



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ TVÁŘENÝCH SOUČÁSTÍ

HEAT TREATMENT OF FORMED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Poloch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Milan Poloch
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tepelné zpracování tvářených součástí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelné zpracování patří k základním způsobům úprav nejen polotovarů připravovaných k tváření, ale i hotových výlisků a výkovek. Cílem tepelného zpracování polotovarů je zpravidla zajistit jejich vhodné mechanické vlastnosti a tedy i potřebnou tvářitelnost. Účelem tepelného zpracování prováděného po tváření je pak zajištění požadovaných užitečných vlastností výlisků a výkovek. Na oblast tepelného zpracování používaných polotovarů i ocelových výlisků a výkovek je zaměřena tato bakalářská práce.

Cíle bakalářské práce:

- Analyzovat faktory ovlivňující tvářitelnost kovových materiálů.
- Zpracovat literární studii věnovanou tepelnému zpracování polotovarů před plošným a objemovým tvářením.
- Analyzovat vliv deformačního procesu na vlastnosti výlisků a výkovek.
- Popsat cíle a procesy tepelného zpracování výlisků a výkovek.
- Navrhnout, připravit a realizovat experiment pro ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti tvářené oceli.
- Vyhodnotit provedený experiment.

Seznam doporučené literatury:

MACEK, Karel, Petr, ZUNA a Jiří, JANOVEC, 2008: Tepelné zpracování kovových materiálů. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 133s. ISBN 978-80-01-04186-4.

PTÁČEK, L., aj. 2002: Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 384 s. ISBN 80-7204-248-3.

KRAUS Václav, 2002: Tepelné zpracování a slinování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 80-7082-582-0.

SILBERNAGEL, Arnošt, Vojtěch, HRUBÝ, Miroslav, GREGER a Jiří, NĚMEC, 2011: Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů. 1. vyd. Ostrava: Kovosil. 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7.

MODRÁČEK, Oldřich, Ladislav NĚMEC, a Miroslav HLUCHÝ, 2002. Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování 2. díl. Praha: Scientia. ISBN 80-7183-265-0.

LIDMILA, Zdeněk. 2008: Teorie a technologie tváření I. Brno: Univerzita obrany. 105 s. ISBN 978-8-7213-579-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

POLOCH Milan: Tepelné zpracování tvářených součástí

Bakalářská práce se zabývá metodami tepelného zpracování tvářených součástí. Kapitola základních pojmů se věnuje ocelím ke tváření. Konkrétně tvařitelnost a vliv plastické deformace na vlastnosti ocelí, vliv chemického složení, strukturního složení a termomechanické podmínky při deformaci. Ve větší části bakalářské práce se věnuji tepelnému zpracování. Základní pojmy týkající se tepelného zpracování jsou vysvětleny v úvodní kapitole a ně navazují základní metody a poté jsou vysvětleny základní metody tepelného zpracování jako je žíhání a kalení s popouštěním. Každá z těchto technologií má svoji vlastní podkapitulu a je v názorně popsána a doplněna o grafy a obrázky. Praktická část spočívá v plastické deformaci vzorků ve tvaru válečků. Na vzorcích proběhla deformace, měření tvrdosti, tepelné zpracování s následným měřením tvrdosti. Jsou vyhodnoceny změny mechanických vlastností na vzorcích.

Klíčová slova Tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, ocel, tváření

ABSTRACT

POLOCH Milan: Heat treatment of formed parts

Bachelor thesis focusing on heat treatment of formed parts. The chapter of basic terms deals with steels for forming. Concrete formability and influence on plastic deformations on steel properties, influence of chemical composition, structural composition and thermo-mechanical conditions during deformation. In the larger parts of the thesis are carried out heat treatment. The prohibited concepts of heat treatment are explained in the introductory question and some follow the basic methods and then the basic methods of heat treatment such as annealing and tempering with tempering are explained. All of these technologies have their own subchapters and are illustrated and supplemented with graphs and figures. The practical amount consists of plastic deformations of roller-shaped samples. The samples were deformed, measured hardness, heat treatment followed by measured hardness. Changes of mechanical properties on samples are evaluated.

Keywords Heat treatment, mechanical properties, steel, forming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLOCH, Milan. *Tepelné zpracování tvářených součástí* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124339>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Tepelné zpracování tvářených součástí vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Zdeňka Lidmily, CSc., s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 26.6. 2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a četné připomínky při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, která mne bezmezně podporovala během celé doby studia.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY	11
1.1 Oceli ke tváření	11
1.1.1 Tvařitelnost ocelí, vliv plastické deformace na vlastnosti ocelí	11
1.1.2 Vliv chemického složení ocelí	12
1.1.3 Vliv strukturního stavu	13
1.1.4 Termomechanické podmínky deformace	14
1.2 Využití tepelného zpracování pro zvýšení tvařitelnosti a zlepšení vlastností tvářených ocelí	15
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ	16
2.1 Ohřev	16
2.2 Výdrž	18
2.3 Ochlazování	18
3 ŽÍHÁNÍ	19
3.1 Žíhání bez překrytality	19
3.1.1 Žíhání na snížení vnitřního pnutí	19
3.1.2 Žíhání rekrytalizační	21
3.1.3 Žíhání na měkko	21
3.1.4 Žíhání protivločkové	22
3.1.5 Žíhání pro odstranění křehkosti po moření	22
3.2 Žíhání s překrytality	22
3.2.1 Žíhání rozpouštěcí	22
3.2.2 Žíhání homogenizační	23
3.2.3 Žíhání normalizační	23

3.2.4	Žihání izotermické	24
3.2.5	Žihání kombinované	25
4	KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ	26
4.1	Základní pojmy při kalení	26
4.1.1	Kalitelnost	26
4.1.2	Zakalitelnost	26
4.1.3	Prokalitelnost	26
4.1.4	Kalící teplota	26
4.1.5	Kalící prostředí	27
4.2	Metody kalení	29
4.2.1	Martenzitické kalení	30
4.2.2	Bainitické kalení	30
4.3	Popouštění	31
5	EXPERIMENT	34
5.1	Příprava experimentu	34
5.2	Provedení experimentu	35
5.3	Vyhodnocení experimentu	40
6	ZÁVĚR	41

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých obrázků

Seznam použitých tabulek

ÚVOD [1], [2]

Zpracováním kovů se lidstvo zabývá už od doby bronzové. Na zvyšování užitku a některých vlastností kovů se při jejich zpracování významně začaly podílet některé vědní obory jako fyzika a chemie. Začaly se řešit vlivy chemického složení kovů a jejich metalografické struktury s ohledem na ovlivnění mechanických vlastností kovů. Zejména v průběhu dvacátého století byla získána a formulována řada nových poznatků, které přinesly podstatné zlepšení podmínek při zpracování kovů.

V současné době jsou na strojírenskou výrobu kladeny vysoké nároky. Dochází k prudkému rozšíření automatizace a robotizace s cílem dosáhnout vyšší produktivity a efektivity výroby. Na zvyšování efektivity výroby, úsporách výrobních nákladů se velkou měrou podílí moderní technologie uplatňované v této oblasti jako je například využití nových poznatků v oblasti změn mechanických vlastností kovů s použitím tepelného zpracování.

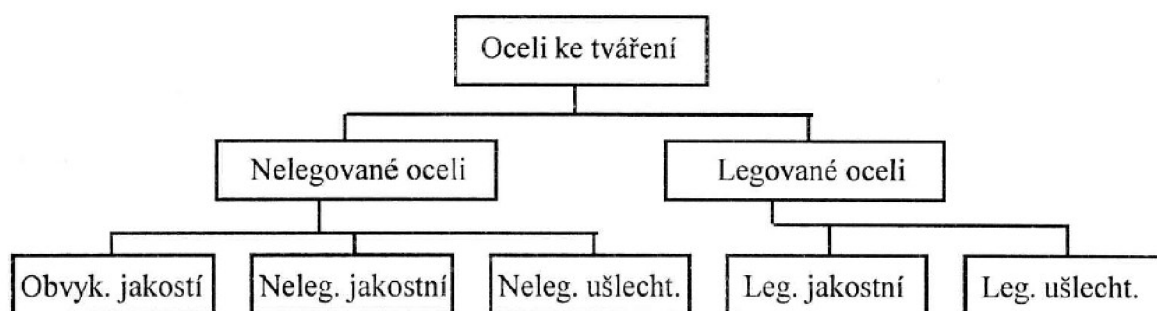
Mechanické vlastnosti ocelí jsou dány především chemickým složením, především se jedná o obsah uhlíku. Tepelným zpracováním lze měnit mechanické vlastnosti oceli. Procesem žíhání lze získat ocel, kterou lze lépe obrobít nebo ji lépe využít pro tvářecí procesy za studena. Ocel po žíhání je měkká a tvárná. Procesem kalení a popouštění lze dosáhnout vysoké pevnosti a zároveň i houževnatosti. Kalená ocel se dá využít například při výrobě rezných nástrojů.

Ve své bakalářské práci chci poukázat na současné známé technologie tepelného zpracování. Jako příklad změn v důsledku tepelného zpracování byl proveden experiment. Experiment poukazuje na změny tvrdosti vzorku kovového materiálu podrobeného plastické deformaci s následným tepelným zpracováním ve formě rekrystalizačního žíhání.

1. ZÁKLADNÍ POJMY

1.1. Oceli ke tváření [1], [3], [4]

Uhlíkové a nízkolegované oceli mají vhodné vlastnosti pro tváření. Mají dobrou tvařitelnost. Tato tvařitelnost se snižuje zvyšujícím se obsahem legur. V následující podkapitole je popsáno jak mají jednotlivé prvky vliv na daný typ oceli. Rozdělením ocelí se zabývá norma ČSN EN 10020. Všeobecně se tyto materiály pro tváření vyznačují obsahem uhlíku nižším než 2% a jejich menším podílem jiných příměsí. Hodnota 2% uhlíku je mezní hodnota rozdílu mezi litinou a ocelí. Základní rozdělení ocelí ke tváření viz obr. 1



Obrázek 1: Rozdělení ocelí [1]

Nelegované oceli mají dané chemické složení, které nedosahuje mezních hodnot obsahu jednotlivých prvků. Podle schématu vidíme, že nelegované oceli se dělí dále na oceli obvyklých jakostí na oceli nelegované jakostní a oceli nelegované ušlechtilé. Legované oceli obsahují alespoň v jednom případě mezní hodnoty chemického složení. Oceli legované se dělí na oceli legované a jakostní a legované ušlechtilé.

1.1.1. Tvařitelnost ocelí, vliv plastické deformace na vlastnosti ocelí [3],[5]

Schopnost kovových materiálů plasticky se deformovat bez porušení soudržnosti se nazývá tvařitelnost. Tvařitelnost ocelí závisí na jejich metalurgicko-fyzikálních vlastnostech, ale současně i na vnějších podmínkách deformace. Pro tvařitelnost rozhodující metalurgicko-fyzikální činitelé jsou:

- chemické složení ocelí (základní a legující prvky, vměstky, plyny...)
- strukturní stav (makro a mikro struktura, velikost zrna, strukturní složky...)
- tepelně aktivované děje (zpevňovací a uzdravovací procesy, růst zrna)

Vnější podmínky deformace ovlivňující tvařitelnost jsou:

- termomechanické podmínky deformace (teplota tváření, velikost a rychlost deformace),

- napěťový stav ve tvářeném materiálu (hlavní napětí od tvářecích sil a napětí přídavná),
- technologické podmínky zpracování (vnější tření, nerovnoměrnost deformace ...)

Tvářením se zpracovávají válcované hutní polotovary. Ty se upravují před, během, i po procesu tváření. Před procesem samotného tváření se provede tepelné zpracování a vhodná úprava povrchu. Pomocí tepelného zpracování se v polotovaru odstraní například nehomogenní struktura chemického složení. Jeho úkol je tedy především připravit vhodné mechanické vlastnosti - snížit pevnostní vlastnosti a zvýšit tvařitelnost.

Tvařejí se skoro všechny dostupné druhy ocelí. Vhodné jsou především oceli uklidněné, ale mohou být použity i oceli neuklidněné. Nevýhodou neuklidněných ocelí je jejich náchylnost ke stárnutí a mají také zvýšenou nehomogenitu chemického složení. Výhodou neuklidněných ocelí je jejich vyšší plasticita, která je způsobena nižším obsahem vměstků.

