

Vliv podmínek tepelného zpracování na mikro- mechanické vlastnosti

Štěpán Babík

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Štěpán Babík
Osobní číslo:	T22003
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv podmínek tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

BRYSON, William E. Heat treatment: master control manual. Munich : Hanser publishers, 2015. ISBN 978-1-56990-485-5.
BENEKE, Franz, Bernard NACKE a Herbert PFEIFER, ed. Handbook of thermoprocessing technologies. Volume 2, Plants, components, safety. Essen: Vulkan Verlag, 2015. ISBN 978-3-8027-2976-8.
METHAROM, Sunan, ed. Heat treatment: conventional and novel applications. New York: Scitus academics, 2017. ISBN 978-1-68117-519-5.

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 4. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je zkoumat vlivy podmínek tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti oceli.

Teoretická část popisuje vlastnosti a rozdělení ocelí, metody tepelného zpracování ocelí a zkoušky měření tvrdosti povrchu.

Praktická část se zabývá postupem přípravy zkušebních vzorků z vybrané oceli, jejich následné tepelné zpracování a měření mikro-mechanických vlastností metodou DSI. Nakonec statické a grafické vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova: ocel, tepelné zpracování, kalení, mikrostruktura, tvrdost, indenter, Vickers, DSI

ABSTRACT

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

The theoretical part describes the properties and classification of steels, heat treatment methods, and surface hardness testing techniques.

The practical part focuses on the preparation process of test specimens made from selected steel, their subsequent heat treatment, and the measurement of micro-mechanical properties using the DSI method. Finally, the results are evaluated both statistically and graphically.

Keywords: steel, heat treatment, hardening, microstructure, hardness, indenter, Vickers, DSI

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D., za ochotu, trpělivost, pomoc a podporu, zejména při realizaci praktické části. Velmi si vážím jeho vstřícného přístupu a cenných rad, díky nimž jsem byl schopen tuto práci úspěšně dokončit.

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 OCEL A JEJÍ SLITINY	13
1.1 VLASTNOSTI OCELI.....	13
1.1.1 Mechanické vlastnosti	13
1.1.2 Fyzikální vlastnosti	14
1.1.3 Chemické vlastnosti	14
1.2 TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA.....	15
1.2.1 Rozdělení ocelí ke tváření	16
1.2.2 Nelegované oceli	16
1.2.3 Legované oceli	17
2 PROCESY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELÍ.....	18
2.1 ŽÍHÁNÍ	19
2.1.1 Žíhání ke snížení pnutí	20
2.1.2 Rekrytalizační žíhání	20
2.1.3 Žíhání na měkko.....	20
2.1.4 Žíhání normalizační	20
2.1.5 Žíhání homogenizační (difuzní)	20
2.1.6 Žíhání izotermické	21
2.2 KALENÍ	21
2.2.1 Kalení martenzitické	23
2.2.2 Kalení bainitické	25
2.3 POPOUŠTĚNÍ.....	25
2.4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	26
2.4.1 Cementování	27
2.4.2 Nitridování	28
2.4.3 Nitrocementování a karbonitridování	28
2.5 TEPELNĚ-MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	28
3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI POVRCHU	30
3.1 TVRDOST.....	30
3.2 STATICKÉ METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI	30
3.2.1 Zkouška tvrdosti podle Martense	31
3.2.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella	31
3.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	32
3.2.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	33
3.2.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI	34
3.3 DYNAMICKÉ METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI	35
3.3.1 Měření pomocí kladívka Poldi	35
3.3.2 Zkouška podle Shorea	36

II	PRAKTICKÁ ČÁST	37
4	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	38
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
5.1	VOLBA ZKUŠEBNÍHO VZORKU.....	39
5.1.1	Ocel 17 102, Žárupevná Cr-Mo ocel	39
5.2	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	40
5.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	41
5.3.1	Zalisování vzorků	41
5.3.2	Leštění vzorků	42
5.4	FÁZE A STRUKTURNÍ SLOŽKY	43
5.5	MĚŘENÍ METODOU DSI	43
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	45
6.1	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	45
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ METODOU DSI ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK KALENÍ	46
6.2.1	Vliv mechanických vlastností na teplotě, kalící médium voda, výdrž na teplotě 30 minut	46
6.2.2	Vliv mechanických vlastností na čase, kalící médium voda, kaleno při teplotě 950 °C.....	49
6.2.3	Vliv mechanických vlastností na teplotě, kalící médium olej, výdrž na teplotě 30 minut.....	52
6.2.4	Vliv mechanických vlastností na čase, kalící médium olej, kaleno při teplotě 950 °C.....	56
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	59
7.1	TVRDOSTI VTISKU.....	59
7.2	VICKERSOVA TVRDOST.....	60
	ZÁVĚR.....	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

ÚVOD

Ocel je jedním z nejrozšířenějších konstrukčních materiálů především díky své vysoké pevnosti, dobré obrobitelnosti a relativně nízké ceně. Jedná se o slitinu železa s obsahem uhlíku do 2,14 %, legovanou prvky jako jsou chrom, mangan či vanad. Tyto prvky ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti. Charakteristické vlastnosti oceli jsou vysoká pevnost, tvrdost, tažnost a odolnost vůči korozi. Oceli se dělí podle chemického složení, mikrostruktury a mechanických vlastností, což umožňuje jejich široké využití v různých průmyslových odvětvích.

Tepelné zpracování je technologický proces, který spočívá v ohřevu materiálu na určitou teplotu, výdrži na této teplotě po určitou dobu a následné ochlazení. Cílem je zlepšení mechanických vlastností, jako jsou tvrdost, pevnost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Mezi nejrozšířenější způsoby tepelného zpracování patří žíhání, kalení a popouštění. Vhodná volba konkrétní metody a parametrů tepelného zpracování je klíčová pro dosažení požadovaných vlastností materiálu.

Zkoušky tvrdosti posuzují odolnost materiálu vůči trvalé deformaci působením vnějších sil. Zkoušky se rozdělují podle zatížení na statické a dynamické, podle principu na vrypové, vnikací a odrazové. Nejmodernější a nejpřesnější zkouška tvrdosti je metoda DSI.

Cílem praktické části práce je vyhodnotit vliv tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti vybrané oceli. Naměřené hodnoty mikro-tvrdosti jsou staticky a graficky zpracovány a vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OCEL A JEJÍ SLITINY

1.1 Vlastnosti oceli

Ocel je slitina železa, uhlíku a přísad s obsahem uhlíku menším než 2,14 %. S obsahem vyšším než 2,14 % uhlíku je ocel označována jako litina. Může se objevit v různých stavech (austenit, ferit α , perlit, ledeburit, cementit), které popisuje fázový binární diagram železo-uhlík, a v několika strukturách (martenzit, bainit, sorbit, troosit, žmirin), které popisují diagramy IRA či ARA. Také různé příměsi ovlivňují vlastnosti oceli. Fosfor a kobalt zvyšují pevnost a tvrdost, mangan zase odolnost proti opotřebení a chrom korozivzdornost.

Ocel je jedním z nejvýznamnějších konstrukčních materiálů, používaných díky své široké škále mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. [3][6]

1.1.1 Mechanické vlastnosti

Charakterizují chování materiálu při mechanickém namáhání (při působení vnějších sil). Toto chování je důležité při pevnostních výpočtech, nebo při vybírání vhodného materiálu pro technologické účely např. tváření hlubokým tahem a také jako známka kvality materiálů a polotovarů u přejímky mezi výrobcem a zákazníkem. [1][9]

Základní mechanické vlastnosti jsou:

Pružnost (elasticita) - je schopnost materiálu se pružně deformovat před porušením materiálu. Deformace je vratná, po odlehčení se těleso vrátí na původního tvaru. Při pružné deformaci platí zákon o zachování objemu. [1]

Tvárnost (plasticita) - je schopnost materiálu se pružně deformovat před porušením materiálu. Deformace je nevratná, po odlehčení se těleso nevrátí do původního tvaru. Při plastické deformaci neplatí zákon o zachování objemu. [1]

Pevnost – je odolnost materiálu proti trvalému porušení soudržnosti částic. [1]

Houževnatost – je odolnost materiálu proti vzniku deformace nebo porušení. Míra houževnatosti je množství mechanické práce, která je potřeba k deformaci nebo porušení materiálu. [1]

1.1.2 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti jsou charakteristiky materiálů, které popisují jejich chování při různých fyzikálních změnách. Tyto vlastnosti neovlivňují chemickou strukturu materiálu a mohou být měřeny nebo pozorovány bez změny jeho složení. [2][3]

Základní chemické vlastnosti jsou:

Hustota je poměr hmotnosti k objemu dané látky. Tato vlastnost určuje například, zda je materiál těžší než voda. [2][3]

Teplota tání je teplota, při které látka mění své skupenství. [2][3]

Délková roztažnost je změna délky látky vlivem měnící se teploty. (vlivem rostoucí teploty se materiály prodlužují) [2][3]

Objemová roztažnost je změna objemu látky vlivem změny teploty. (největší tepelnou vodivost má zlato a stříbro a keramika má naopak nejmenší). [2][3]

Tepelná vodivost je schopnost materiálu přenášet tepelnou energii. [2][3]

Elektrická vodivost je schopnost materiálu vést elektrický proud. Technické materiály se podle vodivosti dělí na vodiče, polovodiče a nevodiče. [2][3]

Magnetické vlastnosti vyjadřují chování materiálu v magnetickém poli. [2][3]

1.1.3 Chemické vlastnosti

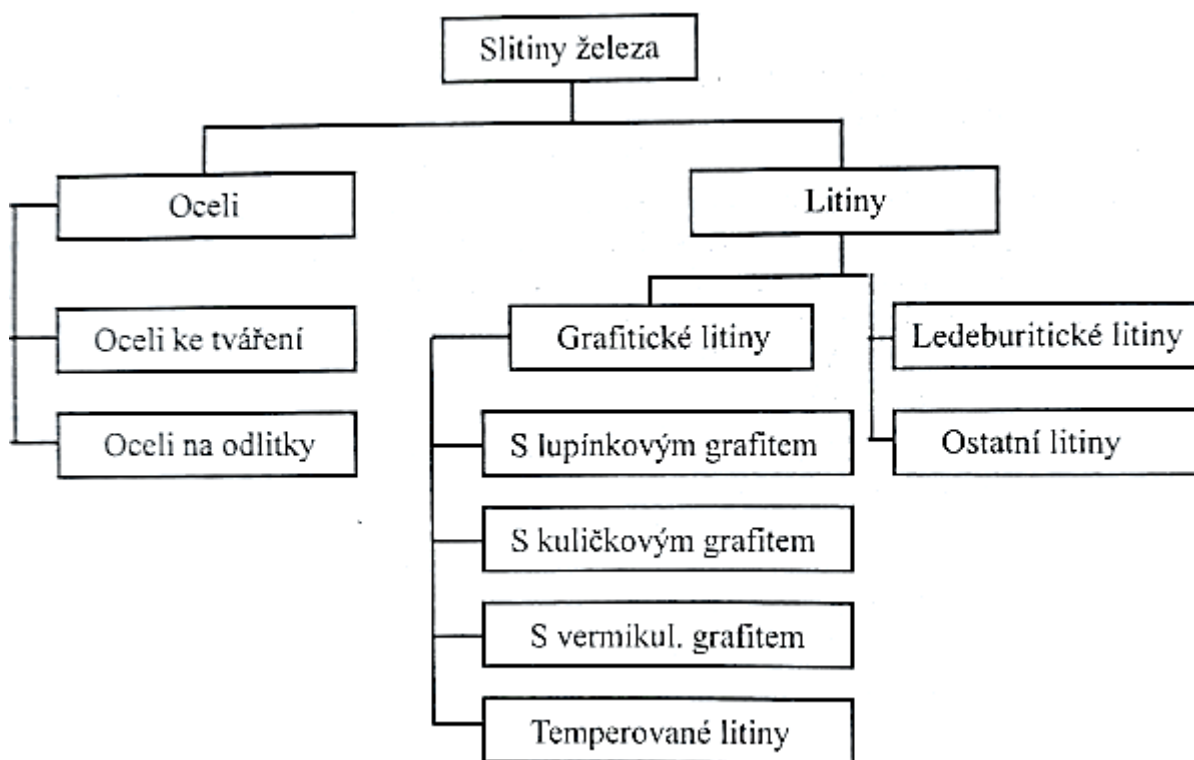
Chemické vlastnosti technických materiálů určují jejich vhodnost pro použití v různých podmínkách, přičemž klíčovým faktorem je odolnost proti korozi, způsobená oxidací. Existují dva typy koroze: chemická koroze, která vzniká na kovových materiálech v plynné atmosféře za vysokých teplot, a elektrochemická koroze, při níž dochází k rozrušování kovů s různými elektrickými potenciály. Oceli legované chromem a niklem vykazují lepší odolnost vůči korozi než běžné uhlíkové oceli, což je činí vhodnými pro použití v náročných prostředích, jako jsou chemické závody. [4] [2]

Dalším důležitým aspektem chemických vlastností oceli je její chování při různých teplotách. Například, Curieova teplota, při které se mění magnetické vlastnosti oceli, se pohybuje mezi 720 °C a 768 °C v závislosti na chemickém složení. Tato teplota je klíčová pro aplikace, kde je magnetické chování oceli důležité, například v elektromagnetických zařízeních. [5]

1.2 Technické slitiny železa

Slitiny železa tvoří nejvýznamnější skupinu kovových materiálů. Druhy slitin vznikly dlouholetým výzkumem a zdokonalováním v provozních podmínkách. Široká škála jejich vlastností je dána chemickým složením a technologií kterou je vyrobena. Přidáním legujících prvků a správným tepelným zpracováním lze dosáhnout ocelí s vysokou pevností a dostatečnou houževnatostí pro použití v náročných podmínkách. Velký výběr ocelí se neustále vylepšuje a dochází k vzniku nových skupin ocelí, které jsou schopny nahrazovat slitiny ostatní. Ocel se používá již přes tisíc let k jejím značným rozvoji došlo teprve v druhé polovině minulého století. Do té doby se rozlišovali jen 2 základní typy ocelí. Uhlíková ocel s nízkým obsahem uhlíku a tvrdší kalitelná ocel s vyšším obsahem uhlíku, pro kterou bylo vyvinuto označení „ocel“. Technické slitiny železa mají v celosvětové výrobě kovů nejvýznamnější postavení. Při zpracování není snadno vyrobit čisté železo, ale vyrábí se slitiny, obsahující kromě uhlíku i další prvky (mangan, křemík, fosfor, síru, aj.). [11][23]

Technické slitiny železa se obecně dělí podle schématu:

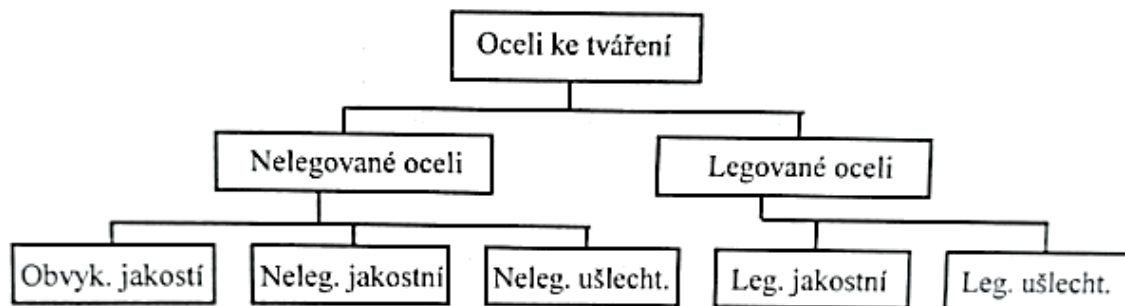


Obr. 1 Schéma rozdělení slitin železa [7]

1.2.1 Rozdělení ocelí ke tváření

Oceli ke tváření jsou materiály, které mají hmotnostní podíl železa vyšší než kteréhokoliv jiného prvku, obsahují více než 2 % uhlíku a zahrnují i další prvky. Některé oceli obsahují i více než 2 % C ale hodnota 2 % C je všeobecně považována za rozdíl mezi ocelí a litinou. [7]

Schéma rozdělení ocelí ke tváření je tvořeno podle schématu:



Obr. 2 Schéma rozdělení ocelí ke tváření [7]

1.2.2 Nelegované oceli

Jsou to oceli, jejich obsah jednotlivých prvků, nedosahuje hodnot uvedených v tabulce 1. Posuzuje se minimální předepsaný obsah daného prvku. Pokud je pro posuzovanou ocel předepsána maximální hodnota některého prvku tak pro rozdělení mezi legovanou a nelegovanou se použije 70 % této hodnoty. [7][20]

Nelegované oceli se dělí podle ČSN EN 10020 na:

- **Oceli obvyklých jakostí** – nejsou vhodné pro tepelné zpracování (kromě žíhání k odstranění pnutí, žíhání na měkko a normalizační žíhání), nemají předepsány zvláštní kvalitativní charakteristiky ani předepsané hodnoty legujících prvků kromě manganu a křemíku.
- **Nelegované jakostní oceli** – patří sem všechny nelegované druhy ocelí kromě ocelí obvyklých jakostí a ušlechtilých ocelí. Nemají předepsány požadavky na stupeň čistoty. Mají vyšší nároky při namáhání, kterému jsou vystaveny (velikost zrna aj.)
- **Nelegované ušlechtilé oceli** – jsou vhodné pro povrchové kalení nebo zušlechťování. Mají přesně stanovení chemické složení. Mají vyšší stupeň čistoty oproti jakostním ocelím. Patří zde např.: oceli pro jaderné reaktory, oceli pro přepínací výztuž do betonu, oceli s požadavky na nárazovou práci aj. [7] [20]

1.2.3 Legované oceli

Jsou to oceli, jejich obsah jednotlivých prvků, dosahuje minimálně v jenom případě hodnot uvedených v tabulce 1.[7]

Legované oceli dělíme na:

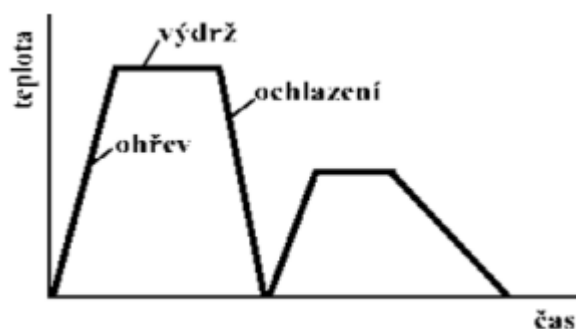
- **Legované jakostní oceli** – Jsou určeny pro tlakové nádoby, potrubí, kolejnice, důlní výztuže.
- **Legované ušlechtilé oceli** – Požadované vlastnosti u těchto ocelí docílíme správným chemickým složením, zvláštními podmínkami výroby a zkoušením. Používají se jako rychlořezné oceli, nerezavějící oceli nebo ostatní legované oceli. [7]

