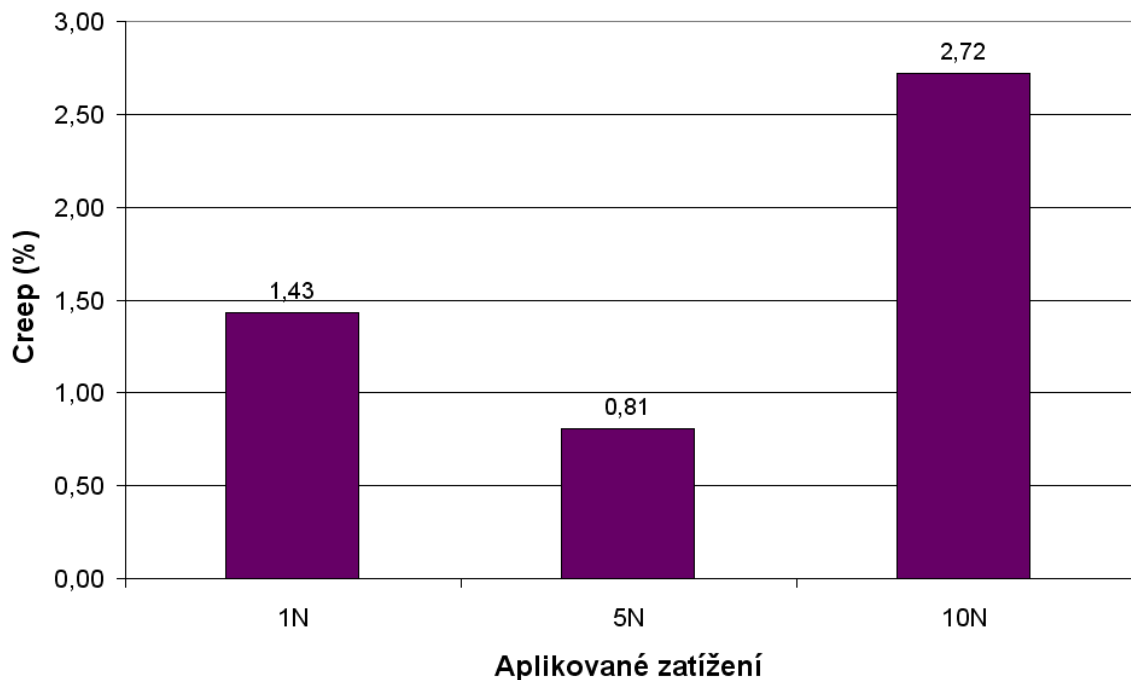
Obr. 37 Vtisková tvrdost tepelně nezpracované oceli 419573

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 10N (5570,97 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 5 N (1881,95 MPa) jak je patrné z obr. 37.



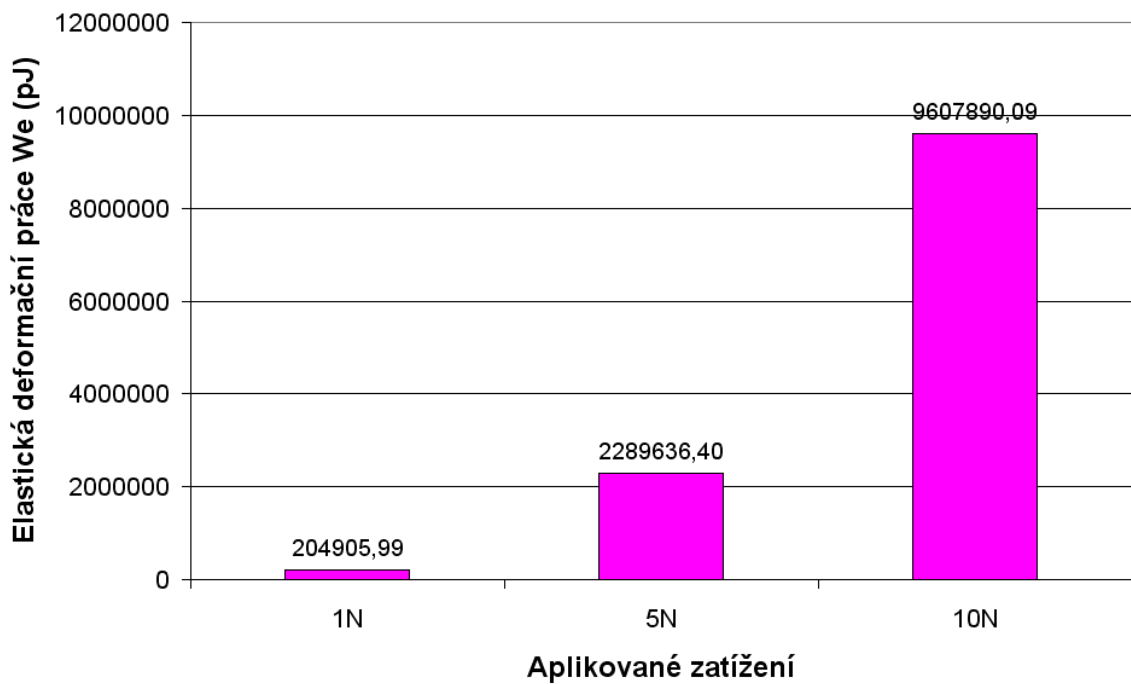
Obr. 38 Vtiskový modul pružnosti tepelně nezpracované oceli 419573

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (227,17 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (123,55 GPa), jak je patrné z obr. 38.