Vhodnými typy ocelí pro tváření jsou takové, které mají vhodné chemické složení. Jejich tvařitelnost je závislá na obsahu legur. Čím více je v oceli legur, tím horší je jejich tvařitelnost. Žáropevné, nástrojové a antikoroční oceli nejsou příliš vhodné pro jejich velký deformační odpor. To způsobuje, že tyto typy ocelí se tváří zpravidla za tepla. Tyto typy ocelí se vyznačují malou rekrytalizační rychlostí a nedá se u nich použít fosfátování. Nelze totiž zajistit efektivní mazání během procesu tváření. Ohřev probíhá pomalu do teploty 800°C. Nedodržení povoleného ohřevu se bude zvyšovat rozdíl teplot mezi jádrem a povrchem ohřívajícího tělesa. Tyto rozdíly teplot způsobují trhliny

1.1.2. Vliv chemického složení ocelí [1], [3], [4], [6]

Chemické složení materiálu má zásadní vliv na zvolení technologie tepelného zpracování zejména ovlivňuje důležitou tvařitelnost. Z hlediska tvařitelnosti je nejvýhodnější používat chemicky čisté kovy. Prvky, které jsou přísadou mají schopnost zpevnit krystalickou mřížku. Těmto prvkům se říká legury. Oceli s vysokým obsahem legur mají tak sníženou tvařitelnost a tváří se převážně za tepla. Vliv jednotlivých prvků na tvařitelnost ocelí lze charakterizovat:

- Uhlík: Významným způsobem ovlivňuje materiálové vlastnosti (Re, Rm, A), tvrdost a tvařitelnost. Snížením obsahu uhlíku můžeme výrazně zvýšit tvařitelnost.
- Mangan : Zvyšuje houževnatost a pevnost dané oceli. Přidáním manganu snížíme křehkost za tepla.
- Křemík: Zvyšuje mez kluzu i pevnost. Oceli s obsahem Si kolem 2,5% mají nízkou tvařitelnost. Při obsahu Si větším než 3,0% vzniká v daném materiálu silný sklon k hrubozrnnosti. Použitím křemíku dochází ke zvýšení plastických vlastností a přetvárných odporů.
- Fosfor: Může být v ocelích prospěšný i nežádoucí. Ve správné koncentraci zvyšuje tvrdost a pevnost, ale při vysokých koncentracích dochází ke vzniku trhlin. Ty vedou ke vzniku křehkých lomů.
- Síra: Podporuje vznik vměstků, které zhoršují mechanické vlastnosti.

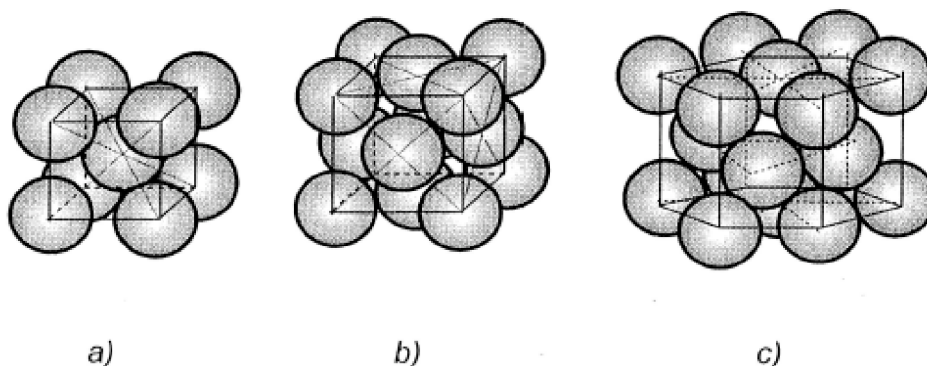
- Chrom: Má na starosti pohyby uzdravování krystalické mřížky. Tváření za tepla je bezproblémové a u tváření za studena se s rychle zvyšující pevností, zvyšuje riziko vzniku trhlin v materiálu.
- Hliník: Je využíván jako dezoxidační činidlo. Dezoxidovaná ocel má lepší mechanické vlastnosti.
- Kyslík: Jeho výskyt je závislý na podmínkách dezoxidace. Snižování kyslíku v materiálu má za následek přibývání oxidů. Oxidy způsobují křehkost při tváření za tepla.
- Dusík: Dusík způsobuje stárnutí materiálu během, kterého se zhoršují některé mechanické vlastnosti. Dusík se váže v materiálu do nitridů.

Tabulka 1: Mezní obsah legujících prvků [1]

Chemický prvek	Zkratka	Obsah v hmot. %	Chemický prvek	Zkratka	Obsah v hmot. %
Hliník	Al	0,10	Nikl	Ni	0,30
Bór	B	0,0008	Olovo	Pb	0,40
Kobalt	Co	0,10	Selen	Se	0,10
Chrom	Cr	0,30	Telur	Te	0,10
Lanthanidy	La	0,05	Vanad	V	0,10
Mangan	Mn	1,65	Wolfram	Wo	0,10
Molybden	Mo	0,08	Zirkon	Zr	0,05
Niob	Nb	0,06			

1.1.3. Vliv strukturního stavu [1], [2], [3], [4], [6], [7]

Atomy kovových materiálu v tuhém stavu jsou uspořádány do krystalové mřížky. Polykrystaly kovů vznikají při krystalizaci taveniny. Krystalová mřížka je charakterizována geometrickým uspořádáním atomů. Krystalové mřížky se dělí do několika skupin podle uspořádání atomů v krystalové mřížce, které lze rozdělit následujícím způsobem, viz obr. 2



Obrázek 2: Základní typy krystalických mřížek a-železo alfa , b-železo gama , c-hořčík nebo zinek [3]

O tom jakou krystalovou mřížku vytvoří tuhnoucí roztok z taveniny rozhodují vlastnosti atomů, teplota, velikost soudržných sil a tlak. Tvorba krystalové mřížky je závislá také na chemickém složení dané slitiny. Vliv chemického složení na vlastnosti kovových materiálů byl popsán v předchozí podkapitole. Chemické prvky tvoří v krystalové mřížce karbidy, oxidické a sulfidické vměstky a nitridy. Nic na světě není ideální a dokonalé. Ani krystalová mřížka není dokonalá. Ta při krystalizaci a jiných procesech trpí na vznik různých poruch. Poruchy krystalové mřížky se dělí na:

- Bodové vady- vakance(vynechání uzlového bodu), substituce(nahrazení atomu atomem jiným) a intersticie(atom je uložen mezi uzly)
- Čárové vady- říká se jim dislokace a můžeme si je představit jako posunutí krystalu vůči druhému. Dělíme je na hranové dislokace, šroubové dislokace a smíšené dislokace.
- Plošné vady- Během těchto vad vznikají vrstevnaté chyby(odchylky od pravidelného tvaru mřížky), dvojčatění (rovina, která je rovinou zrcadlení mřížky je rovina dvojčatění). V neposlední řadě jsou významné hranice zrn. Ty oddělují krystalová zrna. Na hranicích zrn vznikají nemalé množství poruch jako jsou vakance a dislokace.
- Prostorové vady jsou tvořeny shluky atomů příměsových prvků.

Nejenom chemické složení, ale i strukturní stav ocelí, však rozhoduje o jejich tvárných vlastnostech. U slitin s monofázovou strukturou jsou rozhodující vlastnosti základního kovu a ovlivnění krystalografické mřížky legujícími prvky. Tvařitelnost snižuje větší rozdíl velikosti atomových poměrů, větší odlišnost vlastností a větší rozdílnost krystalografické mřížky základního a legujícího kovu. Slitiny s vícefázovou strukturou (např. současný výskyt feritu a austenitu v oceli) mají pak tvařitelnost v porovnání se strukturou monofázovou, vždy nižší. Je to způsobeno rozdílnými mechanickými vlastnostmi feritu a austenitu, sníženou rekrystalizační schopností dvousložkového systému a vylučováním precipitátů na hranicích ferit-austenit.

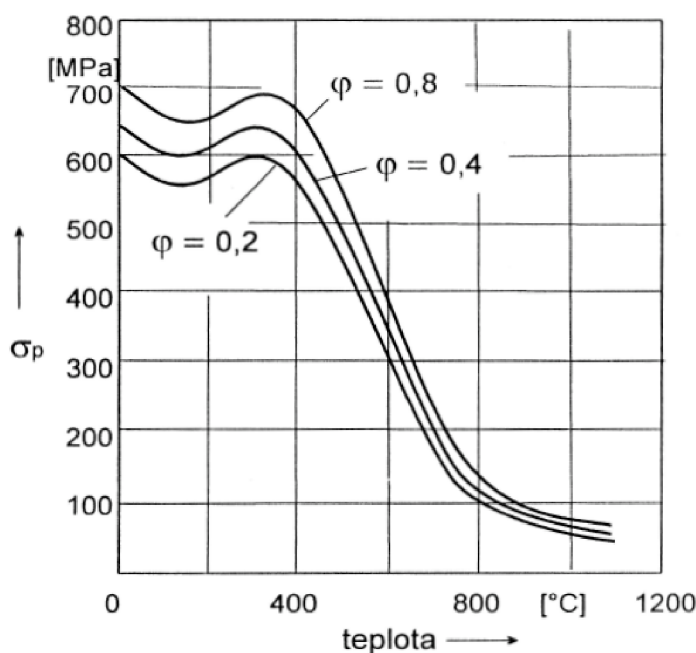
1.1.4. Termomechanické podmínky deformace [1], [2], [3], [4], [6], [7]

Základní termomechanické podmínky deformace jsou vliv velikosti deformace, vliv rychlosti deformace a vliv teploty.

- Vliv velikosti deformace - Je sledován jako výrazný při deformaci materiálu pod teplotou rekrystalizace tj. při tváření za studena. Deformační zpevnění se úměrně zvyšuje s zvyšující se deformací materiálu. Rozdílná situace nastává u tváření za tepla. Zde nestíhají zotavovací procesy a rekrystalizace úplně odstranit deformační zpevnění. Ke zlepšení těchto problémů mohou přispět prodlevy mezi deformacemi . Prodlevy poskytnou prostor pro postdynamické odpevňovací procesy.
- Vliv rychlosti deformace - Deformační rychlost může zvyšovat i snižovat tvařitelnost. Při tváření pod teplotou rekrystalizace(za studena) je vliv změny rychlosti deformací zpravidla malý. To neplatí u tváření nad teplotou rekrystalizace(za tepla)

při níž má vliv naopak velký. Při rychlé deformaci se vytváří teplo, které pozitivně ovlivňuje proces tváření.

- Vliv teploty- Teplota má velmi pozitivní vliv na proces tváření. Během zvýšení teploty se zlepšuje tvařitelnost a snižují se hodnoty přetvárných odporů. Vliv teploty na přirozený přetvárný odpor je znázorněn na obr. 3. Lze z něho odvodit, že tvařitelnost roste s teplotou. Pokles nastává až při spalování a přehřátí kovů. Při zotavovacích procesech jsou zmenšeny pevnostní charakteristiky kubických mřížek.



Obrázek 3: Vliv teploty na přirozený přetvárný odpor oceli s obsahem 0,15% C [3]

1.2. Využití tepelného zpracování pro zvýšení tvařitelnosti a zlepšení vlastností tvářených ocelí [1], [2], [3], [4], [6], [7]

Jak vyplývá z předchozích kapitol lze vytvořením vhodných vnitřních a vnějších podmínek deformace ocelí ovlivnit jejich tvařitelnost. Jedním z důležitých nástrojů pro vytvoření vhodných podmínek je tepelné zpracování polotovarů před tvářením.

Plastická deformace má zpravidla zásadní vliv na strukturu a tedy i vlastnosti tvářené oceli. Další oblastí využití tepelného zpracování u tvářených ocelí je tak i konečné, případně mezioperační tepelné zpracování. Konečné tepelné zpracování tvářených ocelí má za cíl vytvořit ve finálním výrobku takovou strukturu, která zajistí jeho požadované mechanické vlastnosti. Mezioperační tepelné zpracování je třeba zařadit tehdy bude-li polotovar tvářen za studena. Cílem mezioperačního tepelného zpracování je nahradit deformovanou strukturu vzniklou plastickou deformací a obnovit tak tvárné vlastnosti materiálu.

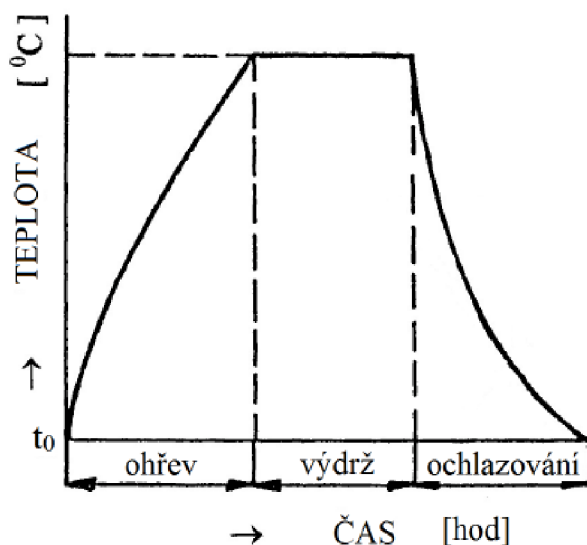
2. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ [1], [4], [6]

Pojmem tepelné zpracování všeobecně rozumíme účelné využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu ke změně struktur určitého materiálu. Změnou struktury materiálu získáme požadované mechanické nebo strukturní vlastnosti polotovaru nebo konečného výrobku. Při této technologii nedochází na rozdíl od obrábění nebo tváření, ke změně tvaru součásti. Při tepelném zpracování dochází pouze ke chtěným změnám vlastností požadovaného materiálu výrobku.