Tabulka 1 Mezní obsahy legujících prvků pro rozdělení ocelí na legované a nelegované (obsahy jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech) [7]

Al	hliník	0,10	Ni	nikl	0,30
B	bór	0,0008	Pb	olovo	0,40
Bi	vismut	0,10	Se	selen	0,10
Co	kobalt	0,10	Si	křemík	0,50
Cr	chróm	0,30	Te	telur	0,10
Cu	měď	0,40	Ti	titan	0,05
La	lanthanidy	0,05	V	vanad	0,10
	(hodnoceno jednotlivě)				
Mn	mangan	1,65	W	wolfram	0,10
Mo	molybden	0,08	Zr	zirkon	0,05
Nb	niob	0,06		ostatní (vyjma C, P, S, N)	0,05

2 PROCESY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELÍ

Tepelné zpracování je proces, při kterém je materiál podroben určitému tepelnému cyklu, aby se dosáhlo požadovaných vlastností (tvrdost, houževnatost, pevnost) a struktury. Každý cyklus tepelného zpracování se skládá z ohřevu, výdrže na teplotě a ochlazení. K požadované změně struktury dochází kombinací výdrže na teplotě a ochlazovacích podmínek.[10]



Obr. 3 Obecný cyklus tepelného zpracování [10]

Ohřev na teplotu může být přímý nebo stupňovitý. Rychlost ohřívání je závislá nejen na velikosti a tvaru součásti, ale také na stupni legování. Ohřev se provádí v pecích nebo v lázních. Atmosféra v peci může způsobovat oxidaci nebo oduhličování materiálu, proto je nutno tyto materiály chránit nátěry nebo zábaly. Moderní pece používají ochranné interní atmosféry, aby k těmto nechtěným jevům nedocházelo. [10][11]

Výdrž na teplotě zajistí rovnoměrné prohřátí celého průřezu a zaručí průběh požadovaných reakcí (rozpuštění některých fází, vyrovnání chemického složení aj.). Pro dosažení požadované struktury je rozhodující ochlazovací fáze, která pro ocel určitého chemického složení zajistí vznik rovnovážné nebo nerovnovážné struktury. Rozlišujeme 2 základní postupy tepelného zpracování: **žihání**, při kterém pomalým ochlazováním vznikají struktury blízké rovnovážnému stavu a **kalení**, které má za následek vznik nerovnovážných struktur při ochlazování nadkritickou rychlostí. [10][11]

Další postup tepelného zpracování je **chemicko-tepelné zpracování**. Je to proces, při kterém se povrchová vrstva oceli mění působením speciálního prostředí za zvýšené teploty, což vede ke změně jejího chemického složení a zlepšení specifických vlastností. **Tepelně-mechanické zpracování** je proces, při kterém kombinace tepelného zpracování a plastické deformace během tváření způsobuje změny ve struktuře materiálu, což zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. [10][11]

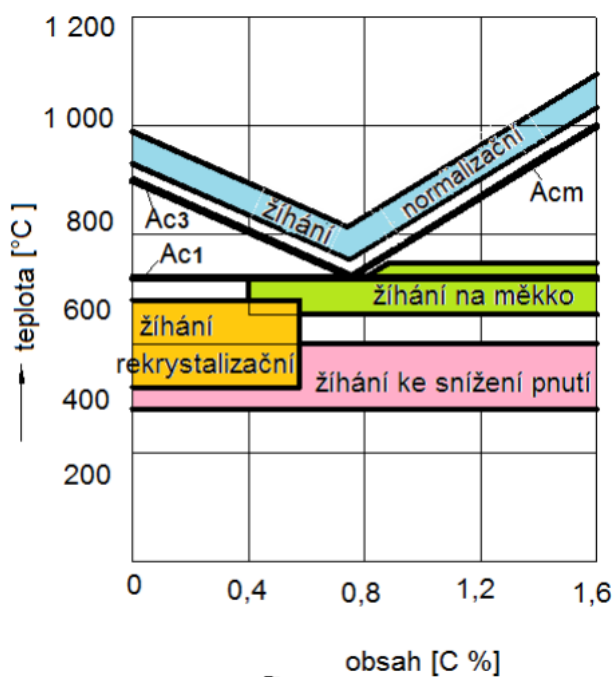
K ochlazování se většinou používají následující prostředí:

- **Ochlazování v peci** – nejmírnější ochlazovací prostředí. Díky regulaci tepelných podmínek pece lze ochlazovat cíleně a velmi pomalu. [10][11]
- **Ochlazování v oleji** – olej ochlazuje intenzivněji než vzduch, ochlazovací intenzitu lze zvýšit prouděním oleje. [10][11]
- **Ochlazování ve vodě** – Voda je nejintenzivnějším ochlazovacím médiem, je levná a šetrná pro životní prostředí. Její vysoká ochlazovací schopnost může však vést k deformacím a trhlinám u složitějších dílců. [10][11]

Rychlost ochlazování ovlivňuje vlastnosti zpracovávaného materiálu, rychlé ochlazení je klíčové pro kalení, zatímco pomalé ochlazování se používá při žíhání. [10][11]

2.1 Žíhání

Žíhání je tepelný proces, který zlepšuje vlastnosti oceli, litin a neželezných kovů tím, že dosahuje tzv. **rovnovážného stavu**. To je stav, při kterém ocel ztrácí část své tvrdosti, snižuje se vnitřní pnutí, krystaly deformované např. tvářením nebo válcováním, se srovnají, zlepši se její odolnost, houževnatost, obrobiteľnosť a jiné vlastnosti. Tento proces zahrnuje zahřátí na žíhací teplotu, udržení této teploty po určitou dobu a následné pomalé chlazení.[2][10]



Obr. 4 Oblast žíhacích teplot [12]

Podle výšky žíhací teploty rozlišujeme:

- **Žíhání bez překrystalizace** (při teplotách nižších než 727 °C) – žíhání ke snížení pnutí, žíhání rekrytalizační, žíhání na měkko. [12]
- **Žíhání s překrystalizací** (při teplotách vyšších než 727 °C) – normalizační žíhání, homogenizační (difuzní) žíhání, izotermické žíhání. [12]

2.1.1 Žíhání ke snížení pnutí

Slouží ke snížení vnitřních pnutí způsobených předchozím tepelným zpracováním. Provádí se po svařování, tváření za tepla a za studena, odléváním nebo mechanickém opracování. Žíhací teploty bývají okolo 600-650 °C, výdrž na teplotě je několik hodin. Ochlazuje se pomalu v peci na teplotu 200 °C. Následuje ochlazení na vzduchu. [10][11][24]

2.1.2 Rekrytalizační žíhání

Slouží k odstranění zpevnění vyvolané předchozím tvářením. Používá se jako mezioperační žíhání při tváření ocelí za studena. Teploty dosahují 550-700 °C a výdrž na teplotě až 5 hodin. [10][11][24]

2.1.3 Žíhání na měkko

Provádí se ke zvýšení obrobiteľnosti a ke snížení tvrdosti materiálu. Tím se dosahuje změnou lamelárního perlitu na globulární. Podmínky žíhání se řídí chemickým složením oceli. Pro uhlíkové a nízkolegované konstrukční oceli se žíhá při teplotách 680-720 °C s výdrží 4-8 hodiny, ochlazuje se v peci. [10][11]

2.1.4 Žíhání normalizační

Ohřev se provádí 30 až 50 °C nad teplotu Ac3. Výdrž na teplotě bývá 1-4 hodiny. Ochlazování probíhá na vzduchu, nebo v olejové lázni (díly velkých rozměrů). Normalizačním žíháním se vytvoří struktura feritu a perlitu, zjemní se austenitické zrna alepší se mechanické vlastnosti. [10][11]

2.1.5 Žíhání homogenizační (difuzní)

Používá se k vyrovnaní chemické nestejnorodosti, které vznikají při tuhnutí odlitků nebo ingotů. Chemická heterogenita se snižuje difuzními procesy, které jsou účinnější při vyšších teplotách. Proto se žíhací teploty obvykle volí 1100 až 1250 °C. Výdrž na teplotě bývá 5 až 15 hodin. Dlouhodobý ohřev při vysokých teplotách vede k oxidaci povrchu a oduhličení

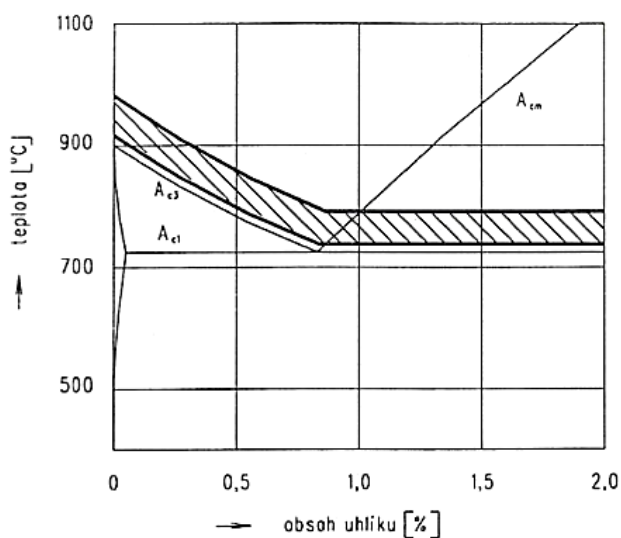
povrchu. Současně nastává hrubnutí austenitického zrna. Jejich zjemnění dosáhneme tepelným zpracováním s překrystalizací (normalizace, ušlechťení). [10][11]

2.1.6 Žihání izotermické

Tvoří ho ohřev na teplotu A_{c3} , výdrž na této teplotě a následném ochlazení na teplotu izotermického rozpadu austenitu v oblasti perlitické přeměny a ochlazování na vzduchu po ukončení přeměny. Izotermické žihání využívá znalost IRA diagramu příslušné oceli. Cílem je zlepšení obrobiteľnosti a snížení pevnosti. Používá se pro oceli, které mají žihací cykly příliš dlouhé. [11]

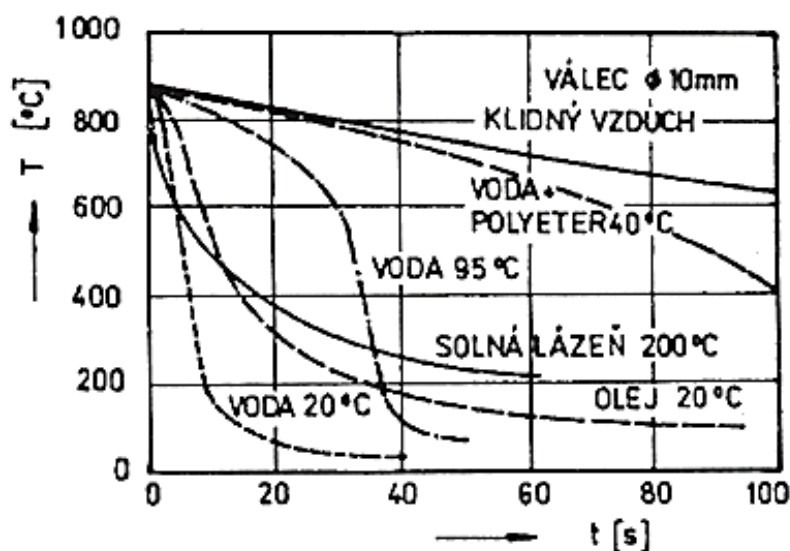
2.2 Kalení

Kalení je tepelné zpracování, jehož účelem je zvýšení tvrdosti oceli. Skládá z ohřevu na kalící teplotu, výdrži na této teplotě a následném ochlazování rychlostí která je rychlejší, než je rychlost kritická. Kalící teploty leží 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} (pro padeutektoidní oceli) nebo A_{c1} (pro nadeutektoidní oceli). Cílem kalení je dosáhnout nerovnovážné struktury s vysokou pevností a tvrdostí. Kalením vzniká buď martenzit nebo bainit. Podle toho dělíme kalení do dvou základních skupin na kalení martenzitické a bainitické. Tvrdost martenzitu se zvyšuje s rostoucím obsahem uhlíku, ale zároveň se zvyšuje jeho křehkost. Proto se kalené oceli dále zpracovávají popouštěním. Pouze oceli s nízkým obsahem uhlíku mají po kalení dobrou houževnatost, pro tyto oceli není třeba dále zpracovávat. Oceli s obsahem uhlíku nižším než 0,2 % se považují za nekalitelné. [11][13][14]



Obr. 5 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu $Fe - Fe_3C$ [14]

- **Kalitelnost** – Schopnost materiálu dosáhnout kalením určité tvrdosti. Nejvyšší dosažitelná tvrdost materiálu závisí na obsahu uhlíku. Za dobře kalitelné jsou považovány oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0.35 %. [7][10][11]
- **Zakalitelnost** – nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli, je dána tvrdostí martenzitu, která s rostoucím obsahem uhlíku stoupá. Výsledná tvrdost je také ovlivněna zbytkovým austenitem po zakalení. [7][10][11]
- **Prokalitelnost** – je schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem. [7][10][11]
- **Kalící prostředí** – Při volbě ochlazovacího prostředí je potřeba volit takové prostředí, kde bude rychlost ochlazování překračovat jen o málo rychlost kritickou. Příliš velká ochlazovací rychlost vede ke vzniku vnitřních teplotních a strukturních pnutí. Účinnost ochlazování je podmíněna tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a viskozitě kalícího prostředí. [7][10][11]



Obr. 6 Ochlazovací křivky středu ocelového válce o průměru 10 mm v uvedených prostředích [7]

Ochlazovací prostředí:

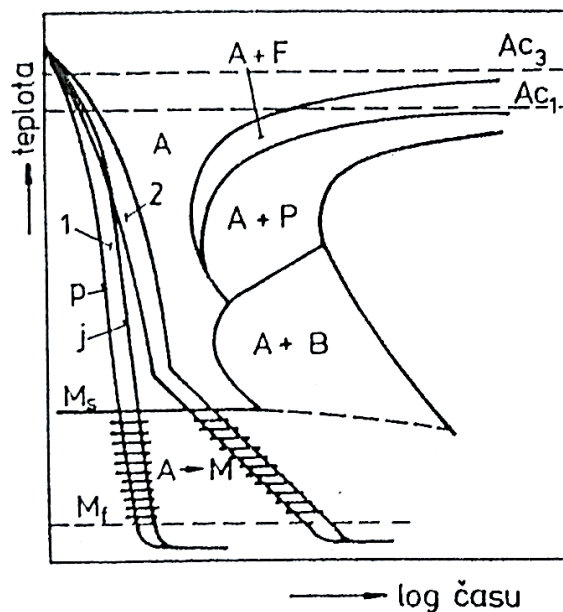
- **Voda** – Nejběžnější, nenáročný, levný a nejstarší kalící prostředí. Na povrchu součásti se vytváří tenká vrstva vodní páry, která významně zpomaluje chlazení, a proto je nutné se součástí pohybovat. Účinek ochlazování je možno zvýšit

cirkulací lázně nebo přidáním přísad které snižují stabilitu vrstvy páry (kyseliny, hydroxidy, soli). [7][11]

- **Olej** – Používají se minerální oleje s aditivy. Má ve srovnání s vodou menší rychlost ochlazování. V oblasti perlitické přeměny 3 až 4x, u martenzitické až 10x. Kalí se především legované oceli. Výhodou jsou malá vnitřní pnutí. Nevýhodami jsou nebezpečí vzplanutí, negativní vliv na životní prostředí, vyšší cena a nutnost výměny oleje vlivem chemické změny a tím i snížení účinnosti. [7][11]
- **Vzduch** – Nejmírnější kalící prostředí. Jeho účinek lze zvýšit prouděním nebo kombinací s vodní sprchou. Používá se pro kalení vysoce legovaných ocelí. [7][11]
- **Roztavené solné a kovové lázně** – Používají se taveniny kovů (olovo, cín) nebo soli. Ochlazovací účinnost solných lázní je poměrně malá, dá se zvětšit cirkulací nebo přidáním vody do 0.5 %. Snižuje se nebezpečí vzniku vnitřních pnutí a deformací. [7][11]

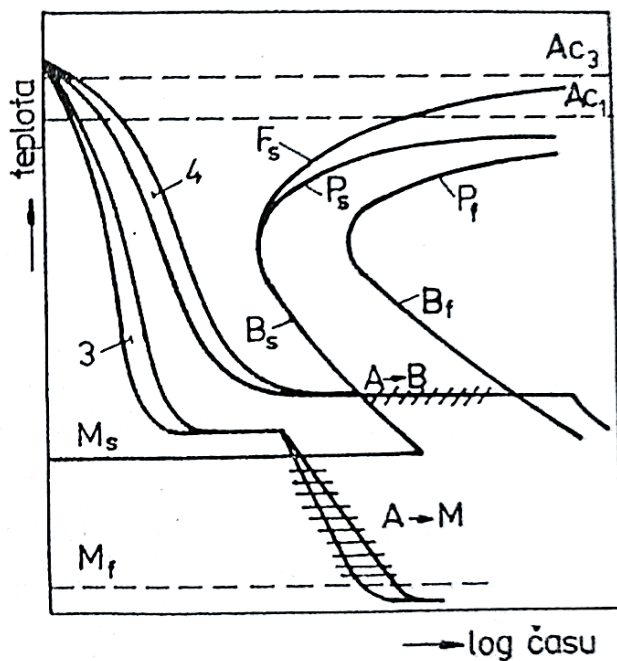
2.2.1 Kalení martenzitické

- **Martenzitické kalení do studené lázně** – Nejjednodušší a nejpoužívanější způsob kalení. Zakalené předměty se poté zušlechťují. Uhlíkové oceli se kalí do vody, nízkolegované a středně se kalí do oleje. [7][11]
- **Lomené kalení** – Při lomeném, někdy nazývaném přerušovaném kalení se součást ochlazuje ve vodě nad teplotu M_s . Poté následuje chlazení v olejové lázni, kde proběhne martenzitická přeměna. Používá se u rozměrově a tvarově složitějších součástí, které by při úplném chlazení popraskali. [7][11]



Obr. 7 Způsoby kalení, 1). do studené lázně, 2) lomené kalení [11]

- **Termální kalení** – Při termálním kalení se používají solné lázně s teplotou lehce nad M_s kalené oceli. Následuje prodleva, která zajistí vyrovnaní teploty v celém průřezu a předejde vzniku vnitřních pnutí už před kalením. Následuje chlazení, při kterém proběhne martenzitická přeměna. Používá se pro legované oceli a menší tvarově složitější tenkostěnné výrobky z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí. Po kalení se součást popouští. [7][11]



Obr. 8 Způsoby kalení, 3). termální kalení, 4). izotermické zušlechťování [11]

- **Kalení se zmrazováním** – Po kalení je součást chlazena v prostředí s teplotou pod bodem mrazu. Dojde tak ke zmenšení podílu zbytkového austenitu. Používá se pro legované oceli s vyšším obsahem uhlíku, které mají teplotu M_f pod bodem mrazu. U těchto ocelí se požaduje vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení a aby si tyto vlastnosti uchovala popouští se při nízkých teplotách.[7][11]