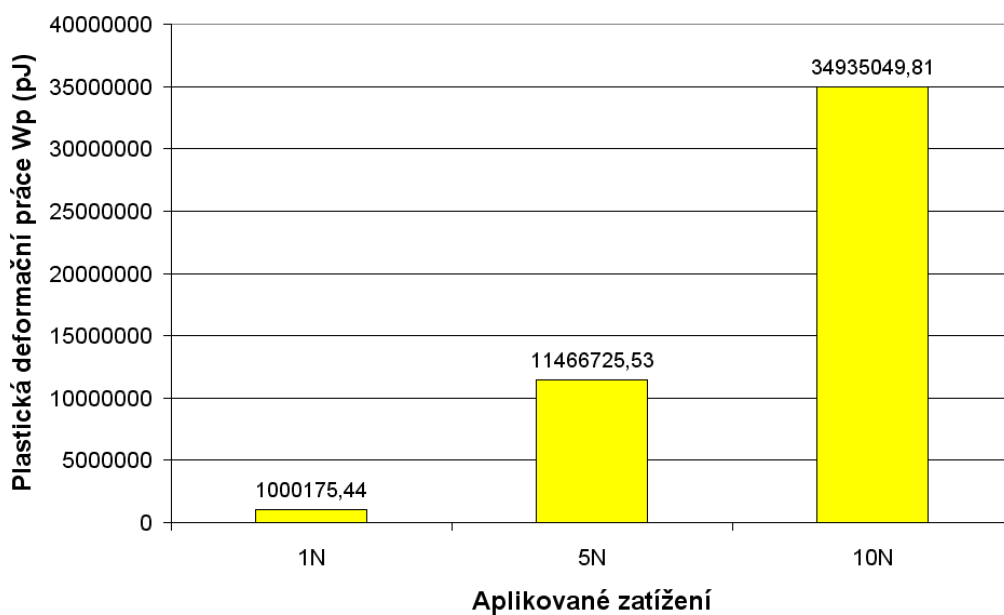
Obr. 39 Creep tepelně nezpracované oceli 419573

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 10N (2,72%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 5N (0,81%), jak je uvedeno na obr. 39.



Obr. 40 *Elastická deformační práce tepelně nezpracované oceli 419573*

Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrdosti změřena při zatížení 1N (204905,99 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (9607890,09 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 40.

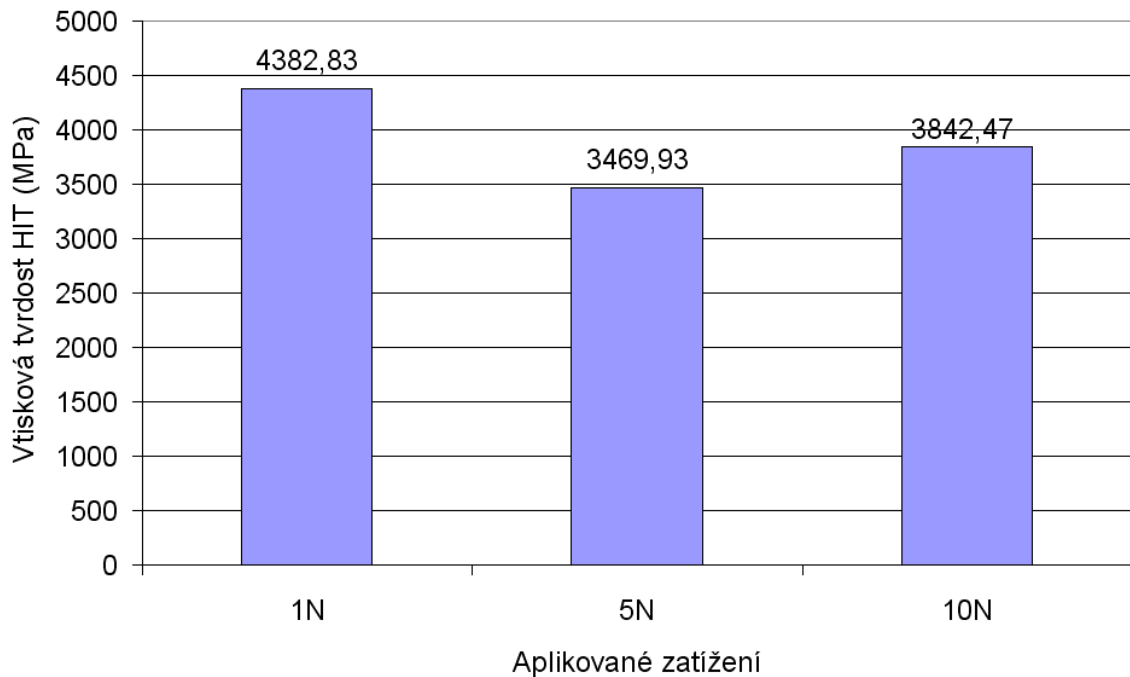


Obr. 41 *Plastická deformační práce tepelně nezpracované oceli 419573*

Při měření mikrotvrdomosti zkušebních těles tepelně nezpracované oceli 419573 byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (34935049,81 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (1000175,44 pJ), jak je patrné z obr. 41.