Principem tepelného zpracování je ohřev výrobku nebo polotovaru na požadovanou teplotu. Dále se tepelně zpracovávaný materiál drží na požadované teplotě a poté se řízeně určitou rychlostí ochlazuje. Změna struktury a vlastností dosáhne tzv. řízenými změnami teploty.

Tepelné zpracování může ušetřit náklady na materiál. Můžeme koupit materiál bez dražších legur a poté ho tepelně zpracovat a dosáhnout lepších materiálových vlastností. To nám při vhodně zvoleném tepelném zpracování umožňuje snížit náklady na výrobu a vyrábět součást levněji.

Tepelné zpracování však současně vyžaduje vysoké finanční náklady a vysokou spotřebu elektrické energie. Je na technologovi posoudit vhodnost a metodu tepelného zpracování. Kompenzace vyšších výrobních nákladů a spotřeby energie je snížení hmotnosti výrobků, změna použitelnosti, vlastností a spolehlivosti.



Obrázek 4: Obecný diagram tepelného zpracování [6]

2.1. Ohřev [4], [6]

Tepelné zpracování je tepelný cyklus jehož účelem je změna požadovaných vlastností materiálů. Celý cyklus sestává ze tří částí. První část je ohřev, druhá část je výdrž nebo-li prodleva a třetí část je ochlazování. Tyto části jsou vyobrazeny na obecném diagramu

tepelného zpracování, obr. 4.

Z hlediska nákladů i jakosti konečného produktu má jednu z nejdůležitějších úloh ze všech pochodů tepelného zpracování ohřev. Neméně důležitou úlohu hraje také ochlazení. Výběr špatných metod může mít až fatální následky na výrobek. Ohřev výrobku je relativně složitý proces. V tomto procesu probíhá výměna tepla mezi atmosférou, ohříváním materiálem a vyzdívkou v peci. V plamenných pecích je navíc ještě jako další činitel plamen.

Formy přenosu tepla:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekci)
- zářením (sáláním)

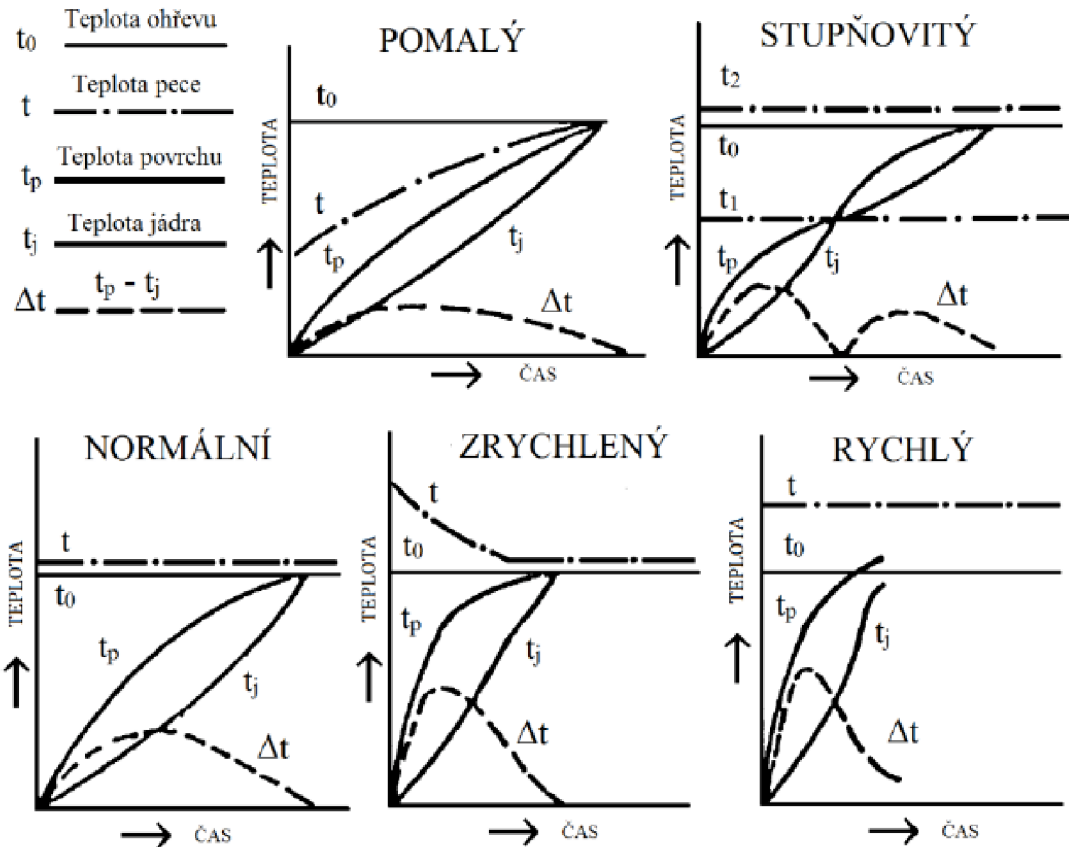
Celková kvalita konečného výrobku závisí na kvalitě vedeném ohřevu a na jeho teplotním a tepelném režimu. Při technologii ohřevu rozlišujeme základní činitele jako konečná teplota, dovolená rychlost, uložení materiálu v peci a teplotní a tepelný režim.

Zvolení ohřívací teploty je závislé na chemickém složení materiálu a na druhu tepelného zpracování. Zvýšení teploty zmenšuje deformační odpor materiálu a zvyšuje difuzní schopnost. Naopak je výše teploty omezena růstem zrna, zintenzivněním oxidace povrchu tělesa atd.

Problémem při nerovnoměrném tepelném poli v ohřívané součásti jsou tepelná vnitřní pnutí. V některých případech představují omezující prvek rychlosti ohřevu. Základní režimy ohřevu a jejich vliv na tepelná pole o ohříváném tělese jsou znázorněny viz. obr. 5

Jednotlivé režimy ohřevu

- Pomalý - vsázka se vkládá do studené pece a ta je postupně ohřívána. Podle schématu je vidět, že rozdíly teplot mezi povrchem a jádrem vsázky jsou malé. Malá je také výrobnost pece.
- Stupňovitý - v peci se vsázka předeřívá v jednom prostředí a poté je přemístěna do prostředí druhého. Ohřívání ve více stupních nám umožňuje snížení vznikajícího napětí v používaném tělese a lze takto zamezit i vzniku nežádoucích deformací.
- Normální - vsázka se vkládá do do pece, která je vyhřátá na předepsanou teplotu. Důsledek je vyšší teplotní spád a vznik většího teplotního pnutí.
- Zrychlený - také se mu jinak říká intenzivní. Pec je předeřívána na vyšší teplotu než je předepsána a poté je do ní vložena vsázka. Dochází ke vzniku velkých teplotních rozdílů mezi povrchem a jádrem výrobku. Při tomto režimu se využívá tepla po předchozí technologické operaci.
- Rychlý - v tomto režimu je teplota nepřetržitě udržována na teplotě mnohonásobně vyšší než je požadována teplota vsázky. Vsázka je vyjmuta v okamžiku, kdy dosáhne předepsané teploty. Z hlediska vzniku vnitřních pnutí je tento způsob nejhorší.



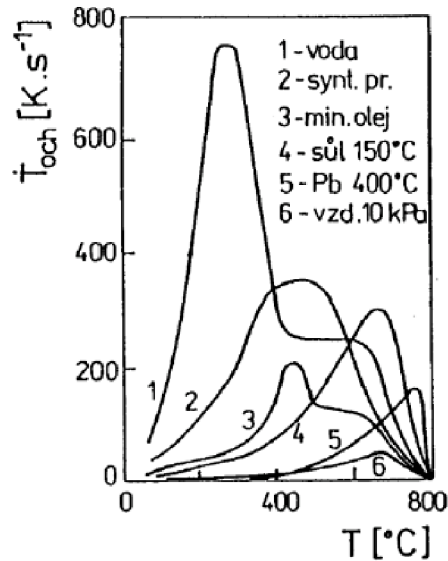
Obrázek 5: Schéma znázornění vlivu způsobu ohřevu na vznik teplotních rozdílů v ohřívaných výrobcích [6]

2.2. Výdrž [4], [6]

Výdrž někdy nazýváme prodlevou . V obou případech se bavíme o udržování předepsané teploty, která se u jednotlivých součástí liší.

2.3. Ochlazování [1], [4], [6]

Ochlazování je technologický proces při kterém se snižuje teplota vsázky na požadovanou hodnotu. Podle způsobu tepelného zpracování probíhá ochlazování v peci s regulovaným ochlazováním, nebo na vzduchu. Rychlostí a intenzitou ochlazování lze zásadním způsobem ovlivnit výslednou strukturu tepelně zpracovaného materiálu. Ta se výrazně mění nejenom v závislosti na výši a prodlevě na teplotě tepelného zpracování a také v závislosti na režimu ochlazování. Např. při kalení ocelí lze jako chladící prostředí využít vzduch, vodu, olej a různé tepelné lázně.. Z následujícího grafu, viz obr. 6 je patrné , jak se liší rychlost ochlazování pro různá prostředí.



Obrázek 6: Teplotní závislost rychlosti ochlazování pro ochlazovací prostředí [1]

3. ŽÍHÁNÍ [1], [4], [8]

Jednou z mnoha možností jak ocel tepelně zpracovat je žíhání. Pomocí žíhání se snažíme dosáhnout rovnovážného stavu v materiálu, homogenní a jemnozrnnou strukturu, s cílem zvýšení obrobitelnosti, houževnatosti a tvárnosti materiálu. Správně zvoleným typem žíhání se vyhneme rozdílům v chemickém složení, můžeme snížit vnitřní pnutí ve výrobku nebo můžeme snížit tvrdost pro následné lepší zpracování například při dopředném protlačování. Žíhání lze zařadit na začátek nebo i na konec technologického postupu. Proces tohoto tepelného zpracování se skládá ze tří fází: ohřevu součásti na požadovanou teplotu, výdrže na teplotě a ochlazování buď na vzduchu nebo v oleji. V závislosti na výši teploty rozlišujeme dvě hlavní skupiny žíhání. Žíhání bez překrytí a žíhání s překrytím. Každá z těchto skupin se dále dělí na další podskupiny viz obr. 7

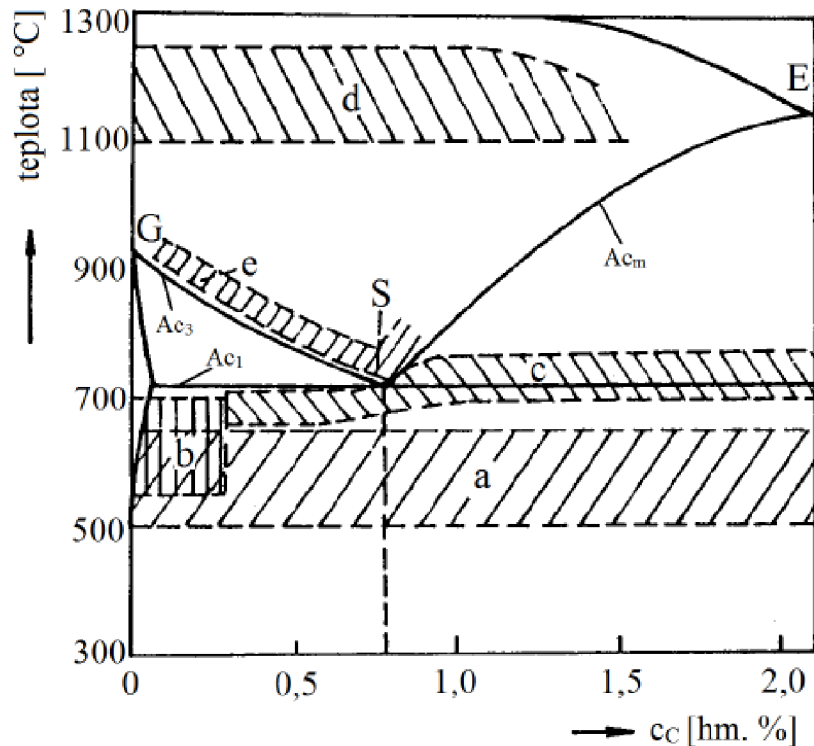
3.1. Žíhání bez překrytí [1], [4], [8]

Během žíhání bez překrytí nepřekročí žíhací teploty překrytí teplotu A_{c1} . Na této teplotě dochází ke strukturálním změnám v materiálu např. rekrytalizace, segregace a zotavení. Fázové přeměny se považují za nevýznamné. Nerovnovážné fáze se rozpouštějí za zvyšujících se teplotu v austenitu nebo feritu.