2.2.2 Kalení bainitické

- **Izotermické zušlechťování** – Při této metodě se součást z kalící teploty přenesse do solné nebo kovové lázně o teplotě 300 až 400 °C. Tam proběhne izotermický rozpad austenitu na bainit. Následuje dochlazení na vzduchu. Při tomto zpracování se vyrovnají vnitřní pnutí ještě před začátkem přeměny. Při této metodě nevzniká nebezpečí deformací a vzniku trhlin, a proto se nemusí součást dále popouštět. Tato metoda je vhodno především pro součásti menších rozměrů z nízkolegovaných ocelí. V případě vysokolegovaných ocelí by byla doba setrvání v lázni příliš dlouhá pro ukončení bainitické přeměny.[7][11]
- **Izotermické kalení** – Jedná se o proces, při kterém je teplota lázně nižší než teplota M_s dané oceli. Výsledkem je smíšená struktura bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu.[7][11]

2.3 Popouštění

Cílem popouštění je snížení vnitřních pnutí vzniklé předešlou tepelnou operací. Popouštění by mělo následovat v co nejkratší době po kalení, neboť vnitřní pnutí může způsobit popraskání součásti. Popouštění spočívá v ohřevu na teplotu nižší než A_1 , výdrž na teplotě (nejčastěji 2 hodiny) a následného ochlazení vhodnou rychlostí. Pro uhlíkové oceli s obsahem uhlíku nad 0,2 % se popouštění dělí podle teploty do 4 kategorií: [7][11]

- **První stádium popouštění** – (cca do 200 °C) Přesycený tuhý roztok martenzitu je rozkládán při vzniku popouštěného kubického martenzitu. Důsledkem je snížení vnitřních pnutí a tvrdosti. [7][11]
- **Druhé stádium popouštění** – (200–300 °C) Probíhá rozpad zbytkového austenitu. Výsledná struktura je tvořena bainitem. V tomto stádiu se zvětšuje měrný objem oceli. [7][11]

- **Třetí stádium popouštění** – (nad 250 °C) Nízkouhlíkový martenzit se mění v rovnovážný tuhý roztok α (ferit). Při vyšších teplotách dochází ke vzniku cementitu. Výsledná struktura se nazývá sorbit. Strukturní změny jsou doprovázeny významnou změnou vlastností oceli. Snižuje se tvrdost, zvyšuje se tvárnost a houževnatost, zvyšuje se měrný objem a klesají vnitřní pnutí. [7][11]
- **Čtvrté stádium popouštění** – (nad 500 °C) Pevnost klesá, zvyšuje se houževnatost a plasticita oceli. Při vyšších teplotách vzniká sorbit, při nejvyšších zrnitý perlit (pod A_1). [7][11]

Rozsah změn při popouštění závisí na teplotě a době popouštění. Podle výšky teploty se popouštění dělí na:

- **Popouštění při nízkých teplotách (napouštění)** – (100 až 300 °C) Jeho účelem je snížení vnitřních pnutí, snížení podílu zbytkového austenitu a zlepšení houževnatosti při zachování vysoké tvrdosti. Používá se u nástrojových ocelí, u kterých je potřeba velká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Součásti se popouštějí ve vařící vodě, solních a olejových lázních a pecích. [7][11]
- **Popouštění při vyšších teplotách (zušlechťování)** – (400 až 650 °C) Používá se k dosažení houževnatosti a plasticity u součástí z konstrukční oceli. Tyto vlastnosti zajišťuje sorbitická struktura. [7][11]

2.4 Chemicko-tepelné zpracování

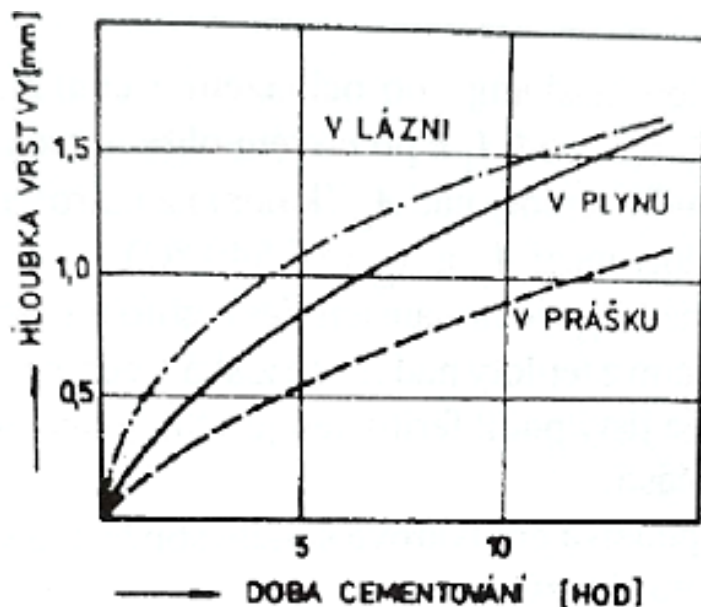
Chemicko-tepelné zpracování spočívá v sycení povrchu oceli za účelem zlepšení mechanických vlastností povrchu tělesa. Při tomto zpracování se vytvářejí povrchové vrstvy, které mají odlišné mechanické vlastnosti od jádra. Změny složení povrchu spočívá v difúzním sycení povrchové vrstvy příslušnými prvky, které mohou být v kapalném, plynném nebo tuhém skupenství. Požadovaných vlastností se dosahuje buď obohacením povrchové vrstvy příslušným prvkem (C, N, C+N, B, Si, Al) za vysokých teplot a pomalým ochlazením, nebo následujícím tepelným zpracováním (kalením nebo popouštěním při nízkých teplotách). Cílem je zvýšení pevnosti a odolnosti proti opotřebení povrchu oceli se zachováním houževnatého jádra. Tímto procesem lze také dosáhnout odolnosti proti korozi a tepelnému namáhání. Hlavní metody chemicko-tepelného zpracování se dělí podle prvku,

kterým je nasycena povrchová vrstva, na **cementování** (sycení uhlíkem), **nitridování** (sycení dusíkem), **nitrocementaci** a **karbonitridaci** (sycení uhlíkem a dusíkem).[7][11]

2.4.1 Cementování

Je způsob chemicko-tepelného zpracování při kterém se povrch součásti sytí uhlíkem. Používá se u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí (většinou do 0.2 %C). Požadovaných vlastností dosahujeme až následným tepelným zpracováním. Provádí se kalení a popouštění při nízkých teplotách. Cementace probíhá za teplot, při kterých je austenit stabilní a umožňuje dobré rozpouštění uhlíku. Cementování rozdělujeme podle prostředí, ve kterém se uskutečňuje na cementaci v prášku, plynu a v lázni. [11]

- **Cementace v prášku** – Nejstarší způsob cementování, má celou řadu nevýhod: zdoluhavý a neekonomický proces, pro obsluhu náročný. Proces značně prodlužuje pomalý ohřev špatně vodivého cementačního prášku. Používá se směs dřevěného uhlí, aktivního uhlí a $BaCO_3$. Díky složení prášku, které se často mění a obtížné kontrole cementační atmosféry nejsou výsledky často uspokojivé. Cementační vrstvy jsou proto nestejně hluboké s častým vznikem měkkých míst. [11]
- **Cementace v plynném prostředí** – Moderní, technologicky vhodný a produktivní způsob. Používají se směsi CO , CO_3 , CH_4 , H_2 , H_2O . V průběhu cementace je možnost regulovat složené cementační atmosféry. Rychlost nauhličení je větší než u prášku. [11]
- **Cementace v kapalném prostředí** – Tato metoda není příliš rozšířená i přesto že je rychlost nauhličování vysoká. Používají se lázně roztavených chloridových solí s přísadou kyanitů. Proces je rychlý a rovnoměrný.[11]



Obr. 9 Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [7]

2.4.2 Nitridování

Při nitridování se sytí povrch oceli dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí. Vznikají velmi tvrdé nitridy, díky kterým se dosahuje vysoké tvrdosti (až 1 200 HV). Nitridací je dosaženo požadované změny vlastností (zvýšení odolnosti proti opotřebení, mez únavy a korozní odolnosti) bez nutnosti dodatečného kalení. Proces probíhá při teplotě 500-550°C. Nitridují se konstrukční oceli vhodné k zušlechťování (0,3 až 0,5 % C), oceli třídy 14 (s přísadou Cr a Al) a 15 (s přísadou Cr, Mo, Al). [11]

2.4.3 Nitrocementování a karbonitridování

Hlavním principem obou metod je syčení povrchu oceli uhlíkem a dusíkem. Metody se liší teplotami, množstvím C a N v povrchu a způsob, kterým se dosahuje požadovaných vlastností vrstvy. Pokud syčení probíhá v okolí teploty A_{c3} , a na vlastnosti má hlavně vliv uhlík, jedná se o nitrocementaci. Po nasycení součásti se musí kalit. Při karbonitridaci ve vrstvě převažuje vliv dusíku a součásti se nekalí. Teploty pro Nitrocementaci bývají 820 až 840 °C a pro karbonitridaci 600 až 630 °C. [11]

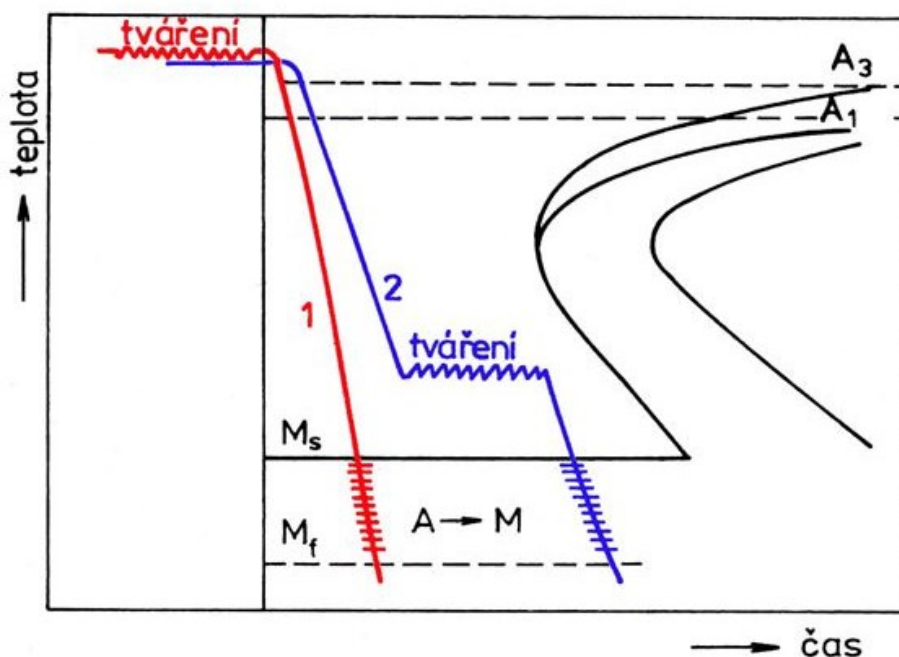
2.5 Tepelně-mechanické zpracování

Při tepelně-mechanickém zpracování se používá kombinace tváření a tepelného zpracování. Kombinací zpevnění a probíhajících fázových přeměn je dosaženo vysoké pevnosti, kterou

nelze jinými způsoby získat. Nejčastěji plastická deformace probíhá v oblasti stabilního nebo metastabilního austenitu a po deformaci následuje martenzitická přeměna. [11]

- **Vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování (VTMZ)** – Ocel se tváří v oblasti stabilního austenitu nad teplotou A_3 při 40 až 90% stupni deformace. Aby se zabránilo rekrytalizace austenitu musí bezprostředně následovat kalení. [11]
- **Nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování (NTMZ)** – Proces spočívá v autenizaci při teplotách vyšších než A_3 , chlazení do oblasti metastabilního austenitu nad M_s (500 až 600 °C), tváření v inkubační době s následným zaklením. [11]

Používá se pro nízkolegované a středně legované podeutektoidní oceli s obsahem 0,3 až 0,6 % C. Pro VTMZ se používají nízkolegované i nelegované oceli, pro NTMZ komplexně legované oceli (Mn, Si, Ni, Cr, Mo). [11]



Obr. 10 Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování 1- VTMZ, 2 – NTMZ [8]

3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI POVRCHU

Měření tvrdosti materiálu je důležitým nástrojem pro určení mechanických vlastností, které se využívají při konstrukčním návrhu, analýze a vývoji nových materiálů. Princip měření tvrdosti se dá popsat jako vtlačování malého tělesa (indentoru) do povrchu zkušebního tělesa určitou silou při přesně definovaných podmínkách. Měřítkem tvrdosti je velikost stopy vzniklá ve zkušebním tělese. Indentor je nástroj, který se vtlačuje do materiálu, může mít různé tvary (kulička, kužel a jehlan) a musí být z dostatečně tvrdého materiálu (kalená ocel, slinutý karbid, diamant). Měření tvrdosti je oproti ostatním mechanickým zkouškám rychlé a jednoduché. Zkoušky tvrdosti patří mezi nejpoužívanější mechanické zkoušky. Ze zjištěné tvrdosti lze přibližně vypočítat pevnost v tahu a posoudit přibližnou obrobiteľnost daného materiálu.[1][2][21]

3.1 Tvrdost

Tvrdost se dá definovat jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Je velmi důležitou mechanickou vlastností konstrukčních i nástrojových materiálů.[1][2][21]

Tvrdost kovů ovlivňuje:

- Stavba materiálu – typ krystalické mřížky a množství mřížkových poruch,
- Mikrostruktura materiálu – příměsi,
- Vnitřní napětí v materiálu – vznik vnitřních pnutí po tváření,
- Teplota,
- Doba působení zatížení a rychlost zatěžování,
- Třením mezi indentorem a vzorkem,
- Velikostí síly, která působí na vnikací těleso. [6][15][21]

3.2 Statické metody měření tvrdosti

Jsou nejrozšířenější a nejvýznamnější zkoušky tvrdosti. Indentor vniká pomalým vtlačováním plynule se zvyšující rychlostí kolmo do zkoušeného povrchu. Vnikací těleso musí mít vysokou pevnost. Pro měkké materiály se používají kalené oceli nebo slinuté karbidy. Pro pevné materiály jako jsou kalené oceli nebo tvrzené litiny je vnikací těleso z diamantu. [1][22][25]

3.2.1 Zkouška tvrdosti podle Martense

Používá se diamantový kužel s úhlem vrcholu 90°. Měřítkem tvrdosti je zatížení kužele potřebné k dosažení vrypu určité šířky. Tato zkouška se praxi málokdy používá. [1][22]

3.2.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Při této zkoušce je ocelová kalená kulička o průměru D je vtlačována do zkoumaného materiálu silou F . Průměr vtisku (d) se měří vhodným měřicím přístrojem ve dvou na sebe kolmých směrech. [1][22]

Zkouška tvrdosti podle Brinella je dána vztahem:

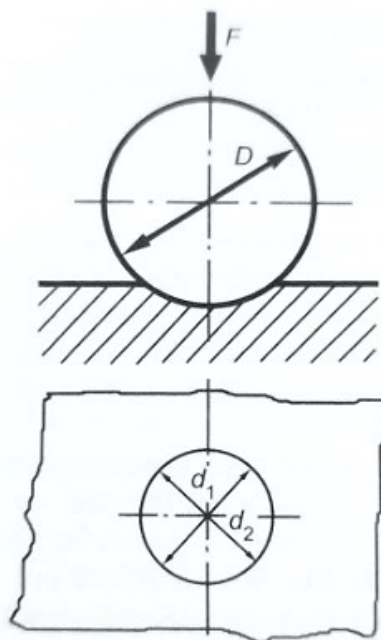
$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

F – Zkušební zatížení [N]

A – plocha vtisku [mm^2]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku [mm][6][15]



Obr. 11 Zkouška tvrdosti podle Brinella[1]

Průměry kuliček bývají $D = 10; 5; 2,5; 2$ a 1 mm. Měření musí být provedeno na hladkém, čistém povrchu bez nečistot. Tloušťka zkušebního tělesa nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku a střed vtisku musí být od okraje vzorku vzdálený minimálně $2,5 d$. Měření probíhá na Brinellově tvrdoměru.[1]

3.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

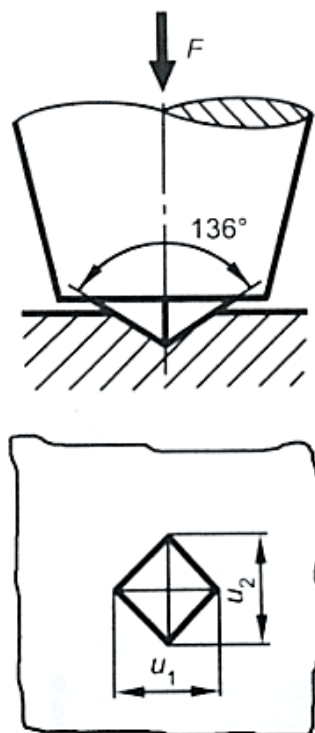
Vickersova zkouška je založena na stejném principu jako zkouška podle Brinella, liší se tvarem indentoru. Diamantový pravidelný čtyrboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° je vtlačován do zkušebního tělesa kde vytvoří otisk. Po odlehčení se změří úhlopříčky a provede se výpočet tvrdosti. Rozměry vtisku bývají velmi malé, a proto se ke změření úhlopříček používají mikroskopy. [1][6][22]

Výsledná tvrdost se vypočítá pomocí vztahu:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 1,854 \cdot F}{d^2} = \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} \quad (2)$$

F – zvolené zatížení [N]

d – aritmetický průměr úhlopříček vtisku [mm][1][15]



Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [1]

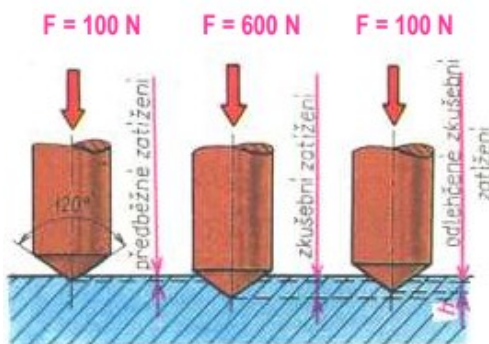
Používané zatížení je odstupňováno po 10 stupních od 9,8 N po 980 N. Doba zátěže je v rozmezí 10–180 sekund. Měření musí být opět provedeno na rovném, hladkém povrchu bez okují a nečistot. Někdy je nutná úprava povrchu broušením. Zkoušený předmět musí být minimálně 1,5 d na tloušťku. Minimální vzdálenost vtisku od okraje je stanovena normou. [1][2][22]

3.2.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Na rozdíl od předchozích metod se u zkoušky tvrdosti podle Rockwella nevyjadřuje plocha vtisku, ale hloubka vtisku před předběžným a po celkovém zatížení. Princip zkoušky spočívá ve vtlačení indentoru do povrchu zkoumaného materiálu, indentor může být ocelová kalená kulička nebo diamantový kužel s úhlem vrcholu 120° . Kulička bývá dle normy EN 10109-2 $D = 1,5875$ nebo $3,175$ mm a kužel má poloměr zaoblení na vrcholu $0,20$ mm. Měření probíhá na zařízení nazývaném Rockwellovův tvrdoměr. [1][6][22]

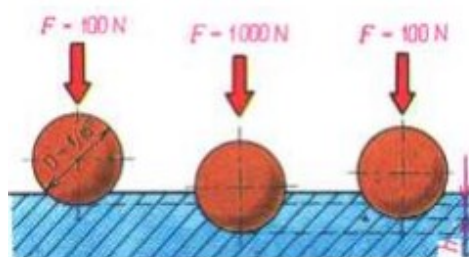
Normalizovány jsou 3 metody zkoušek:

- HRA – Do materiálu vtlačujeme diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° do nejvyššího zatížení 600 N.