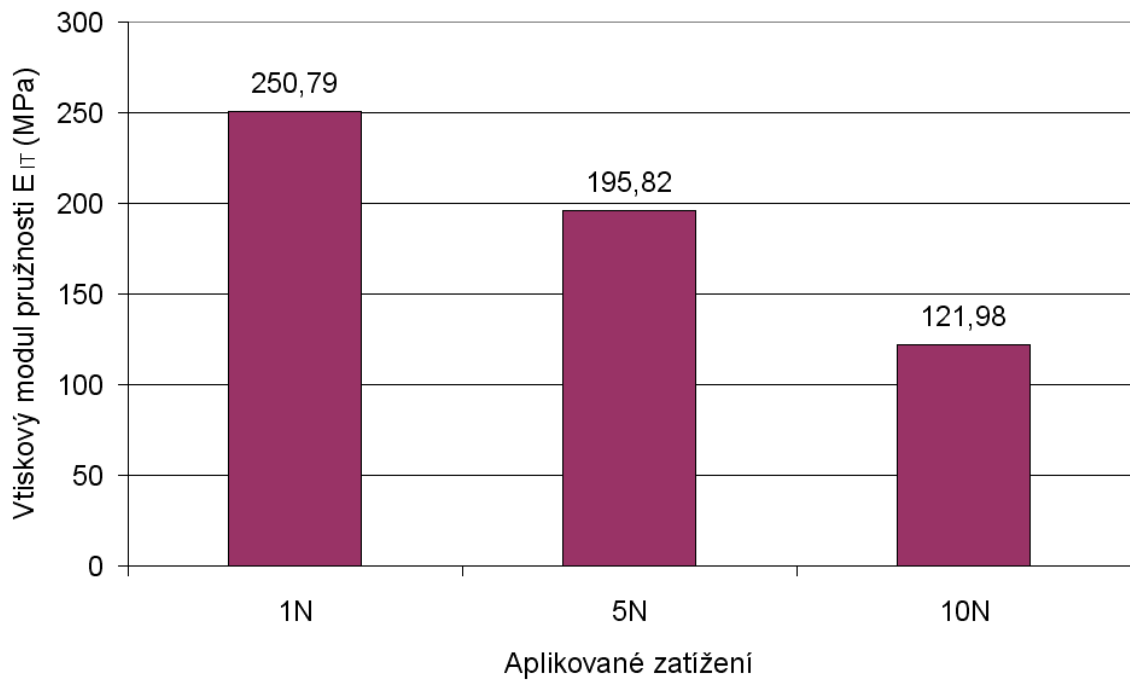
8.3.3 Zkušební tělesa ocel 419573 žíhané na měkko

Žíhání na měkko testovaných zkušebních těles spočívá v ohřevu součásti na žíhací teplotu 850°C a pomalém ochlazení 10°C/h na teplotu 650°C. Dochlazení součásti je následně dokončena na volném vzduchu.



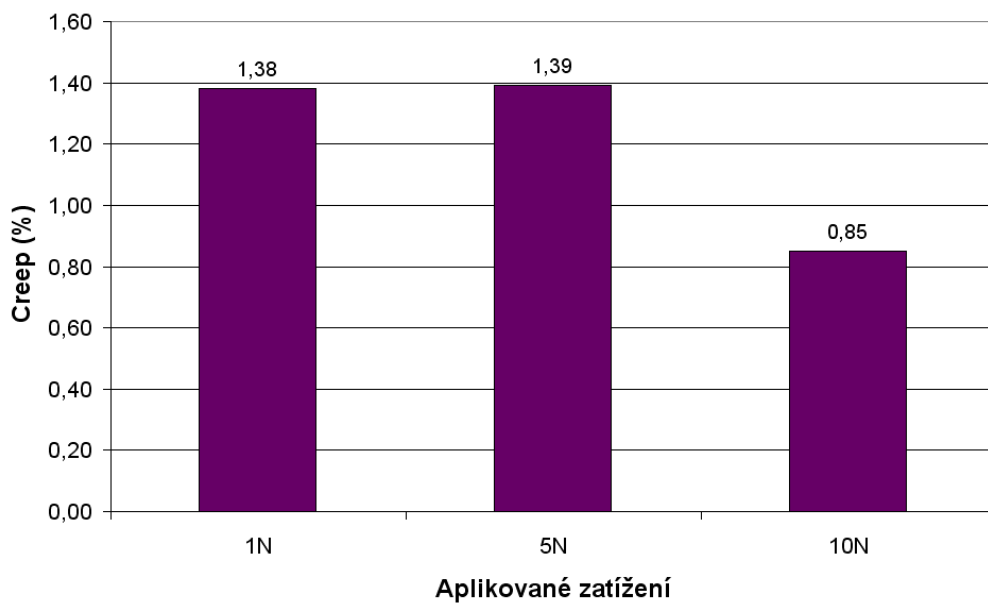
Obr. 42 Vtisková tvrdost oceli 419573 žíhané na měkko

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti zjištěna při zatížení 1N (4382,83 MPa), zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo při aplikovaném zatížení 5N (3469,93 MPa) jak je patrné z obr. 42.