3.1.1. Žíhání na snížení vnitřního pnutí [1], [8]

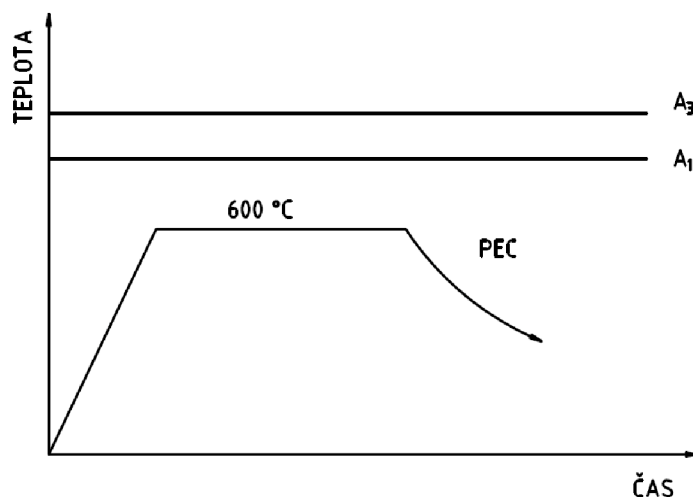
Jak už napovídá název, cílem je snížit nebo úplně odstranit vnitřní pnutí vznikající například při nanášení svarové housenky (tepelně ovlivněná oblast), při tváření za studena (ohýbání, protlačování, stříhání atd.) nebo při výrobě velkých a složitých tvarů, kdy nedochází k rovnoměrnému ochlazení výkovku. Je využíváno pecí s nucenou cirkulací atmosféry.

Žíhací teploty se pohybují mezi 500 až 650 °C. Při těchto teplotách dochází ke snížení



Obrázek 7: Znázornění oblasti žíhacích teplot v Fe-Fe₃C (a-ke snížení pnutí, b- rekrystalizační, c- na měkko, d- homogenizační, e- normalizační [1])

vnitřního pnutí. Mechanismus snížení pnutí spočívá v ohřátí polotovaru na teplotu při které dochází k lokální plastické deformaci kvůli snížení meze kluzu. Výdrž na teplotě se pohybuje různě v závislosti na tvaru a složitosti součásti. Obvykle se pohybuje mezi 1 až 10 hodinami. Následuje pozvolné ochlazování na teploty okolo 300°C a součásti jsou chlazeny na vzduchu, viz graf na obr.8



Obrázek 8: Graf závislosti teploty na čase pro žíhání na snížení vnitřního pnutí [10]

3.1.2. Žihání rekrytalizační [1], [8]

Cílem rekrytalizačního žihání je obnovení tvárných vlastností po tváření za studena. Při rekrytalizačním žihání. Je křehká, usměrněná, deformovaná struktura nahrazena novou jemnozrnnou. Teploty při rekrytalizačním žihání se pohybují mezi 550 až 700 °C. Prodleva se pohybuje mezi 1 až 5 hodinami. Odvíjí se podle stupně deformace a požadovaných vlastností součástí.

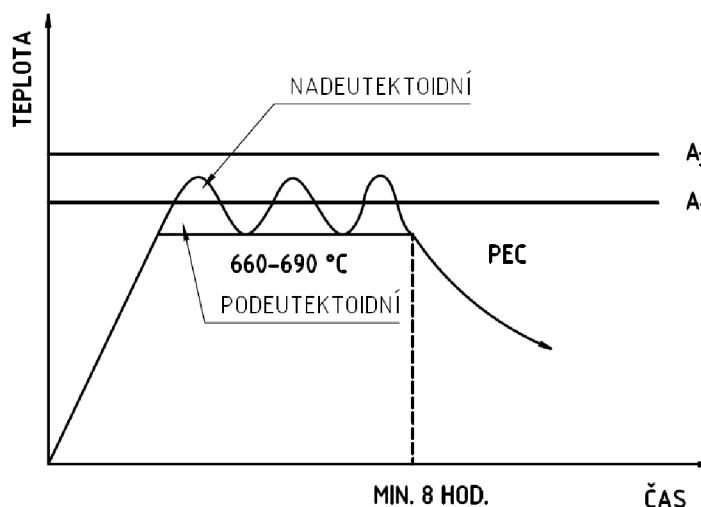
3.1.3. Žihání na měkko [1]

Žiháním na měkko se sníží tvrdost součástí, tím se zlepší obrobiteľnosť oceli. Žihání na měkko je hojně využíváno při tepelném zpracování nástrojových ocelí. Dochází ke sferoidizaci cementitu. To znamená, že se lamelární (destičkový) přemění na perlit globulární (zrnitý). V tabulce č. 2 jsou hodnoty tvrdostí dosažené po žihání na měkko.

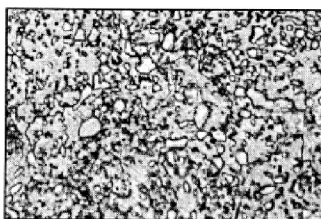
Tabulka 2: Hodnoty tvrdostí vybraných ocelí po žihání na měkko [5]

Označení	Žihací teplota [°C]	Tvrdost [HV]	Příklady využití
11 500	680-720	180	konstrukční ocel
12 020	680-720	120	k cementování
14 220	680-720	220	k cementování
16 341	680-720	max. 250	k zušlechťování
19 422	700-730	max. 250	nástrojová ocel

Zatím co podeutektoidní oceli se žihají při teplotě 660 až 690 °C, Nadeutektoidní oceli se žihají při teplotách těsně nad A₁, kdy se rozpouštějí ledeburitické karbidy. Ochlazování je pozvolné a velmi pomalé kvůli výsledné tvrdosti. V intervalu teplot 600 až 720 °C se žihají oceli podeutektoidní. Výdrž trvá 4 hodiny a součást je pomalu ochlazována. Toto vytvoří dobrou obrobiteľnosť součástí, ale i výhodné vlastnosti pro další zpracování. Na obrázku číslo 10 je vidět zrnitý perlit po žihání na měkko. Průběh žihání je patrný z grafu na obr. 9



Obrázek 9: Graf závislosti teploty na čase pro žihání na měkko [10]



Obrázek 10: Zrnitý perlit v nadeutektoidní uhlíkové oceli po žíhání na měkko (světelná mikroskopie, zvětšeno 800x) [1]

3.1.4. Žíhání protivločkové [1]

Tento typ žíhání je používán jako prevence vzniku tzv. vloček v polotovaru. Vločky jsou vnitřní trhliny kruhového tvaru popřípadě elipsovitého tvaru, které připomínají vločky. Jejich výskyt je spojen s těžkými výkovky, které obsahují větší obsah vodíku. Ten se s klesající teplotou hůře rozpouští. Vodík se pak vylučuje ve formě vměstků. Hydrostatický tlak v těchto vměstcích způsobuje trhliny.

Přebytečný vodík lze odstranit difuzí. Při výrobě polotovaru ať již tvářených či odléváných by neměla jejich teplota nijak dramaticky klesnout pod teplotu A_1 . Protivločkové žíhání tak spočívá v prodlevě při teplotách okolo $660-680^{\circ}\text{C}$, která trvá v rámci stovek hodin nebo další možností je pomalé ochlazování probíhající v peci. Intenzita ochlazování se volí cca. 5°C za hodinu.

3.1.5. Žíhání pro odstranění křehkosti po moření [1]

Křehkost ocelí vzniká při moření součásti, které se užívá na odstraňování okujů z jejich povrchu. Během moření dochází k difuzi vodíku do kovu, což způsobuje zkřehnutí součásti. Vodík se tedy velmi dobře odstraňuje pomocí žíhacích teplot, které dosahují teplot až 500°C po dobu 1 až 4 hodin.

3.2. Žíhání s překrystalizací [1], [6]

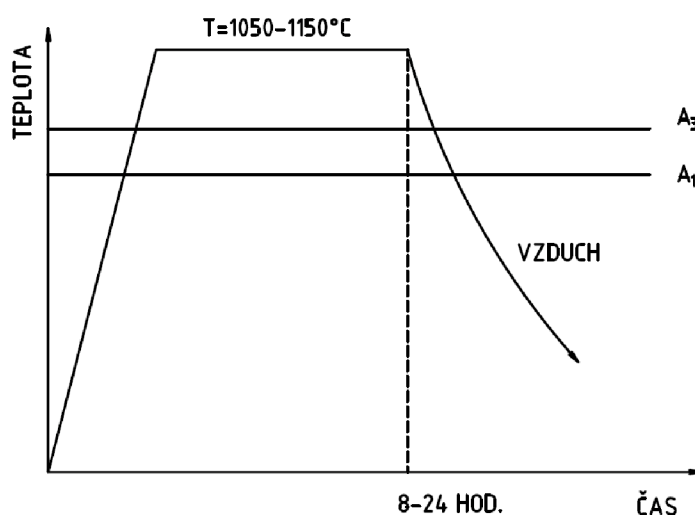
Žíhací teploty překročí při překrystalizačním žíhání překročí teploty A_1 . Oceli podutektoidní se žíhají zpravidla nad teplotami A_3 , zatímco oceli nadeutektoidní se žíhají při teplotách nad A_m . Při takto provedených způsobech žíhání dochází ke totální přeměně feriticko- cementické struktury na strukturu austenitickou.

3.2.1. Žíhání rozpouštěcí [1], [6]

Cílem tohoto žíhání je rozpouštění tzv. minoritních fází. Těmi se rozumí karbidy a nitridy v ocelích. Jedná se o optimální zpracování austenitických ocelí, za vysokých teplot dojde k rozpouštění karbidických, nitridických a karbo-nitridických fází do tuhého roztoku. Zásadní je volba ochlazování, aby nedošlo k opětovnému vyloučení fází. Rekrystalizační žíhání probíhá za teplot dosahujících i 1100°C . Doba setrvání na teplotě je poměrně krátká 15 až 25 min, poté následuje ochlazování. K ochlazování se využívají různá chladicí média jako je vzduch nebo olejové a vodní lázně.

3.2.2. Žihání homogenizační [1], [4], [6]

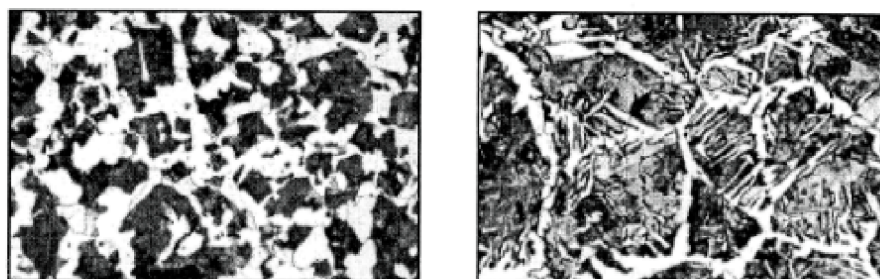
Tuhnutí ingotů a odlitků provází vznik chemického heterogenního složení. Zbavit se heterogenního chemického složení pomáhá Homogenizační žihání, které homogenizuje chemické složení součásti. Žihací teploty se proto volí velmi vysoké mezi 1050 až 1150°C. Na této teplotě se součást drží 8 až 24 hodin. Délka výdrže je určena hrubostí struktury materiálu součásti. Při dlouhodobém ohřevu součásti na vysokých teplotách dochází k oduhlčování a oxidaci součásti. To způsobuje zhrubnutí zrn austenitu a odstranění zhrubnuté struktury se využívá tváření za tepla nebo rekrytalizací. Graf závislosti teploty na čase lze pozorovat na obr. č. 11



Obrázek 11: Graf závislosti teploty na čase pro žihání homogenizační [10]

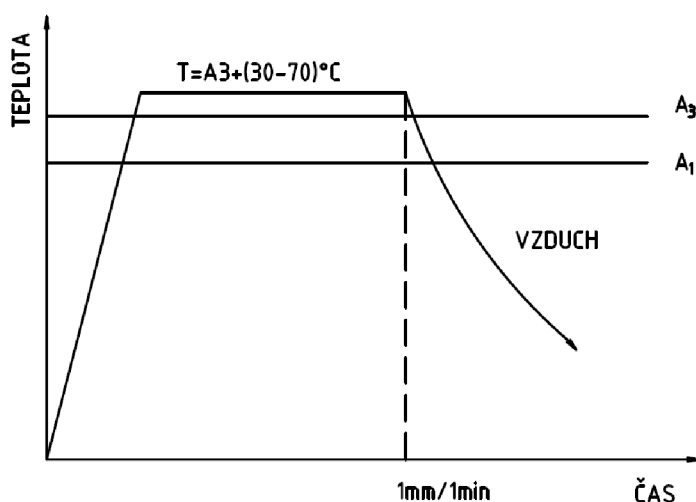
3.2.3. Žihání normalizační [4], [6]

Cílem tohoto typu žihání je zjemnit a homogenizovat zhrublou strukturu po předchozím homogenizačním žihání nebo předchozím výrobním procesu jako je například tváření. Proces normalizace se provádí hlavně pro výkovky, svařence a odlitky. Ukázkou vzniklé struktury vidíme na obr. 12



Obrázek 12: Feriticko-perlitická struktura v podeutektoidní oceli (světelná mikroskopie, zv. 100x), Widmannstattenova struktura v podeutektoidní oceli (světelná mikroskopie, zv. 100x)[1]

Na grafu č. 13 vidíme fáze při normalizačním žhání. Ohřev se provádí nad teplotami A3 konkrétně 30 až 50°C nad touto teplotou. Proces ochlazování probíhá na vzduchu v klidu nebo může probíhat řízeně v peci.