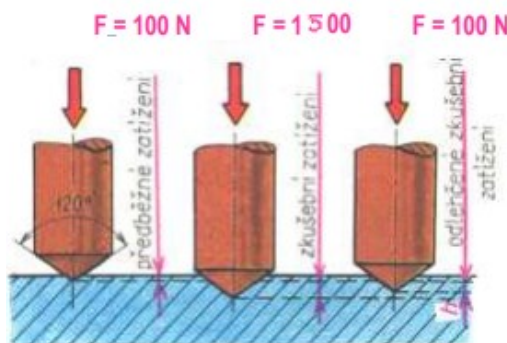
Obr. 13 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRA [2]

- HRB – Do materiálu vtlačujeme kalenou ocelovou kuličku o průměru $1,5875$ mm do nejvyššího zatížení 1000 N.



Obr. 14 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRB [2]

- HRC – Do materiálu vtlačujeme diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° do nejvyššího zatížení 1500 N.



Obr. 15 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRC [2]

Postup měření je následovný, indentor se zatíží předběžným zátěžním 100 N. To je výchozí hodnota na začátek měření. Zatěžující sílu zvyšujeme na maximum, to by mělo proběhnout do 6 sekund. Hloubku vtisku ukazuje číselníkový úchylkoměr, který je součástí měřícího přístroje. Po ustálení ručičky úchylkoměru zatížení postupně snižujeme na hodnotu předběžného zatížení (100 N). Tímto krokem zmizí pružná deformace a ručička se vrátí o určitou hodnotu. Na stupnici tvrdosti je pak odečítaná naměřená hodnota. Tato metoda je přesnější než metoda Brinellova díky odstranění nepřesností, které mohou vzniknout nedokonalým vtiskem kuličky. [2][22][25]

3.2.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

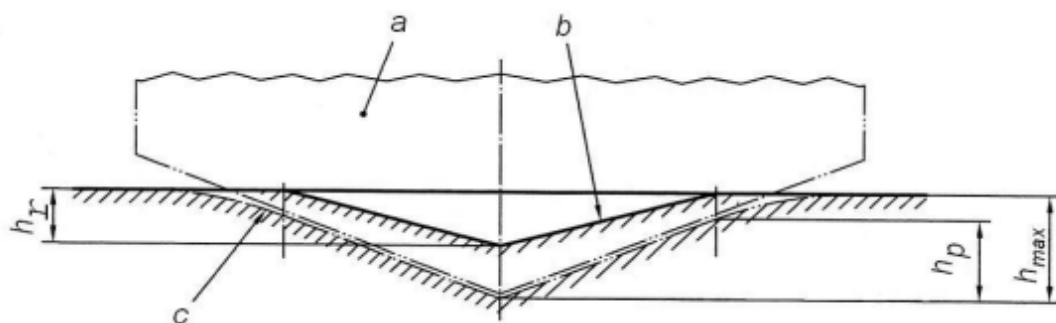
DSI (Depth Sensing Indentation) slouží k zjištění mechanických vlastností tenkých vrstev. Indentor je vtlačován do povrchu zkoumaného předmětu a zároveň přístroj zaznamenává zatížení a hloubku do které je vtlačován. Pomocí grafického zpracování dat vznikne křivka, která ukazuje vztah mezi zatížením a hloubkou vtisku. Díky přístroji, napojenému na PC lze ihned vidět vyhodnocené materiálové parametry. [16]

Výsledná tvrdost se vypočítá pomocí vztahu:

$$H = \frac{F_{max}}{A_s} \quad (3)$$

F_{max} – maximální síla [N]

A_s – plocha vtisku [mm] [16]



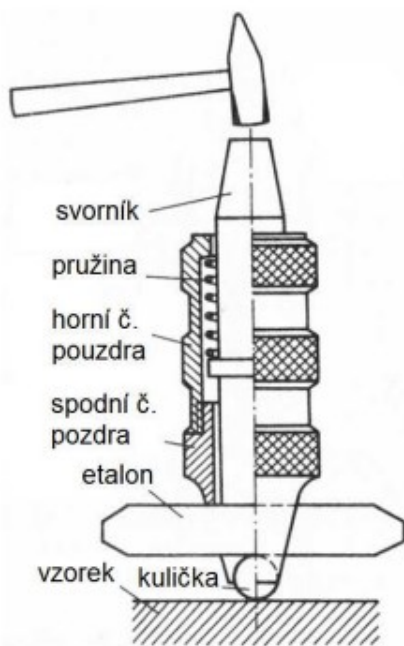
Obr. 16 Schématické znázornění příčného řezu vtisku. a) indenter, b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese, c) povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximální zkušební zatížení. [16]

3.3 Dynamické metody měření tvrdosti

Principem dynamických zkoušek je působení zkušební tělíska na vzorek rázem. Tvrdost se určuje buď plasticou deformací povrchu vzorku (zkoušky vnikací) nebo velikostí odrazu indentoru (zkoušky odrazové). [1][22]

3.3.1 Měření pomocí kladívka Poldi

Princip této zkoušky spočívá v úderu kladivem do svorníku, který přenesení rázu na kuličku o průměru 10 mm, která se obtiskne do zkoušeného materiálu. Zároveň ale udělá vtisk i do porovnávací tyčinky u které známe tvrdost. Průměry vtisků se pomocí lupy změří a v tabulkách vyhledáme příslušné číslo tvrdosti odpovídající velikosti vtisku. [6][17]



Obr. 17 Princip zjišťování tvrdosti kladívkem Podi [6]

3.3.2 Zkouška podle Shorea

Shoreova zkouška někdy nazývána odrazová metoda je založena na odrazu tělesa tvaru válečku zakončeného kulovitě zabroušeným diamantem. Váleček padá volným pádem na zkoumané tělísko, od kterého se odrazí do určité výšky, z které se odečte tvrdost. Zkouška probíhá na Shoreho skleroskopu a má stupnici rozdělenou na 140 dílků. Metoda se používá na měření velmi tvrdých materiálů, plastů a elastomerů. Měření má poměrně malou přesnost. [17][18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat, jak tepelné zpracování ovlivňuje mikro-mechanické vlastnosti vybraných vzorků oceli. Experimentální část práce se skládala z výběru zkušebních vzorků ze zvoleného materiálu, následných příprav a tepelného zpracování. Následně bylo potřeba změřit mikro-tvrdost vzorků pomocí DSI metody. Ze získaných výsledků se vybraly parametry, které se potom statisticky a graficky zpracovaly. Hlavním cílem experimentu bylo porovnání naměřených hodnot mikro-mechanických vlastností oceli 17 102 a posouzení vlivu použitého tepelného zpracování.

Postup zpracování bakalářské práce:

- Vypracování literárního souhrnu na dané téma.
- Příprava vzorků na experimentální část.
- Provedení měření experimentální části.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jako první krok bylo potřeba zvolit vhodný druh oceli. Z tohoto materiálu byly následně nařezány zkušební vzorky, které byly poté tepelně zpracovány. Před měřením tvrdosti bylo nutné zkušební vzorky zalisovat a vyleštit. Následovalo měření tvrdosti a jako finální krok bylo provedeno statistické a grafické vyhodnocení výsledků.

5.1 Volba zkušebního vzorku

Jako materiál pro experimentální část byla zvolena ocel 17 102.

5.1.1 Ocel 17 102, Žárupevná Cr-Mo ocel

Ocel 17 102 je legována chromem a molybdenem. Má vysokou pevnost a tvrdost, a proto je hojně využívaná v technickém průmyslu. Označení 17 102 znamená, že ocel má přibližně 17 % chromu a 1 % molybdenu. Tato ocel je vhodná pro tepelné zpracování jako je kalení, žihání a popouštění. Z této oceli se vyrábí trubky a nádoby pracující při vysokých teplotách, součásti v automobilovém průmyslu nebo nosné konstrukce ve stavebnictví. Označení českou technickou normou: ČSN 41 7102. [19][20]

Tabulka 2 Chemické složení oceli 17 102

Chemické složení [hm.%]						
C	Mn	Si	CR	Mo	P	S
max 0,15	max 0,60	max 0,50	4,00-6,00	0,45-0,65	max 0,035	max 0,030

(zdroj: materiálový list)

Tabulka 3 Technologické údaje oceli 17 102

Technologické údaje		
Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Dochlazení
Žihání	880-920 °C	Vzduch
Normalizační žihání	900-940 °C	Vzduch
Žihání na měkko	740-780 °C	V peci
Žihání ke snížení pnutí	680-720 °C	Vzduch, V peci
Kalení	920-980 °C	Voda, Olej
Popouštění	680-740 °C	Voda, Vzduch

(zdroj: materiálový list)

5.2 Tepelné zpracování

Zkušební vzorky byly nařezány a tepelně zpracovány pomocí metody kalení. Nejprve byl vzorek vložen do pece, kde došlo k ohřátí na požadovanou teplotu. Následovala výdrž na teplotě po určitou dobu. Tato doba byla zvolena podle doporučené doby kalení vyčtené z materiálového listu. Poté se vzorek zakalil buď do vody nebo do oleje.

Jednotlivé vzorky byly zpracovány při různých podmínkách. Podmínky se lišili hodnotami teploty, při které se kalilo a také ochlazovacím médiem. Všechny parametry byly zapsány do následující tabulky.

Tabulka 4 Parametry tepelného zpracování vzorků

Materiál	Vzorek	Kalící teplota [°C]	Výdrž na kalící teplotě [min]	Kalící médium	Dochlazení
Ocel 17 102	1	bez tepelného zpracování			
	2	920 °C	30	voda	vzduch
	3	950 °C	15	voda	vzduch
	4	950 °C	30	voda	vzduch
	5	950 °C	45	voda	vzduch
	6	980 °C	30	voda	vzduch
	7	920 °C	30	olej	vzduch
	8	950 °C	15	olej	vzduch
	9	950 °C	30	olej	vzduch
	10	950 °C	45	olej	vzduch
	11	980 °C	30	olej	vzduch

(zdroj: materiálový list)

Kalení probíhalo na kalícím pracovišti SKM od firmy LAC.



Obr. 18 Kalící pracoviště SKM

(zdroj: vlastní)

Kalení probíhalo v laboratorní peci LHM. K ochlazování byla použita voda a olej.



Obr. 19 Ohřátý zkušební vzorek před ochlazením

(zdroj: vlastní)

5.3 Příprava zkušebních vzorků

Před měřením tvrdosti bylo potřeba zkušební vzorky zalisovat a vyleštit broušením.

5.3.1 Zalisování vzorků

Zkušební vzorky bylo potřeba zalisovat, aby bylo možné následné upnutí do metalografické leštičky. Pro zalisování zkušebního vzorku jsme použili epoxidovou lisovací hmotu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler.



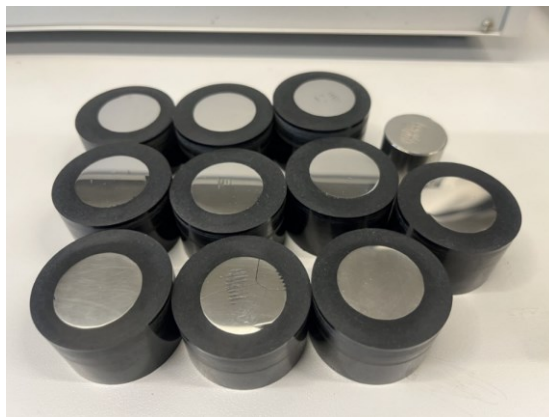
Obr. 20 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

(zdroj: vlastní)

5.3.2 Leštění vzorků

Pro dosažení požadované kvality povrchu byly zkušební vzorky nejprve broušeny a následně leštěny na lešticím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Broušení probíhalo za použití brousicích kotoučů s postupně jemnější zrnitostí 250, 600 a 1200. Následně bylo prováděno doleštění pomocí textilního plátna a diamantové suspenze o zrnitosti 9 μm a 3 μm , čímž byl povrch vzorku dále vyhlazen a připraven pro metalografickou analýzu. Parametry leštění:

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



Obr. 21 Vyleštěné vzorky

(zdroj: vlastní)



Obr. 22 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

(zdroj: vlastní)

5.4 Fáze a strukturní složky

Měření mikrotvrdomosti je možné efektivně využít na zjišťování strukturních složek. Při tomto lze využít poznatku, že každá strukturní složka odpovídá nějaké hodnotě tvrdosti dle Vickerse, která byla zjištěna předchozími měřeními. Z diagramu Fe-Fe₃C vychází podrobný přehled strukturních složek a jejich tvrdostí, uveden v Tabulce 5. Vzhledem k testované oceli bude věnována pozornost především oblasti vysokouhlíkového martenzitu.

Tabulka 5 Tvrdomost strukturních složek

Strukturní složky	Tvrdomost HV
Fe	85
Ferit	85-130
Austenit	120-180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200-250
Perlit jemný	250-300
Bainit horní	300-400
Bainit dolní	400-550
Martenzit nízkouhlíkový	600-700
Martenzit vysokouhlíkový	700-850

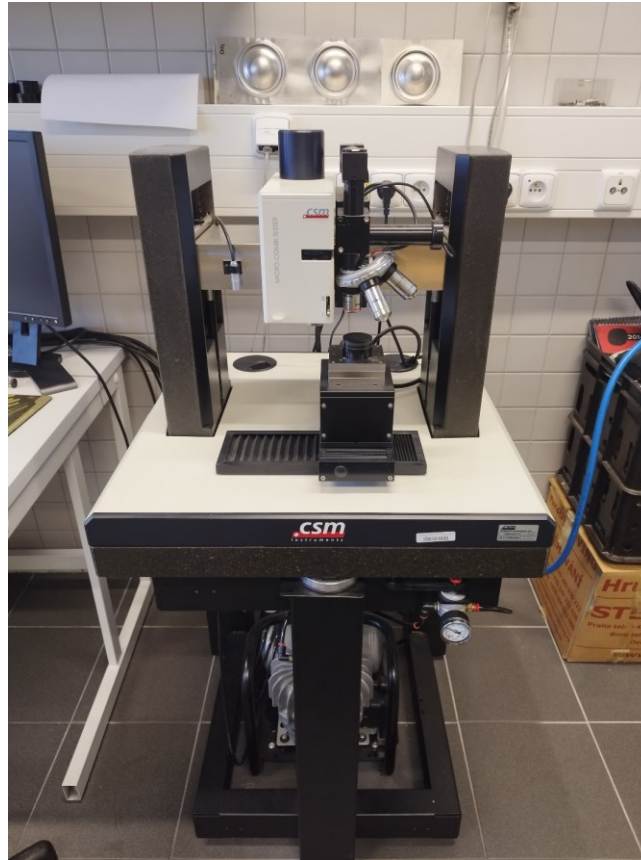
(zdroj: vlastní)

5.5 Měření metodou DSI

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

Zvolené parametry zkoušky:

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



Obr. 23 přístroj MicroCombi Tester (MHT³) od firmy Anton-Paar

(zdroj: vlastní)

Jako vnikací tělísko (indenter) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indenter). Měření byla provedena metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

Vyhodnoceny byly tyto parametry:

- H_{IT} – vtisková tvrdost [MPa],
- HV_{IT} – vickersova tvrdost [-],
- E_{IT} – vtiskový modul [Gpa],
- W_{elast} – elastická práce [μ J],
- W_{plast} – plastická práce [μ J].

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

6.1 Statistické vyhodnocení výsledků

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4)$$

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (5)$$

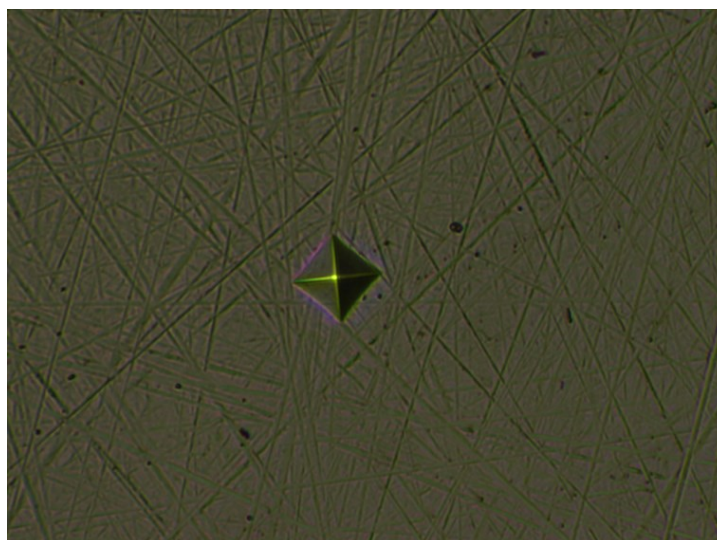
Kde:

n – počet měření,

$\bar{x}$ – aritmetický průměr,

σ – směrodatná odchylka.

Do každého zkušebního tělesa bylo uděláno 10 indentací při zatížení 1 N, které se metodou DSI a přístrojem MicroCombi Tester dále vyhodnocovali.