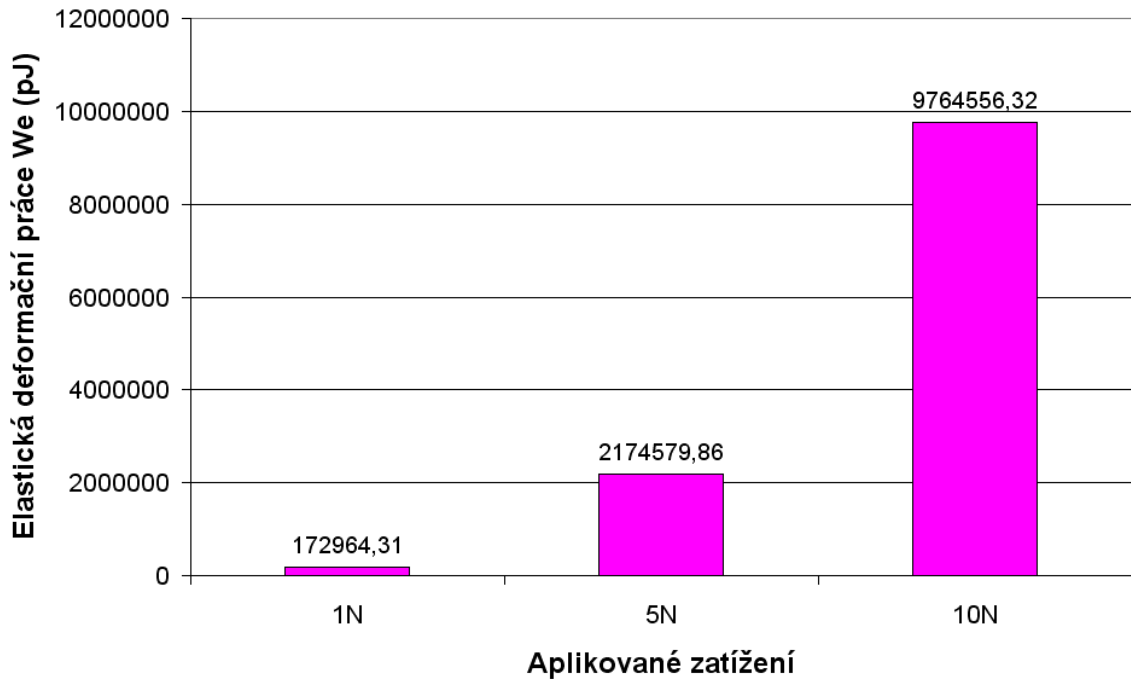
Obr. 43 Vtiskový modul pružnosti oceli 419573 žíhané na měkko

Nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u zatížení 1N (250,79 GPa). Naopak nejmenší hodnoty vtiskového modulu bylo dosaženo aplikovaným zatížením 10N (121,98 GPa), jak je patrné z obr. 43.



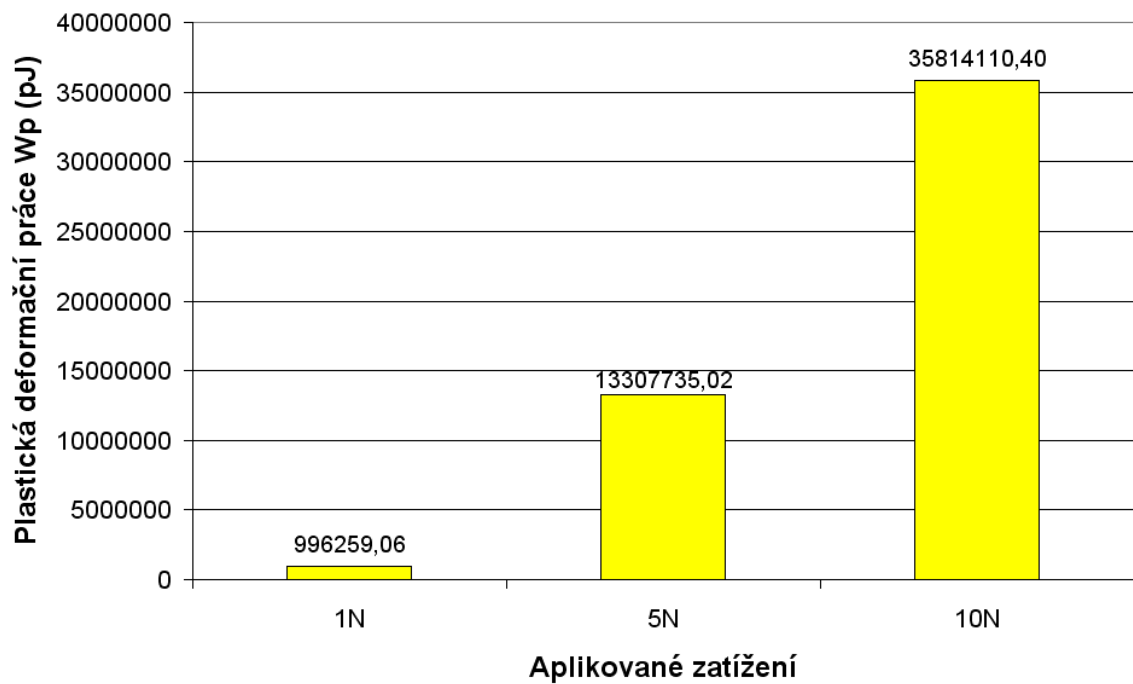
Obr. 44 Creepi oceli 419573 žíhané na měkko

Z naměřených hodnot při zkoušce mikrotvrlosti vyplynulo, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u zatížení 5N (1,39%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u zatížení 10N (0,85%), jak je uvedeno na obr. 44.



Obr. 45 *Elastická deformační práce oceli 419573 žíhané na měkko*

Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla měřením mikrotvrlosti změřena při zatížení 1N (172964,31 pJ), naopak největší hodnota byla zjištěna při nejvyšším zatížení 10N (9764556,32 pJ). Naměřené výsledky měření elastické deformační práce jsou zobrazeny na obr. 45.