Obrázek 13: Graf závislosti teploty na čase pro žhání normalizační [10]

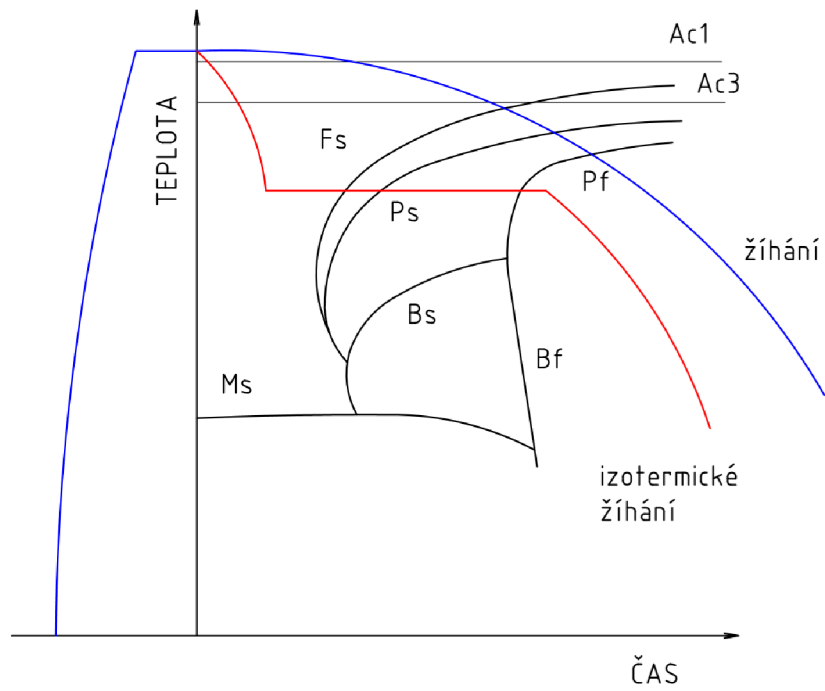
V tabulce číslo 3 jsou uvedeny příklady hodnot tvrdostí po normalizačním žhání. Jsou vybrány běžně používané oceli a hodnoty tvrdostí jsou orientačně převedeny na jednotku HV.

Tabulka 3: Hodnoty tvrdostí vybraných ocelí po žhání normalizačním [5]

Označení	Žhací teplota [°C]	Tvrdost [HV]	Příklady využití
11 500	860-890	170	konstrukční ocel
12 020	870-920	130	k cementování
14 220	850-880	130	k cementování
16 341	880-900	200	k zušlechťování
19 083	830-850	220	nástrovní ocel

3.2.4. Žhání izotermické [1], [4], [6]

Izotermické žhání je proces tepelného zpracování při kterém dochází k rychlému ochlazení součásti na teplotu izotermického rozpadu austenitu. Po austenitizaci oceli na teplotu 20 až 50 c nad teplotu Ac se součást ochladí na teplotu pod A1 a za konstantní teploty 600 až 700°C se austenit přemění na feriticko-cementickou strukturu, viz obr. 14 Teploty při tomto procesu dosahují hodnot 600 až 700°C kdy dochází v perlitické oblasti k rozpadu austenitu, dle teploty vzniká určitá charakteristická struktura. Ochlazování se provádí na vzduchu. Po procesu izotermického žhání má materiál součásti lepší obrobitelnost, která je zapříčiněna rovnoměrnější strukturou a další výhodou je zkrácená doba tepelného zpracování.



Obrázek 14: Graf závislosti teploty na čase pro žihání izotermické [10]

3.2.5. Žihání kombinované [1]

Jak už napovídá název této metody tepelného zpracování jde obvykle o kombinaci žihání normalizačního, které je hned poté doplněno žiháním bez překrytí např. žiháním na snížení vnitřního pnutí nebo žiháním na měkko.

4. KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ [1], [4], [6]

Kalení je způsob tepelného zpracování jehož cílem je zvýšení tvrdosti materiálu. Proces kalení ocelí spočívá v jejich ohřevu do oblastí teplot austenitu a prudkém ochlazení. Součást z podeutektoidních ocelí se v peci ohřeje na teplotu 30-50°C nad A_3 , součásti vyrobené z nauteutektoidních ocelí se ohřívají na teploty vyšší než je teplota A_c1 . Při kalení je dosahováno nerovnovážných struktur ocelí, buď zcela nebo jen částečně. Struktury vyskytující se v zakalené oceli jsou buď martenzitická nebo bainitická. Podle těchto dvou struktur se způsoby kalení rozdělují do dvou skupin. U první skupiny proběhne přeměna austenitu jako martenzitická a u druhé skupiny jako bainitická. Výsledná struktura vzniklá kalením je však velice křehká a proto je kalení obvykle doprovázeno popouštěním při kterém se odstraní křehká struktura a sníží velké vnitřní pnutí v kalené součásti.

4.1. Základní pojmy při kalení

4.1.1. Kalitelnost [1], [4], [6], [9], [11]

Kalitelné oceli jsou takové oceli, které jsou vhodné pro tepelné zpracování tím se myslí, že jsou schopny projít procesem postupného ochlazování určitou rychlostí z ohřevu nad teplotou austenitu.

4.1.2. Zakalitelnost [1], [4], [6], [9], [11]

Zjednodušeně můžeme zakalitelnost definovat jako schopnost získat u daného typu oceli ze kterého je součást vyrobena, co nejvyšší možnou tvrdost, kterou umožňuje její chemické složení. Naprosto zásadní roli zde hraje obsah uhlíku. Když je jeho obsah vyšší než 0,32 % lze o oceli tvrdit, že je dobře kalitelná. U součástí, které prošly ochlazováním nadkritickou rychlost, je možnost stanovit zakalitelnost. Zakalitelnost se řadí k materiálovým charakteristikám.

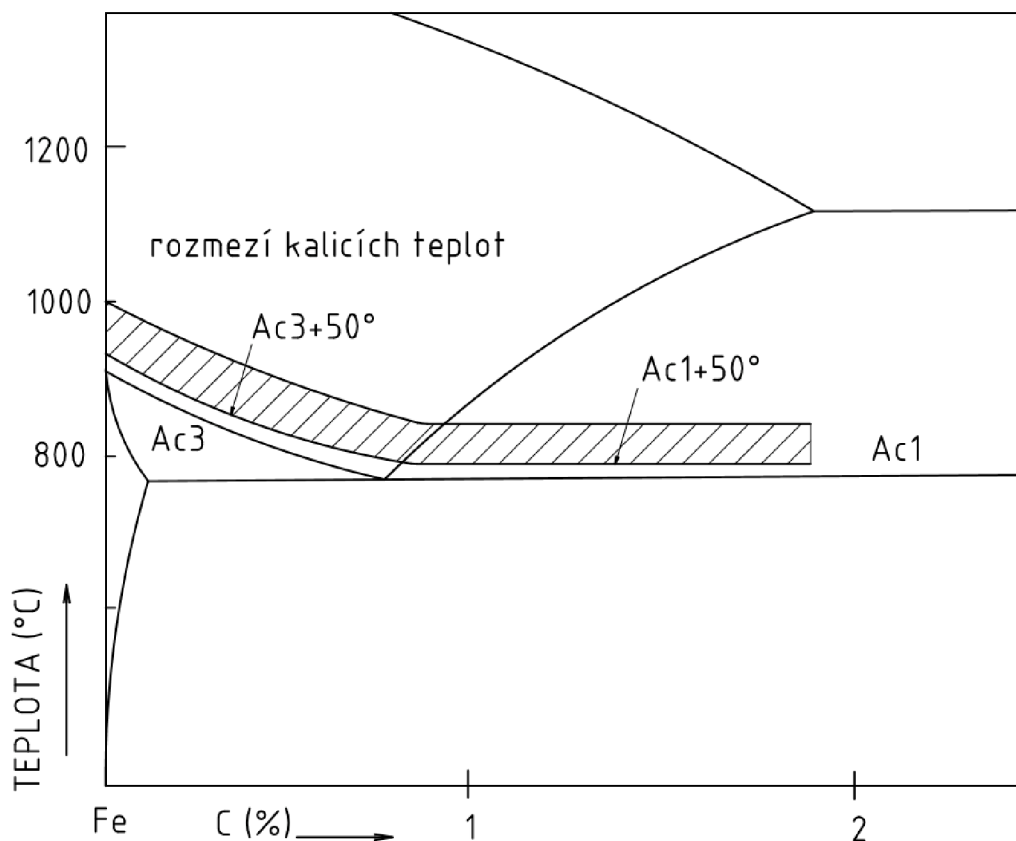
4.1.3. Prokalitelnost [1], [4], [6], [9], [11]

Prokalitelnost udává schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v uvažované hloubce pod ochlazovaným povrchem. Prokalitelnost roste s obsahem přísadových prvků rozpuštěných v austenitu v okamžiku kalení a velikosti zrna austenitu. Přímou hodnotu prokalitelnosti můžeme zjistit ze vztahu mezi kritickou rychlostí kalení v_k a skutečnou rychlostí ochlazování, která je u dané součásti.

4.1.4. Kalicí teplota [1], [4], [6], [9], [11]

Jak už bylo napsáno v úvodu kapitoly součásti vyrobené z podeutektoidních ocelí mají kalicí teploty 30-50°C nad teplotou A_3 , kdy zvolená teplota je taková zlatá střední cesta mezi homogenní strukturou austenitu a zachování jemného zrna. Součásti vyrobené

z ocelí nadeutektoidních se ohřívají na teploty vyšší než Ac_1 , při takto vysokých teplotách u tohoto typu ocelí nehrozí zhrubnutí struktury. Zhrubnutí struktury je nežádoucí jev z důvodu výskytu kalických mikrotrhlin, které v krajních případech mohou způsobovat lom materiálu (porušení součásti). Dalšími negativními vlivy zhrublé struktury jsou pokles houževnatosti a růst tranzitní teploty. Jako opatření proti těmto negativním vlivům se proto volí tzv. optimální kalicí teplota. Kalicí teploty jsou znázorněny na následujícím schématu, viz obr. 15

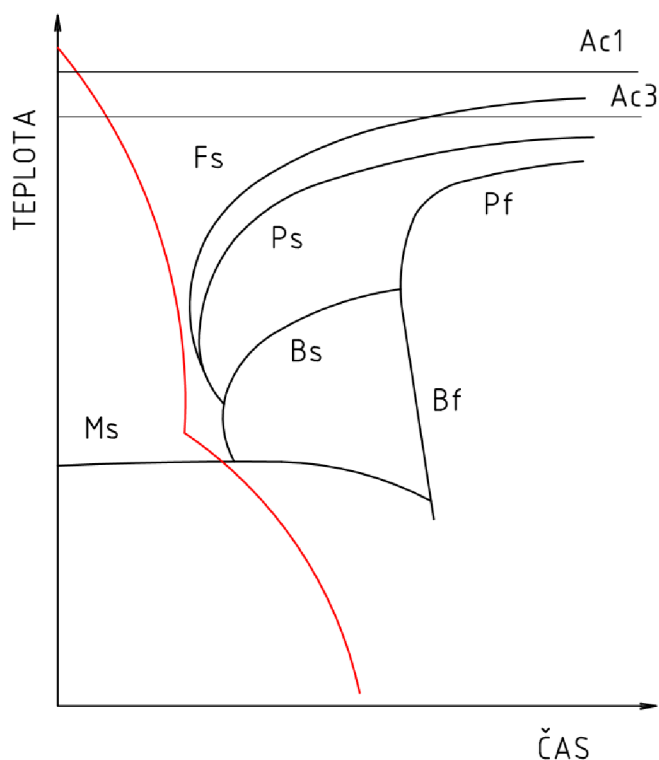


Obrázek 15: Rozmezí kalických teplot [10]

Proces ohřevu na kalicí teplotu probíhá v pecích. Ohřev v atmosférických pecích se neobejde bez určitých problémů jako je oxidace nebo oduhličení povrchu. Pro odstranění těchto nežádoucích jevů lze ohřev realizovat v lázních což mohou být taveniny různých kovů nebo solí. Jako kovové lázně bývají použity slitiny olova nebo cínu. Solné lázně jsou tvořeny dusičnany, chloridy a fluoridy draslíku, sodíku a baria.