Obr. 24 Otisk vpichu vyfocený přístrojem MicroCombi Tester

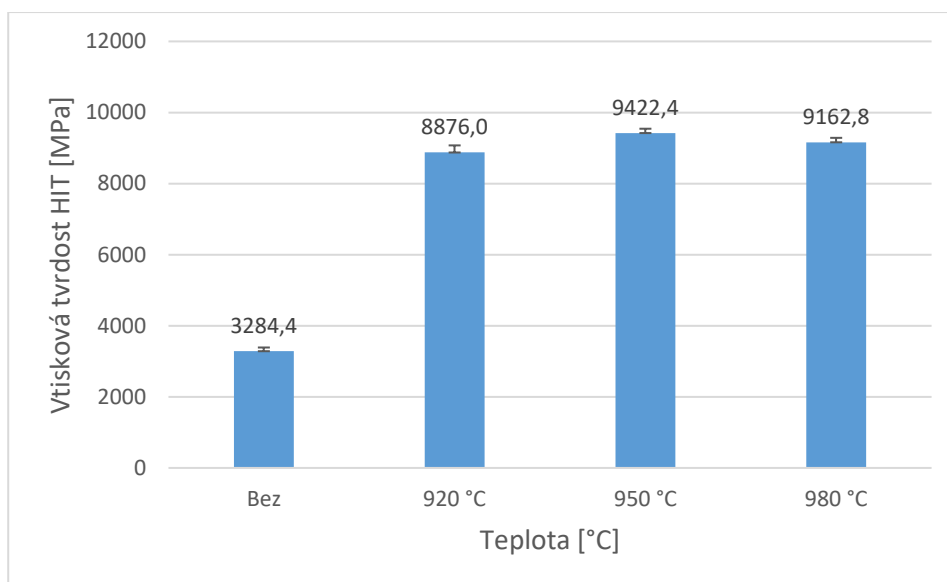
(zdroj: vlastní)

6.2 Výsledky měření metodou DSI za různých podmínek kalení

Měření zkušebních vzorků bylo provedeno metodou DSI. Každý vzorek byl změřen desetkrát při zkušebním zatížení 1 N. Naměřené hodnoty byly následně graficky zobrazeny a zpracovány s ohledem na různé podmínky kalení.

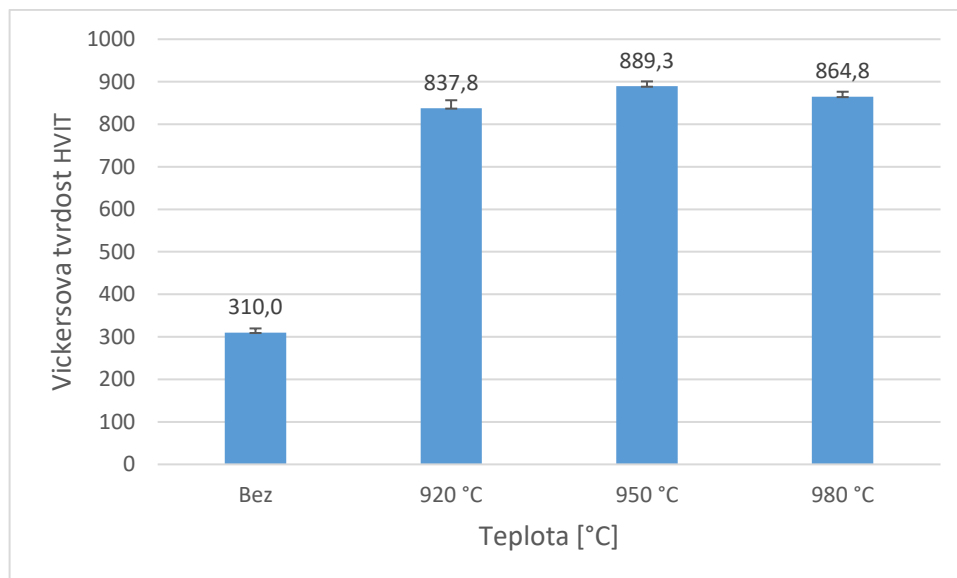
6.2.1 Vliv mechanických vlastností na teplotě, kalící médium voda, výdrž na teplotě 30 minut

Měření probíhalo na 3 zkušebních vzorcích, které byly tepelně zpracované. Každý byl tepelně zpracován na rozdílné teplotě. Pro porovnání byl použit i vzorek bez tepelného zpracování. Jako kalící médium byla použita voda.



Obr. 25 Závislost vtiskové tvrdosti H_{IT} na teplotě (voda); výdrž 30 minut

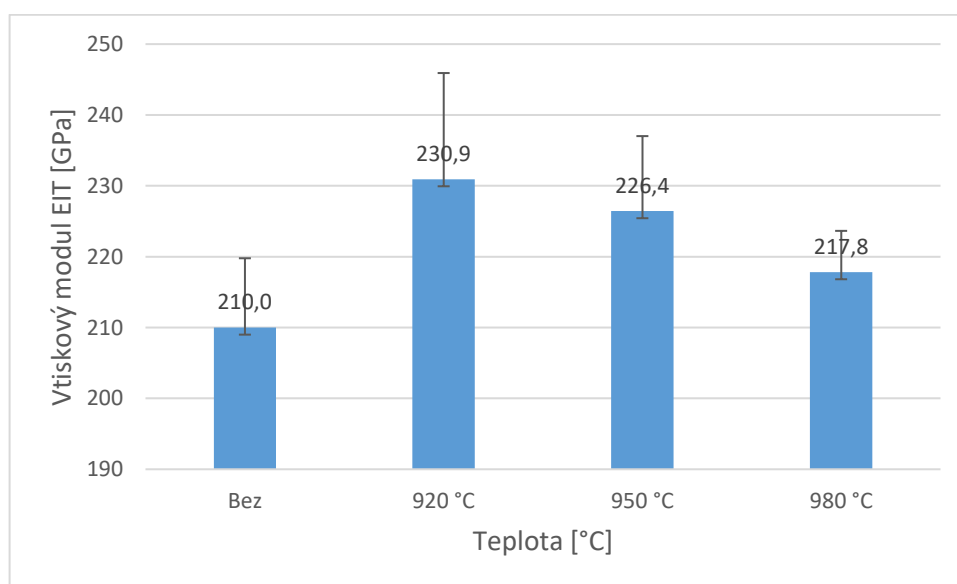
Z tohoto grafu lze vyhodnotit, že nejvyšší vtisková tvrdost H_{IT} , která vznikla kalením s výdrží 30 minut a byla kalena do vody, je při teplotě 950 °C. U vzorků kalených při teplotě 920 a 980 °C lze vidět, že jejich vtisková tvrdost není tak vysoká jako při teplotě 950 °C. Lze také porovnat tepelně zpracované vzorky se vzorkem bez tep. zpracování. Z grafu lze vyčíst, že všechny tepelně zpracované vzorky mají několikrát násobně vyšší vtiskovou tvrdost oproti vzorku bez tepelného zpracování, ale nejlépe na tom je vzorek testovaný při 950 °C, u kterého je nárůst 186,9 %.



Obr. 26 Závislost tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} na teplotě (voda); výdrž 30 minut

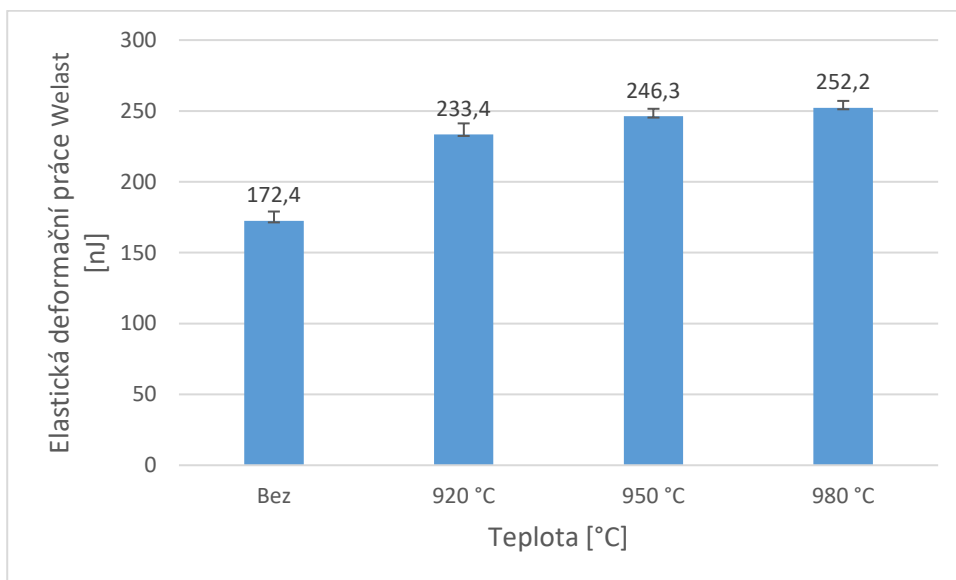
Nejvyšší hodnota Vickersovy tvrdosti HV_{IT} byla naměřena u vzorku tepelně zpracovaného při teplotě 950 °C. Hodnoty ostatních vzorků byly velmi podobné až na vzorek bez tep. zpracování. Procentuální nárůst Vickersovy tvrdosti vzorku tepelně zpracovaného při teplotě 950 °C oproti vzorku tepelně nezpracovanému je 186,9 %. U vzorků tep. zpracovaných při teplotách 920 °C a 980 °C jsou procentuální nárůsty 170,3 % a 179,9 %.

Z Vickersovy tvrdosti lze také určit, z jakých strukturních složek se materiál skládá. Z tabulky plyne, že vzorky tepelně zpracované se nachází v oblasti vysokouhlíkového martenzitu. Vzorek bez tepelného zpracování se nachází v oblasti horního bainitu.



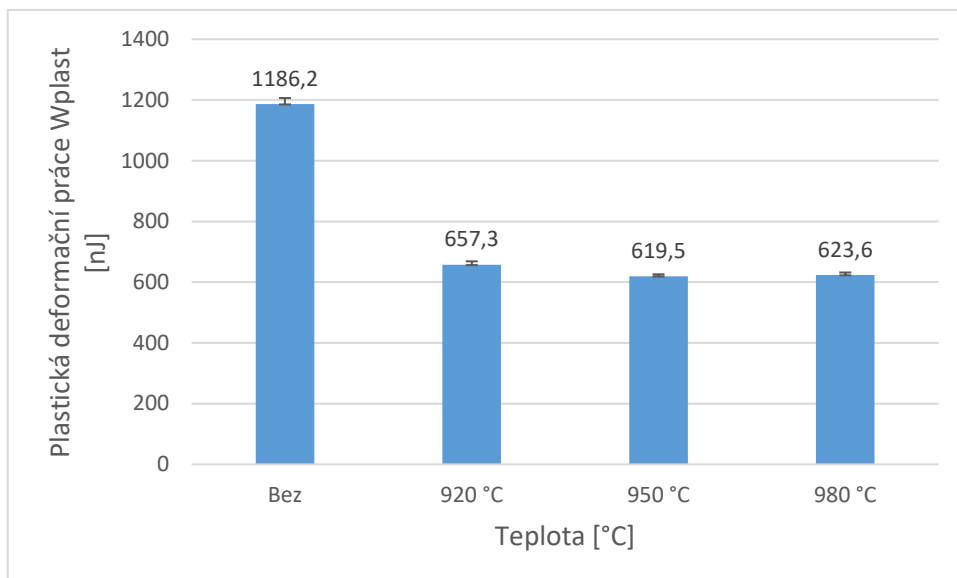
Obr. 27 Závislost vtiskového modulu E_{IT} na teplotě (voda); výdrž 30 minut

Nejvyšší vtiskový modul nastal u vzorku kaleného při teplotě 920 °C. U vzorku kaleného při teplotě 980 °C je hodnota vtiskového modulu podobná jako u tepelně nezpracovaného vzorku. Procentuální nárůsty tepelně zpracovaných vzorků vůči referenčnímu vzorku jsou u teploty 920 °C 9,9 %, u teploty 950 °C 7,8 % a u teploty 980 °C 3,7 %.



Obr. 28 Závislost elastické deformační práce W_{elast} na teplotě (voda); výdrž 30 minut

V tomto případě lze z grafu vyčíst, že nejvyšší elastická deformační práce byla naměřena při teplotě 980 °C. Při teplotách 920 °C a 950 °C jsou hodnoty podobné, ale nedosahující tak vysoké hodnoty jako u 980 °C. Procentuální nárůst u teploty 980 °C oproti vzorku bez tepelného zpracování je 46,3 %. U vzorku zpracovaného při teplotě 950 °C není rozdíl tak veliký oproti vzorku 980 °C a procentuální rozdíl je 2,4 %. Z tohoto grafu lze vyčíst, že čím byla teplota vyšší, tím víc se zvýšila elastická deformační práce.

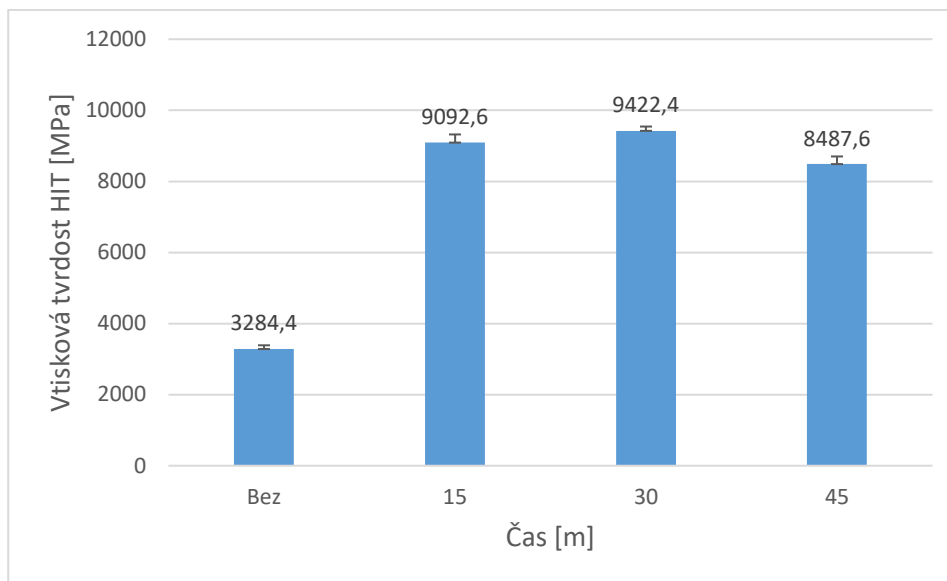


Obr. 29 Závislost plastické deformační práce W_{plast} na teplotě (voda); výdrž 30 minut

Hodnota plastické deformační práce je nevyšší u vzorku bez tepelné úpravy. U všech tepelně zpracovaných vzorků jsou hodnoty podobné. U teploty 950 °C je procentuální pokles 47,8 %. Lze tedy jednoznačně říct, že tepelným zpracováním došlo ke snížení plasticity a zároveň ke zvýšení pevnosti.

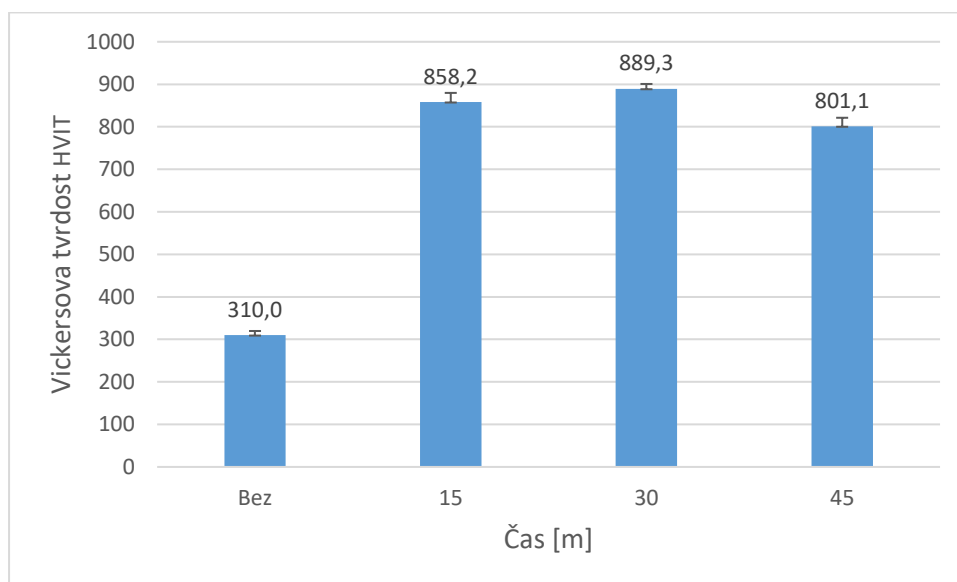
6.2.2 Vliv mechanických vlastností na čase, kalící médium voda, kaleno při teplotě 950 °C

Měření probíhalo na 3 zkušebních vzorcích, které byly tepelně zpracované. Každý byl tepelně zpracován jinou dobu. Pro porovnání byl použit i vzorek bez tepelného zpracování. Jako kalící médium byla použita voda.



Obr. 30 Závislost vtiskové tvrdosti H_{IT} na čase (voda); při teplotě 950 °C

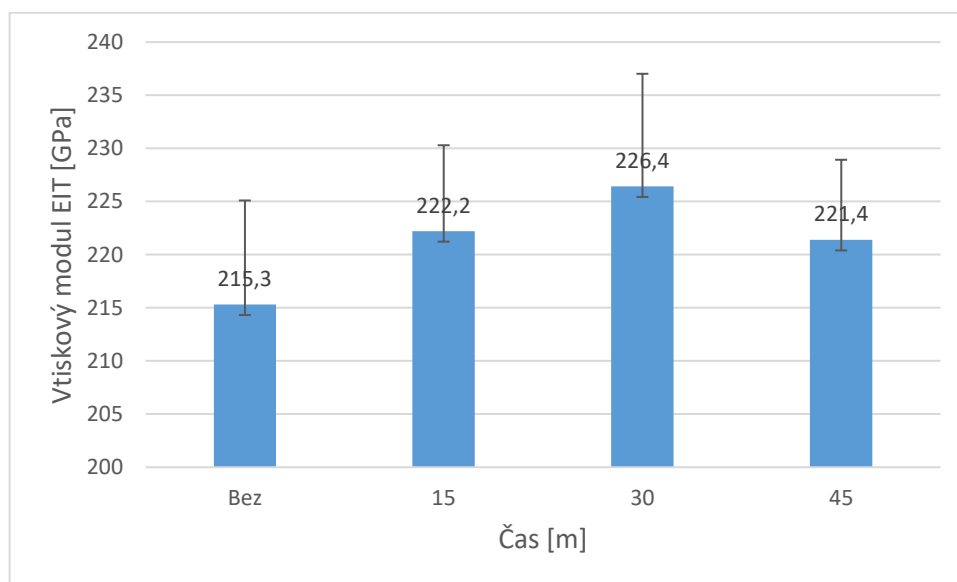
Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena u vzorku tepelně zpracovaného 30 minut. U všech tepelně zpracovaných zkušebních vzorků byla naměřená hodnota téměř trojnásobná oproti vzorku tepelně nezpracovanému. Konkrétně u vzorku s nejvyšší hodnotou byl zaznamenán nárůst o 186,9 %. Vzorek zpracovaný po dobu 15 minut vykazoval obdobný nárůst, avšak jeho hodnota byla o 3,5 % nižší než hodnota nejvyššího vzorku.