Obr. 46 *Plastická deformační práce oceli 419573 žíhané na měkko*

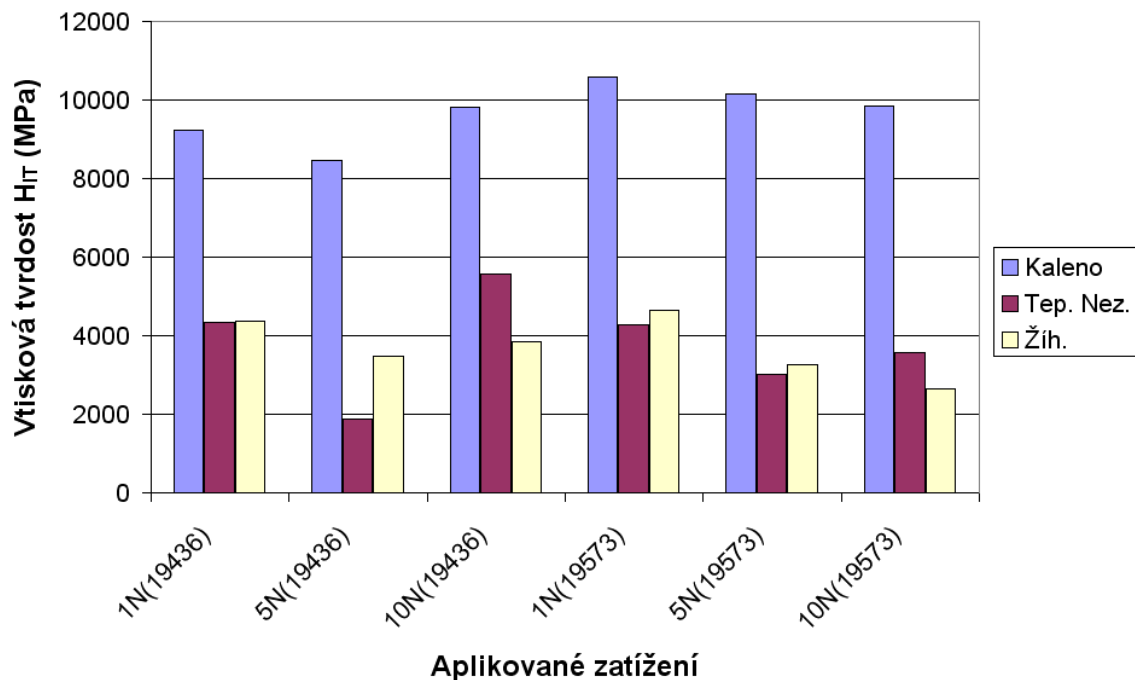
Při měření mikrotvrlosti zkušebních těles oceli 419573 žíhané na měkko byla největší hodnota plastické deformační práce zjištěna při zatížení 10N (35814110,4 pJ). Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 1N (996259,06 pJ), jak je patrné z obr. 46.

9 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V experimentální části diplomové bylo realizováno měření mikrotvrdomi metodou DSI. Byly vybrány dva typy kovových materiálu a to oceli třídy 19 (19436 a 19573). Každý z vybraných typů materiálů byl testován ve stavu tepelně nezpracovaném, kaleném a popuštěném a žíhaném na měkko. Na testovaných tělesech byla provedena maticová indendace při aplikovaném zatížení 1N, 5N a 10N. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny. Hodnoceny byly:

1. Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa)
2. Vtiskový modul pružnosti E_{IT} (MPa)
3. Creep (%)
4. Elastická deformační práce W_e (pJ)
5. Plastická deformační práce W_p (pJ)

9.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

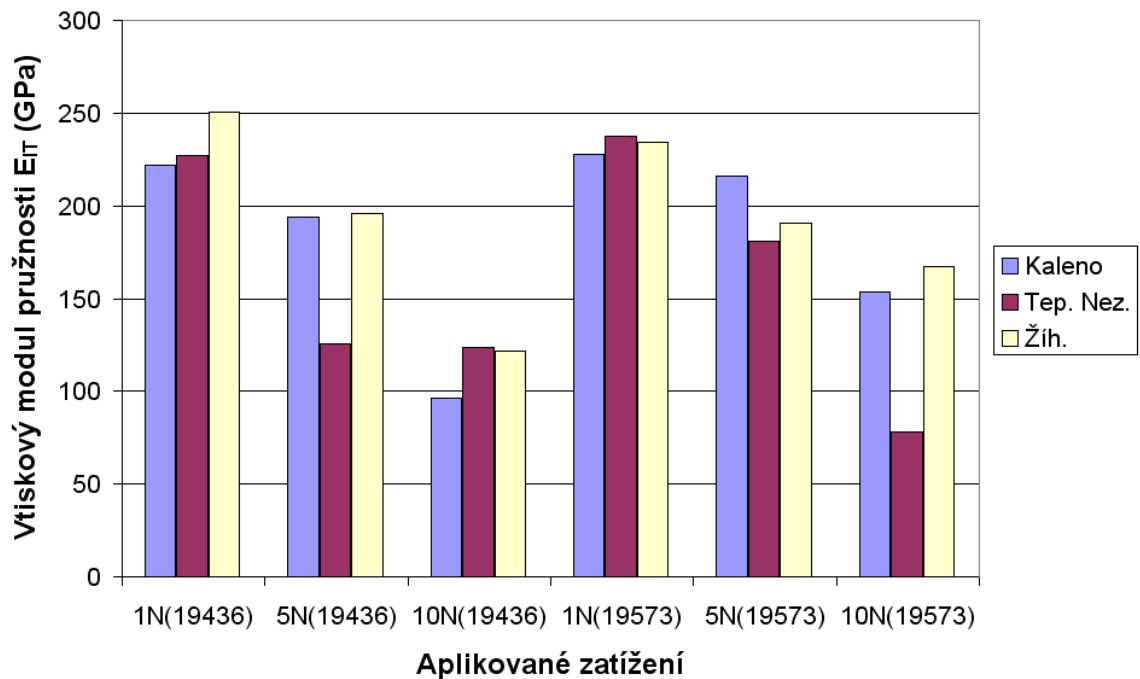


Obr. 47 Vtisková tvrdost

Z výsledků měření mikrotvrdomi vyplývá, že nejvyšší hodnot vtiskové tvrdosti bylo u obou typů testovaných materiálů dosaženo u tepelného zpracování kalení. Nejmenších hodnot

vtiskové tvrdosti bylo dosaženo u tepelně nezpracovaných testovaných zkušebních těles a u těles žíhaných na měkko. Výsledky jsou jednoznačně způsobeny strukturálními změnami vytvořenými po kalení a žíhaní na měkko. Zatímco u kalení byla dosažena nerovnovážná struktura tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým, vyznačující se vysokou tvrdostí, struktura lobulárního perlitu vytvořena po žíhaním na měkko se vyznačuje malou tvrdostí a pevností. Tomu také odpovídají zjištěné výsledky měření vtiskové tvrdosti, jak je patrné z obr. 47.

