

Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta
Ústav techniky a automobilové dopravy



Korozní degradace kovových materiálů

Diplomová práce

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Votava, Ph.D.

Vypracoval:

Luboš Kerber

Brno 2016

STRANA PRO ZADÁNÍ

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: *Korozní degradace kovových materiálů* vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis diplomanta

PODĚKOVÁNÍ

Tím – to bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Votavovi, Ph.D za odborné vedení diplomové práce, technické rady a podnětné připomínky ohledně dané problematiky. Dále bych chtěl poděkovat panu Jiřímu Pokornému, který zajistil výrobu zkušebních vzorků, správné provedení destruktivních zkoušek a veškerou odbornou pomoc, především při analyzování laboratorních měření u zkoušených vzorků.

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o degradaci kovových materiálů v solné mlze. V práci je zaměřeno na materiál 42CrMo4. Z této ocele jsou vyhotoveny zkušební vzorky pro laboratorní měření. V první části diplomové práce je teoreticky a rešeršně popsána tepelné zpracování, oxidace, mechanické a dynamické zkoušky materiálu, které budou prováděny na laboratorních strojích. Druhá část diplomové práce je zaměřena na opracování materiálu na daný požadovaný rozměr. Dále se diplomová práce zabývá označováním a tepelným zpracováním připravených vzorků a následným vkládáním do připravené solné komory. V poslední třetí části diplomové práce je zpracována analýza získaných výsledků, které byly získány na připravených vzorcích pomocí laboratorního zkoušení, kterými byly dynamické a mechanické zkoušky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ocel 15 142, tepelné zpracování, koroze materiálu, solná mlha, mechanické zkoušky materiálu

ABSTRACT

The thesis discusses the degradation of metallic materials in the salt spray. The work is focused on material 42CrMo4. From this steel are prepared test specimens for laboratory measurements. In the first part of the thesis is a theoretical and research described heat treatment, oxidation, mechanical and dynamic material testing, to be carried out on laboratory machines. The second part of the thesis is focused on processing the material to the required dimensions. Furthermore, the thesis deals with marking and heat treatment of the prepared sample and subsequent insertion into the prepared salt chamber. In the third part of the thesis is an analysis of the results that were obtained for samples prepared using laboratory testing, which were dynamic and mechanical tests.

KEY WORDS

Steel, heat treatment, material corrosion, salt spray, mechanical testing of materials

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	CÍL PRÁCE	10
3	KOROZE	11
3.1	Druhy koroze	13
3.1.1	Rozdělení podle korozního prostředí	13
3.1.1.1	Atmosferická koroze	13
3.1.1.2	Koroze v kapalinách	14
3.1.1.3	Koroze v půdě	14
3.1.2	Rozdělení podle vnitřního mechanismu	14
3.1.2.1	Chemická koroze	14
3.1.2.2	Elektrochemická koroze	15
3.1.3	Rozdělení podle korozního napadení	15
3.1.3.1	Rovnoměrná koroze	15
3.1.3.2	Nerovnoměrná koroze	16
3.1.3.2.1	Jamková, bodová koroze	16
3.1.3.2.2	Extrakční koroze	16
3.1.3.2.3	Štěrbínová koroze	17
3.1.3.2.4	Podpovrchová koroze	17
3.1.3.2.1	Selektivní koroze	17
3.1.3.2.2	Mezi – krystalická koroze	17
3.1.3.2.3	Trans – krystalická koroze	17
4	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU	18
4.1	Ocel	18
4.1.1	Ocel 15 142	20
4.2	Rovnovážný diagram	20

4.2.1	Soustava stabilní – Fe – C	20
4.2.2	Soustava metastabilní – Fe – Fe ₃ C	21
5	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	23
5.1	Žíhání	24
5.1.1	Normalizační žíhání	25
5.1.2	Žíhání na měkko	25
5.2	Kalení	26
5.3	Popouštění	27
6	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	28
6.1	Mechanické vlastnosti	28
6.2	Statické zkoušky krátkodobé	28
6.2.1	Zkouška tahem	28
6.2.1.1	Trhací stroj	29
6.2.1.2	Zkušební tyče	29
6.2.1.2.1	Měřená délka zkušební tyče	30
6.2.1.2.1.1	Poměrové zkušební tyče	30
6.2.1.3	Pracovní diagram	31
6.3	Dynamické zkoušky	36
6.3.1	Rázové zkoušky	36
6.3.2	Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy	36
7	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
7.1	Zkoušený materiál	38
7.2	Příprava vzorků	39
7.2.1	Značení jednotlivých zkušebních vzorků	40
7.2.1.1	Značení zkušebních vzorků – vrubová zkouška	40
7.2.1.2	Značení zkušebních vzorků – tahová zkouška	41
7.3	Tepelné zpracování připravených zkušebních těles	41

7.3.1	Etalon – 1	42
7.3.2	Kalení a následné popouštění – 2.....	43
7.3.3	Normalizační žíhání – 3	43
7.3.4	Žíhání na měkko – 4.....	44
7.4	Hodnocení fázových struktur testovaného materiálu	45
7.4.1	Snímky tepelně ovlivněných struktur.....	45
7.5	Korozní degradace v solné mlze.....	48
7.5.1	Úbytek hmotnosti materiálu	48
7.6	Destruktivní zkoušky.....	51
7.6.1	Zkouška tahová	51
7.6.1.1	Tahové zkoušky materiálu.....	52
7.6.1.1.1	Výsledky tahových zkoušek.....	53
7.6.1.2	Výsledky tahových zkoušek.....	55
7.6.2	Zkouška vrubové houževnatosti.....	57
7.6.2.1	Výsledky vrubových zkoušek.....	60
8	ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	61
8.1	Výsledky tahových zkoušek	61
8.2	Výsledky vrubových zkoušek.....	63
9	DISKUZE	64
10	ZÁVĚR	65
11	POUŽITÁ LITERATURA.....	66
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
13	SEZNAM TABULEK.....	70

1 ÚVOD

Kovové materiály jsou neustále využívány ve všech odvětvích a je na ně kladen důraz při jejich výrobě a následném použití. Bez kovových materiálů není možné realizovat velkou škálu dnešních potřeb, a proto se také kovové materiály velmi používají. Nejpoužívanějším kovovým materiálem je ocel.

Ocel je slitina železa, uhlíku a legujících prvků, které jsou v oceli obsaženy. Obsah uhlíku v oceli musí být menší než 2,11 %. Jakmile obsah uhlíku přesáhne 2,11 %, nejedná se už o ocel, ale o litinu. Ocel se vyskytuje v několika fázích (austenit, ferit, perlit, ledeburit, cementit). Tyto fáze popisují fázový diagram železa – uhlík. Dále se ocel může vyskytovat v několika strukturách (martenzit, bainit, sorbit), které popisují diagramy IRA nebo ARA.

Kovové materiály mohou být při jejich používání velmi zatěžovány, a proto jsou na kovových materiálech použity tepelné zpracování.

Tepelné zpracování je časově řízený proces, při kterém nejdříve nastává ohřev, následná řízená výdrž na teplotě a ochlazení, které se používá k odstranění zbytkových napětí nebo k požadované změně materiálových charakteristik. Mezi materiálové charakteristiky řadíme tažnost, houževnatost a tvrdost (mez kluzu a pevnosti). Pod pojmem tepelné zpracování se zařazují i některé mechanické nebo chemické procesy. Mezi hlavní druhy tepelného zpracování řadíme žhání, kalení, temperování a cementaci. [11]

Vlastnosti materiálů se zjišťují destruktivními a nedestruktivními zkouškami. V této práci je zaměřeno pouze na destruktivní zkoušky a to na tahovou zkoušku a na zkoušku vrubovou.

Tahová zkouška je nejčastěji používanou zkouškou, která se používá nejen u kovových materiálů. Princip zkoušky je dán spojitě se měnící působící silou a konstantní rychlostí elektrohydraulického pístu stroje na kruhovou zkušební tyč. V průběhu zkoušky je zaznamenávána závislost velikosti působícího zatížení na prodloužení tyče. Veškeré závislosti jsou zaznamenávány do pracovního diagramu. Výsledkem tahové zkoušky jsou základní mechanické vlastnosti materiálu. [9]

Principem vrubové zkoušky je zjištění absorbované energie potřebné k porušení zkušební vzorku. Zkouška se provádí nejčastěji jedním rázem, kdy se na porušení vzorku použije dostatečné množství energie. Používá se především u tepelně

zpracovaných ocelí. Destruktivní zkoušky se provádí za přesně stanovených teplot, aby při vyhodnocování zkoušek a jednotlivých měření nedocházelo k jejich ovlivňování.

Práce je zaměřena na vlastnosti oceli při působení v solné mlze. Korozní degradace materiálu je ve velké většině brána jako nežádoucí proces. Definice koroze nám říká: „Koroze kovových materiálů je fyzikálně-chemické působení dvou nebo více činitelů kovu a prostředí, vedoucí ke změnám vlastnosti kovu, které mohou vyvolávat vzájemné zhoršení funkce kovu, prostředí nebo technického systému, jehož jsou kov a prostředí hlavními složkami“.

2 CÍL PRÁCE

Materiál 42CrMo4 je jedním z nejpoužívanějších materiálů, které se tepelně zpracovávají. Jedná se o materiál, který je možné použít v široké škále. Materiál je předurčen pro více namáhané strojní díly, které vyžadují vysokou pevnost a houževnatost. Uplatnění tohoto materiálu je zejména u hřídelí, spojovacích součástí a u nástrojů pro lisování a tváření.

Hlavním cílem diplomové práce je podrobit tento materiál kovové degradaci materiálu, který byl nejprve technologicky opracován a následně tepelně zpracován. Experimentální měření diplomové práce je rozděleno do třech hlavních etap. V každé etapě jsou na sebe navazující jednotlivé dílčí operace.

- **Etapa číslo 1:** V první etapě se jedná o přípravu zkoušených vzorků. V první řadě byl materiál opracován danými technologickými operacemi na přesně daný rozměr. Poté byly jednotlivé zkoušené vzorky označeny a tepelně zpracovány. Zkoušený materiál byl tepelně zpracován kalením a následným popuštěním, dále normalizačním žíháním a nakonec žíháním na měkko.
- **Etapa číslo 2:** Po označení a tepelném zpracování, byly zkušební vzorky vloženy do solné komory. Měření vzorků bude probíhat celkem ve čtyřech etapách. První sada vzorků, která byla označena a tepelně zpracována určenými tepelnými zpracováními bude hned zkoušena na mechanické a dynamické zkoušky v laboratoři. Druhá, třetí a čtvrtá sada vzorků byla vložena do solné komory. Druhá sada bude v solné komoře 30 dní a poté budou provedeny zkoušky. Třetí sada bude degradovat v solné komoře 60 dní a u čtvrté sady bude probíhat zkoušení materiálu v laboratoři po 90 dnech strávených v solné komoře.
- **Etapa číslo 3:** Po uplynutí stanovené doby v solné mlze, budou zkoušené materiály pomocí laboratorních zkoušek jak dynamických, tak mechanických vyhodnoceny. U zkoušených materiálůvých vzorků byl zaznamenáván počátek, průběh i konečná fáze degradace. Hlavním kritériem byl úbytek materiálu v závislosti na strávené době v solné komoře a zvoleném tepelném zpracování materiálu.

Analýzou naměřených výsledků je možné určit mechanické a dynamické vlastnosti materiálu oproti základnímu materiálu, který nebyl tepelně zpracován. Dále také zjistíme úbytek hmotnosti materiálu v jednotlivých měřeních, které jsou odstupňovány danými časovými intervaly.

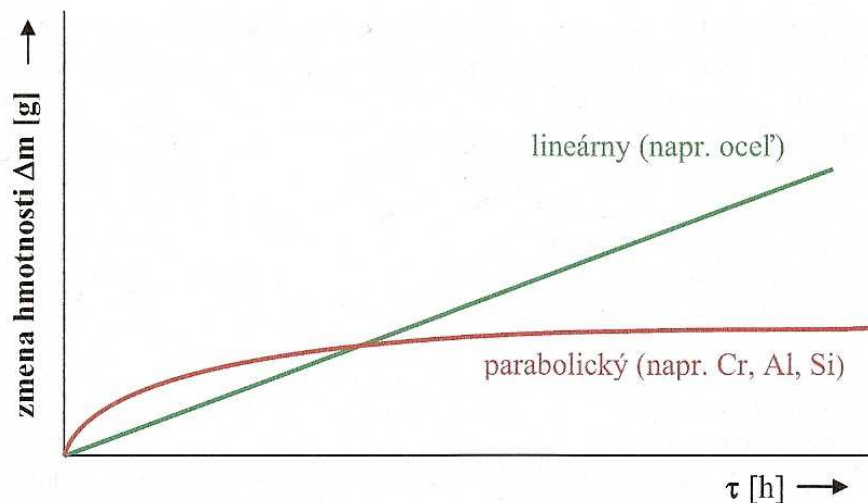
3 KOROZE

Koroze kovových materiálů je definována jako souhrn chemických a elektrochemických reakcí mezi povrchem materiálu a okolním agresivním prostředím, které způsobuje znehodnocení materiálu. Koroze může probíhat v atmosféře, v plynech, ve vodě, v zemi a v různých chemických látkách, které jsou ve styku s kovem. Poškození materiálu může být rozdílné. Může nastat například změna vzhledu (ztráta barvy a lesku), až po úplný rozpad (porušení celistvosti v celém průřezu). Kromě kovových materiálů koroze znehodnocuje také nekovové organické a anorganické materiály. [3]

Technicky významné z hlediska koroze jsou slitiny železa. Ocel se vyrábí z oxidu železa obsažených v železných rudách s vynaložením velké tepelné energie ve vysokých a ocelářských pecích. Z přirozeného stavu (oxidu železa) se získává výrobními procesy „vynucený čistý“ stav (surové železo, ocel). V případě, že se takový produkt dostane do kontaktu s kyslíkem ve vzduchu, má tendenci vrátit se chemickou reakcí zpět do výchozího stavu. Váže se znovu s kyslíkem a vzniká korozní proces. [3]

Koroze vede stále k vývoji nových a účinnějších způsobů protikorozní ochrany materiálů. [3]

Rychlost koroze závisí především na chemických vlastnostech materiálu a je dána hloubkou vrstvy v závislosti na čase. Průběh oxidace je znázorněn dvěma základními jednoduchými způsoby na obr. 1.