4.1.5. Kalicí prostředí [1], [4], [6], [9], [11]

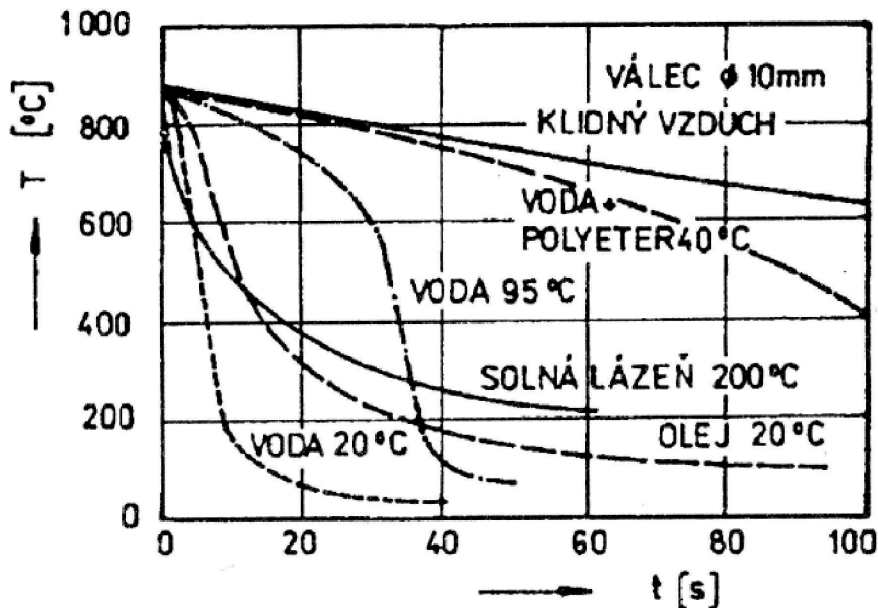
Jako optimální kalicí(ochlazovací) prostředí je voleno takové prostředí jenž umožní ochlazování objemů součásti rychlostí o něco větší, než je rychlost kritická. Při kritické rychlosti ochlazování nedochází k feritickoperlitické přeměně austenitu, ale k přeměně martenzitické. Kritická rychlost ochlazování klesá s obsahem uhlíku a se zvětšujícím se zrnem austenit. Ideální křivka ochlazování při kalení je znázorněna na, viz obr. 16



Obrázek 16: Ideální křivka ochlazování [10]

Z tvaru křivky je patrné, že při teplotách mezi teplotami 500 až 600°C má ochlazování největší rychlost a křivka je zde velmi strmá. Změna nastává při teplotách okolo 300°C, kdy je rychlost ochlazování v porovnání s předchozí znatelně menší a křivka je méně strmá. Velká rychlost při ochlazování se spojena s výskytem vnitřního pnutí. Při volbě kalicího média se při volbě nejvíce hodnotí především jeho tepelná vodivost, měrné teplo a viskozita. Problém nastává u odpařování kalicího prostředí. Při odpařování vody a oleje vzniká tzv. parní polštář, který je možno eliminovat pomocí pohybu kalicího prostředí nebo pomocí pohybu součástí. Účinnost nejpoužívanějších kalicích prostředí je znázorněna v grafu na obr.17

Prostředí se volí podle intenzity ochlazování. V dnešní době, kdy se v provozu hodnotí i ekologie se z ní stal jeden z významných faktorů volby. Jedním z nejlevnějších chladících prostředí je voda. Voda je levná, intenzivně působící, nehořlavá a běžně dostupná kapalina. Voda dosahuje vysokých ochlazovacích účinností v oblasti nosu ARA diagramu. Vysoká rychlost ochlazování nastává během martenzitické přeměny při které se, ale zvyšuje koncentrace vnitřních pnutí uvnitř součástí. Ve vodě lze kalit předměty i z uhlíkových ocelí. V důsledku nadměrného ohřívání vodní lázně, ztrácí voda svoji ochlazovací účinky v perlitické oblasti. Existuje široká škála řešení, jak zamezit nadbytečnému ohřevu vody. Účinnost vody jako ochlazovacího prostředí se zvyšuje pomocí cirkulace vody i součástí. Dále se hojně využívají přísady do vody samotné jako například soli (NaCl, NaNO₃) nebo kyseliny (H₂SO₄). Další možnost je využít ve vodě rozpustných polymerů. Polymeru rozpuštěné ve vodě zpomalují nerovnoměrné a rychlé ochlazování součástí. Jinak by mohlo dojít k trhlinám, různým defektům nebo k místům, která by i po procesu kalení zůstala měkká. Konkrétně jsou to polymery jmenovitě polyalkylenglykol, polyakrylát atd. Po při-



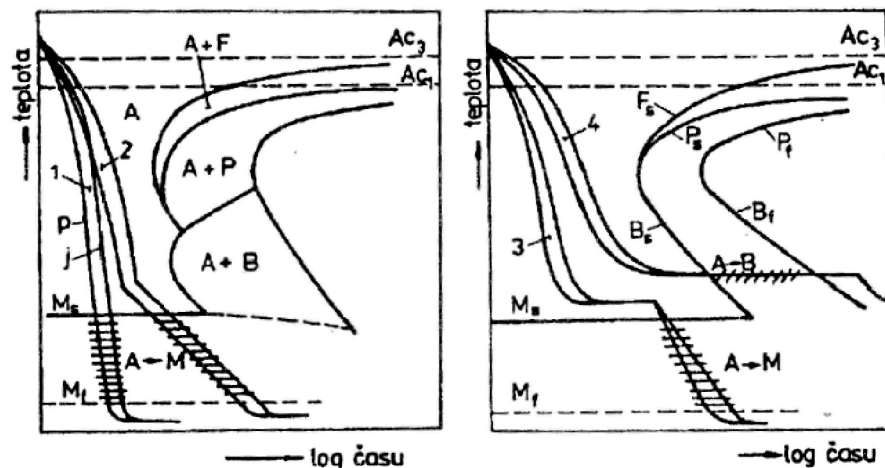
Obrázek 17: Ochlazovací křivky středu válce o průměru 10 mm v konkrétních prostředích [1]

dání polymerů do vody se lázeň musí udržovat v čistotě.

Druhým nejvíce používaným kalicím prostředím je olej. Jak je uváděno v knize Nauky o materiálu II. „oleje mají ve srovnání s vodou 3 až 4 krát menší rychlost ochlazování v oblasti perlitické a téměř 10 krát menší v oblasti martenzitické”. Kalení do oleje má tu výhodu, že narozdíl od vody se jeho účinnost se nemění s teplotou. Dalším rozdílem oproti vodě jsou malá vnitřní pnutí. Negativa použití oleje jako ochlazovacího prostředí jsou možnosti vznícení olejové lázně a větší finanční náročnost při ekologickém likvidování olejové lázně. Nejčastěji se v provozech využívají oleje minerální s nějakou aditivní složkou, méně často se využívají polyalkylenglykolové oleje. Ty jsou využívány pro menší zátěž na životní prostředí a ochranu zdraví pracovníků. Kalení na vzduchu se využívá u pecí komorových, kdy je vsázka tvořena samokalitelnou ocelí. Účinnost kalení na vzduchu lze zvýšit pomocí vodní mlhy.

4.2. Metody kalení [1], [4], [6], [9], [11]

V praxi existuje mnoho různých metod kalení. Metody se volí podle požadovaných vlastností zpracovávaných součástí. Záleží na mnoha faktorech jako jsou například velikost a tvar součásti nebo chemické složení materiálu. Dle strukturních složek v oceli, dělíme metody kalení na kalení martenzitické nebo kalení bainitické. Na následujících dvou schématech ARA diagramů vidíme způsoby kalení, obr. 18



Obrázek 18: Schématické znázornění kalení, a) do studené lázně- 1, lomené- 2, b) termální-3, izotermické zušlechťování-4[křivka ochlazování povrchu (p) součásti a jádra (j)] [1]

4.2.1. Martenzitické kalení [1], [4], [6], [9], [11]

Při martenzitickém kalení je převažující strukturou struktura martenzitické s zbytkovou strukturou austenitu.

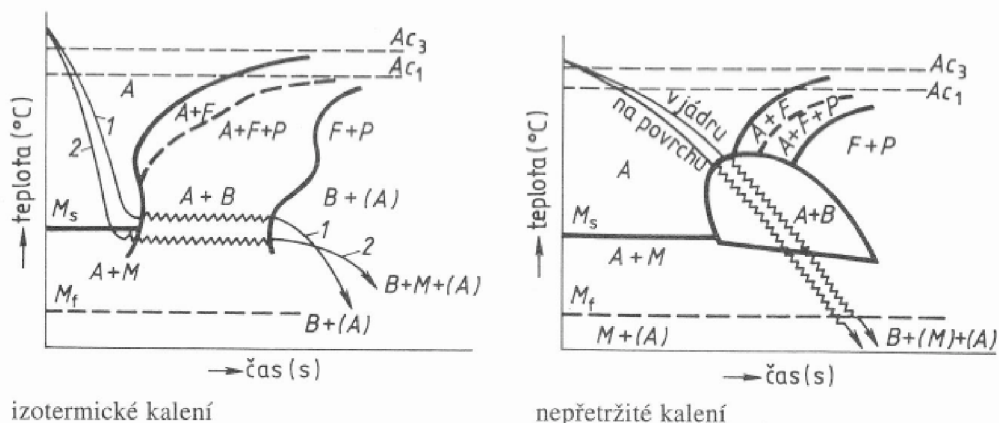
Při martenzitickém kalení je převažující získanou strukturou struktura martenzitické se zbytkovou strukturou austenitu. Nejjednodušší a nejčastěji používané kalení je kalení *martenzitické do studené lázně*. Studenou lázní jsou myšleny média jako olej, voda nebo vzduch, které jsou v pokojové teplotě. Martenzitické kalení do studené lázně má mnoho výhod a nevýhod. Mezi výhody řadíme například technologickou nenáročnost a nízké pořizovací náklady na kalicí prostředí. Mezi výraznou nevýhodou patří vysoká úroveň vnitřních pnutí, která je spojena s deformací kalených předmětů.

Přerušované(lomené) kalení spočívá ve využívání kombinací dvou kalicích prostředí. Ze schématu na obr. č. 18 lze vyčíst, že ochlazování probíhá velmi rychle a u teploty M_s přechází křivka na mírnější rychlost. K tomu došlo změnou prostředí. Během první fáze se z hlediska strukturního zabránilo vzniku perlitu a ve fázi druhé proběhla přeměna na martenzit. Výhoda oproti kalení do studené lázně je, že se docílí menší úrovně vnitřních pnutí. Lomené kalení se využívá zejména u zápusťek či jiných tvarově složitých součástí.

Během *termálního kalení* jsou součásti kaleny v lázních ohřátých na určitou teplotu. Teplota pro každou ocel se liší, ale pokaždé se jedná o teplotu těsně pod teplotou M_s . Výhodou je, že prodleva v takovéto lázni způsobí vyrovnání rozdílů teplot mezi jádrem a povrchem součásti, tím pádem se výrazně sníží riziko vzniku vnitřního pnutí. Využívá se u finálně upravených vyrobených součástí z legovaných ocelí.

4.2.2. Bainitické kalení [1], [4], [6], [9], [11]

Při bainitickém kalení se na rozdíl od kalení martenzitického kalení součásti nepouštějí. Výjimkou jsou součásti nepřetržitě kalené. Metody bainitického kalení jsou znázorněny na obr. 19



Obrázek 19: Schéma průběhu bainitického kalení (1 – izotermické zušlechťování, 2 – izotermické kalení)[4]

Bainitickým způsobem kalení je *zušlechťování izotermické*. Můžeme pozorovat několik společných vlastností s kalením termálním. Při obou metodách se součást ochlazuje velmi rychle v tzv. termální lázni, která je tvořena roztavenými slitinami kovů nebo roztavenou solí. Teploty lázni se pohybují mezi 300 až 400°C. Dochází k naprosto minimálním vnitřním pnutím, takže není potřeba využívat dalších postupů jako je popouštění. Izotermicky zušlechťovány jsou oceli s nízkým obsahem uhlíku.

Vylepšením přechází metody izotermického zušlechťování je *kalení izotermické*. Ze strukturního hlediska je takto kalená součást tvořena strukturami martenzitu, bainitu a austenitu. Takovéto struktury lze dosáhnout nepřetržitým bainitickým kalením při plynulém ochlazování. Využívá se při kalení nízkolegovaných vysokopevných ocelí.