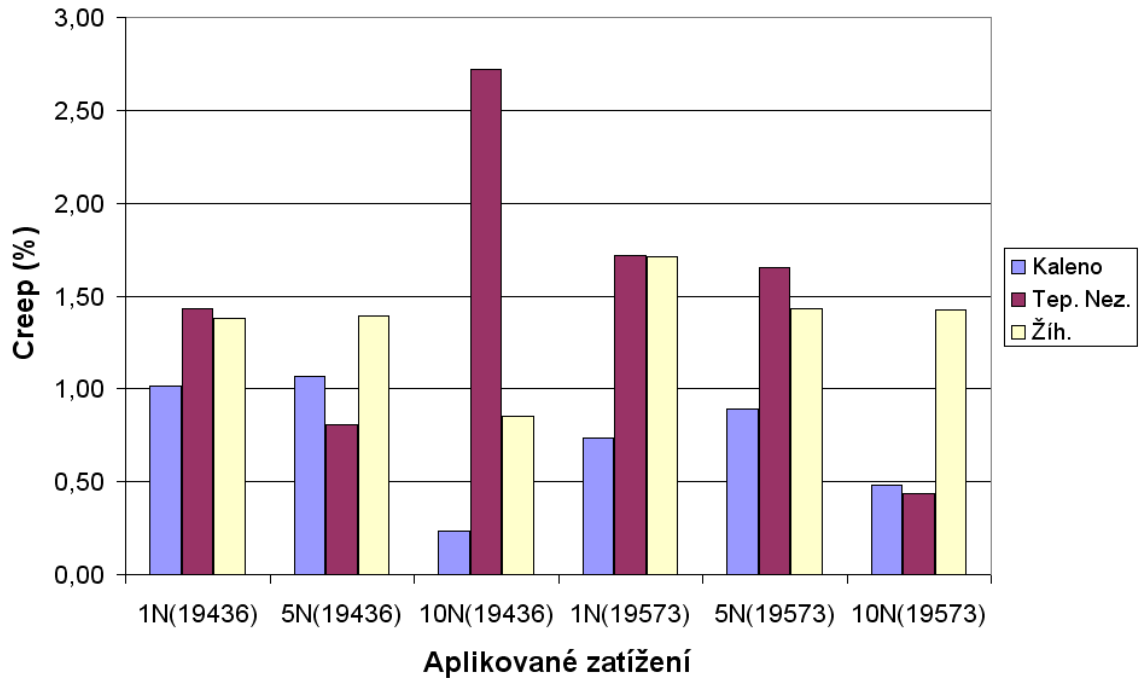
9.2 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}



Obr. 48 Vtiskový modul pružnosti

Vtiskový modul pružnosti charakterizuje tuhost testovaných zkušebních těles. Z výsledků měření je patrné, že největší tuhosti bylo dosaženo u zakaleného zkušebního tělesa, která vykazuje nerovnovážnou martenzitickou strukturu. Naopak nejmenší tuhost vykazuje zkušební těleso, které nebylo tepelně zpracováno a je charakterizováno strukturou perlitu. Zkušební těleso vyžíhané na měkko vykazovalo vyšší tuhost a skončilo v pořadí velikosti tuhosti na druhém místě, jak je vidět z obr. 48.