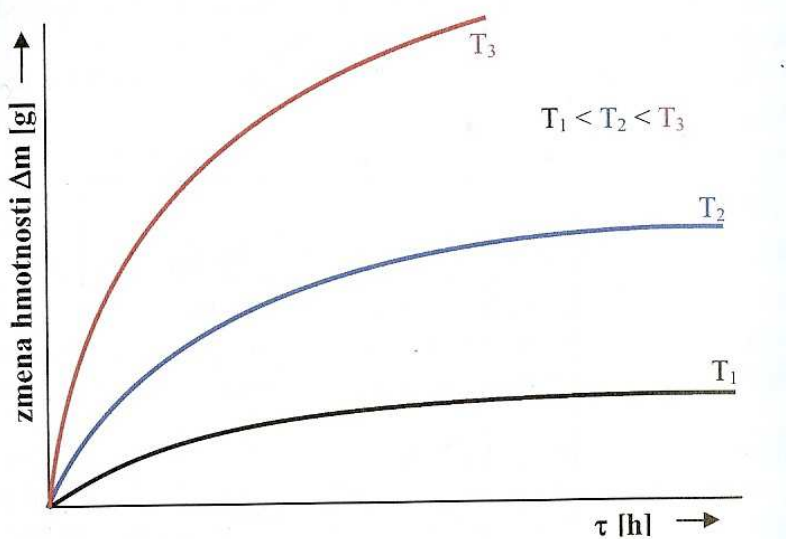
Obrázek 1: Průběh rychlosti oxidace ocelí v závislosti na čase [3]

Rychlost oxidace může mít lineární průběh, jestliže úbytek materiálu se s časem mění konstantní rychlostí a vzniklé korozní vrstvě nic nebrání v jejím pokračování. Lineární závislost vykazují převážně ocele. Oxidační vrstva vytvořená na povrchu

zpomaluje korozní degradaci materiálu. Vzniklá korozní vrstva ovšem obsahuje vyšší vnitřní napětí tlakového charakteru v důsledku většího mřížkového parametru, jakým je mřížka základní hmoty slitin železa. Tím i vzniká postupné odlupování korozní vrstvy a pokračování korozních procesů. [3]

Druhý z průběhů oxidace je ve tvaru parabolickém. Vznikem oxidační vrstvy dochází ke zpomalení korozního procesu na povrchu materiálu, protože oxidační vrstva stěžuje přístup koroznímu prostředí k materiálu. V některých kovech po vzniku oxidační vrstvy koroze s určitou hloubkou už skoro nepokračuje, respektive rychlost koroze se velmi výrazně zpomalí. Mezi tyto kovy patří především (Cr, Al, Si a podobně), které s přibývajícím časem změny hmotnosti minimalizují, až zastavují a koroze nepokračuje. Rychlost koroze je dána celistvostí korozní vrstvy. [3]

Rychlost oxidace kovů se velmi výrazně odvíjí od okolní teploty. Čím vyšší teplota bude v korozním prostředí, tím budou korozní procesy intenzivnější (obr. 2). [3]



Obrázek 2: Změna rychlosti oxidace v závislosti na teplotě a času [3]

Rychlost oxidace dále výrazně závisí na parciálním tlaku kyslíku v daném okolí působení korozní degradace. Zvětšující se rychlost oxidace je zapříčiněno zvyšujícím se parciálním tlakem kyslíku v okolní atmosféře. [3]

3.1 Druhy koroze

Degradace materiálů je rozložena do několika druhů, které jsou rozloženy do určitých hledisek, podle kterých jsou rozlišovány a řazeny do jednotlivých skupin.

3.1.1 Rozdělení podle korozního prostředí

3.1.1.1 *Atmosferická koroze*

Atmosférická koroze je nejrozšířenějším druhem koroze. Je to elektrotechnický proces, který se realizuje kyslíkovou depolarizací vyvolanou vlhkostí a agresivními nečistotami v ovzduší. Korozní děj probíhá pod velmi tenkou vrstvou vody nasycené rozpustnými složkami atmosféry, převážně oxidem siřičitým, oxidem uhelnatým, amoniakem, aerosoli a chlorovodíkem. Tento vodní film s hloubkou $50 \div 150 \mu\text{m}$ vzniká kondenzací vodních par obsažených ve vzduchu, tj. jeho vznik je podmíněný relativní vlhkostí vzduchu. Když je povrch kovu drsný a je pokrytý vrstvou prachu a nečistot, tvoří se vodní film při nižší relativní vlhkosti jakou je kritická relativní vlhkost (60 %). Velmi důležitý význam má kyslík, který proniká tenkým filmem a zúčastňuje se katodické reakce jako depolizátor, to korozi urychluje. [3]

Korozní vlastnosti prostředí jsou určujícím faktorem pro navrhování způsobů protikorozní ochrany materiálů. Proto jsou normami rozdělovány atmosféry podle korozní agresivity na pět stupňů:

- **C1 – velmi nízká** = atmosféra uzavřená, klimatizované místnosti, v kterých nedochází ke kondenzaci vodních par
- **C2 – nízká** = vztahuje se na prostory, v kterých dochází k občasné kondenzaci vodních par
- **C3 – střední** = suché klimatické podmínky
- **C4 – vysoká** = vlhké oblasti při spolupůsobení atmosférických nečistot průmyslových míst, přístavů, atd.
- **C5 – velmi vysoká**

Důležitý vliv na rychlost koroze má teplota. Při nízkých teplotách se atmosférická koroze zastavuje zamrznutím elektrolytu. Při vzrůstající teplotě se rychlost koroze zvyšuje. Zvýšením odolnosti materiálu dosáhneme legováním pomocných prvků, kterými jsou například: Cu, Al, Cr, Ni, Be, P. [3]

3.1.1.2 *Koroze v kapalinách*

V tomto odvětví má největší význam koroze ve vodě. Agresivita vody z hlediska koroze závisí na několika hlediscích. Prvním hlediskem je pH, dalším hlediskem je množství plynů rozpuštěné ve vodě, dalšími důležitými východisky je teplota a proudění vody. Kyslík se v průběhu elektrochemické koroze uplatňuje jako depolizátor.

3.1.1.3 *Koroze v půdě*

Základním prvkem koroze, která vzniká je obsah vody v půdě. Z korozního hlediska se skládá ze tří fází:

- 1) Plyná fáze – půda je ovlivněná mikrobiální činností
- 2) Kapalná fáze – zde vzniká vlastní korozní prostředí (elektrická vodivost půdy)
- 3) Tuhá fáze – je ovlivněna strukturou, chemickým složením a stupeň zavlažení ovlivňuje anodickou korozní reakci

Půdy, které obsahují velký podíl znečištění, vysokou elektrickou vodivost, vysokou kyselost a velký obsah rozpuštěných solí působí velmi korozivně na materiál. [3]

3.1.2 **Rozdělení podle vnitřního mechanismu**

3.1.2.1 *Chemická koroze*

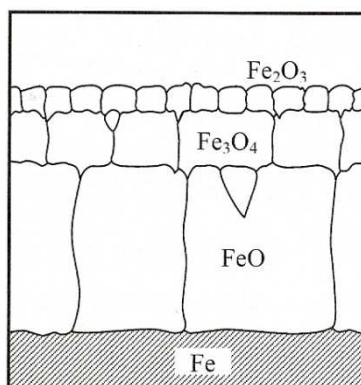
Chemická koroze se řídí základními zákony chemické kinematiky reakcí a transportních procesů a zahrnuje případy koroze v plynech a elektrolytech. Základní složkou v plyných prostředí je kyslík, v důsledku kterého vzniká homogenní oxidická vrstva, která ovlivňuje rychlost další koroze materiálu. Charakteristickým rysem koroze v oxidačně působících plynech je tvorba iontových a kovalentních sloučenin na kovovém povrchu. [3]

Vlivem působících plynů (vodíku) nevznikají na povrchu vrstvy korozních zplodin. Vodík narušuje ocel vodíkovou křehkostí nebo vodíkovou korozí, která je zapříčiněna důsledkem reakce vodíku a uhlíku v oceli. [3]

Při oxidaci železa a slitiny železa vznikají tři vrstvy:

- **Vnitřní** – FeO, vzniká od 570 °C, pod touto teplotou se rozpadá na Fe₃O₄ a Fe
- **Střední** – Fe₃O₄ (magnetit), je stále v celém rozsahu teplot

- **Venkovní** – Fe_2O_3 (hematit), má nejvyšší obsah kyslíku, při vyšších teplotách se rozkládá na Fe_3O_4 a O_2

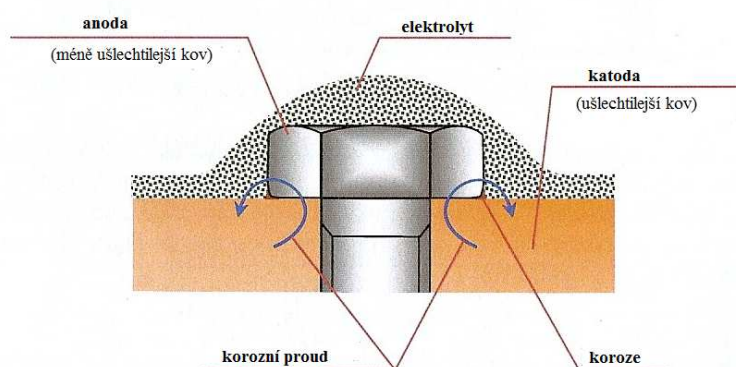


Obrázek 3: Schematické znázornění oxidačních vrstev na povrchu železa a slitin železa [3]

3.1.2.2 *Elektrochemická koroze*

Elektrochemická koroze je znehodnocení kovů s různým elektrickým potenciálem za vzniku elektrického proudu, který se mění na teplo. Základním předpokladem pro průběh elektrochemické koroze je dána díky přítomnosti elektricky vodivých roztoků nebo solí. Neušlechtilé kovy Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Ni, Sn, Pb se v elektrolytu rozpouštějí a k vodíkové elektrodě mají záporné napětí. [3]

Kovy s vyšším záporným potenciálem jsou málo odolné proti elektrochemické korozi oproti kovům s nižším záporným nebo kladným potenciálem. [3]



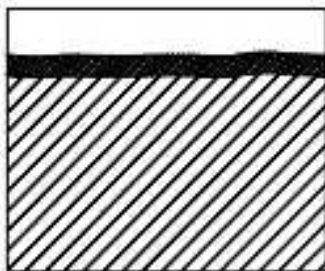
Obrázek 4: Princip vzniku galvanické koroze [3]

3.1.3 **Rozdělení podle korozního napadení**

3.1.3.1 *Rovnoměrná koroze*

Rovnoměrná koroze je ovlivnitelná krystalovou strukturou kovu. Tím se myslí, že určité zasažená místa korodují rychleji a vytváří nerovnoměrný povrch. Koroze probíhá rovnoměrně po celém povrchu materiálu. Korozní znehodnocení se projevuje jako

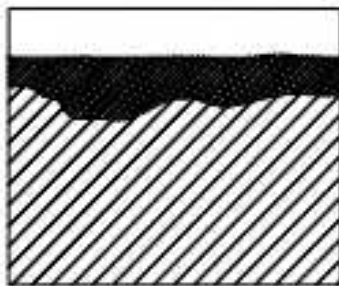
úbytek materiálu, ať už jeho tloušťkou, tak váhovou ztrátou, nebo v rozměrových jednotkách v hloubce napadeného materiálu. [4, 8]



Obrázek 5: Rovnoměrná koroze [17]

3.1.3.2 *Nerovnoměrná koroze*

Koroze nerovnoměrná proniká v různých místech materiálu do různé šířky a hloubky. Některá místa mohou být při tom i bez korozního napadení. [8]

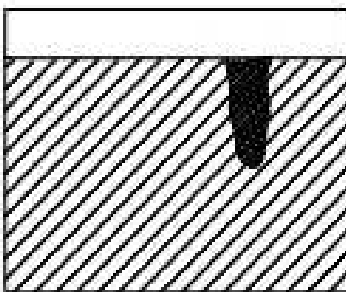


Obrázek 6: Nerovnoměrná koroze [17]

3.1.3.2.1 *Jamková, bodová koroze*

Bodová koroze neboli pitting vzniká porušením pasivní vrstvy, kde dochází ke vzniku bodů. Ostatní povrch materiálu není vůbec napadán. Koroze proniká do velké hloubky, někdy i celou hloubkou materiálu. [1]

Jamková koroze probíhá stejně jako bodová koroze s tím rozdílem, že neproniká tak do hloubky materiálu. [4]



Obrázek 7: Jamková, bodová koroze [17]

3.1.3.2.2 *Extrakční koroze*

U ekstrakční koroze je korozní napadení pouze u jedné chemické složky slitiny. [3]

3.1.3.2.3 Štěrbínová koroze

Hlavní příčinou vzniku štěrbinové koroze je nedokonalá výměna korozního prostředí. Tudíž štěrbinová koroze probíhá většinou v malých prostorech, spárách vznikajících v místě styku dvou kovových materiálů. [1,4]