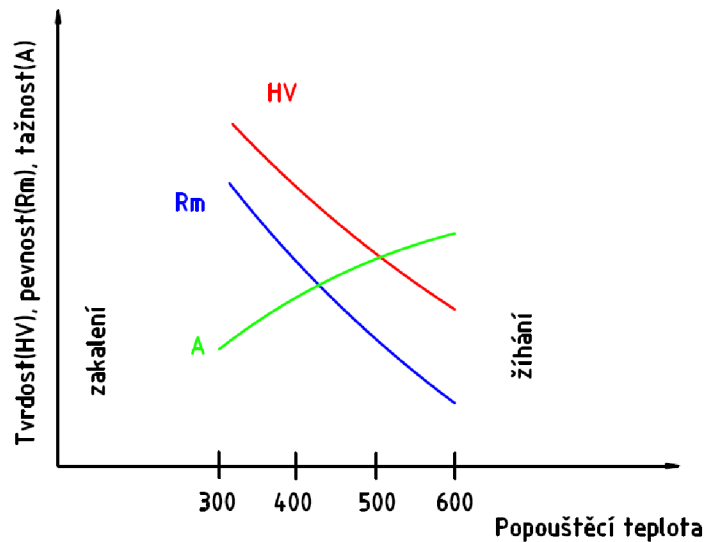
4.3. Popouštění [1], [4], [6], [9]

Většina součástí po kalení je příliš tvrdá a zároveň křehká. Proto se jako doplňující operace využívá popouštění. Cílem popouštění je odstranění nebo dostatečné zmenšení vnitřních pnutí, která vznikla při kalení. Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak vnitřní pnutí mají za následek lomy v součásti. Popouštěním lze upravit i jiné mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí viz obr. 20

Ihned po zakalení součásti je součást popouštěna. Při ohřevu součásti dochází ke změnám ve strukturách nerovnovážných fází. Těmito fázemi jsou martenzit a austenit. Při popouštění dochází k fázové precipitační přeměně tetragonálního martenzitu na martenzit kubický.

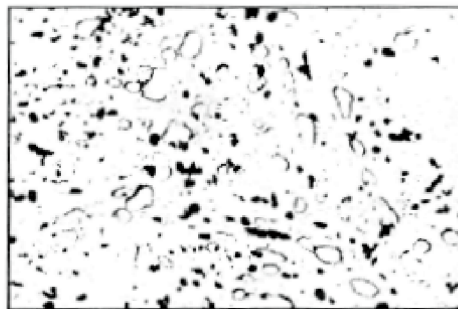
Fázové přeměny během procesu popouštění obvykle dělíme na čtyři stádia.

- První stádium popouštění probíhá za teplot do 200°C. V prvním stádiu se tetragonální martenzit (přesycený tuhý roztok) rozpadá na jinou strukturu. Ty struktury jsou dvě. Jednou z nich je nerovnovážný karbid a druhou strukturou je kubický martenzit. Během prvního stádia mírně klesá úroveň vnitřního pnutí



Obrázek 20: Vliv popouštění na mechanické vlastnosti [10]

- Druhé stádium popouštění probíhá za teplot mezi 200-300°C. Během tohoto stádia se zbytkový austenit rozpadá na bainitickou strukturu. Při druhém stádiu dochází k zvětšení měrného objemu oceli.
- Třetí stádium probíhá za teplot nad 300°C spočívá ve vzniku rovnovážné, tuhé struktury feritu. Při této fázi vzniká současně také cementit. Tyčinkové tvary v cementitu se zvětšováním teploty rozpouštějí a mění se na zrnka. Nízkouhlíkový martenzit se vlivem snižování obsahu uhlíku mění na ferit. Vzniká feriticko-perlitická struktura, která se nazývá sorbit. Ukázkou sorbitické struktury lze vidět na obr. č. 21



Obrázek 21: Sorbitická struktura v oceli 13 240 (kaleno a popouštěno 680°C/2h., zvětšeno 5000x)[1]

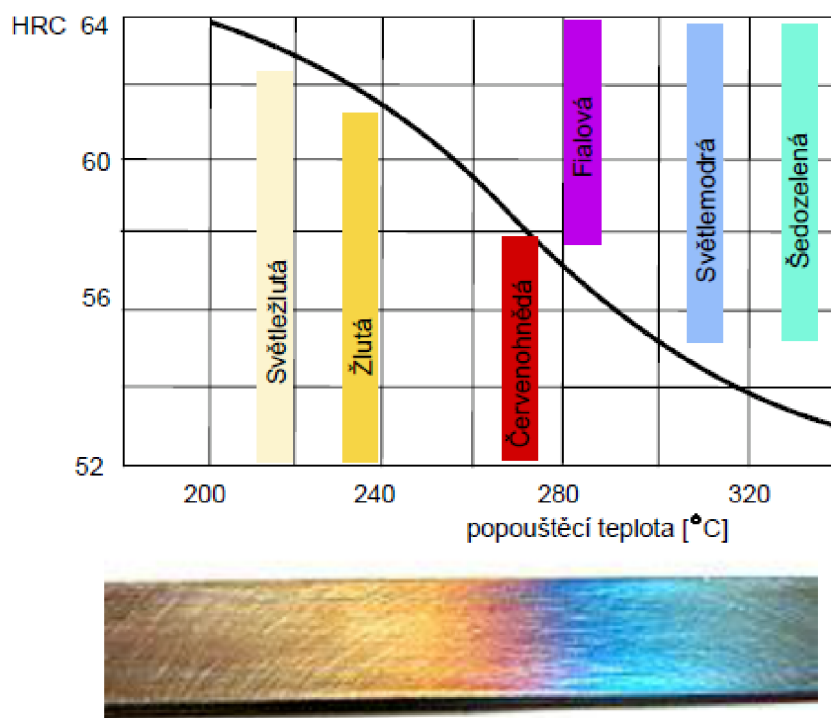
Ve třetí fázi se podstatně mění mechanické vlastnosti materiálu. Zvyšuje se hodnota houževnatosti a zmenšuje se tvrdost.

- Čtvrté stádium probíhá za teplot nad 500°C. Během posledního stádia probíhá zhrubnutí částit vyloučeného cementitu. Zhrubnutím při těchto teplotách vzniká struktura zrnitého perlitu. Ve čtvrtém stádiu dochází u nízkolegovaných ocelí k obohacování zrn cementitu karbidotvornými prvky. V poslední fázi popouštění klesá tvrdost materiálu a jeho plasticita s houževnatostí se zvyšují. Hodnoty tvrdostí u vybraných ocelí v tabulce č. 4

Tabulka 4: Hodnoty tvrdosti po popouštění u různých ocelí[5]

Označení	Popouštěcí teplota [°C]	Tvrdość [HRC]
11 500	560-670	173-203
12 020	530-670	160-203
14 220	150-170	min. 52
16 341	260-400	min. 60
19 422	150-250	min.62

Při pouštění dochází ke změně barvy popouštěné oceli. Pro zajímavost na obr. 22, změna barvy popouštěné oceli.



Obrázek 22: Vliv popouštění na mechanické vlastnosti [10]

5. EXPERIMENT

S cílem ověření vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli, byl navržen a realizován experiment. Experimentálně byl prověřen vliv rekrystalizačního žíhání na mechanické vlastnosti dvou typů ocelí. Experiment spočíval v plastické deformaci vzorků ocelí, přičemž bylo zvoleno různé velikosti deformace. Poté byla změřena tvrdost vzorků a následně se vzorky tepelně zpracovaly v elektrické komorové peci. Na tepelně zpracovaných vzorcích byla opět změřena tvrdost a výsledky měření tvrdostí tepelně neupravených a upravených vzorků porovnány.

5.1. Příprava experimentu [12]

Pro experiment byla vybrána ocel třídy 11. značení podle norem ČSN 11 500. Dle evropských norem se ocel značí E295 Chemické složení a mechanické vlastnosti ocelí jsou shrnuty v tab. 5 a 6

Tabulka 5: Chemické složení oceli 11 500/E295[12]

C	Mn	Si	P	S	N	Al
max 0,38	-	-	max 0,045	max 0,045	max 0,009	-

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti oceli 11 500/E295[12]

Mechanické vlastnosti před T.Z.	-
Pevnost v tahu Rm [MPa]	470 - 610
Mez kluzu Re [MPa]	275

U ocele 11 500/E295 byla pro přípravu polotovaru použita tažená kruhová tyč o průměru 20mm, která byla na soustružnickém automatu nařezána na válečky o délce 30mm.

Pro realizaci experimentu bylo využito experimentální zařízení UST – odboru technologie tváření kovů a plastů. Pro plastickou deformaci vzorků byl využit hydraulický lis CZR 500, foto lisu je na obr. 23 tepelné zpracování se uskutečnilo v elektrické komorové peci, viz foto na obr. 24. Pro přípravu vzorků byla využita metalografická bruska, viz foto na obr. 25 Měření tvrdosti se uskutečnilo na tvrdoměru Zwick 3212, viz foto na obr. 26



Obrázek 23: Lis CZR 500

5.2. Provedení experimentu [13], [14], [15], [16]

Prvním krokem experimentální práce bylo vytvoření deformačně zpevněné struktury u dvou vzorků. Pro získání deformované struktury bylo použito volné pěchování mezi rovnoběžnými plochami pěchovacích desek na výše uvedeném tvářecím stroji, tj. lise CZR 500. Velikost deformace byla zvolena 20% a 60% . Takže váleček z oceli 11 500/E295 byl



Obrázek 24: Pec komorová



Obrázek 25: Metalografická bruska



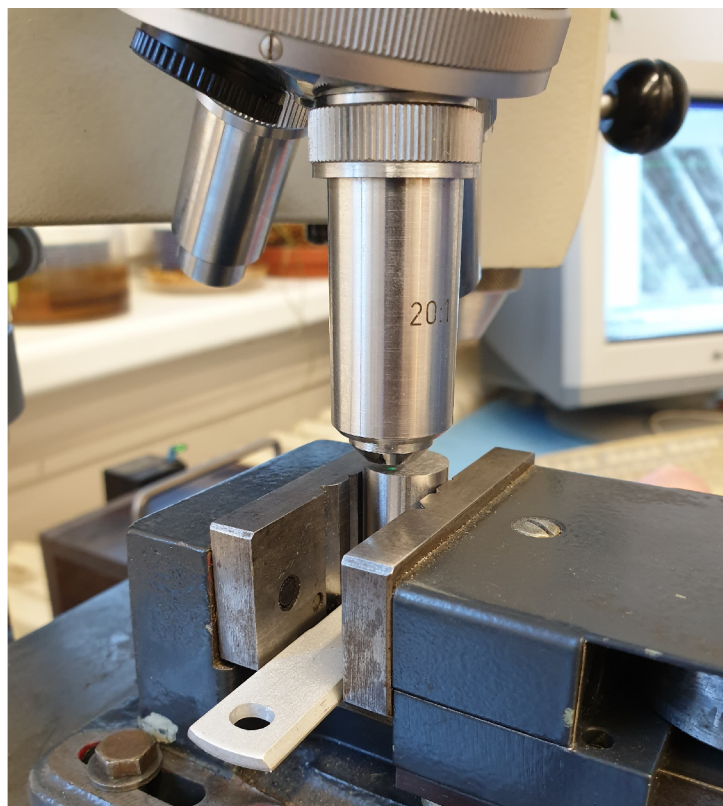
Obrázek 26: Tvrdoměr Zwick 3212

v prvním případě napěchován na výšku 24 mm, pro deformaci 80% pak na výšku 12 mm. Nedeformované a deformované vzorky z oceli z mat. 11 500/E295 jsou na obr. 27.