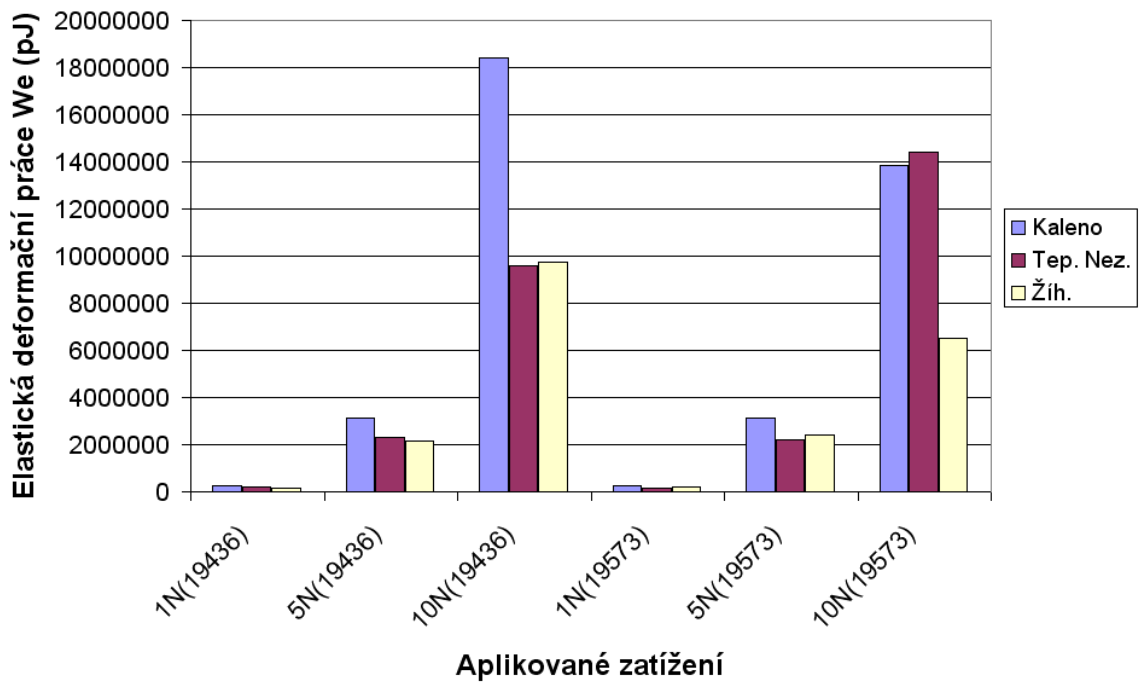
9.3 Creep



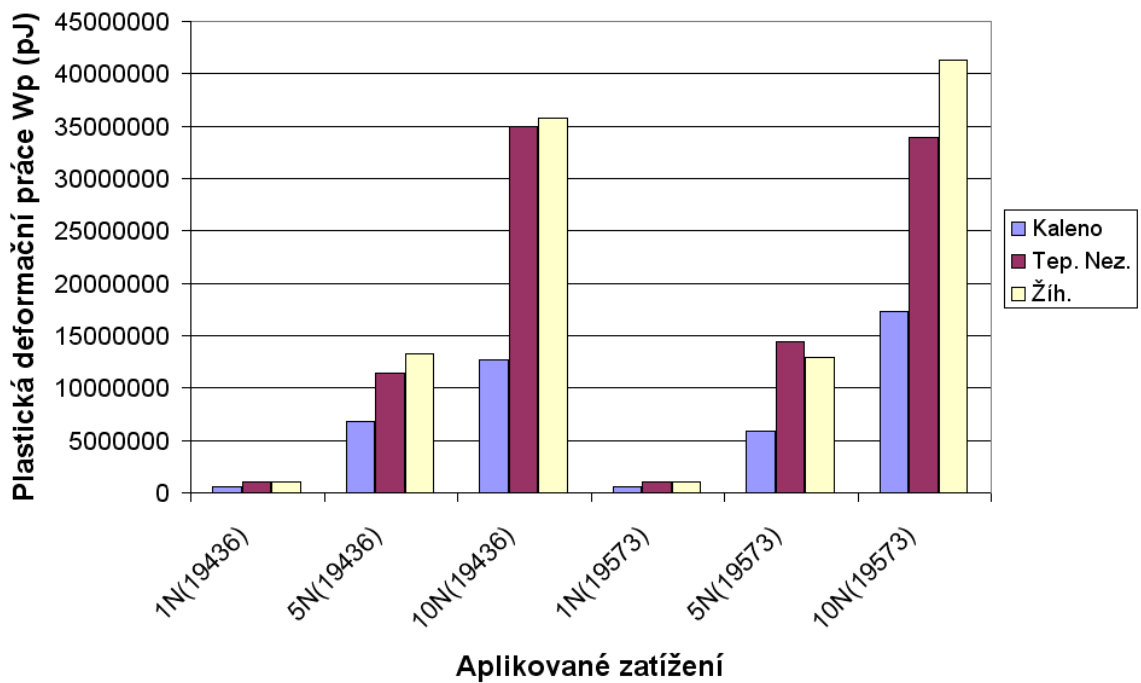
Obr. 49 Creep

Z výsledků creepového chování je patrné, že nejmenší hodnot creepu byla dosaženo u kalených zkušebních těles. Je to způsobeno nerovnovážnou strukturou, která odolá deformaci v průběhu času. Naopak u žíhaných a tepelně nezpracovaných zkušebních těles je patrný nárůst creepů, uvedený na obr. 49.

9.4 Elastická a plastická deformační práce W_e a W_p



Obr. 50 *Elastická deformační práce*



Obr. 51 *Plastická deformační práce*

Zajímavý pohled poskytuje elastická a plastická deformační práce zaznamenaná v průběhu testu mikrotvrdomosti. Z výsledků měření je patrné, že na velikost deformační práce bude mít

zásadní vliv velikost zatěžující síly aplikované u příslušného měření. Z obr. 50 a 51 je vidět, že se vzrůstajícím zatížením dochází k nárůstu deformační práce potřebné k provedení daného vtisku indentoru do testovaného zkušební tělesa. Z hlediska tepelného zpracování je zřejmé, že zakalené zkušební tělesa vykazovala menší elastickou deformační práci. Naopak tělesa žíhaná na měkko nebo tepelně nezpracovaná vykazovala daleko vyšší hodnoty plastické deformační práce.

ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problém měření mikrotvrdomosti u vybraných typů kovových materiálů (ocel třídy 19). Vybrané typy materiálů byly testovány jak surovém stavu (tepelně nezpracované), tak ve stavu tepelně zpracovaném (kalení + popuštění, žíhání na měkko). připravená zkušební tělesa byla podrobena měření mikrotvrdomosti metodou DSI se zvolenou zatěžující silou 1N, 5N, a 10N. naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti bylo dosaženo u zakaleného zkušební tělesa. Naopak tepelně nezpracované a zkušební těleso vyžíhané na měkko vykazovalo mnohem menší hodnoty vtiskové tvrdosti.

Velmi podobně tomu bylo také u míry tuhosti jednotlivých modifikovaných struktur. Nejvyšší tuhost vykazovala zakalená struktura, naopak nejmenší byla zjištěna u žíhaných nebo tepelně nezpracovaných zkušebních těles.

Creepové chování vykazovala nejlepší hodnoty u zakalené struktury, která více odolávala působící síle. Naopak struktura reprezentující tepelně nezpracovaný materiál nebo materiál vyžíhaný vykazovala mnohem větší hodnoty creepu.