3.1.3.2.4 Podpovrchová koroze

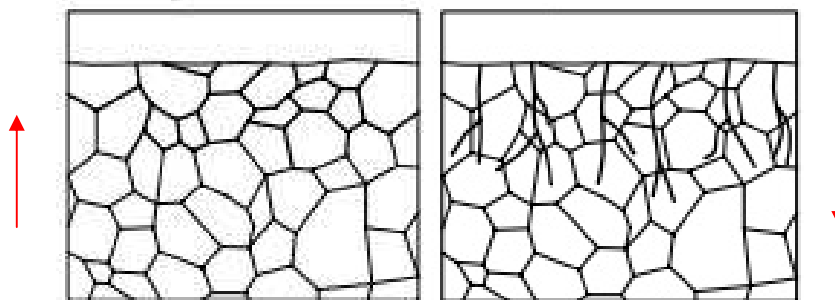
Je charakteristická tím, že je rozsáhlejší porušení uvnitř kovového materiálu než na povrchu. Podpovrchová koroze začíná v místě nejmenší korozní odolnosti a rozšiřuje se pod povrchem za vzniku podpovrchových dutin. [3]

3.1.3.2.1 Selektivní koroze

Je korozní děj, při kterém dochází ke korozi jen u některých chemický, strukturních částí materiálu. Z toho vyplývá, že korozní napadení probíhá v jedné strukturní složce z více fázové struktury (odlišné chemické složení). [3,4]

3.1.3.2.2 Mezi – krystalická koroze

Mezi – krystalická neboli také inter – krystalická koroze je koroze chemická nebo elektrochemická. Koroze postupuje podél materiálových krystalů v dané struktuře materiálu. Jedná se o rozpouštění jedné z mnoha fází vyloučené po hranicích krystalů. Koroze může vzniknout i u homogenního materiálu jestliže korozní činidlo naleptává rozhraní krystalů více než krystaly samé. [2]



Obrázek 8: Mezi-krystalická koroze a trans – krystalické koroze [19]

3.1.3.2.3 Trans – krystalická koroze

Trans – krystalická koroze je buďto chemická nebo elektrochemická koroze, projevující se vznikem trhlin probíhajících napříč zrny. Jak chemická, tak elektrochemická koroze je velice nebezpečná, protože se nedají při běžné prohlídce odhalit. [2]

4 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU

4.1 Ocel

Ocel je nejpoužívanějším kovovým materiálem. V současnosti existují materiály s vyšší tvrdostí, pevností, odolností proti opotřebení, žárupevností, žáruvzdorností a podobně požadovaných vlastností. Avšak velkou výhodou ocelí je jejich dostupnost, recyklovatelnost a jejich výhodné technologické vlastnosti z hlediska zpracovatelnosti. Tím se hlavně myslí jejich dobrá slévatelnost, obrobitelnost, tvářitelnost, svařitelnost a kalitelnost. V oceli je možné dosáhnout široké spektrum výborných mechanických vlastností jakým je pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost. Používají se v celé škále výroby, ať už různých součástek, konstrukcí a zařízení. [3]

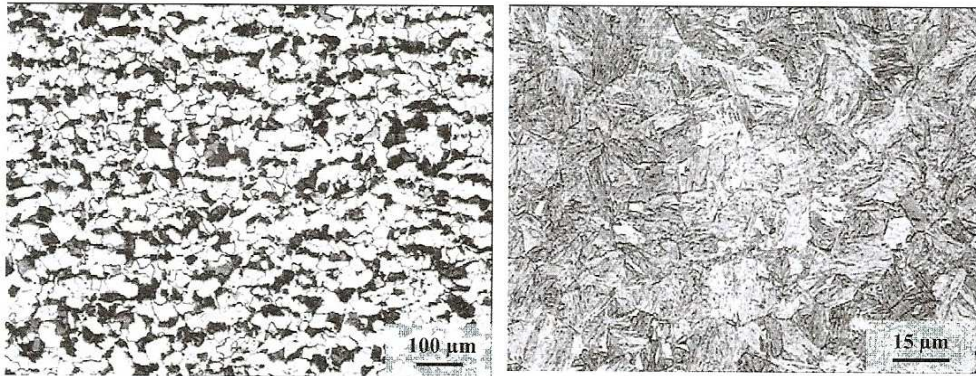
Jsou to slitiny železa a uhlíku, který je v oceli obsažen do 2,11 % hmotnosti. Dalšími legujícími prvky je Mn, Cr, W, Si, V. Hustota ocelí je $7\,850\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Rozdělujeme je na ocele konstrukční (uhlíkové a slitinové), nástrojové a se specifickými vlastnostmi. [3]

Dále jsou oceli rozdělovány podle obsahu uhlíku na:

- PODEUTEKTOIDNÍ (feriticko – politické) – $C < 0,8$ hmotnosti %
- EUTEKTOIDNÍ – $C = 0,8$ hmotnosti %
- NADEUTEKTOIDNÍ – $0,8$ hmotnosti % $< C < 2,06$ hmotnosti % [13]

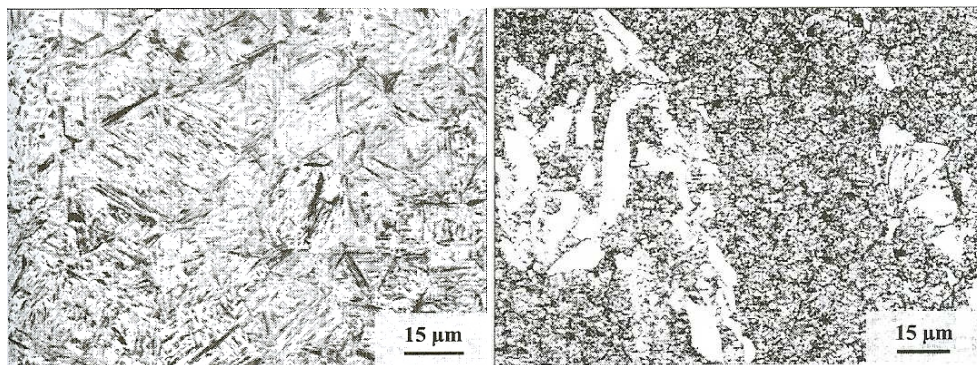
U konstrukčních ocelí je obsah uhlíku nejčastěji v rozsahu 0,1 – 0,5 hmotnosti %. V žíhaném stavu mají konstrukční ocele relativně nízkou pevnost v tahu, přibližně okolo $R_m = 300 - 500\text{ MPa}$. Zvýšení pevnostních vlastností se dosahuje legováním, buď to tepelným a nebo chemicko – tepelným zpracováním. Legováním ocelí je možné dosáhnout specifických vlastností, například žáruvzdornost, žárupevnost, odolnost proti korozi. [3]

Na obr. 10 můžeme vidět jak mikrostrukturu konstrukční oceli, tak bainitickou mikrostrukturu, která je tepelně zpracována metodou kalení.



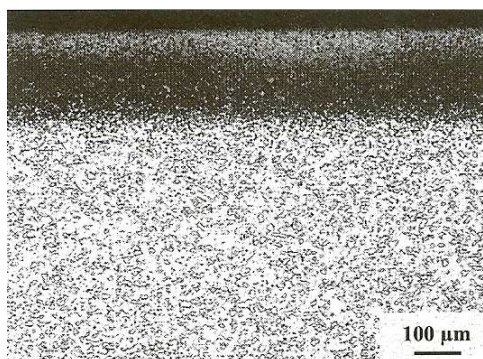
Obrázek 9: Feriticko-perlitická mikrostruktura konstrukční oceli a Bainitická mikrostruktura (po kalení) [3]

Na obr. 10, je snímek martenzitické mikrostruktury po kalení a mikrostruktury legované nástrojové oceli.



Obrázek 10: Martenzitická mikrostruktura (po kalení) a Mikrostruktura legované nástrojové oceli [3]

Zde je vidět snímek mikrostruktury kalené chemicko – tepelně zpracované oceli s nízkým obsahem uhlíku. Povrchová difuzní vrstva byla vytvořena procesem nasycením uhlíku a dusíku a poté tepelně zpracována metodou kalení.



Obrázek 11: Mikrostruktura chemicko-tepelně zpracované oceli s nízkým obsahem uhlíku [3]

V současnosti se pro mnohé konstrukční použití používají mikrolegované ocele. Jsou to svařitelné ocele s mezí kluzu R_e 300 – 500 MPa. Mikrostruktura ocelí je feritická s malým podílem perlitu. Zpevnění feritu se dosáhne manganem a křemíkem.

Zvýšení meze kluzu se u ocelí dosahuje především malým množstvím přísadových látek Al, Ti, Nb a V. Maximální obsah přísadových látek je maximálně 0,15% hmotnosti. Mikrostruktura ocelí je velmi jemnozrnná, dosahuje se tím disperzního zpevnění intermediárními sloučeninami mikrolegujících prvků (karbidu a nitridu). Ocele jsou velmi odolné proti stárnutí. [3]

4.1.1 Ocel 15 142

Je nízkolegovaná ušlechtilá, chrom – molybdenová ocel k zušlechťování. Dnes je označována jako 42CrMo4. Ocel slouží především pro strojně velmi namáhané součásti. Po zakalení tato ocel dosahuje tvrdosti přibližně 58 – 60 HRC. Po zušlechtění materiálu až do průměru 100 mm lze docílit pevnosti nad 1 000 MPa ještě při dostatečné houževnatosti. Kalení se provádí do méně razantního kalicího prostředí, kde nedochází ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad na které je tento materiál náchylný. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení, a proto je také velmi používanou ocelí určenou k zušlechťování. [18]

4.2 Rovnovážný diagram

Rovnovážné diagramy rozlišujeme dle formy uhlíku nad hranicí rozpustnosti. Z termodynamického hlediska je grafit brán jako stabilní fáze a cementit jako metastabilní fáze. Proto je rozlišujeme na:

- Soustavu stabilní → železo – grafit
- Soustavu metastabilní → železo – cementit [16]

Rovnovážný diagram nám udává binární systém, ve kterém lze díky obsahu uhlíku a teplotě odečíst jak fázové, tak i strukturní proměny ve slitině železo – uhlík. Kromě obsaženého železa a uhlíku jsou v technickém železe dále obsaženy žádoucí a nežádoucí prvky. Mezi žádoucí prvky můžeme zařadit například mangan, křemík, ale mezi nežádoucí prvky patří především fosfor a síra. Nejdůležitějším prvkem, který je obsažen v rovnovážném diagramu je uhlík. Jeho obsah má zásadní vliv na konečné vlastnosti materiálu. V případě ocelí je obsažen do 2,11 % uhlíku, překročením této koncentrace se jedná buď o surová železa, nebo litiny.

4.2.1 Soustava stabilní – Fe – C

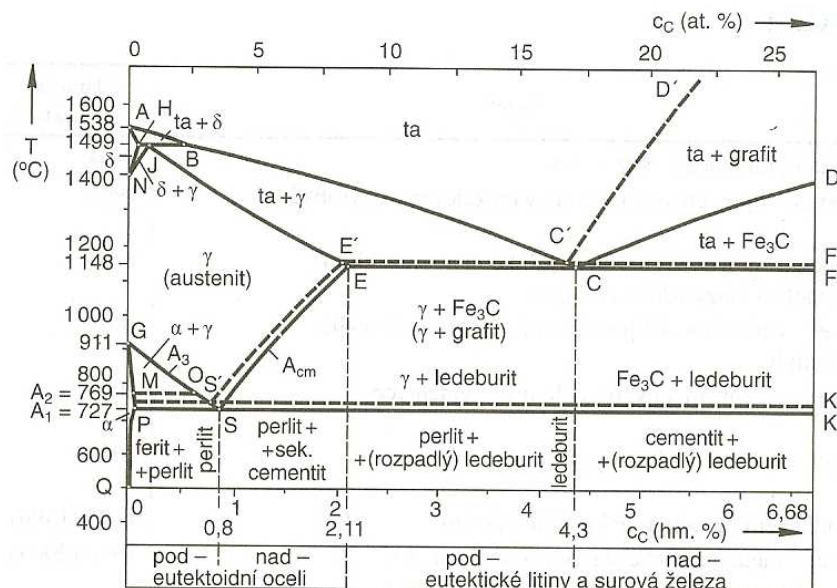
Soustava stabilní je dána formou C vyskytující se ve slitinách s Fe. Vyskytuje se zde termodynamickou formou, nikoli jako karbid železa Fe_3C , ale jako grafit. Stabilní

soustava Fe – C se v technické praxi nevyskytuje. Stabilní diagram krystalizuje pouze grafické litiny, u kterých je dosaženo obsahu C > 2,03 hmotnosti %. [17]

4.2.2 Soustava metastabilní – Fe – Fe₃C

Rovnovážný diagram metastabilní soustavy se skládá z jednofázových a dvoufázových polí. Jednofázová pole jsou tvořena tekutou fází L (taveninou), která se vyznačují dokonalou rozpustností do 6,68 % hmotnosti uhlíku a tuhými fázemi α , β , γ , δ a Fe₃C. Dvoufázová pole jsou tvořena směsí uvedených fází. Tyto fáze byly pojmenovány α , β , δ jako jednotlivé ferity, směs γ jako austenit a chemická sloučenina Fe₃C jako cementit. V metastabilní soustavě jsou hlavními složkami binární soustavy je železo s uhlíkem Fe a karbidem železa Fe₃C. Dle tohoto rovnovážného diagramu krystalizují všechny nelegované oceli a karbidické litiny.[17]

Jedny z nejdůležitějších bodů, které jsou obsaženy v rovnovážném diagramu, jsou celkem dva. Jedním z nich je eutektický bod C a druhý bod je S, který nám značí eutektoidní bod. [14]



Obrázek 12: Rovnovážný diagram Fe - C a Fe - Fe₃C [15]

Identifikace symbolů v diagramu:

c_C – koncentrace uhlíku, T – teplota, ta – tavenina, α – ferit (nízkoteplotní), γ – austenit, Fe₃C – cementit, δ – vysokoteplotní ferit, C – eutektický bod, S – eutektoidní bod, A_c – teplota rekrystalizace při ohřevu materiálu, A_r – teplota rekrystalizace při ochlazování materiálu [15]

Metastabilní soustava je rozdělena do několika fází:

- **Ferit – Fe_α** - Je nízkoteplotní intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α. Ferit α krystalizuje v krychlové prostorově středěné soustavě. Vyznačuje se malou pevností, tvrdostí a je tvárný za studena a je dobře obrobitelný. Při nezávislém obsahu uhlíku ve slitině začíná ohřev překrystalizace na teplotě A_{c1} a končí na teplotě A_{c3}, kde je už závislý na chemickém složení slitiny. Vysoko – pevnostní ferit je označován jako Fe_δ.