Obr. 31 Závislost tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} na čase (voda); při teplotě 950 °C

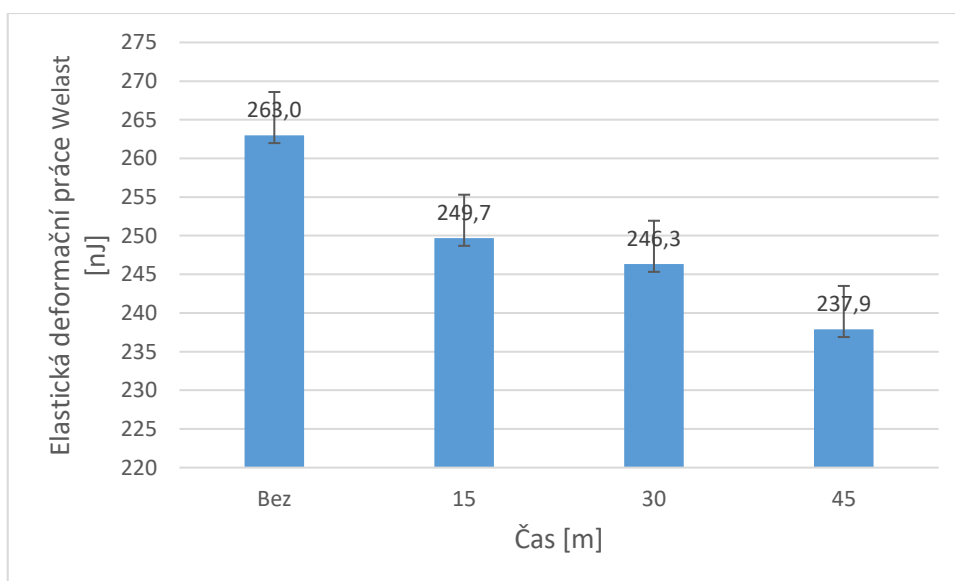
Nejvyšší naměřená hodnota Vickersovy tvrdosti byla zaznamenána u vzorku kaleného po dobu 30 minut. Nejnižší naměřená hodnota Vickersové tvrdosti byla naměřena vzorku bez tepelného zpracování. Procentuální nárůst nejvyšší hodnoty oproti vzorku bez tepelného zpracování činí 186,9 %.

Na základě naměřených hodnot a jejich porovnání s tabulkou tvrdosti jednotlivých strukturních složek bylo zjištěno, že tepelně zpracované vzorky se skládají z vysokouhlíkového martenzitu. Naopak zkušební vzorek obsahuje strukturní složky horního bainitu.



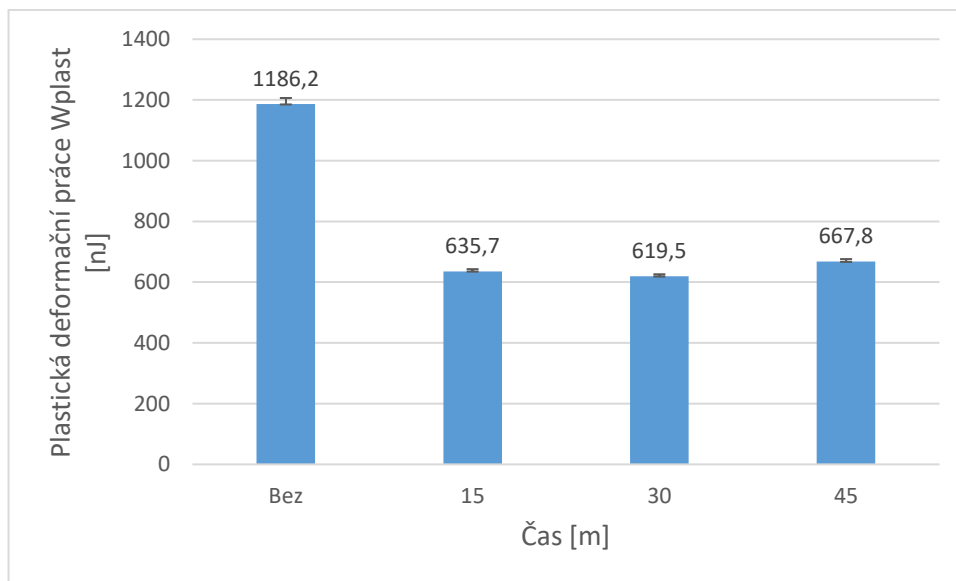
Obr. 32 Závislost vtiskového modulu E_{IT} na čase (voda); při teplotě 950 °C

U vtiskového modulu je nejvyšší naměřená hodnota u zkušebního tělesa zpracovaného po dobu 30 minut. Hodnota vtiskového modulu u 15 a 45 minut je hodně podobná jako u zkušebního tělesa tepelně nezpracovaného. U zkušebního vzorku tepelně zpracovaného po dobu 30 minut došlo k 5,2 % nárustu vůči vzorku tepelně nezpracovanému.



Obr. 33 Závislost elastické deformační práce W_{elast} na čase (voda); při teplotě 950 °C

Nejvyšší elastická práce byla naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku, zatímco nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku kaleného po dobu 45 minut. U ostatních vzorků elastická práce s rostoucím časem tepelného zpracování postupně klesala. Lze tedy jednoznačně říct, že s prodlužující se dobou tepelného zpracování klesala elasticita materiálu.

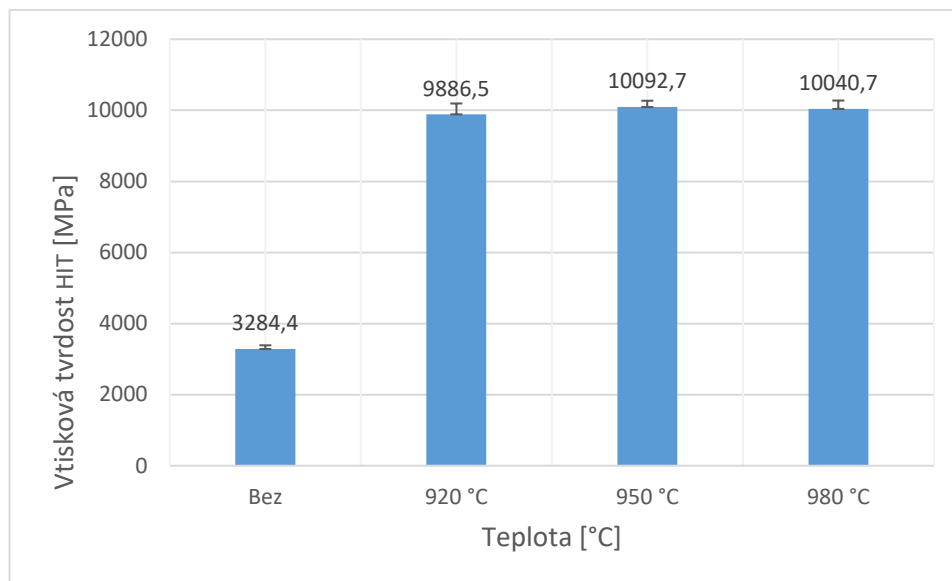


Obr. 34 Závislost plastické deformační práce W_{plast} na čase (voda); při teplotě 950 °C

Nejvyšší plastická deformační práce byla naměřena u vzorku bez tepelného zpracování. Nejnižší hodnota vyšla u vzorku tepelně zpracovaného po dobu 30 minut, tato hodnota je oproti vzorku bez tepelného zpracování menší o 47,8 %. Tento výsledek naznačuje, že všechny tepelně zpracované vzorky jsou tvrdší, ale méně plastické než zkušební vzorek tepelně nezpracovaný.

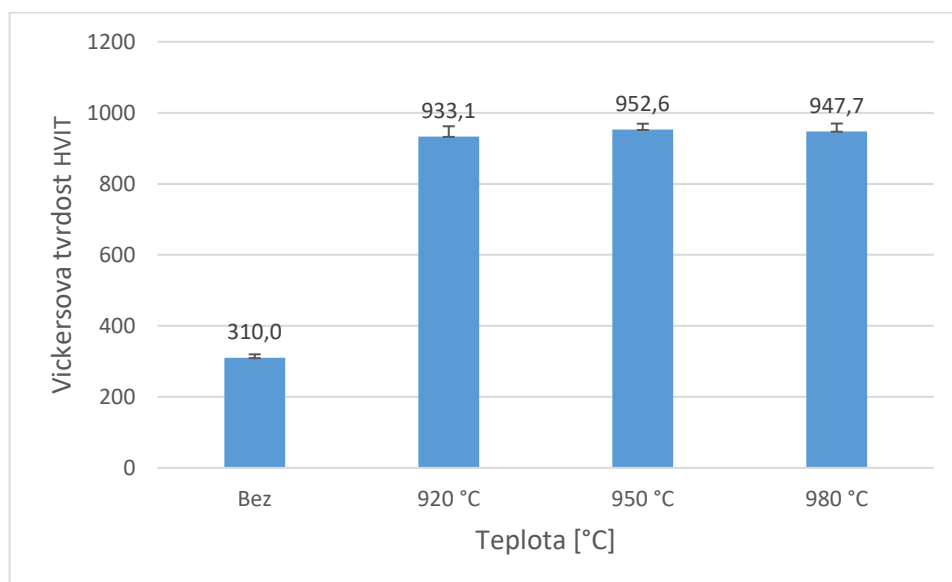
6.2.3 Vliv mechanických vlastností na teplotě, kalící médium olej, výdrž na teplotě 30 minut

Měření probíhalo na 3 zkušebních vzorcích, které byly tepelně zpracované. Každý byl tepelně zpracován na rozdílné teplotě. Pro porovnání byl použit i vzorek bez tepelného zpracování. Jako kalící médium byl použit olej.



Obr. 35 Závislost vtiskové tvrdosti H_{IT} na teplotě (olej); výdrž 30 minut

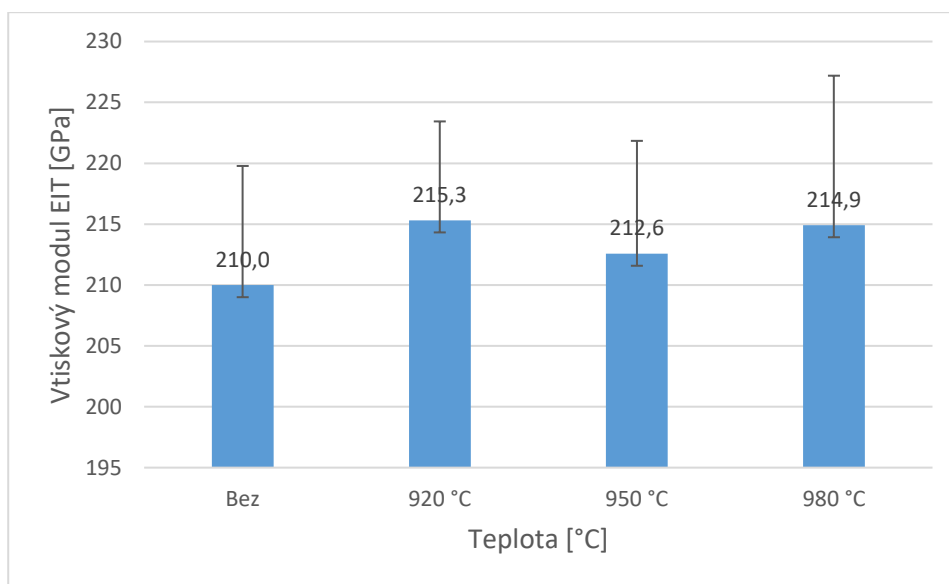
Z tohoto grafu lze vyčíst, že všechny tepelně zpracované vzorky prokazují několikanásobně vyšší hodnotu vtiskové tvrdosti ve srovnání s nezpracovaným vzorkem. Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo při teplotě 950 °C, kdy došlo k nárustu o 207,4 %. Rozdíly mezi tvrdostí vzorků kalených při teplotách 920 °C, 950 °C a 980 °C jsou relativně malé, pohybují se kolem 2 %, což naznačuje, že v tomto rozsahu teplot je tvrdost materiálu již téměř stabilní.



Obr. 36 Závislost tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} na teplotě (olej); výdrž 30 minut

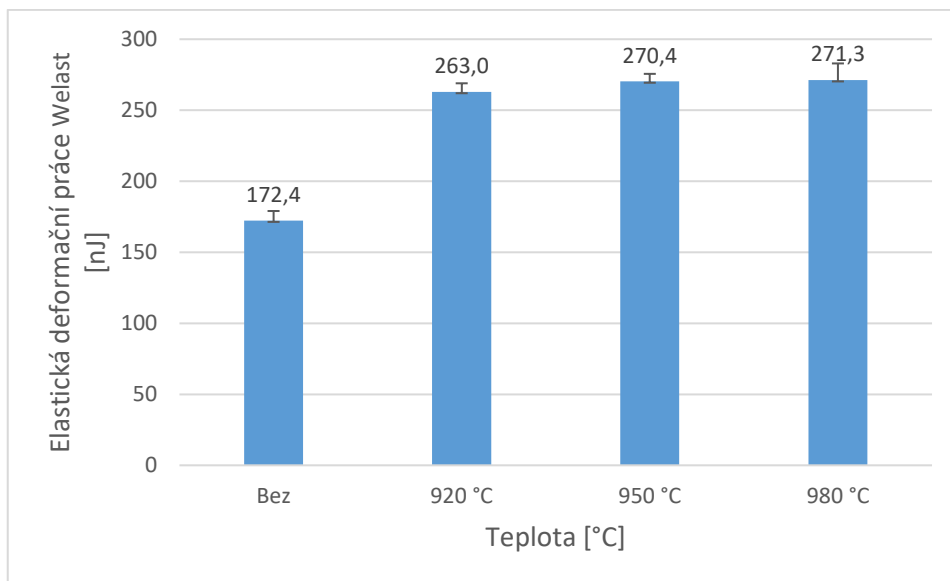
Vickersova tvrdost vyšla obdobně jako vtisková tvrdost. Nejvyšší hodnota byla naměřena při teplotě 950 °C. Tato hodnota se oproti vzorku bez tepelného zpracování navýšila o 207,3 %. Tyto hodnoty říkají, že tepelné zpracování významně zlepšilo mechanické vlastnosti materiálu. Rozdíly tvrdosti dle Vickerse mezi vzorky kalenými při teplotách 920 °C, 950 °C

a 980 °C jsou minimální, což vypovídá o tom, že bylo dosaženo téměř maximální možné tvrdosti v tomto teplotním rozmezí. Z Vickersovy tvrdosti lze také určit, z jakých strukturních složek se materiál skládá. Z tabulky plyne, že vzorky tepelně zpracované se nachází v oblasti vysokouhlíkového martenzitu. Vzorek bez tepelného zpracování se nachází v oblasti horního bainitu.



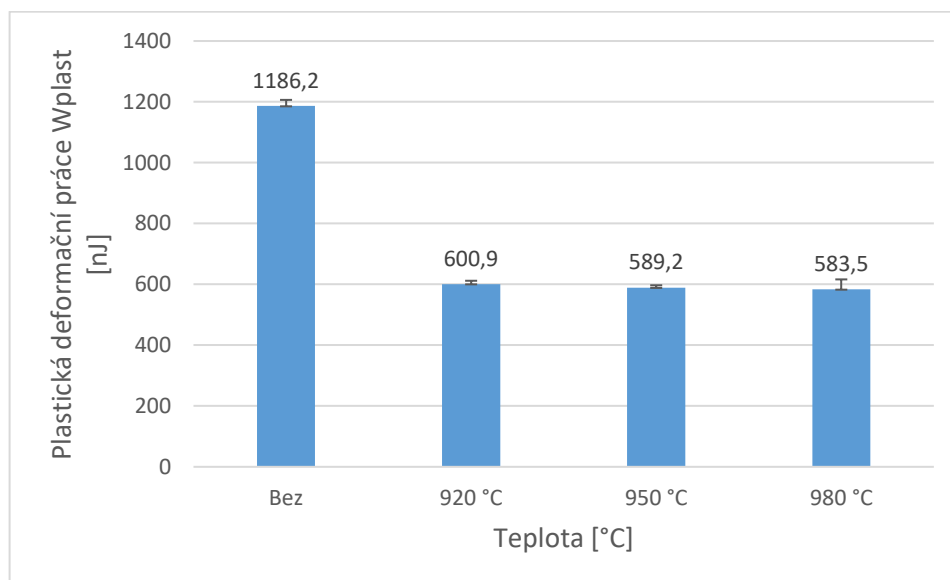
Obr. 37 Závislost vtiskového modulu E_{IT} na teplotě (olej); výdrž 30 minut

Vtiskový modul vyšel u všech zkušebních vzorků velmi podobně. Nejvyšší naměřená hodnota vyšla u vzorku tepelně zpracovaného při teplotě 920 °C. Zde došlo k nárůstu o 2,5 %. Druhá nejvyšší hodnota vyšla u vzorku tepelně zpracovaného při teplotě 980 °C, s nárůstem o 2,3 %.



Obr. 38 Závislost elastické deformační práce W_{elast} na teplotě (olej); výdrž 30 minut

Nejvyšší naměřená hodnota elastické deformační práce byla naměřena u vzorku tepelně zpracovaného při teplotě 980 °C. Zde došlo k nárustu o 57,4 % oproti vzorku bez tepelného zpracování. Hodnoty elastické deformační práce u všech tepelně zpracovaných vzorků jsou velmi podobné a vykazují minimální rozdíly. Vzorek zpracovaný při teplotě 950 °C se oproti vzorku zpracovanému při 980 °C neliší ani o 1 %. Vzorek tepelně zpracovaný při 920 °C se liší o 2,7 %.

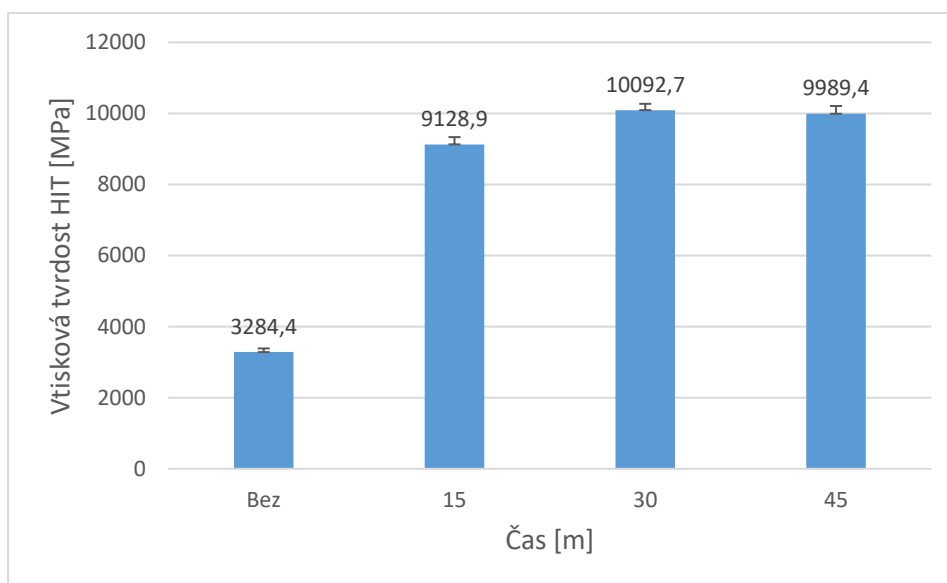


Obr. 39 Závislost plastické deformační práce W_{plast} na teplotě (olej); výdrž 30 minut

Z tohoto grafu lze vyčíst, že nejvyšší naměřená hodnota plastické deformační práce je u vzorku bez tepelného zpracování. Nejnižší hodnota je u vzorku zpracovaného za teploty 980 °C. Všechny tepelně zpracované vzorky vykazují 50 % pokles v plastické deformační práci.