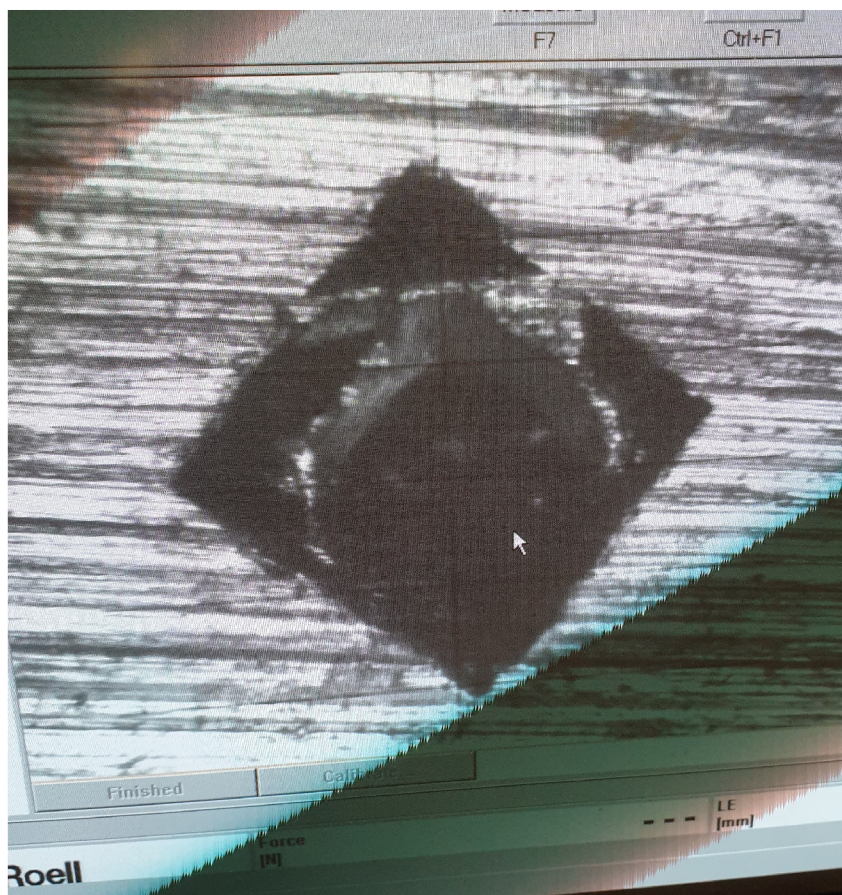
Obrázek 27: Nedeformované a deformované vzorky

Po přípravě všech čtyř vzorků bylo provedeno prvotní měření tvrdosti. Před vlastním měřením tvrdosti byly na metalografické brusce připraveny kvalitní plochy pro měření. Zkouška tvrdosti byla realizována pomocí metody Vickers. V našem případě bylo zatížení vyvozeno pomocí závaží o váze pěti kilogramů. Tato metoda je založena na vtlačení diamantového indentoru do tělesa. U této metody je indentor ve formě čtyřbokého pravidelného jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Výsledná tvrdost se měří po odlehčení, kdy se vypočítá aritmetický průměr úhlopříček vtisku. Na následující fotografii obr. č. 28 lze vidět detail měření vtisku.



Obrázek 28: Detail měření vtisku

Jedná se o přístroj firmy Zwick 3212. Tento tvrdoměr byl modernizován pomocí tří objektivů, které přenáší obraz do počítače. V počítači se následný vtisk ohraničí a počítat vypočítá následnou tvrdost. Na každém vzorku byly provedeny tři vtisky. Jeden vtisk byl na středu součást a poté dva vtisky na okrajích vzorku. Změřené tvrdosti byly zapsány do tabulky č. 7. Dále na další fotografii lze vidět ukázkou vtisku, obr. č. 29



Obrázek 29: Ukázka vtisku

Tabulka 7: Naměřená tvrdost před rekystalizačním žháním [13]

Číslo měření	Číslo vzorku / pozn.	Zatížení	Naměřená tvrdost [HV]	Pevnost v tahu [MPa]
1.	1., mat. 11 500/nedef	HV5	117	370
2.		HV5	1119	385
3.		HV5	120	385
4.	2., mat 11 500/nedef.	HV5	119	385
5.		HV5	116	370
6.		HV5	121	385
7.	3.,mat. 11 500/def.20%	HV5	124	400
8.		HV5	125	400
9.		HV5	127	400
10.	4., mat 11 500/def.60%	HV5	142	450
11.		HV5	135	430
12.		HV5	136	430

Následně proběhlo tepelné zpracování v komorové peci. Tento typ pecí je využíván spíše na kusovou výrobu. Vzhled takovéto pece je na obrázku č. 23. Pro sériovou výrobu se používají průběžné pece. Pec byla přehřívána na teplotu 500°C. Vložená vsázka byla na této teplotě držena cca. 30 minut a poté vyjmuta a ochlazená na vzduchu. Po vychladnutí byly vzorky připravovány na další měření tvrdosti. Na každém vzorku se opět na metalografické brusce vyleštilo čelo. Poté byl každý vzorek změřen na tvrdoměru za stejných podmínek jako před tepelnou úpravou. Naměřené tvrdosti jsou shrnuty v tab. 8

Tabulka 8: Naměřená tvrdost po rekrytalizačním žíhání[13]

Číslo měření	Číslo vzorku / pozn.	Zatížení	Naměřená tvrdost [HV]	Pevnost v tahu [MPa]
1.	1., mat. 11 500/nedef	HV5	103	335
2.		HV5	103	335
3.		HV5	108	350
4.	2., mat 11 500/nedef.	HV5	108	350
5.		HV5	108	350
6.		HV5	106	335
7.	3.,mat. 11 500/def.20%	HV5	116	370
8.		HV5	110	350
9.		HV5	113	370
10.	4., mat 11 500/def.60%	HV5	96	305
11.		HV5	128	415
12.		HV5	112	350

5.3. Vyhodnocení experimentu

Z porovnání tvrdostí ocelí naměřených před a po rekrytalizačním žíhání je zřejmý výrazný vliv použitého tepelného zpracování na mechanické vlastnosti tohoto typu oceli.

- Naměřená tvrdost materiálu ve výchozím stavu se pohybuje od 116 do 121 HV-5. Po tepelném zpracování byly naměřeny tvrdosti v intervalu 103 až 108 HV-5. Z poklesu pevnosti výchozího materiálu při rekrytalizačním žíhání lze usuzovat, že výchozí materiál, kterým byla tažená tyč, nebyl po tažení tepelně upravován. Při námi provedeném rekrytalizačním žíhání poklesla jeho pevnost o 9,5%
- U oceli deformované pýchováním o 20 % došlo při tepelném zpracování k poklesu tvrdosti z 125 na 113 HV-5 , což odpovídá poklesu pevnosti z 400 MPa na hodnotu 365 MPa. Z naměřených hodnot je patrné, že čas rekrytalizace, tj. 30 min nebyl dostatečný k tomu, aby mechanické hodnoty oceli poklesly až na úroveň pýchováním nezpevnovaného materiálu
- U oceli deformované pýchováním o 60 % došlo při tepelném zpracování k poklesu tvrdosti z 138 na 112, což odpovídá poklesu pevnosti z 440 na 360 MPa. Po tepelném zpracování jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými vtisky. Ty mohou být zapříčiněny chybou měření nebo vměstkem ve vzorku.

6. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala tepelným zpracováním tvářených součástí. V rešeršní části jsem se věnoval základním pojům v oblasti tváření, vlivům různých faktorů na tvařitelnost. Popsány byly vlivy plastické deformace, chemického složení, strukturního stavu a termomechanické podmínky deformace. Následně bylo shrnuto celkově tepelné zpracování. Jaký je jeho princip a za jakým účelem jej provádíme. Jsou zde vysvětleny základní pojmy. V následujících kapitolách rešeršní práce byly vysvětleny základní metody tepelného zpracování jako jsou žíhání a kalení s popouštěním. Každá z těchto metod má svoji vlastní kapitolu, kde se probírají nejčastější způsoby žíhání nebo kalení. Způsoby jsou doplněny o grafy závislostí teplota-čas popřípadě o ukázky vznikajících struktur.

Experimentální část bakalářské práce byla zaměřena na vliv plastické deformace na mechanické vlastnosti před a po tepelném zpracování. Byly vytvořeny čtyři vzorky ve formě válečků z nelegované oceli s označením ČSN 11 500. Jako polotovar byla použita tažená kruhová tyč o průměru 20mm. Na soustružnickém automatu byla tyč nařezána na válečky o délce 30mm. Dva z těchto vzorků byly ponechány nedeformované a dva z nich byly plasticky deformovány. Následně byla změřena tvrdost materiálu. Celkem bylo provedeno dvanáct měření podle metody Vickers, kdy je do měřeného tělesa vpraven diamantový indentor. Poté proběhlo tepelné zpracování ve formě rekrytalizačního žíhání při teplotě 500°C v elektrické peci. Po tepelném zpracování byla vhodně upravena čelní plocha vzorků na metalografické brusce. Nakonec proběhlo opět měření tvrdosti. Celý experiment byl fotograficky dokumentován a fotografie doplňují text. Z naměřených hodnot tvrdosti je patrné snížení tvrdosti u našich vzorků. Dále lze pozorovat vliv plastické deformace na tvrdost žíhané součásti. Tyto poznatky jsou v souladu s fakty uvedenými v rešeršní části práce.

SEZNAM POUŽÍTÝCH ZDROJŮ [17]

- [1] PTÁČEK, Luděk *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [2] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] LIDMILA, Zdeněk *Teorie a technologie tváření I. 1.*, vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.
- [4] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování.. 3.*, přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-7183-265-0.
- [5] MORÁVEK, Otakar a Vladislav BABOROVSKÝ. *Základy tepelného zpracování oceli: Učební text pro 1.-3. roč. odb. učilišť a učňovských škol, [obor] technologie kaliče. 3.* upr. vyd. Praha: SNTL, 1969, 239 s.
- [6] KRAUS, Václav *Tepelné zpracování a slinování.. 3.* vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. : obr., tabulky, schémata, grafy. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [7] LIDMILA, Zdeněk *Teorie a technologie tváření II. 1.*, vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-580-2.
- [8] KORECKÝ, Jan. *Tepelné zpracování kovů.* Vyd. 2.upr. Praha: SNTL, 1965, 88 s.
- [9] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989, 549 stran : ilustrace ; 25 cm.
- [10] LIDMILA, Zdeněk. *Podklady pro výuku předmětu ETR*. Brno, 2019.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2. 1. díl, Polotovary a jejich technologičnost.. 2.*, upr. vyd. Praha: Scientia, 2001, 316 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-7183-244-8.
- [12] *Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 11 500/E295 Feron* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11500.pdf>
- [13] Český normalizační institut *ČSN EN ISO 18265 Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti (ISO 18265:2003)*. 2014
- [14] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení..* V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [15] ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [16] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 1993, 84 s. : il. ISBN 80-01-01002-3.
- [17] *Citace PRO* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

Seznam obrázků

1	Rozdělení ocelí [1]	11
2	Základní typy krystalických mřížek a-železo alfa , b-železo gama , c-hořčík nebo zinek [3]	13
3	Vliv teploty na přirozený přetvárný odpor oceli s obsahem 0,15% C [3]	15
4	Obecný diagram tepelného zpracování [6]	16
5	Schéma znázornění vlivu způsobu ohřevu na vznik teplotních rozdílů v ohřívaných výrobcích [6]	18
6	Teplotní závislost rychlosti ochlazování pro ochlazovací prostředí [1]	19
7	Znázornění oblasti žhacích teplot v Fe-Fe ₃ C (a-ke snížení pnutí, b- rekrystalizační, c- na měkko, d- homogenizační, e- normalizační [1]	20
8	Graf závislosti teploty na čase pro žhání na snížení vnitřního pnutí [10]	20
9	Graf závislosti teploty na čase pro žhání na měkko [10]	21
10	Zrnitý perlit v nadeutektoidní uhlíkové oceli po žhání na měkko (světelná mikroskopie, zvětšeno 800x) [1]	22
11	Graf závislosti teploty na čase pro žhání homogenizační [10]	23
12	Feriticko-perlitická struktura v podeutektoidní oceli (světelná mikroskopie, zv. 100x), Widmannstattenova struktura v podeutektoidní oceli (světelná mikroskopie, zv. 100x)[1]	23
13	Graf závislosti teploty na čase pro žhání normalizační [10]	24
14	Graf závislosti teploty na čase pro žhání izotermické [10]	25
15	Rozmezí kalicích teplot [10]	27
16	Ideální křivka ochlazování [10]	28
17	Ochlazovací křivky středu válce o průměru 10 mm v konkrétních prostředích [1]	29
18	Schématické znázornění kalení, a) do studené lázně- 1, lomené- 2, b) termální-3, izotermické zušlechťování-4[křivka ochlazování povrchu (p) součásti a jádra (j)] [1]	30
19	Schéma průběhu bainitického kalení (1 – izotermické zušlechťování, 2 – izotermické kalení)[4]	31
20	Vliv popouštění na mechanické vlastnosti [10]	32
21	Sorbitická struktura v oceli 13 240 (kaleno a popouštěno 680°C/2h., zvětšeno 5000x)[1]	32
22	Vliv popouštění na mechanické vlastnosti [10]	33
23	Lis CZR 500	35
24	Pec komorová	36
25	Metalografická bruska	36
26	Tvrdoměr Zwick 3212	37
27	Nedeformované a deformované vzorky	38

28	Detail měření vtisku	38
29	Ukázka vtisku	39

Seznam tabulek

1	Mezní obsah legujících prvků [1]	13
2	Hodnoty tvrdostí vybraných ocelí po žíhání na měkko [5]	21
3	Hodnoty tvrdostí vybraných ocelí po žíhání normalizačním [5]	24
4	Hodnoty tvrdosti po popouštění u různých ocelí[5]	33
5	Chemické složení oceli 11 500/E295[12]	34
6	Mechanické vlastnosti oceli 11 500/E295[12]	34
7	Naměřená tvrdost před rekrytalizačním žíháním [13]	39
8	Naměřená tvrdost po rekrytalizačním žíhání[13]	40