Na vlastnosti feritu mají velký vliv ostatní vyskytující se prvky, který s feritem tvoří tuhý roztok. Prvky, které zvyšují houževnatost jsou Ni, Cr a Mn, opačným způsobem nám reaguje ferit na Si, který snižuje jeho houževnatost. [14, 17]

- **Austenit** - Tuhý roztok uhlíku upravený v železe Fe_γ vyskytující se v rovnovážném stavu nad teplotou A_{c3}. Austenit krystalizuje v krychlové plošně středěné mřížce, lepší rozpouštění uhlíku než u feritu, čehož se využívá především při kalení ocelí. Austenit je pak dobře tvářitelný, houževnatý a má tvrdost dle Brinella 170 až 220. [14]

- **Cementit – Fe₃C** - Je chemická sloučenina krystalizující v kosočtverečné krystalové soustavě. Tato chemická sloučenina je velmi tvrdá (více než 65 HRC) křehká a netvárná. Je to rovnovážná sloučenina, která se při vyšší teplotě rozpadá na železo a grafit. Rozpadu cementitu se využívá především při výrobě temperované litiny. Cementit se podle geneze rozděluje do 5 různých druhů (primární, ledeburický, sekundární, politický a terciální). [14,17]

- **Bainit** – Vznikbainitu je zapříčiněn rozpadem přechlazeného austenitu v širokém rozsahu teplot. Struktura bainitu je tvořena vyloučenými karbidy a jehlicemi feritu. [14]

- **Grafit** – Krystalizuje v šesterečné soustavě a jeho pevnost, houževnatost je menší než u železa. [14]

- **Ledeburit** – Ledeburit je eutektonická směs austenitu a cementitu. Vznikající pouze u slitin s obsahem uhlíku nad 2% (litiny) při krystalizaci.

- **Martenzit** – Je silně přesycený tuhý roztok uhlíku v mřížce železa Fe_α (feritu). Vzniká zde při dostatečně rychlém ochlazení austenitu. Struktura martenzitu je velmi tvrdá a křehká.

- **Perlit** – Vzniká eutektoidní přeměnou austenitu na směs cementitu a feritu. Perlit je tvárný a pevný. Ve slitinách se může vyskytovat i ve formě laminární nebo globulární.

- **Sorbit** – Struktura sorbitu je tvořena velmi jemnými částicemi karbidů. Vzniká při popouštění martenzitu. Sorbit je pevný a má vysokou houževnatost. [14]

5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování ocelí je časově řízený proces ohřevu a ochlazení, který se používá k odstranění zbytkových napětí nebo ke změně materiálových charakteristik. Do změny materiálových charakteristik zahrnujeme jeho tvrdost, tažnost a houževnatost. [11]

Tepelným zpracováním se rozumí cyklus, který se rozděluje na tři neméně důležité procesy. Postup při tepelném zpracování:

I. Ohřev

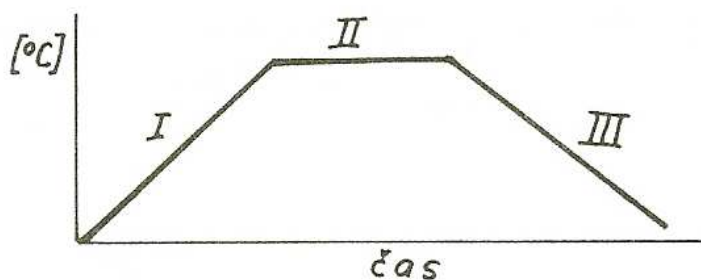
Ohřevem materiálu se rozumí postupné zvyšování teploty materiálu v tuhém stavu na určitou teplotu. Ohřev materiálu je prováděn buď to v plynových nebo elektrických pecích se vzdušnou nebo ochrannou atmosférou. Ohřev může být prováděn i ve vakuu a to buď to indukčně, odporově, přímým plamenem hořícího média nebo v tekutých lázních.

II. Výdrž na této teplotě

Výdrž na této teplotě nám vzniká časový úsek, při kterém se ohřátý materiál dostává do požadovaného stavu (homogenizuje, austenitizuje, nebo se přeměňuje na jinou strukturu).

III. Ochlazování

Ochlazování se udává jako průměrná hodnota poklesu teploty za časovou jednotku v rozmezí mezi počátkem a koncem ochlazování. [13]



Obrázek 13: Schéma průběhu teplot v závislosti na čase [13]

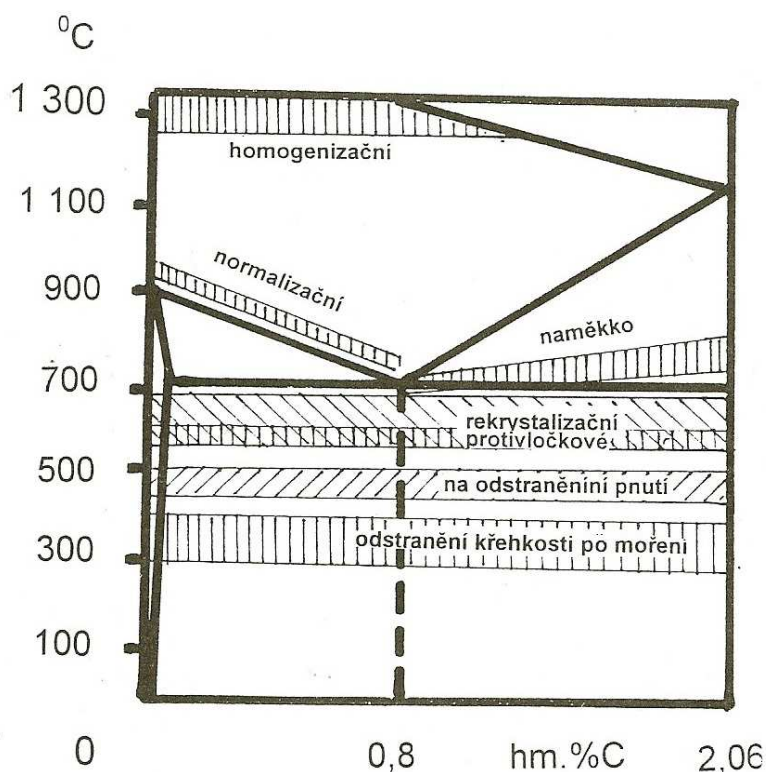
5.1 Žihání

Po tváření za tepla i za studena vznikají v materiálu zbytkové napětí, kromě toho má materiál v důsledku tohoto zpracování vyšší pevnost a tvrdost. Tepelné zpracování mění materiálovou strukturu, tak že neodpovídá struktuře příslušnému rovnovážnému fázovému diagramu. Úplné žihání i normalizace jsou tepelná zpracování, která materiálu umožňují transformaci materiálu dle rovnovážného diagramu.

Materiál se ohřívá 50 °C nad jeho kritickou hodnotu. Teplota je udržována po celou dobu, než se rozpustí uhlík a poté následně difunduje materiálem. Materiál je pak pozvolna ochlazován, zpravidla to bývá v peci, které byl upravován.

Technologický proces žihání se používá ke změkčení, ke zvýšení tažnosti, ke zjemnění zrn materiálu a k odstranění zbytkových napětí. [11]

V případě, že žihání teplota nepřekročí nejnižší teplotu fázové přeměny, což je teplota A_1 , tak se jedná o tepelné zpracování bez rekrytalizace, při jejím překročení se jedná o tepelné zpracování s rekrytalizací. Oblasti žihacích teplot pro jednotlivé druhy žihání jsou na obr. 15.



Obrázek 14: Přehled teplotních oblastí žihání ocelí [13]

5.1.1 Normalizační žíhání

U normalizačního žíhání probíhá ohřev do oblasti austenitu s následným ochlazením na vzduchu. Účelem normalizačního žíhání je vytvoření rovnoměrné a jemné struktury, která se nevytvořila při krystalizaci nebo při nedostatečně intenzivním tváření za vysokých teplot, nebo při žíhání na vysoké teploty. Jemnější zrna nám zapříčiňují zvýšení meze kluzu i meze pevnosti žíhaného materiálu. [13]

Proto se toto tepelné zpracování používá u podeutektoidních ocelí, kde konečnou fází je zvýšení pevnosti. V případě opakování budou zrna stále více zjemňovány.

U normalizačního žíhání se zahrnuje ohřev do nejspodnější oblasti austenitu. U podeutektoidních ocelí je to 30 – 50 °C nad teplotu A_{c3} . Následuje výdrž na teplotě, která je ovlivněna hmotností žíhaného výrobku, aby austenit mohl vzniknout v celém jeho průřezu. U podeutektoidních ocelí probíhá ochlazování materiálu zásadně za klidného vzduchu, aby vznikla feriticko – perlitická struktura. [17]

5.1.2 Žíhání na měkko

Hlavním cílem žíhání na měkko je převedení laminární struktury perlitu na globulární perlit. Procesem žíhání na měkko se rozumí sbalování lamel do globulí, které se nazývá sferoidizace nebo-li globularizace. Hlavním důvodem žíhání na měkko je snížení tvrdosti a zlepšení obrobiteľnosti ocelí pro následné obrábění. Dalším neméně důležitým důvodem je vytvoření struktury pro kalení

Čím více je v oceli obsažen C, tím více karbidů ocel obsahuje a rozpouštění trvá déle. To samé platí i u výdrží na teplotě, tudíž může být i několik hodin, záleží na velikosti a hmotnosti výrobku. Po žíhání nad teplotou A_1 se ocel ochlazuje velmi pomalu, až pod teplotu A_{r1} , kde se při přechodu přes překryštalizační teplotu zamezí vnitřnímu pnutí a vzniku tvrdých složek. Žíhání na měkko se používá především u eutektoidních a nadeutektoidních ocelí. Zřídka se používá u podeutektoidních ocelí.

Pokud je výchozí strukturou před žíháním martenzit nebo bainit, tak stačí, aby byla žíhací teplota několik stupňů pod teplotou A_1 , poněvadž tyto struktury nám zaručují sbalování karbidů poměrně rychle.

Pokud je výchozí strukturou lamelární perlit, probíhá sbalování lamel pomaleji, což je ovlivněno hrubšími lamely a vyšším obsahem C. Po tepelném zpracování se z hrubého lamelárního perlitu vytvoří pouze globulární perlit. Struktura globulárního

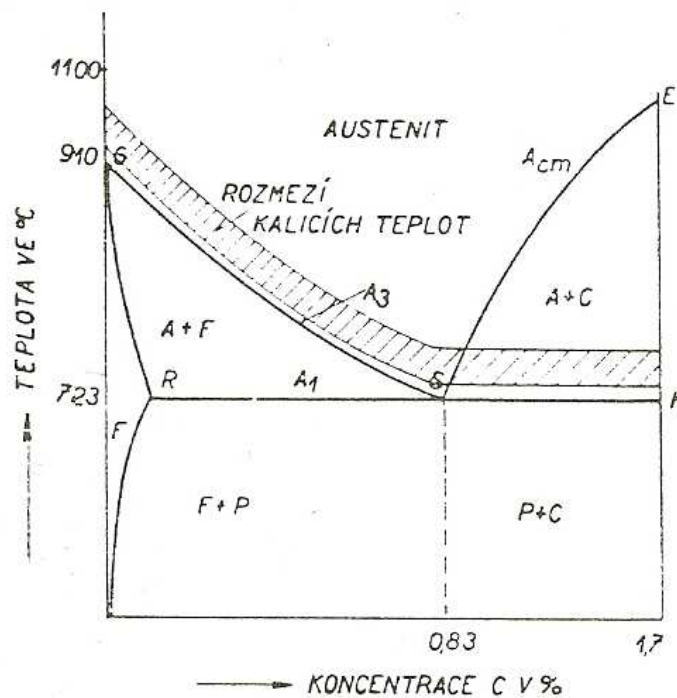
perlitu nám nevyhovuje k následnému kalení, proto je potřeba vykonat normalizační žíhání, které nám zmenší velikost zrn.

5.2 Kalení

Kalení nám slouží k transformaci austenitu na perlit. Při tom nedochází při ochlazení okamžitě, ale je nutný určitý čas na průběh správně transformace. Politická přeměna ustává při 420 °C, lze jí zabránit rychlým ochlazením na nízkou teplotu. Při rychlém ochlazení oceli na teplotu okolo 200 °C a nižší se austenit přemění na martenzitickou strukturu. Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku ve feritu a je nejpevnější a nejtvrďší strukturou oceli.

Dalším ochlazením na teplotu 200 – 400 °C a následnou časovou výdrží na této teplotě dojde k transformaci austenitu na strukturu označovanou jako bainit.

V závislosti na teplotě, nebo v rozmezí teplot vzniká řada struktur, které se označují jako bainity. V závislosti na teplotě můžeme získat téměř libovolnou strukturu, od hrubozrnné struktury perlitu, až po strukturu jemnozrnnou. [11]



Obrázek 15: Pásmo kalících teplot ocelí [13]

5.3 Popouštění

Popouštění je ohřívání kaleného předmětu na určitou teplotu a následný výdrž na této teplotě. Používá se především k vytvoření struktur rovnovážného stavu u ocelí s bainitkou nebo martenzitickou strukturou a následným ochlazením na teplotu okolí určeným způsobem. Fázové přeměny, které nastávají při popouštění, se týkají skoro všech fází. Ať už to jsou základní fáze martenzitu a zbytkového austenitu, tak i minoritních fází, kterými jsou karbidy a karbonitridy. Toto tepelné zpracování rozdělujeme do čtyř dílčích fází:

1) První fáze

Popouštíme na teplotu, která nepřesáhne 200 °C. Toto popouštění spočívá v rozpadu uhlíku silně přesyceného tuhého roztoku α' na nerovnovážný karbid ϵ a nízkouhlíkový martenzit. Popouštění materiál v první fázi popouštění bývá označován jako pouštěný (kubický) martenzit. Vznik martenzitu nám doprovází mírné snížení vnitřního pnutí.