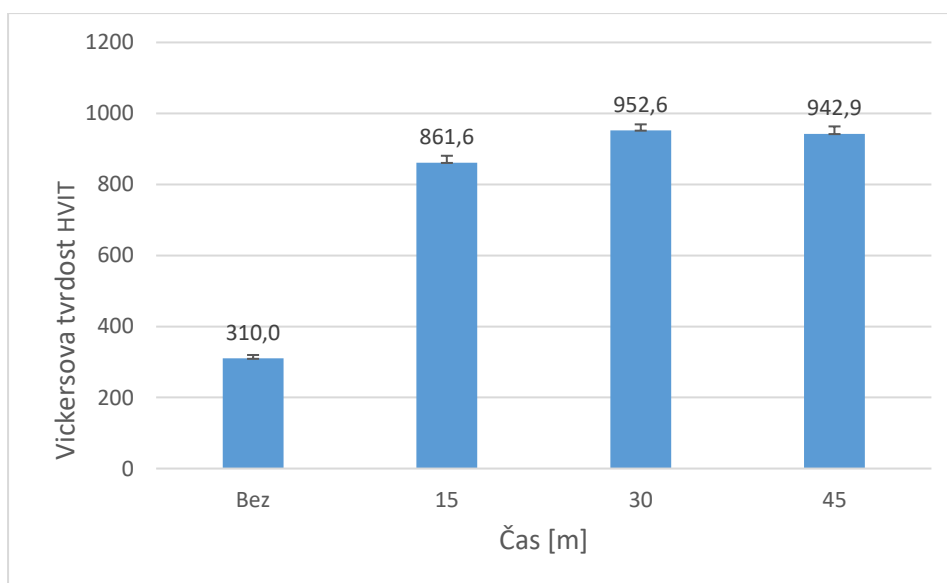
6.2.4 Vliv mechanických vlastností na čase, kalící médium olej, kaleno při teplotě 950 °C

Měření probíhalo na 3 zkušebních vzorcích, které byly tepelně zpracované. Každý byl tepelně zpracován jinou dobu. Pro porovnání byl použit i vzorek bez tepelného zpracování. Jako kalící médium byl použit olej.



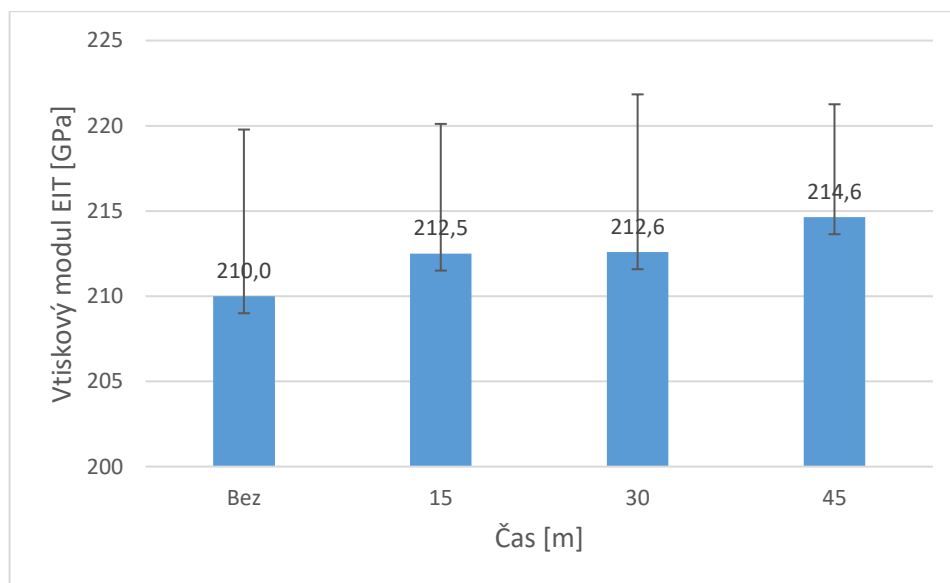
Obr. 40 Závislost vtiskové tvrdosti H_{IT} na čase (olej); při teplotě 950 °C

Vtisková tvrdost byla naměřena nejvyšší při 30 minutách tepelného zpracování. Z tohoto grafu lze jednoznačně vyčíst že tepelné zpracování má kladné vlastnosti na pevnost a tvrdost naší oceli. Vtisková tvrdost se při tepelném zpracování zvýšila o 207,3 %.



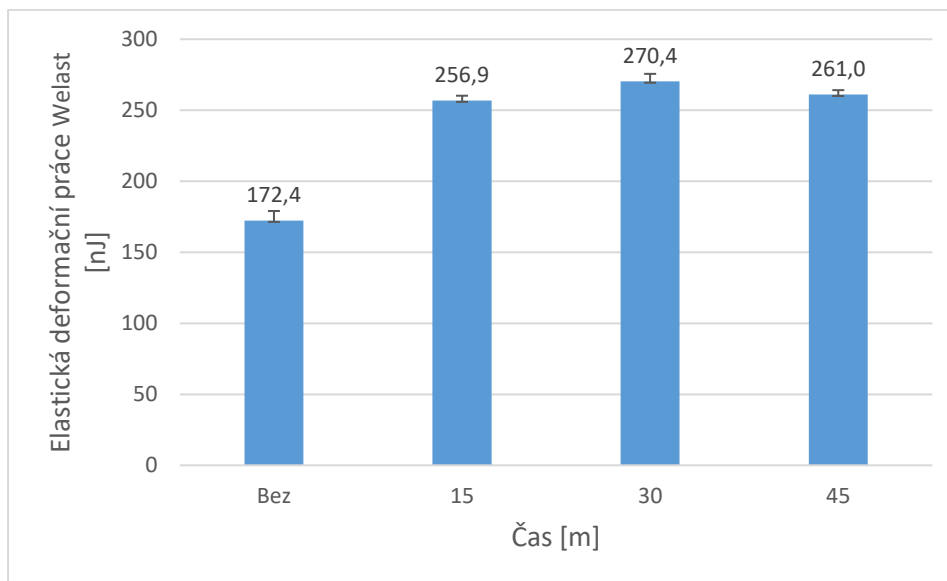
Obr. 41 Závislost tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} na čase (olej); při teplotě 950 °C

Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti dle Vickerse byla u vzorku tepelně zpracovaného 30 minut. Nejnižší naměřená hodnota naopak u vzorku tepelně nezpracovaného. U vzorků zpracovaných 15 a 45 minut jsou hodnoty podobné jako u vzorku zpracovaného 30 minut, ale nejsou nejvyšší. Z grafu jsme taky vyčetli, že tepelně zpracovaná ocel obsahuje strukturní složky vysokouhlíkového martenzitu. Vzorek bez tepelné úpravy obsahuje složky horního bainitu.



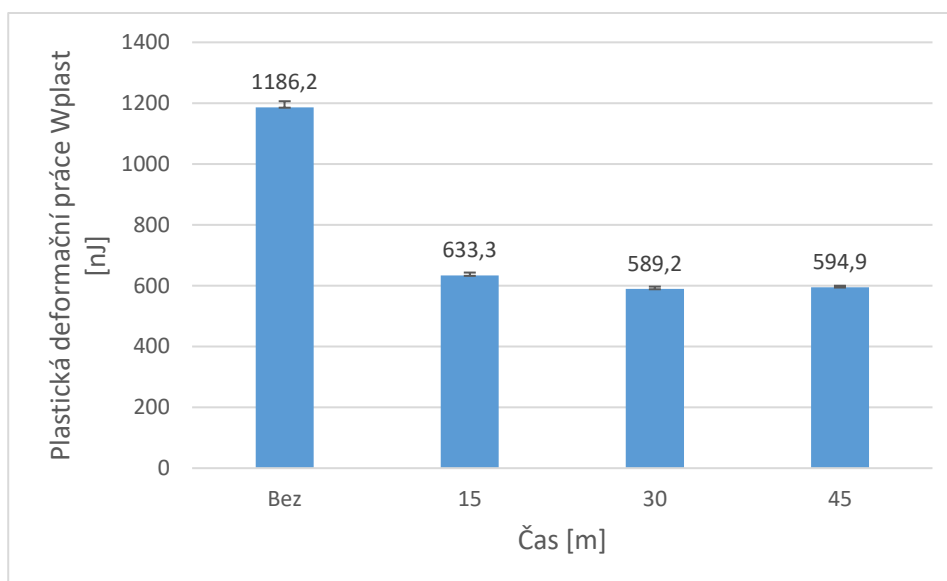
Obr. 42 Závislost vtiskového modulu E_{IT} na čase (olej); při teplotě 950 °C

Všechny hodnoty vtiskového modulu vyšly velmi podobně. Nejvyšší naměřená hodnota byla u vzorku tep. zpracovaného 45 minut. Tato hodnota se zvětšila o 2,2 % oproti vzorku bez tepelného zpracování. U zkušebních těles tepelně zpracovaných po dobu 15 a 30 minut vyšla hodnota téměř stejná. Tato hodnota se oproti nezpracovanému vzorku zvětšila o 1,2 %.



Obr. 43 Závislost elastické deformační práce W_{elast} na čase (olej); při teplotě 950 °C

Nejvyšší naměřená hodnota elastické deformační práce vyšla u vzorku tepelně zpracovaného 30 minut. Nejnižší hodnota vyšla u vzorku bez tepelného zpracování. Nejvyšší naměřená hodnota vzrostla hodnota o 56,8 % oproti vzorku bez tepelného zpracování.



Obr. 44 Závislost plastické deformační práce W_{plast} na čase (olej); při teplotě 950 °C

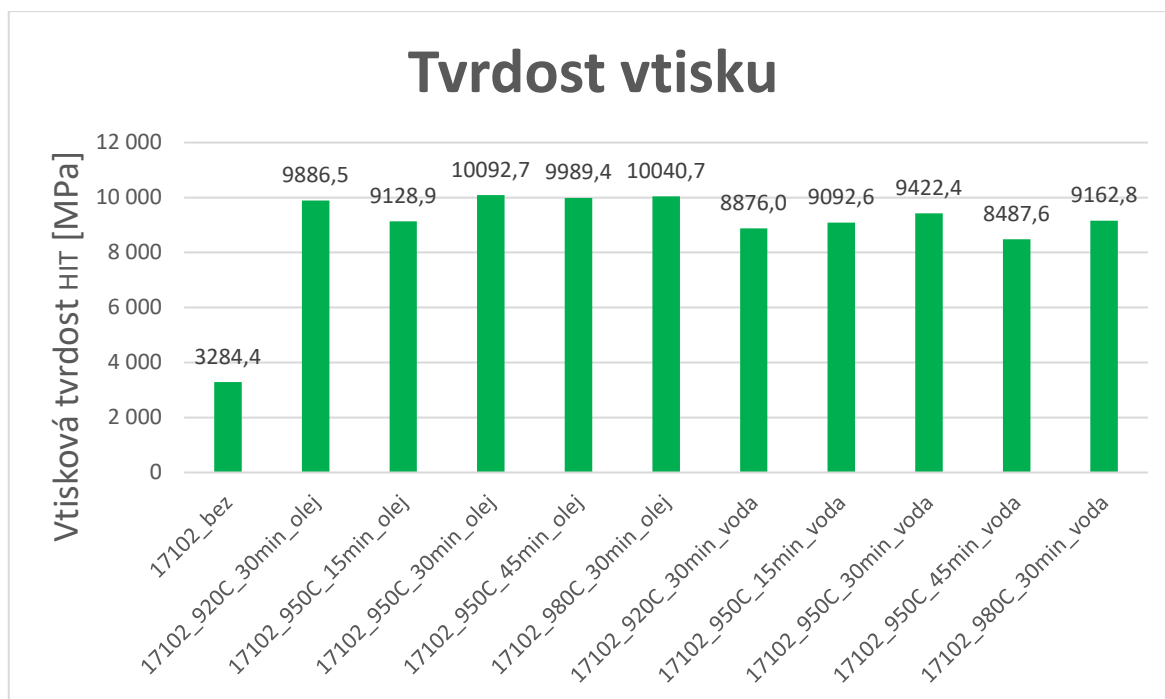
Nejvyšší naměřená hodnota vyšla u vzorku bez tepelného zpracování. Naopak nejnižší hodnota byla u vzorku tepelně zpracovaného po dobu 30 minut. Ostatní tepelně zpracované vzorky měli podobné hodnoty. Procentuální pokles u nejnižší naměřené hodnoty činí 50,33 %.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Náplní praktické části bylo tepelně zpracovat vybranou ocel a změřit mikro-mechanické vlastnosti. Zkušební vzorky se tepelně zpracovaly při rozdílných teplotách a časech. Následně probíhalo měření mikro-tvrdosti pomocí metody DSI. Naměřené hodnoty se staticky a graficky zpracovaly a byly porovnány s hodnotami vzorku bez tepelného zpracování.

Vzorky byly porovnány a zhodnoceny v následujících kapitolách:

7.1 Tvrdosti vtisku

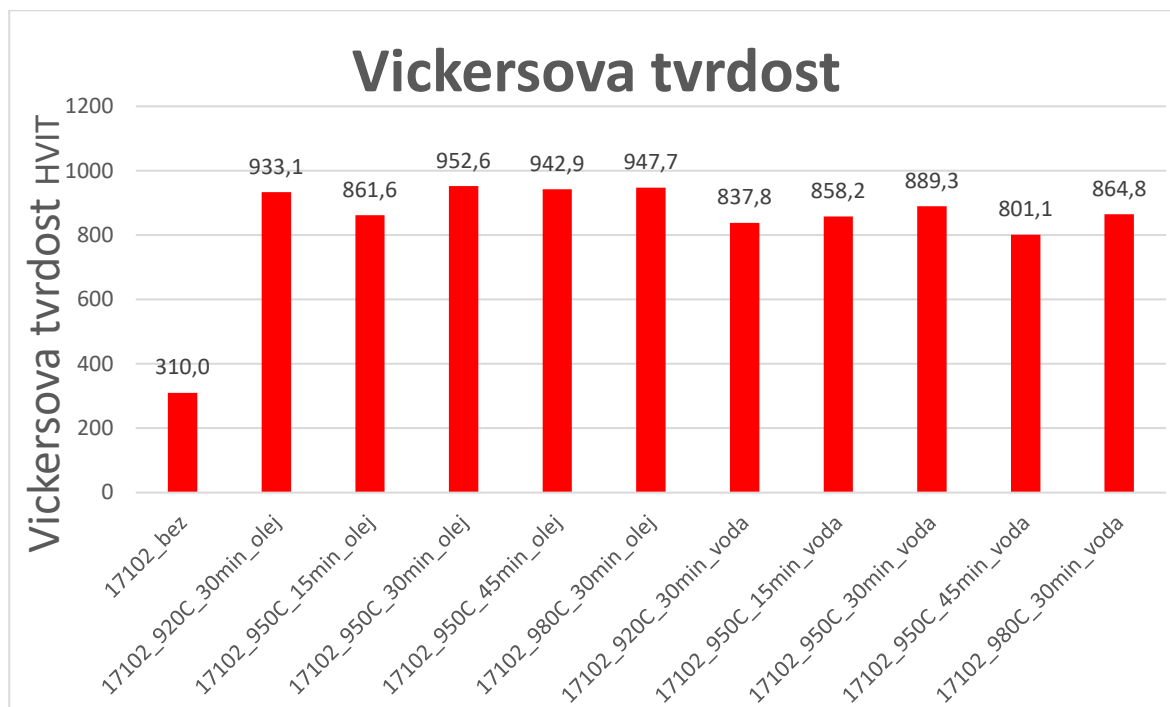


Obr. 45 Porovnání tvrdosti vtisku jednotlivých vzorků

Z grafu lze vyčíst, že nejvyšší hodnotu naměřené tvrdosti dosáhl vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut, ochlazený do oleje. Nejnižší hodnotu tepelně zpracovaných vzorků měl vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 45 minut, ochlazený do vody.

Ze vzorků kalených do vody se jako nejvhodnější jeví vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut. U vzorků kalených do oleje se jako nejlepší jeví vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut.

7.2 Vickersova tvrdost



Obr. 46 Porovnání Vickersovy tvrdosti jednotlivých vzorků

Porovnání hodnot Vickersové tvrdosti pobíhalo podobně jako u vtiskové tvrdosti. Pro porovnání opět sloužil vzorek tepelně nezpracovaný.

Nejvyšší hodnotu Vickersové tvrdosti měl stejně jako při vtiskové tvrdosti vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut, ochlazený do oleje. Nejnižší hodnotu tepelně zpracovaných vzorků měl vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 45 minut, ochlazený do vody.

Ze vzorků kalených do vody se jako nejvhodnější jeví vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut. U vzorků kalených do oleje se jako nejlepší jeví vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 30 minut.

Z tohoto grafu lze vyčíst, že voda jakožto kalící médium není tak účinné, protože při kalení do oleje jsou výsledné hodnoty celkově vyšší.

Při porovnání hodnot s tabulkou č. 5 lze říct, že výsledná struktura všech tepelně zpracovaných vzorků je vysokouhlíkový martenzit.

Celkově lze vyhodnotit, že ideální podmínky pro zpracování oceli ČSN 17 102 jsou:

Kalící teplota 950 °C, výdrž 30 minut a chladicí prostředek olej. U tohoto vzorku vyšla nejvyšší hodnota tvrdosti vtisku i Vickersova tvrdost a výsledná struktura je tvořena vysokouhlíkovým martenzitem.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala vlivem podmínek tepelného zpracování na mikro-mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 102. Z materiálu bylo nařezáno 11 zkušebních vzorků, které byly tepelně zpracované. Tepelné zpracování probíhalo za rozdílných podmínek. Vzorky se od sebe lišily kalicí teplotou, dobou výdrže na kalicí teplotě a použitým kalicím médiem. Jeden vzorek zůstal nezpracovaný pro možnost srovnání s ostatními. Celý experiment probíhal v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, na kalicím pracovišti SKM od firmy LAC.

V teoretické části byly popsány vlastnosti oceli a její slitiny, způsoby tepelného zpracování a metody měření tvrdosti, včetně metody DSI.

Měření mikro-tvrdosti proběhlo metodou DSI se zatížením 1 N. Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester (MHT3) od firmy Anton-Paar v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, ve Zlíně. Následně byly všechny naměřené hodnoty graficky zpracovány a vyhodnoceny.