Elastická deformační práce vykazovala nárůst hodnot u zakalené struktury, zatímco u perlické struktury byla elastická práce zjištěna mnohem menší. Plastická deformační práce dosáhla nízkých hodnot u zakalené struktury a naopak vysokých hodnot u struktury nezakalené.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUŠEK, Jiří. *Tvrdość, mikroťvrdość, nanotťvrdość - čistě kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Vyd. 1. Praha : Nakladatelství technické literatury Alfa, 1989. 552 s.
- [3] DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikroťvrdości struktur materiálů*. Brno : VUT, 2006. 41 s.
- [4] BRANDŠTETR, Jiří. *CHEMIE pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. 1. Brno : VUTIUM, 1999. 183 s.
- [5] PTÁČEK, L a kol. *Nauka o materiálu I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s..
- [6] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu II. (1. Svazek)*. Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 658 s.
- [7] ŘASA, J., ŠVERCL, J. *Strojnické tabulky II*. Praha : Nakladatelství SCIENTIA, spol. s.r.o., 2007. 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [8] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 3. vydání. Praha 6 : Pedagogické nakladatelství Scientia, 2000. 985 s. ISBN 80-7183-165-6.
- [9] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie I*. 4. vydání. Praha : nakladatelství Scientia, 2007. 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HIT	Vtisková tvrdost.
EIT	Vtiskový modul pružnosti.
We	Elastická deformační práce.
Wp	Plastická deformační práce.
HV	Tvrdost podle Vickerse.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse.....	17
Obr. 2 Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoopu.....	19
Obr. 3 Všeobecný cyklus tepelného zpracování.....	28
Obr. 4 Průběh žíhání.....	29
Obr. 5 Znázornění oblastí žíhaných teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C.....	29
Obr. 6 Některé druhy žíhání.....	31
Obr. 7 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C.....	33
Obr. 8 Lomené kalení (křivka 1) a spojitě martenzitické kalení (křivka 2).....	34
Obr. 9 Termální kalení.....	35
Obr. 10 Kalení se zmrazováním.....	35
Obr. 11 Nepřetržitě bainitické kalení.....	36
Obr. 12 Izotermické bainitické zušlechťování.....	37
Obr. 13 Část rovnovážného diagramu Fe-Fe ₃ C s.....	38
Obr. 14 Průběh času a teplot při nitridování.....	40
Obr. 15 Indentační křivky.....	46
Obr. 16 Leštící přístroj.....	48
Obr. 17 Vtisková tvrdost zakalené oceli 419436.....	50
Obr. 18 Vtiskový modul pružnosti zakalené oceli 419436.....	51
Obr. 19 Creep zakalené oceli 419436.....	51
Obr. 20 Elastická deformační práce zakalené oceli 419436.....	52
Obr. 21 Plastická deformační práce zakalené oceli 419436.....	53
Obr. 22 Vtisková tvrdost tepelně nezpracované oceli 419436.....	53
Obr. 23 Vtiskový modul pružnosti tepelně nezpracované oceli 419436.....	54
Obr. 24 Creep tepelně nezpracované oceli 419436.....	55
Obr. 25 Elastická deformační práce nezpracované oceli 419436.....	55
Obr. 26 Plastická deformační práce nezpracované oceli 419436.....	56
Obr. 27 Vtisková tvrdost oceli 419436 žíhané na měkko.....	57
Obr. 28 Vtiskový modul pružnosti oceli 419436 žíhané na měkko.....	57
Obr. 29 Creep oceli 419436 žíhané na měkko.....	58
Obr. 30 Elastická deformační práce oceli 419436 žíhané na měkko.....	59
Obr. 31 Plastická deformační práce oceli 419436 žíhané na měkko.....	59

Obr. 32 <i>Vtisková tvrdost kalené oceli 419573</i>	62
Obr. 33 <i>Vtiskový modul pružnosti kalené oceli 419573</i>	63
Obr. 34 <i>Creep kalené oceli 419573</i>	63
Obr. 35 <i>Elastická deformační práce kalené oceli 419573</i>	64
Obr. 36 <i>Plastická deformační práce kalené oceli 419573</i>	65
Obr. 37 <i>Vtisková tvrdost tepelně nezpracované oceli 419573</i>	66
Obr. 38 <i>Vtiskový modul pružnosti tepelně nezpracované oceli 419573</i>	66
Obr. 39 <i>Creep tepelně nezpracované oceli 419573</i>	67
Obr. 40 <i>Elastická deformační práce tepelně nezpracované oceli 419573</i>	68
Obr. 41 <i>Plastická deformační práce tepelně nezpracované oceli 419573</i>	68
Obr. 42 <i>Vtisková tvrdost oceli 419573 žíhané na měkko</i>	69
Obr. 43 <i>Vtiskový modul pružnosti oceli 419573 žíhané na měkko</i>	70
Obr. 44 <i>Creepi oceli 419573 žíhané na měkko</i>	70
Obr. 45 <i>Elastická deformační práce oceli 419573 žíhané na měkko</i>	71
Obr. 46 <i>Plastická deformační práce oceli 419573 žíhané na měkko</i>	72
Obr. 47 <i>Vtisková tvrdost</i>	73
Obr. 48 <i>Vtiskový modul pružnosti</i>	74
Obr. 49 <i>Creep</i>	75
Obr. 50 <i>Elastická deformační práce</i>	76
Obr. 51 <i>Plastická deformační práce</i>	76

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 <i>Tvrdość dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály</i>	16
Tab. 2 <i>Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdości dle Vickerse</i>	18
Tab. 3 <i>Druhy kalení</i>	32
Tab. 4 <i>Chemické složení</i>	49
Tab. 5 <i>Chemické složení</i>	61