2) Druhá fáze

V druhé fázi popouštění dosahuje teplota 200 – 250 °C. Při této teplotě probíhá rozpad zbytkového austenitu na strukturu bainitického typu. Mechanismus přeměny lze považovat za stejný jako při rozpadu austenitu za stejných teplot po přímém ochlazení z oblasti stabilního austenitu. V této fázi dochází ke zvětšení měrného objemu oceli.

3) Třetí fáze

Ve třetím stádiu popouštění o teplotě nad 250 °C vzniká rovnovážný tuhý roztok α – ferit. Při nižších teplotách mají částice cementitu tyčinkovitou strukturu. Při teplotě nad 400 °C se tyčinkové karbidy přeměňují na kulovitá zrnka cementitu. Hlavními přeměny ve třetí fázi je snížení tvrdost, zvětšení tvárnosti a houževnatosti, klesá zbytkové pnutí a zvětšený měrný objem z druhé fáze popouštění snižuje. Výsledkem třetí fáze je změna struktury na feriticko – cementickou, která se nazývá sorbit.

4) Čtvrtá fáze

Ve čtvrté fázi se teplota pohybuje nad 500 °C, tato fáze bývá označována jako postupné hrubnutí částic cementitu, rekrytalizací a hrubnutím zrn. Pevnostní vlastnosti se stále snižují, ale zvyšuje se houževnatost a plasticita oceli. U legovaných ocelí tato fáze zajišťuje buď obohacování cementitu karbidotvornými prvky, nebo i vznik nových karbidů s odlišnou mřížkou než má cementit. U převážně většiny reakcí při popouštění uhlíkových a nízkolegovaných ocelí je doprovázeno snižováním tvrdosti oceli. [11]

6 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY

6.1 Mechanické vlastnosti

Základními vlastnostmi každého výrobku jsou jeho mechanické vlastnosti, které charakterizují odolnost výrobku proti vnějším silám a to jak statickým tak i dynamickým. Vlastnosti se zjišťují zkouškami v normalizovaných zkušebnách. Statickými mechanickými zkouškami se vyhodnocuje chování materiálu jak za krátkodobého, tak i za dlouhodobého působení stálých nebo pomalu a spojitě měnících se sil. Za krátkodobého působení se jedná především o zkoušku tahem a o zkoušky tvrdosti. [1]

Naměřené výsledky statických zkoušek nedávají žádné informace o chování materiálu při namáhání dynamickém, kterým jsou v technické praxi často zatěžovány pohybující se strojní součásti. Při nich dochází často k poruše soudržnosti silami, které zdaleka nedosahují hodnot téhož materiálu zjištěných statickými zkouškami. V případě, že zatěžující síly rostou skokem, jedná se o namáhání rázové, jestliže se opakovaně mění, jedná se o namáhání cyklické. [1]

Pevnost materiálu charakterizuje mez pevnosti, což je napětí, které se u kovových materiálů udává v MPa. Základní hodnotou je mez pevnosti v tahu, která udává odolnost materiálu proti porušení normálovým napětím. [2]

6.2 Statické zkoušky krátkodobé

Statickými zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu a spojitě se měnících sil. Druh namáhání nám udává, o jakou krátkodobou zkoušku se jedná. Může to být zkouška tahem, tlakem, smykem, ohybem a zkoušky tvrdosti. [2]

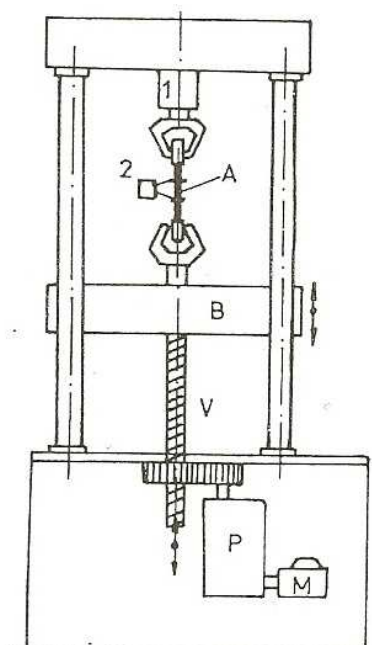
6.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je jednou ze základních a nejdůležitějších zkoušek. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče postupně se zvyšujícím tahovým zatížením předepsanou rychlostí, až do doby, než nastane lom. Účelem zkoušky je měření napěťových a deformačních vlastností materiálu. [1,5]

Běžné zkoušky tahem se provádí za okolní teploty mezi 10 – 35 °C, dle potřeby se dá materiál zkoušet i za mnohem vyšších nebo nižších teplot, záleží na uplatnění budoucího výrobku. [1]

6.2.1.1 *Trhací stroj*

K základnímu laboratornímu vybavení pro mechanické zkoušky je zkušební stroj. K tahovým zkouškám je zapotřebí trhací stroj. Stroj je tvořen pevným rámem a v horní části stroje je umístěno zařízení pro měření síly. Zkušební vzorek je uchycen mezi zařízení pro měření síly a druhým koncem je uchycen k pohyblivému příčnicku. Příčník je uváděn do pohybu motorem. Motor je zapojen přes vřeteno a převodovou skříň, tím dochází k pohybu příčnicku a postupnému zatěžování a deformaci zkoušeného vzorku. Deformace zkušebního tělesa je hlídána průtahoměrem.



Obrázek 16: Trhací stroj [18]

Identifikace trhacího stroje:

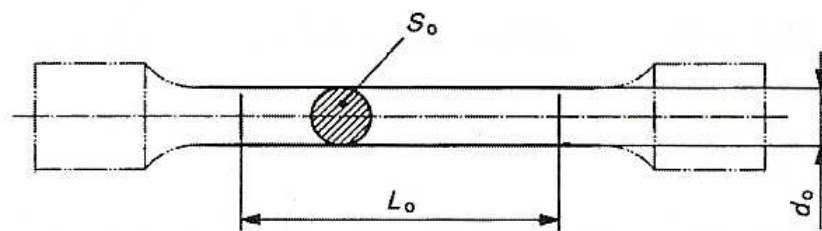
1 – zařízení pro měření síly, 2 – průtahoměr, A – zkušební těleso, B – pohyblivý příčník, V - vřeteno, P - převodovka, M – motor

6.2.1.2 *Zkušební tyče*

Zkušební tyče mají nejrůznější tvary průřezů, nejvíce používané jsou většinou kruhové, obdélníkové nebo čtvercové. Konce tyčí, nebo – li hlavy, mají často větší průřez než je vnitřní měřená část tyče. Slouží k upnutí do čelistí zkušebního stroje. Tím zabezpečíme, že lom nastane právě v měřené části tyče L_0 . [1]

Kruhové tyče se převážně vyrábějí obráběním (soustružením, případně broušením), tyče nekruhového průřezu pak frézováním. [1]

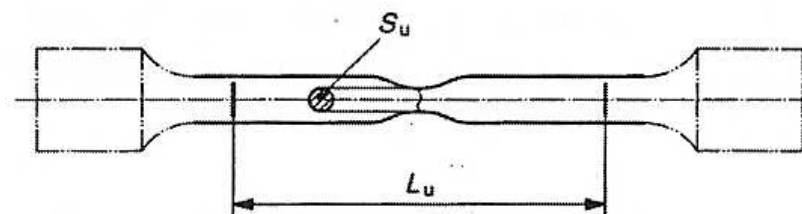
Zde můžeme vidět zkušební tyče. Na obr. 17 je znázorněna zkušební tyč před zkouškou. Na obr. 18 je zobrazena zkušební tyč po zkoušce. Jsou zde také vyobrazeny jak původní rozměry S_0 a L_0 , tak i konečné S_u a L_u .



Obrázek 17: Zkušební tyč před měřením [2]

kde: S_0 ... původní průřez [mm]

L_0 ... počáteční měřená délka [mm]



Obrázek 18: Zkušební tyč po měření [2]

kde: S_u ... měřený průřez [mm]

L_u ... měřená délka [mm]

6.2.1.2.1 Měřená délka zkušební tyče

Před započítáním zkoušky je nutné vyznačit na zkušební tyči úsek, na kterém se budou zjišťovat všechny potřebné hodnoty nutné pro výpočet mechanických parametrů zkoušeného materiálu. Tento úsek bývá převážně označován jako L_0 a nazývá se počáteční měřená délka. [1]

6.2.1.2.1.1 Poměrové zkušební tyče

U poměrové zkušební tyče se počáteční měřená délka L_0 vztahuje k počáteční ploše příčného průřezu tyče S_0 , kterou

získáme výpočtem. Vypočítaná hodnota počáteční délky se zaokrouhluje na nejbližší násobek 5 mm.

$$L_o = k \cdot \sqrt{S_o} \text{ [mm]}$$

kde: k...součinitel proporcionality, má buď hodnotu 5,65
nebo 11,3

S_o...průřez [mm]

6.2.1.3 *Pracovní diagram*

Zvyšující se tahová síla F vytvářená zkušebním strojem způsobuje prodlužování celé zkušební tyče, a tím i prodlužování měřené délky L_o o ΔL na délku L=L_o+ ΔL. Grafickou závislost tohoto prodloužení ΔL na velikosti vyvozené síly F znázorňuje pracovní diagram. Dvojice hodnot F a L jsou u nejmodernějších zkoušecích zařízení zaznamenávané v několikatisícovém množství na jednu zkoušku, takže pracovní diagram je velice přesný. Současně se podle zákonitosti o neměnnosti objemu zmenšuje původní průřez S_o na okamžitý S. [1]

Hodnoty prodloužení, které zaznamenává zařízení zkušebního stroje v závislosti na velikosti síly, jsou buď z čidla průtahoměru, nebo z pohybu příčnicku. Výhodou průtahoměru je přímé zaznamenávání prodloužení ΔL [mm] k okamžité hodnotě síly F [N], zatím co hodnoty deformace zaznamenané z dráhy příčnicku je nutno na absolutní hodnotu prodloužení ΔL přepočítávat přímou úměrou mezib počáteční vzdáleností čelistí a délkou měřené délky tyče. Stejně to platí i u určování rychlostí deformace. [1]

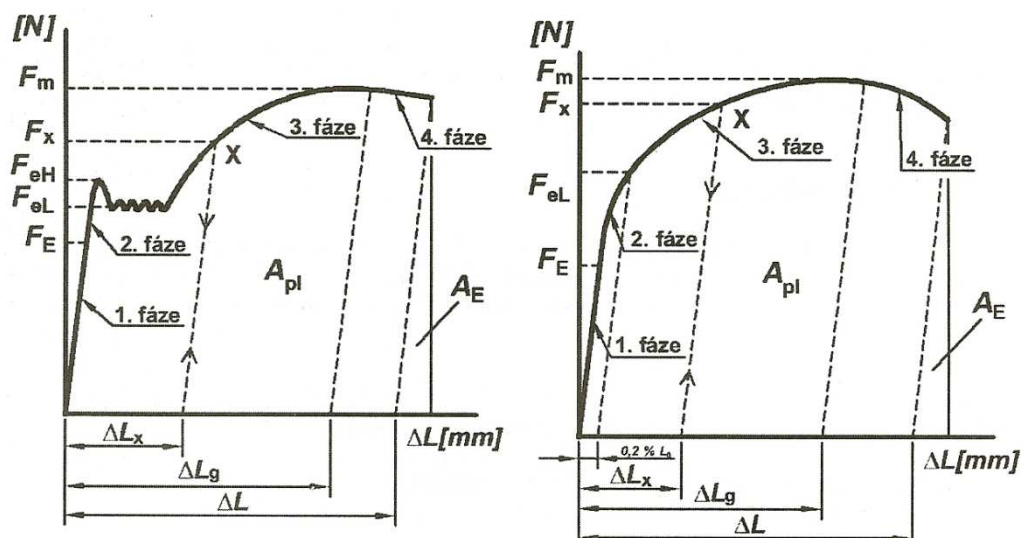
Pracovní diagramy rozdělujeme na dva základní typy:

1) Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu

- Hlavní použití pro nízkouhlíkové vyžíhané ocele.

2) Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu

- Používá se pouze pro vyžíhané uklidněné ocele.



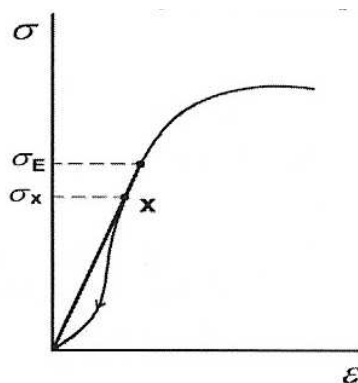
Obrázek 19: Pracovní diagram s výraznou a nevýraznou mezí kluzu

1. Fáze – oblast pružných deformací

Zkušební tyč je prodloužena přímo úměrně ke vzrůstající zatěžující síle, tudíž v grafu je první fáze zaznamenána jako přímka. V této fázi se zkušební tyč deformuje pouze pružně. Prodloužení ΔL po odlehčení zatěžující síly zmizí a zkušební tyč se vrátí zpět do původního tvaru.

Konec 1. fáze ohraničuje síla na mezi úměrnosti (elasticity) F_E . Síla se v běžných laboratořích nezjišťuje, protože je zde velmi pozvolný přechod přímkové části znázorňující oblast z pružné deformace do oblasti trvalých deformací.