Na základě vyhodnocení výsledků lze pozorovat, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u vzorku, kaleného při teplotě 950 °C po dobu 30 minut s následným ochlazením v oleji. Tento vzorek dosáhl nejvyšší hodnoty jak u vtiskové tvrdosti, tak u tvrdosti dle Vickerse.

Na základě výsledků tvrdosti dle Vickerse byly určeny strukturní složky materiálu. Tepelně zpracované vzorky se nacházely v oblasti vysokouhlíkového martenzitu. Což bylo způsobeno tím, že byly zpracovávány kalením. Naopak tepelně nezpracovaný vzorek se nacházel v oblasti horního bainitu.

Podmínky tepelného zpracování mají zásadní vliv na tvrdost a mikrostrukturu oceli ČSN 17 102. Vhodnou volbou kalicí teploty, dobou výdrže a volbou kalicího média dochází k výraznému zvýšení tvrdosti materiálu. Tyto faktory ovlivňují mechanické vlastnosti, odolnost a životnost oceli v praktickém využití. Získané poznatky usnadňují optimalizaci tepelného zpracování podle požadavků na konkrétní použití.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUMBÁLEK, Leoš. Kontrola a měření pro SPŠ strojní. Praha: Information, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [2] MÜLLER, Miroslav a PETRŽELA, Zdeněk. Strojírenská technologie část I. II.: Studijní text pro tříletý učební obor zámečník. 2010/2011. Dostupné z: https://www.unicprum.cz/soubory/elektronicke-ucebnice/dokumenty/za_strojirenska_technologie_1_2.pdf
- [3] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály [online]. 1. vyd. Vysoká škola chemickotechnologická v Praze, 2006 [cit. 2024-11-21]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/.
- [4] ALEXANDROVICH, P. L. and ANATOLIEVICH, F. G. Local corrosion of austenitic steels and alloys. Austenitic Stainless Steels – New Aspects. 2017. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70339>
- [5] HORDYCH, I., HERBST, S., NURBERGER, F., BOJARKIN, V., HUBERT, O., & MAINER, H. J. Manufacturing and virtual design to tailor the properties of boron-alloyed steel tubes. Virtual Design and Validation, 2020. 21-44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38156-1_2
- [6] HODIS, Zdeněk. Materiály a technologie kovy II – přednášky. Brno, 2011. Studijní opory. Masarykova univerzita v Brně. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/jaro2013/TE2BP_MTK2/um/MTK2_studijni_opory_10.pdf
- [7] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [8] VĚCHET, Stanislav a NĚMEC, Karel. Tepelné zpracování ocelí: druhy a oceli. Online. In: Slideplayer. 2011. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>. [cit. 2025-03-24].
- [9] MANDAL, P., K and KANT, Ravi. Effect of microalloying elements on mechanical properties in high-strength low-alloy steel. Materials Science Forum, 2015. 830-831, 231-233. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.830-831.231>
- [10] HODIS, Zdeněk. Materiály a technologie kovy I – přednášky. Brno, 2010. Studijní opory. Masarykova univerzita v Brně. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2010/TE2BP_MTK1/um/MTK1_studijni_opory_03.pdf

- [11] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [12] PALÁT, Hynek. *Strojírenská technologie*, 1. www.sspu-opava.cz [online]. 2011 [cit. 2024-12-8]. Dostupné z: <https://www.sspu-opava.cz/cs/studium/vyukovematerialy/>
- [13] LISCIC, Bozidar, Hans M. TENSI, Lauralice C.F. CANALE & George E. TOTTEN. *Quenching Theory and Technology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 9781439859865.
- [14] MRÁZ, Libor. *Maturitní témata ze strojírenské technologie*. Střední průmyslová škola Zlín, tř. Tomáše Bati 4187 Zlín, 2008.
- [15] HERMANN, Konrad. *Hardness Testing – Principles and Applications*. ASM International, 2011. ISBN 978-1-61344-761-9.
- [16] DUŠEK, Jiří. *Tvrдость, mikrotvrдость, nanotvrдость – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.
- [17] SKÁLOVÁ, Jana; BENEDIKT, Vladimír a KOVAŘÍK, Rudolf. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [18] SCHILLER, Michael. *PVC Additives – Performance, Chemistry, Developments, and Sustainability (2nd Edition) - 1.7.14 Shore Hardness*. (pp. 105). Hanser Publishers. 2022. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0138QKG1/pvc-additives-performance/shore-hardness>
- [19] SHEN, Yang; MATSUURA, Hiroyuki; WANG, Cong. Evolution of carbide precipitates in 1.25cr-0.5mo steel during simulated postweld heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions* 2018. A, 49(10), 4413-4418. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4806-x>
- [20] SILVA, Marcelo, A. da; TEIXEIRA, Jose, Claudio, G; GUIMARAES, Arti, Sauer; BOTT, Ivani, de, Souza; COSTA, Hector R. M. A methodology for evaluation of life fraction using cr-mo steel under creep conditions. *Materials Science Forum*, 2013. 758, 57-63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.758.57>
- [20] TÓTH, László, et al. "The effects of quenching and tempering treatment on the hardness and microstructures of a cold work steel". *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 4, no. 1, 2019, p. 286-294. <https://doi.org/10.21791/ijems.2019.1.36>.

- [21] WALLEY SM. Historical origins of indentation hardness testing. *Materials Science and Technology*. 2012;28(9-10):1028-1044. doi:10.1179/1743284711Y.00000000127
- [22] HERRMANN, Konrad (ed.). *Hardness testing: principles and applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2011. ISBN 978-1-61503-832-9.
- [23] MAALEKIAN, Mehran. "The effects of alloying elements on steels (I)." 2007. https://pure.tugraz.at/ws/portalfiles/portal/70192576/The_Effects_of_Alloying_Elements_on_Steels.pdf
- [24] DEY, Kumar. *Annealing Process of Steel* [online]. 2021 [cit. 2025-05-1]. Dostupné z: <https://whatispiping.com/annealing/>
- [25] BHADURI, Amit. *Mechanical properties and working of metals and alloys* [online]. Singapore: Springer, [2018] [cit. 2025-02-08]. Springer series in materials science. ISBN 978-981-10-7209-3.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma rozdělení slitin železa [7]	15
Obr. 2 Schéma rozdělení ocelí ke tváření [7].....	16
Obr. 3 Obecný cyklus tepelného zpracování [10].....	18
Obr. 4 Oblast žíhacích teplot [12]	19
Obr. 5 Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu $Fe - Fe_3C$ [14]	21
Obr. 6 Ochlazovací křivky středu ocelového válce o průměru 10 mm v uvedených prostředích [7].....	22
Obr. 7 Způsoby kalení, 1). do studené lázně, 2) lomené kalení [11]	24
Obr. 8 Způsoby kalení, 3). termální kalení, 4). izotermické zušlechťování [11].....	24
Obr. 9 Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [7]	28
Obr. 10 Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování 1- VTMZ, 2 – NTMZ [8].....	29
Obr. 11 Zkouška tvrdosti podle Brinella[1]	31
Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [1].....	32
Obr. 13 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRA [2]	33
Obr. 14 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRB [2].....	33
Obr. 15 Schéma zkoušky dle Rockwella označována HRC [2].....	34
Obr. 16 Schématické znázornění příčného řezu vtisku. a) indentor, b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese, c) povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximální zkušební zatížení. [16].....	35
Obr. 17 Princip zjišťování tvrdosti kladívkem Podi [6].....	35
Obr. 18 Kalicí pracoviště SKM.....	40
Obr. 19 Ohráty zkušební vzorek před ochlazením.....	41
Obr. 20 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000	41
Obr. 21 Vyleštěné vzorky	42
Obr. 22 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO	42
Obr. 23 přístroj MicroCombi Tester (MHT ³) od firmy Anton-Paar	44
Obr. 24 Otisk vpichu vyfocený přístrojem MicroCombi Tester	45
Obr. 25 Závislost vtiskové tvrdosti HIT na teplotě (voda); výdrž 30 minut	46
Obr. 26 Závislost tvrdosti dle Vickerse $HVIT$ na teplotě (voda); výdrž 30 minut	47
Obr. 27 Závislost vtiskového modulu EIT na teplotě (voda); výdrž 30 minut.....	47
Obr. 28 Závislost elastické deformační práce $Welast$ na teplotě (voda); výdrž 30 minut .	48
Obr. 29 Závislost plastické deformační práce $Wplast$ na teplotě (voda); výdrž 30 minut.	49
Obr. 30 Závislost vtiskové tvrdost HIT na čase (voda); při teplotě 950 °C	50
Obr. 31 Závislost tvrdosti dle Vickerse $HVIT$ na čase (voda); při teplotě 950 °C	50

Obr. 32 Závislost vtiskového modulu <i>EIT</i> na čase (voda); při teplotě 950 °C	51
Obr. 33 Závislost elastické deformační práce <i>W_{elast}</i> na čase (voda); při teplotě 950 °C ..	51
Obr. 34 Závislost plastické deformační práce <i>W_{plast}</i> na čase (voda); při teplotě 950 °C ..	52
Obr. 35 Závislost vtiskové tvrdosti <i>HIT</i> na teplotě (olej); výdrž 30 minut	53
Obr. 36 Závislost tvrdosti dle Vickerse <i>HVIT</i> na teplotě (olej); výdrž 30 minut	53
Obr. 37 Závislost vtiskového modulu <i>EIT</i> na teplotě (olej); výdrž 30 minut	54
Obr. 38 Závislost elastické deformační práce <i>W_{elast}</i> na teplotě (olej); výdrž 30 minut ...	55
Obr. 39 Závislost plastické deformační práce <i>W_{plast}</i> na teplotě (olej); výdrž 30 minut ...	55
Obr. 40 Závislost vtiskové tvrdosti <i>HIT</i> na čase (olej); při teplotě 950 °C	56
Obr. 41 Závislost tvrdosti dle Vickerse <i>HVIT</i> na čase (olej); při teplotě 950 °C	56
Obr. 42 Závislost vtiskového modulu <i>EIT</i> na čase (olej); při teplotě 950 °C	57
Obr. 43 Závislost elastické deformační práce <i>W_{elast}</i> na čase (olej); při teplotě 950 °C ...	58
Obr. 44 Závislost plastické deformační práce <i>W_{plast}</i> na čase (olej); při teplotě 950 °C ..	58
Obr. 45 Porovnání tvrdosti vtisku jednotlivých vzorků	59
Obr. 46 Porovnání Vickersovy tvrdosti jednotlivých vzorků	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mezní obsahy legujících prvků pro rozdělení ocelí na legované a nelegované (obsahy jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech) [7]	17
Tabulka 2 Chemické složení oceli 17 102	39
Tabulka 3 Technologické údaje oceli 17 102	39
Tabulka 4 Parametry tepelného zpracování vzorků	40
Tabulka 5 Tvrdost strukturních složek	43

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Fe	Železo
C	Uhlík
Al	Hliník
B	Bór
Bi	Vismut
Co	Kobalt
Cr	Chrómový
Cu	Měď
La	lanthanidy
Mn	Mangan
Mo	Molybden
Nb	Niob
Ni	Nikl
Pb	Olovo
Se	Selen
Si	Křemík
Te	Telur
Ti	Titan
V	Vanad
W	Wolfram
Zr	Zirkon
Sn	Cín
Ms	Teplota Martenzitické přeměny [°C]
Ac	Kritická teplota [°C]
IRA	Izotermický rozpad austenitu

ARA	Anizotermický rozpad austenitu
F	Zatěžující síla [N]
S	Plocha vtisku [mm^2]
D	Průměr kuličky [mm]
D	Průměr vtisku [mm]
Fo	Předběžné zatížení
g	Gravitační síla
H	Tvrdost
HB	Tvrdost dle Brinella
HV	Tvrdost dle Vickerse
HR	Tvrdost dle Rockwella
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská technická norma
H_{IT}	Vtisková tvrdost [Mpa]
HV_{IT}	Vickersova tvrdost
E_{IT}	Vtiskový modul [GPa]
W_{elast}	Elastická deformační práce [nJ]
W_{plast}	Plastická deformační práce [nJ]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Ocel 17 102

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST OCEL 17 102

ČSN 41 7102

STN 41 7102

Žárupevná Cr-Mo ocel

OCEL

17 102

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
max 0,15	max 0,60	max 0,50	4,00–6,00	0,45–0,65	max 0,035	max 0,030

Polotovary

[1] tyče válcované za tepla

[2] plechy válcované za tepla

[3] výkovky

[4] bezešvé trubky

Mechanické vlastnosti

Polotovary	[1] [3]	[1]	[2]		
Rozměr t, d [mm]	–	40	1–30	1–30	6–90
Stav	.3	.6	.2	.3	.5
Mez kluzu R _e [MPa] min	–	445	190	–	345
Mez pevnosti R _m [MPa]	–	640–790	min 390	–	490–690
Tažnost A ₅ [%] min podél	–	17	22	–	18
Kontrakce Z [%] min	–	60	–	–	–
Vrubová houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²] min podél	–	98	–	–	–
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min napříč	–	–	49	–	49
Tvrdost HB	max 169	192–239	–	max 169	–
Modul pružnosti E [GPa]	–				
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–				

Polotovary	[3]		[4]	
Rozměr t, d [mm]	≤ 300	≤ 250	≤ 24	≤ 24
Stav	.5	.6	.2	.5
Mez kluzu R _e [MPa] min	395	445	210	390
Mez pevnosti R _m [MPa]	min 590	610–790	420–590	590–730
Tažnost A ₅ [%] min	podél.	17	17	22
	tang	14	15	–
Kontrakce Z [%] min	–	55	–	–
Vrubová houževnatost KCU 2 [J .cm ⁻²] min	podél.	59	59	69
	tang	39	39	–
Tvrdost HB	min 170	183–239	–	–
Modul pružnosti E [GPa]	–			
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	–			

Teplota [°C]	200	300	350	400	450
Nejnižší mez kluzu R _p 0,2 [MPa] za zvýšených teplot	[1], stav .6	–	275	245	216
	[2], stav .5	–	265	235	206
	[3], stav .5	–	255	235	206
	[4], stav .2	157	137	132	127
	[4], stav .5	343	275	245	215

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	Rezistivita ρ [Ω . m]
7 840	–	11,8.10 ⁻⁶	20	600.10 ⁻⁹

Odolnost proti degradačním procesům

ODOLNOST PROTI TEČENÍ

Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa] pro stav .2

Teplota [°C]	450	470	490	510	530	550	570	590	610
$R_{mT}/10^4$	195	165	130	115	95	77	62	50	40
$R_{mT}/10^5$	146	119	96	77	61	48	37	29	–
$R_{mT}/2.10^5$	132	106	84	66	52	40	31	25	–
$R_{mT}/2,5.10^5$	127	102	81	63	49	38	30	–	–

Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa] pro stav .5

Teplota [°C]	450	470	490	510	530	550	570	590	610
$R_{mT}/10^4$	–	–	191	145	112	87	68	53	41
$R_{mT}/10^5$	–	182	131	46	70	51	36	–	–
$R_{mT}/2.10^5$	234	160	113	81	57	40	–	–	–
$R_{mT}/2,5.10^5$	225	153	107	75	53	37	–	–	–

Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa] pro stav .6

Teplota [°C]	450	470	490	510	530	550	570	590	610
$R_{mT}/10^4$	–	222	177	139	108	83	64	49	38
$R_{mT}/10^5$	–	153	117	89	67	51	38	–	–
$R_{mT}/2.10^5$	175	134	102	76	58	44	–	–	–
$R_{mT}/2,5.10^5$	169	129	97	73	55	42	–	–	–

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

žihání	880–920 °C	1,5 min/mm na teplotě, ochlazovat rychlostí max 1 °C min. do 650 °C, pak na vzduchu
normalizační žihání	900–940 °C	ochlazovat na vzduchu
žihání ma měkko	740–780 °C	ochlazovat v peci
žihání ke snížení prnutí	680–720 °C	ochlazovat na vzduchu nebo v peci
kalení	920–980 °C	ochlazovat ve vodě, tenké kusy na vzduchu nebo v oleji
popouštění	680–740 °C	1h na teplotě, ochlazovat ve vodě nebo na vzduchu
teploty přeměn	$A_{C1} \sim 800$ °C	$A_{C3} \sim 830$ °C

TVAŘITELNOST

třída tvařitelnosti za tepla 1

teploty tváření	1 100–900 °C	ochlazovat v peci nebo v popelu pak vyžítat
-----------------	--------------	---

SVAŘITELNOST

podle ČSN 05 1310 – zaručená podmíněná, teplota předehřevu 300–350 °C, dohřev min 1h s pomalým ochlazováním, výrobky ve stavu .2 žítat po svaření při teplotě 750 °C
doporučené přídavné materiály pro svařování el. obloukem ručně E 10Cr5Mo-B (ČSN 05 5101)

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška smáčknutím podle ČSN 42 0415.4

vzdálenost tlačných desek pro stav .2 $H = \frac{1,08D_a}{0,08 D+a}$

pro stav .5 $H = \frac{1,07D_a}{0,07 D+a}$

zkouška rozšiřováním podle ČSN 42 0415.5 (vrchoový úhel $\beta = 45^\circ$)

d/D 0,9 0,8 0,7 0,6

$\frac{D_u - D}{D} \cdot 100 [\%]$ 15 17 19 23

Použití

Pro zařízení na zpracování ropy a stlačeného vodíku za teplot do 600 °C.

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030
elektroocel nebo martinská	červená-žlutá-oranžová	083

Porovnání se zahraničními materiály

ISO		EURO		Německo	
TS 37	ISO 2604/I, II, IV	5CrMo16	EN 96-79	12CrMo19 5	DIN 17176
F 37	ISO 2604/I, II, IV				
P 37	ISO 2604/I, II, IV				
Francie		Velká Británie		Rusko	
Z10CD5-05	NF A36-602-88	625	BS 3604/1-90	15Ch5M	GOST 5632-72
Z10CD5-05	NF A36-206-83	625	BS 3606-92		
USA		Japonsko		Kanada	
Type 501, 502	ASTM A314-70	SFVAB 5 A, B	JIS G3203-82		
Gr. 3	ASTM A182	STBA 25	JIS G3462-88		
Gr. F5	ASTM A194	STFA 25	JIS G3467-89	—	—
P5	ASTM A199, A200	STPA 25	JIS G3458-88		
T5	ASTM A335	SCMV 6	JIS G4109-87		
Itálie		Rakousko		Švédsko	
A16CrMo 25 5 KG, KW	—	—	—	—	—
B16CrMo 20 5 KG, KW					
Polsko		Maďarsko		Norsko	
H5M	PN H-86022	12 CrMo 20 5	MSZ 2295	—	—
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
—	—	—	—	5 CrMo 16 F.240B	UNE 36072/1-75 UNE 36072/1-75
Čína		Rumunsko			
10MoCr50	GB 1221-92	10 MoCr 50	STAS 8184		
10MoCr50	GB 6479-86			—	
10MoCr50	GB 9948-88				