V pružných a plastických deformacích se vyskytuje anelasticita neboli vnitřní útlum, který se projevuje při pozvolném odlehčování zkušební tyče. Projevuje se jako nelineární pokles síly vzhledem k jejímu prodloužení. V oblasti pružných plastických deformací je to znázorněno na obr. 20 a v oblasti plastických deformací je to znázorněno na obr. 21b. [1]



Obrázek 20: Anelasticita při odlehčení pod mezí úměrností [1]

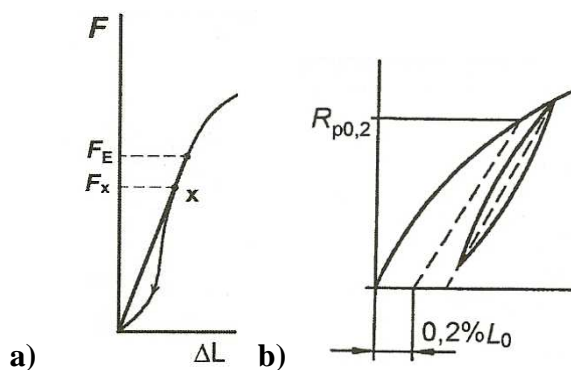
2. Fáze – oblast od meze úměrnosti k mezi kluzu

Konec 2. fáze je ohraničen silou, která se nazývá *síla na mezi kluzu*. Deformace tyče přestává být elastická a pokračuje dvěma způsoby.

Prvním způsob je dán, že zkušební tyč se začíná deformovat, ale už nelineárně se zatěžující silou, až do velikosti, kdy deformace pokračuje stejnou zatěžovací silou. Tato deformace začíná ukončovat 2. fázi, která je charakterizována pracovním diagramem s výraznou mezí kluzu. Zatěžovací síla, při které vznikne prodleva nebo zlom, se nazývá síla na výrazné mezi kluzu a označuje se F_e . U této síly se při větších rozdílech v úseku prodlevy rozlišuje síla na horní mezi kluzu F_{eH} , která se rovná nejvyšší zaznamenané síle prodlevy v oblasti Ludersovy deformace a síle na dolní mezi kluzu F_{eL} , která odpovídá nejnižší prodlevě. [1]

Druhý způsob je dán zkušební tyčí, která je plynule deformována nelineárně zatěžovací silou a následným přechodem do křivky rovnoměrné deformace. Tento způsob je charakterizován pracovním diagramem s nevýraznou mezí kluzu obr. 19. U toho to typu pracovního diagramu je 2. fáze ukončena dosažením smluvní trvalé deformace. Smluvní deformace je uváděna ve velikosti 0,2 % původní měřené délky zkušební tyče. Průsečík rovnoběžky s přímkovou částí diagramu ve vzdálenosti od počátku pracovního diagramu určuje smluvní sílu na mezi kluzu 0,2, která se označuje $F_{p0,2}$. [1]

V případě, že začátek diagram není dobře čitelný, postupuje se tak, že v bezpečné vzdálenosti nad předpokládanou mezí kluzu se zkušební tyč odlehčí a znovu se zatěhuje, tím vznikne hysterezní smyčka. Tečna, která je rovnoběžná se spojnicí konců hysterezní smyčky, určuje začátek pracovního diagramu a směr přímkového úseku pracovního diagramu, viz obr. 21 b.



Obrázek 21: Anelisticita při odlehčení a) Pod mezí úměrnosti b) Nad mezí kluzu [2]

3. Fáze – oblast rovnoměrných trvalých deformací

Třetí fáze v tahovém diagramu je oblast rovnoměrné (homogenní) deformace. Zde platí vztah mezi napětím a deformací. [1]

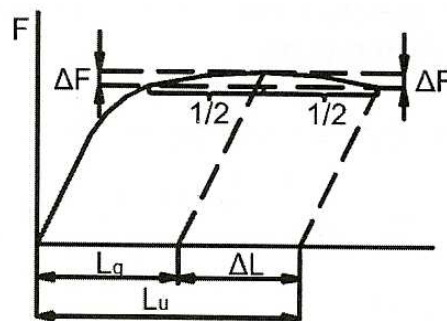
$$\sigma = k * \varphi^n = \frac{F}{S}$$

kde: k...materiálová konstanta
φ...skutečné prodloužení
n...exponent zpevnění [1]

Tato fáze je vyznačována tím, že zkušební tyč se při vzrůstajícím se zatížením nad mezí kluzu trvale deformuje a to především po celé své měřené délce, až do okamžiku, kdy začne začínat její pokles. Od tohoto okamžiku se na měřené délce v jednom místě začne zaškrcovat. Největší použité napětí, při této zkoušce se značí F_m . [1]

Tato oblast je označována jako oblast rovnoměrné (homogenní) deformace. V nanoměřítku lze tuto fázi z hlediska mikrostruktury brát jako rovnoměrnou, ale z hlediska mikrostruktury se trvalá deformace, v této oblasti děje značně nerovnoměrně (skokově). [3]

Tato trvalá deformace, která odpovídá konci 3. fáze, se nazývá největší rovnoměrné (homogenní) prodloužení ΔL_g . U plochého tvaru této oblasti pracovního diagramu se rovnoměrné největší prodloužení L_g se určuje jako středový bod. [2]



Obrázek 22: Určování prodloužení při maximálním zatížení [1]

V průběhu zatěžování zkušební tyče v této oblasti je možné kdykoliv růst zatěžovací síly zastavit a sílu odstranit, viz bod X na obr. 21. Při odlehčení síly v bodě X za mezí úměrnosti a kluzu odpruží tyč dle čáry rovnoběžně s přímkovou částí pracovního diagramu. Po celkovém odlehčení zkušební tyče je možné na tyči změřit délku tyče L_x . [1]

Trvalé prodloužení ΔL_X se vypočítá v kterémkoliv bodě pracovního diagramu a vypočte se od deformované délky L_X .

$$\Delta L_X = L_X - L_0 [mm]$$

kde: L_X ...Délka zkušební tyče po odlehčení [mm]

L_0 ...Počáteční měřená délka zkušební tyče [mm] [2]

Při novém měření, se zatěžování vrací stejnou cestou na stejné místo (na přerušenou část pracovního diagramu) a po dosažení síly F_X pracovní diagram pokračuje, jakoby odlehčení ani nebylo provedeno během měření. [1]

4. Fáze – oblast nerovnoměrných trvalých deformací

Po rovnoměrné deformaci přechází zkušební vzorek do oblasti 4. fáze. V oblasti nerovnoměrných trvalých deformací zatěžující síla klesá i při postupující deformaci. Na zkušební tyči se současně vytváří větší či menší zúžení průřezu, zaškrcení nebo – li tzv. krček.

V konečné fázi se už zkušební tyč v oblasti kolem krčku neprodlužuje. Na zkušební tyči v oblasti krčku nastává zužování. Zužování probíhá i při klesající síle, protože skutečné napětí v oblasti krčku stoupá v důsledku náhle se zmenšujícího průřezu tyče. Velikost a tvar zúžení je dobrým měřítkem odolnosti proti trojosému namáhání.

Tvar krčku je závislý na samotném zkoušeném materiálu a na průřezu zkušební tyče. U kruhových zkušebních tyčí bývá i v místě přetržení kruhový průřez. [1,2]



Obrázek 23: Zaškrcení kruhové tyče - krček [1]

Maximální trvalé prodloužení:

$$\Delta L_u = L_u - L_o [mm]$$

kde: L_u ... Délka s prodloužením [mm]

L_o ...Počáteční délka [mm]

6.3 Dynamické zkoušky

Pokud při dynamických zkouškách rostou zatěžující síly skokem, jedná se o namáhání rázové. Jestli se zatěžující síly opakovaně mění, jedná se o namáhání cyklické. [2]

6.3.1 Rázové zkoušky

S rychlostí zatěžování stoupá mez kluzu i mez pevnosti, přičemž mez kluzu roste rychleji než pevnost. Současně vzrůstá i odpor proti plastickému přetvoření. Při velké rychlosti deformace se i materiál, který se při statickém zatěžování chová jako houževnatý, poruší bez předchozí deformace, tj. křehkým lomem.

Pružné deformace se šíří v kovech takovou rychlostí, která je srovnatelná s rychlostí zvuku v daném kovu, kdežto trvalé deformace se šíří rychlostí nejvýše několika jednotek [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Takto specifické velikosti jsou pro každý kov a teplotu. Rozdělení napětí a deformace nejsou při rázu stejnosměrná. V místě nárazu je deformace větší než v místě protilehlém. Je – li pak rychlost rázového zatížení větší než rychlost šíření trvalé deformace, nestačí se odbourat místní špičky napětí a maršál se chová jako křehký. [1]

Rázová zkouška hodnotí odolnost materiálu proti vzniku křehkého lomu. Odolnost proti rázu není samostatnou vlastností materiálu, nýbrž je výslednicí řady současně působících jevů. Nelze ani obecně říci, že určitý materiál má nebo nemá odolnost proti rázům, protože je za určitých okolností ve stavu tvárném nebo křehkém. V prvním případě se poruší po větší nebo menší deformaci, ve druhém bez předchozí trvalé deformace. [2]

6.3.2 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Jako technologické zkušební zařízení se používá Charpyho kyvadlové kladivo, které přeráží zkušební tyč s vrubem odvráceným k místu dopadu kladiva. [2]

Rázová zkouška hodnotí odolnost materiálu proti vzniku křehkého lomu. Ta je vyhodnocována rázovou zkouškou v ohybu. Technologické zkoušky odolnosti proti rázu v krytu nebo v tahu mají jen omezený význam. [1]

Pro zkoušku rázem v ohybu se používají tyče. Tyče jsou používány převážně o základním rozměru 10 x 10 x 55 mm, které mají uprostřed své délky vrub. Používají se nejčastěji dva druhy vrubů a to buď do písmene V, nebo U. Ovšem, častěji se používají nejčastěji vruby ve tvaru V.

- V – vrub má úhel rozevření 45°, hloubku 2 mm a poloměr zaoblení vrubu 0,25 mm.
- U – vrub má hloubku 5 mm a poloměr zaoblení dna vrubu 1 mm a šířka vrubu je 2 mm. [1]

Energie spotřebovaná k přeražení zkušební tyče s vrubem slouží k výpočtu vrubové houževnatosti, která se udává v jednotkách [J/cm²].

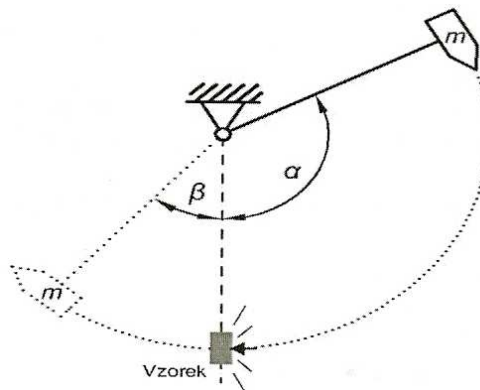
$$KCV = \frac{KV}{S} [J * cm^{-2}]$$

kde:

KCV Vrubová houževnatost

KV Energie spotřebovaná na přeražení tyče [J]

S Plocha tyče pod vrubem [cm²], [9]



Obrázek 24: Schéma Charpyho kladiva [1]

Zkoušky rázem v ohybu jsou využívány v řadě praktických případů a jsou standardizovány. Zjišťuje se, zda pro danou teplotu má materiál požadovanou úroveň houževnatosti, nebo se zjišťuje teplotní závislost houževnatosti, stanovují se tranzitní teploty. Jedná se zejména o následující oblasti použití:

- Kontrola kvality materiálu a výrobků
- Hodnocení náchylnosti konstrukcí vůči porušení křehkým lomem
- Optimalizace chemického složení, mechanického a tepelného zpracování
- Získání reálných mechanických vlastností [9]

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce je rozvržena na několik dílčích fází. Nejprve byly ze surového materiálu zhotoveny zkušební vzorky na požadované rozměry, poté byly tepelně zpracovány požadovanými technologiemi a nakonec degradovaly v solné mlze, kde byly po celou dobu degradačního procesu kontrolovány a byly prováděny záznamy jednotlivých technologií. Díky stanoveným časovým intervalům strávených v solné komoře a následně vzniklé korozní degradace byly provedeny destruktivní zkoušky na zkušebních vzorcích pro tahové a vrubové zkoušky. Poté bylo provedeno vyhodnocení a interpretace výsledků.

7.1 Zkoušený materiál

Jako zkoušeným materiálem byla vybrána ocel 42CrMo4. Tento materiál byl vybrán proto, poněvadž má velmi široké uplatnění pro své charakteristické vlastnosti. Materiál se především používá u velmi namáhaných strojních součástí, součástí motorových vozidel a dále se hodí k tepelnému zpracování, především je vhodný k povrchovému kalení. Ocel 42CrMo4 se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí, tyto dvě vlastnosti využijeme především u hřídelí a spojovacích součástí.

Chemické složení materiálu je deklarováno v tab. 1 a jeho mechanické vlastnosti dané výrobcem jsou uvedeny v tab. 2.

Tabulka 1: Chemické složení zkoušeného materiálu

Chemické složení oceli 42CrMo4									
Základní materiál	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]
	0,395	0,75	0,05	0,008	0,008	0,94	0,05	0,07	0,22

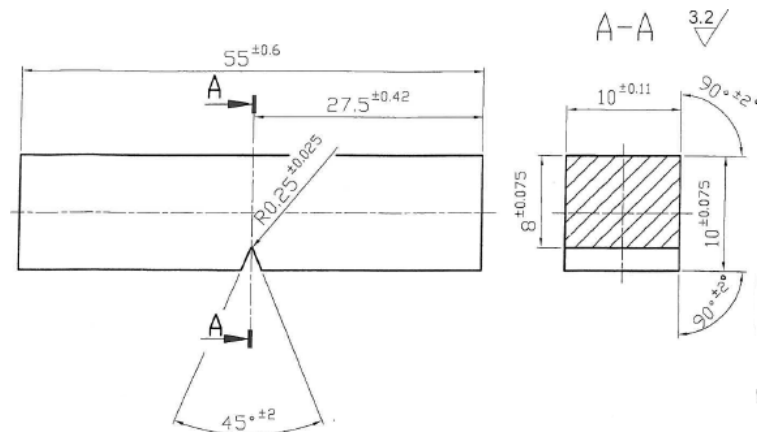
Tabulka 2: Mechanické zkoušky materiálu ocele 42CrMo4

Mechanické zkoušky oceli 42CrMo4	
Mez kluzu [MPa]	904
Pevnost [MPa]	958
Tažnost [%]	18,0

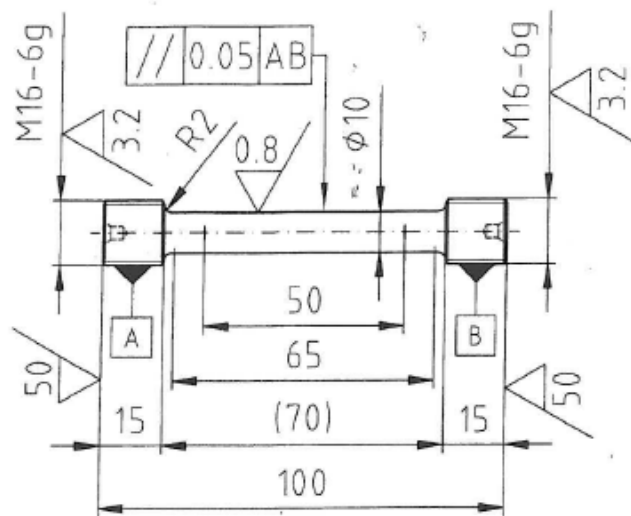
7.2 Příprava vzorků

Z ocelového materiálu určité jakosti byly vyhotoveny zkušební tělesa o předem stanovených rozměrech pomocí soustruhu, frézky a brusky předepsanými řeznými rychlostmi. Zkušební vzorky jak pro tahovou, tak pro vrubovou zkoušku byly vyhotoveny z jedné tavby konstrukční oceli 42CrMo4, aby nedošlo k milnému vyhodnocení zkušebních těles. Vybraná část zkušebních těles byla označena a následně tepelně zpracována.

Poté byla provedena jak tahová, tak rázová zkouška materiálu. Kde byla stanovena mez pevnosti v tahu a porovnána s jednotlivými druhy tepelného zpracování a na době strávené v solné komoře. Následně bylo provedeno porovnání, které tepelné zpracování nejvíce ovlivňuje samotnou degradaci materiálu v solné mlze u konstrukčních ocelí.



Obrázek 25: Výkresová dokumentace zkušebních vzorků pro vrubové zkoušky



Obrázek 26: Výkresová dokumentace zkušebních vzorků pro tahové zkoušky

Metrické závity na zkušebních tělesech pro tahovou zkoušku, byly vyhotoveny až po tepelném zpracování a po časových intervalech v solné komoře. Místa kde se měl vytvářet závit byla chráněna protikorozní ochranou. Jako protikorozní ochrana zde bylo plastické mazivo. Bylo tak provedeno z důvodu působení koroze na povrch materiálu. Tím se zabránilo případnému znehodnocení zkušebního tělesa (metrického závitu) a nedošlo tak k degradaci metrického závitu a tím k neuskutečnění případné tahové zkoušky.

7.2.1 Značení jednotlivých zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly označeny dle dané technologie tepelného zpracování, aby nedošlo k jejich zaměnění a následnému špatnému vyhodnocení. Vzorky byly označovány tak, aby označení nebylo ve styku s podporami, opěrami, nebo v místě, kde dochází k měřené zkoušce plastické deformace a kde by mohlo dojít k následnému ovlivnění zkoušek.

Označení zkušebních těles podle použití tepelného zpracování:

- 1 – Zkušební vzorek bez tepelného zpracování (etalon)
- 2 – Zkušební vzorek, u kterého došlo k zakalení a následnému popuštění
- 3 – Zkušební vzorek, u kterého bylo provedeno normalizační žíhání
- 4 – Zkušební vzorek, u kterého bylo provedeno žíhání na měkko

Tohle značení platí jak při zkoušce rázové, tak při tahové zkoušce. K odpovídající číslci je přiřazena odpovídající tepelné zpracování.

7.2.1.1 Značení zkušebních vzorků – vrubová zkouška

Zkušební vzorky na vrubovou zkoušku byly označeny na jedné straně, která nepřiléhá a ani se nedotýká opěr, v kterých je materiál upnut. Při označování byl materiál na rovnoměrné podložce, aby nedošlo k deformaci materiálu při označování.



Obrázek 27: Označení jednotlivých vrubových vzorků dle tepelného zpracování

7.2.1.2 Značení zkušebních vzorků – tahová zkouška

Zkušební vzorky na tahovou zkoušku byly označeny na čelech zkušebních vzorků. Čela zkušebních vzorků zůstanou beze změny i po provedení tahové zkoušky, tudíž nám značení nezmizí a rozeznáme vzorek i později.



Obrázek 28: Označení zkušebních tyčí na tahovou zkoušku

7.3 Tepelné zpracování připravených zkušebních těles

Pro tepelné zpracování zkušebních těles byla použita muflová pec (Obr. 29). Muflová pec byla postupně nastavena na předepsané teploty. Teploty byly nastaveny na úkor vybraného tepelného zpracování, tudíž pro daný způsob tepelného zpracování je dána teplota a požadovaný čas strávený na teplotě. Do muflové pece byly vkládány a vydělávány zkoušené vzorky pomocí kovových kleští. Některé typy vzorků byly po uplynutí časového intervalu na požadované teplotě ponechány v peci až do druhého dne. Tím to ponecháním zkušebních vzorků v muflové peci bylo zajištěno postupné chladnutí, až na okolní teplotu a tím i správné provedení tepelného zpracování. Jiná série vzorků byla, ihned po dodržení času na příslušné teplotě vydělána a postupně se samovolně ochlazovala na okolní teplotu. Další série zkušebních těles byla ihned po uplynutí časového intervalu na teplotě chlazena do oleje, aby bylo zajištěno správné provedení tepelného zpracování.



Obrázek 29: Muflová pec [20]

Muflová pec je složena ze dvou částí. Ze spodní a horní části. Ve spodní části pece je umístěno ovládání a řízení samotné pece. Horní část muflové pece je složena z keramické mufle s topným vinutím a tepelnou izolací. Samotná teplota v peci je řízena pomocí termočlánku, který řídí programovatelný regulátor pomocí výkonového stupně s triakem.

Specifické vlastnosti pece:

Tabulka 3: Technické parametry [LABO]

Max. teplota	1 250	[°C]
Objem	5	[l]
Příkon	2 100	[W]
Napětí	230	[V]
Hmotnost	27	[kg]
Vnitřní objem	5	[dm ³]
Rozměry pece (v × š × hl)	490 × 400 × 525	[mm]
Pracovní prostor (v × š × hl)	95 × 170 × 290	[mm]

7.3.1 Etalon – 1

Zkušební těleso označené symbolem číslo 1 je etalon. Etalon je zkušební výchozí těleso, které nebylo ovlivněné žádným tepelným zpracováním. Bylo pouze vyrobeno na

strojích (soustruh, frézka) předepsanými řeznými rychlostmi, aby nedošlo k ovlivnění zkoušky.



Obrázek 30: Zkušební těleso bez tepelného zpracování

7.3.2 Kalení a následné popouštění – 2

Symbol číslo 2 vyražený na zkušebních tělesech pro rázové, tak pro vrubové zkoušky nám udává, že se jedná o zkušební tělesa, která jsou tepelně zpracována nejprve na kalící teplotu a následně jsou popouštěni na popouštěcí teplotu.



Obrázek 31: Zkušební těleso kalené a následně popouštěné

V tab. 4 jsou uvedeny teploty a časové intervaly, které byly použity při tepelném zpracování.

Tabulka 4: Použité teploty a časové intervaly

	Teplota tepelného zpracování [°C]	Čas tepelného zpracování [min]
Kalení	880	20
Popouštění	620	20

Zkušební vzorky byly kaleny na teplotu 880 °C. Následkem tohoto kalení byla transformace austenitu na perlit. Po kalení nenásledovalo rychlé ochlazování, poněvadž nebylo úkolem zbytkový austenit přeměnit na martenzitickou strukturu, čímž by došlo ještě k větší pevnosti a tvrdosti zakalené oceli. Naopak bylo po zvolném vychladnutí provedeno popouštění, kde bylo zapříčiněno popouštění na popouštěcí teplotu. Po dodržení teplotních rozsahů při popouštění byly sníženy celkové pevnostní vlastnosti, ale zvýšila se houževnatost a plasticita oceli.

7.3.3 Normalizační žíhání – 3

Normalizační žíhání je použito u zkušebních těles, která jsou označena číslem 3. Normalizačně žíhané zkušební vzorky jsou proto, abychom výrazně odlišili změnu

struktury materiálu. A poté následně porovnaly odlišnosti od výchozího vzorku (etalonu).



Obrázek 32: Zkušební těleso normalizačně žíhání

Tabulka 5: Použitá teplota a časový interval

	Teplota tepelného zpracování [°C]	Čas tepelného zpracování [min]
Norm. žíhání	880	20

U normalizačního žíhání probíhá ohřev do oblasti austenitu s následným pozvolným ochlazením na vzduchu. Toto tepelné zpracování nám ovlivňuje především strukturu materiálu a to tak, že se postupně vytváří rovnoměrná a jemná struktura materiálu. Jemnější struktura materiálu zajišťuje zvýšení meze kluzu i meze pevnosti zkušebních těles, které dochází při následném zkoušení na destruktivních zkouškách.

7.3.4 Žíhání na měkko – 4

Raznicí číslo 4 jsou značeny zkušební vzorky, které jsou žíhány na měkko. Žíhání na měkko je zde použito proto, abychom získali zcela jinou strukturu materiálu oproti zkušebnímu vzorku číslo 1 (etalonu).



Obrázek 33: Zkušební těleso žíhané na měkko

Tabulka 6: Použitá teplota a časový interval

	Teplota tepelného zpracování [°C]	Čas tepelného zpracování [min]
Žíhání na měkko	700	20

Při tomto zpracování probíhá ohřívání oceli v okolí teplot perlitických přeměn s pozvolným chladnutím. Tím je dosaženo přeměny laminárního perlitu na zrnitý perlit, čímž materiál zbavíme celkového pnutí a tvrdosti materiálu. Naopak v materiálu vznikne dokonalá měkkost a houževnatost, kterou dojde ke zlepšení obrobitelnosti.

7.4 Hodnocení fázových struktur testovaného materiálu

Po vyrobení zkušebních těles byly z tepelně zpracovaného materiálu připraveny metalografické výbrusy. Výbrusy byly vyhotoveny u všech třech tepelných zpracování a materiálu dodaného přímo z válcoven. Výbrusy byly vyhotoveny především proto, abychom zjistili jakou má materiál strukturu před i po tepelném zpracování. Dále také jestli se v materiálu nenachází nějaká vada (trhlina).

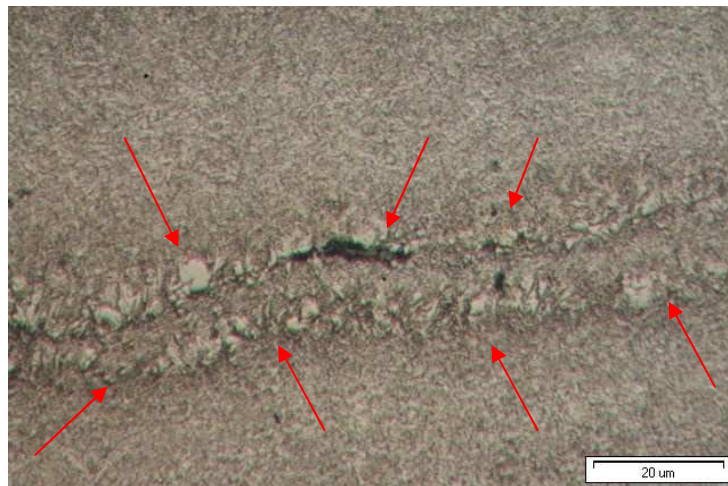
Vzorky pro metalografické snímky byly vytvořeny ze stejné tavby, ze které byly vyrobeny zkušební tělesa jak pro zkoušku tahovou, tak zkoušku vrubovou.

Veškeré metalografické snímky byly vytvořeny na metalografickém mikroskopu Neophot 21.

7.4.1 Snímky tepelně ovlivněných struktur

- **Etalon**

Základní materiál dodaný z válcoven vykazuje jemnozrnnou perliticko-feritickou strukturu, která je typická pro ocel s vyšším podílem legujících prvků. Na základě metalografického preparátu lze ovšem konstatovat i značné vady při technologii válcování. Jedná se především o zavaleninu oxidu železa viz Obr. 34. Tvar i směr nehomogenity spolu se silným oduhličením v jejím okolí svědčí o vadě materiálu, kdy zaválcovaná okuj reaguje s okolním uhlíkem v oceli a tím vznikají částice čistého feritu.



Obrázek 34: Snímek etalonu

- **Kalení a následné popouštění**

Na základě chemického složení byla pro tento druh tepelného zpracování stanovena austenitizační teplota na hodnotu 880 °C. Časová prodleva austenitizace byla stanovena dle hmotnosti jednotlivých vzorků na 20 minut. Ochlazení bylo stanoveno dle technických listů do vody s teplotou cca 20 °C.

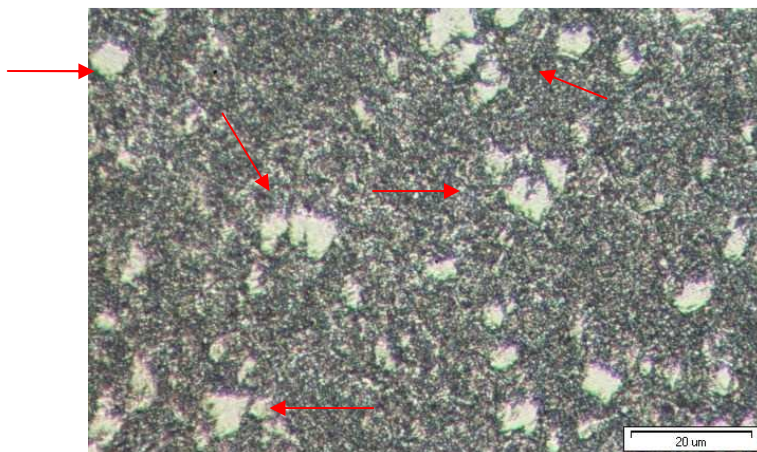


Obrázek 35: Snímek kalené a následně popouštěné oceli

Podle metalografických výbrusů lze charakterizovat jemně rozptýlené karbidy v základní kovové hmotě. Souvislá karbidická síť na hranicích zrn sorbitu je orientována ve směru martenzitických jehlic. Jelikož se na vzorku vyskytují i světlá místa orientovaných lesklých faset, lze usuzovat i na částečné množství zbytkového austenitu. Pro jednoznačnou identifikaci by ovšem bylo nutné provést identifikaci na rastrovacím elektronovém mikroskopu.

- **Normalizačně žháno**

V technické praxi je toto tepelné zpracování využíváno pro zlepšení mechanických vlastností strojních součástí. Oblast austenitizace byla posunuta na hodnotu 890 °C, což je dostatečná hodnota pro rozpuštění veškerého množství legujících prvků i uhlíku v dané oceli a tvorbu pouze austenitického zrna. Jelikož hmotnost byla do 0,2 kg, byl stanoven teplotní spád na přirozený průběh okolního prostředí (nebyl využit proud tlakového vzduchu pro rychlejší ochlazení prvků).

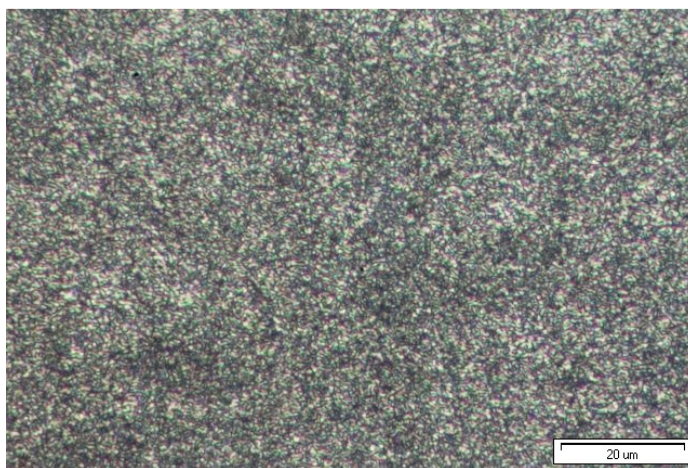


Obrázek 36: Snímek normalizačně žíhané oceli

Na základě metalografických výbrusů, lze ovšem konstatovat, že rychlost ochlazování měla být dimenzována s větším teplotním spádem. Dle Obr. 36 jsou patrné hrubé karbidy, které přesahují hodnotu 5 μ m. To je dáno pomalým ochlazením z austenitické struktury. Kovová matrice zůstává sorbitická.

- **Žíhání na měkko**

Toto tepelné zpracování je zařazeno pro zlepšení obrobiteľnosti i ustálení vnitřních pnutí po mechanickém, chemickém i tepelném zpracování. Počáteční hodnota byla zvolena na 700 °C, po které následovalo pozvolné chladnutí v laboratorní peci. Výslednou strukturu po tomto tepelném zpracování lze charakterizovat jako vysoce jemnozrnnou perliticko – feritickou, která se vyznačuje značnou houževnatostí základní kovové matrice. Pevnost zajišťuje značná disperzita perlitu, kdy jednotlivé lamely plynule přecházejí v celistvou strukturu. Jelikož z tohoto důvodu dochází k oduhličení okolního prostředí lze pozorovat tvorbu feritického zrna.



Obrázek 37: Snímek oceli žíhané na měkko

7.5 Korozní degradace v solné mlze

Po tepelném zpracování zkušebních vzorků byl daný počet zkušebních vzorků umístěn do solné komory. V solné komoře byly, zkušební tělesa podrobeny korozní zkoušce v umělé atmosféře. Korozní zkouška v neutrální solné mlze podle normy EN ISO 9227, ve které se pojednává o stanovení přístroje, chemikálie a daný postup korozní zkoušky v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného, kterou se získá protikorozní odolnost kovových materiálů. Zkouška probíhá rozprašováním roztoku chloridu sodného ve zkušební komoře. V komoře musí být teplota $35\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Roztok chloridu sodného má koncentraci $50\text{ g/l} \pm 5\text{ g/l}$ a hodnota roztoku pH je 6,5 až 7,2.

Jak tahové, tak rázové zkušební vzorky, byly připevněny na závěsné tyči. Zkušební vzorky na tahové zkoušky byly v komoře umístěny pomocí motouzu, aby nedocházelo k ovlivnění zkoušky a rázové zkušební vzorky byly v solné komoře zavěšeny na drátu, na kterém byla nanášena tenká vrstva PVC, tím pádem také nedochází k ovlivnění vzorků.

Solná mlha na zkušební tělesa působila v určitých časových intervalech. Solná mlha postupně napadala povrch zkoušeného materiálu. Zkušební tělesa nebyly opatřeny žádnou protikorozní ochranou, aby bylo zjištěno, která metoda z tepelného zpracování nejvíce odolává působení koroze na zkušební tělesa. Na povrchu materiálu se po pár dnech v solné komoře začala projevovat koroze. Povrch materiálu byl postupně degradován a materiál byl napadán převážně rovnoměrnou korozi.

Z reakce solné mlhy na zkušební tělesa můžeme vidět postupné působení koroze na materiál v závislosti na strávených dnech v solné komoře. Průběh koroze je velmi ovlivněn tepelným zpracováním zkušebních těles.

Zkušební vzorky umístěné v solné komoře byly postupně vydělávány. Byly vydělávány podle strávené doby a to po uběhnutí 30, 60 a 90 dnů. Po postupném odebrání vzorků probíhaly zkoušky a po posledním odběru a laboratorních zkouškách zkoušených materiálů následovalo hodnocení výsledků.

7.5.1 Úbytek hmotnosti materiálu

Úbytek hmotnosti zkušebních vzorků byl zapříčiněn dobou, po kterou byly umístěny v solné komoře a postupně degradovaly. Dalším aspektem rychlosti úbytku hmotnosti je dán danou metodou tepelného zpracování materiálu. Průměrné hmotnostní hodnoty jsou obsaženy v tab. 7.

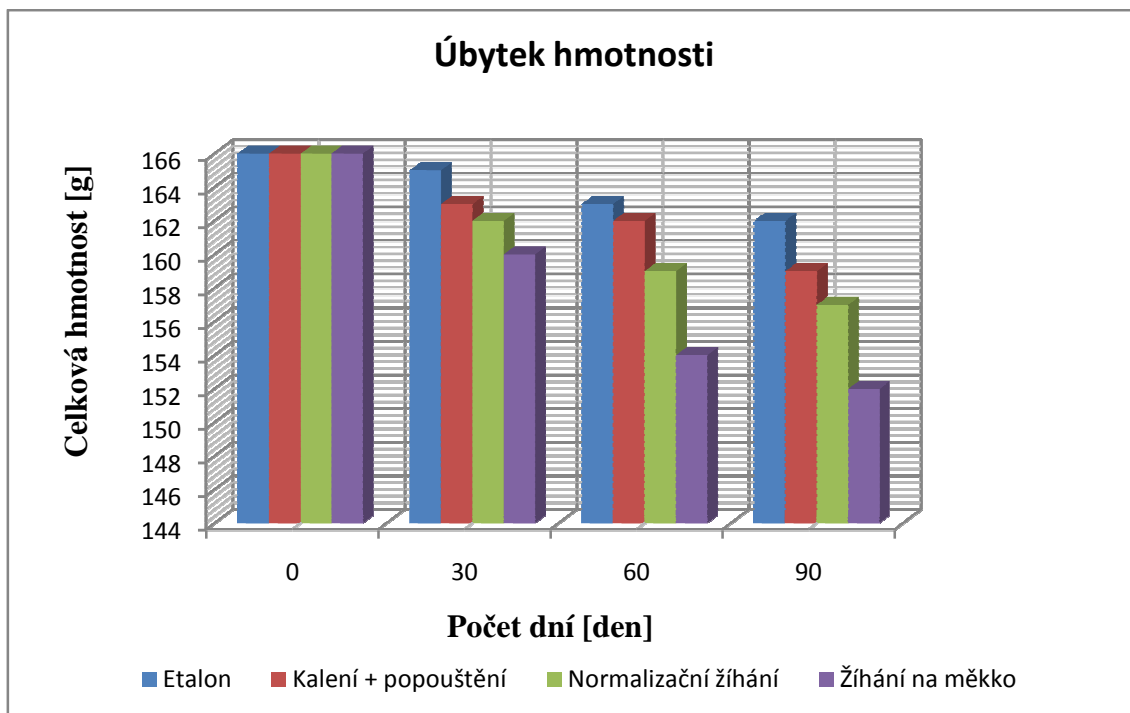
Tabulka 7: Úbytek hmotnosti zkušebních vzorků

Tepelné zpracování	Počet dní	Tahová zkouška	Vrubová zkouška
		Hmotnost [g]	Hmotnost [g]
Bez tepelného zpracování	0	82	42
	30	81	42
	60	81	41
	90	80	41
Kalení a následné popouštění	0	82	42
	30	81	41
	60	80	41
	90	79	40
Normalizační žihání	0	82	42
	30	80	41
	60	79	40
	90	79	39
Žihání na měkko	0	82	42
	30	80	40
	60	78	38
	90	77	37,5

Základní vyhotovené zkušební těleso pro tahovou zkoušku mělo hmotnost 82 g, pro vrubovou zkoušku mělo hmotnost 42 g. V příložené tab. 7 můžeme názorně vidět, že každá metoda tepelného ovlivnění reagovala jinak na solnou mlhu. Z důvodu maximálního časového intervalu 90 dní je u některé z metod pouhý nepatrný rozdíl jen v jednotkách gramů.

Úbytek hmotnosti materiálu je znázorněn v grafu, kde můžeme zjistit, které tepelné zpracování má větší odolnost vůči degradaci materiálu v solné komoře. Úbytek hmotnosti má klesající tendenci jak u etalonu, tak u všech použitých tepelných zpracování. Hmotnostní rozdíl není moc zásadní, poněvadž použitá tepelná zpracování odolávají korozi v časových intervalech 30, 60 a 90 dní dobře. Největší hmotností

úbytek rozdílu v hmotnosti materiálu byl u žíhání na měkko, dále u normalizačního žíhání, po té následovalo kalení a následné popouštění a nejvíce odolával etalon, kde došlo k nejmenšímu úbytku hmotnosti a tím i k nejmenší degradaci z použitých tepelných zpracování.



Obrázek 38: Úbytek hmotnosti

U všech zkoušených struktur materiálu byl celkový hmotnostní úbytek materiálu v řádech desítek gramů. U výchozího zkoušeného materiálu (etalonu) byl celkový úbytek 8 g, což je asi 4,8 % z celkové hmotnosti materiálu.

U materiálu, který byl nejdříve kalen a poté následně popouštěn došlo k celkovému úbytku materiálu na celkových 14 g, což je 8,4 % z celkové hmotnosti materiálu.

Normalizačně žíhaný materiál byl druhý nejméně odolný solné mlze. U normalizačně žíhaného materiálu došlo k celkovému úbytku materiálu 20 g. Tento úbytek materiálu byl 12,1 % z celkové hmotnosti materiálu.

Nejméně odolným tepelným zpracování proti degradaci materiálu byl materiál, který byl žíhán na měkko a vystaven solné mlze. Toto tepelné zpracování se projevilo jako nejméně vhodné. Zde došlo k celkovému úbytku materiálu až na 32 g z celkové hmotnosti je to 19,3 %.

7.6 Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky probíhaly ve zkušební laboratoři. V laboratoři probíhaly jak tahové, tak vrubové zkoušky. Zkoušky byly prováděny za okolní teploty. Teplota v laboratoři byla 20 °C. U destruktivních zkoušek je rozdíl už větší než u úbytku napětí. Časové intervaly 30, 60 a 90 dní výrazně ovlivňovaly jednotlivé vlastnosti u destruktivních zkoušek.

7.6.1 Zkouška tahová

Všechny tahové zkoušky byly provedeny laboratorním přístrojem, viz obr. 39. Laboratorní univerzální trhací stroj LabTest 5.200 SP1 je digitální elektromechanický stroj, který má rozsah od 0 do 200 kN. Používá systém měření podle ČSN EN 7500-1, dále podporuje normy ČSN, DIN, EN, ISO, ASTM, GOST. Rozsah jeho měření je od 0,4 % od 100 % rozsahu snímače. Rozlišení polohy příčnicku je 1 µm. Všechny záznamy v průběhu zkoušky se ukládají na pevný disk do počítače, kde byly následně vyhodnoceny a interpretovány.



Obrázek 39: Zkušební univerzální trhací stroj LabTest 5.200SP1

7.6.1.1 *Tahové zkoušky materiálu*

Zkušební tahová zkouška byla provedena na univerzálním trhacím stroji Lab Test 5.200 SP1. Každé tahové zkušební těleso určené k tahové zkoušce bylo našroubováno do čelistí umístěných na příčnících pomocí závitů $M16 \times 2$. Po umístění zkušebních vzorků byla provedena tahová zkouška, tím došlo k přetržení zkušebního tělesa a získání důležitých informací získané během zkoušky.



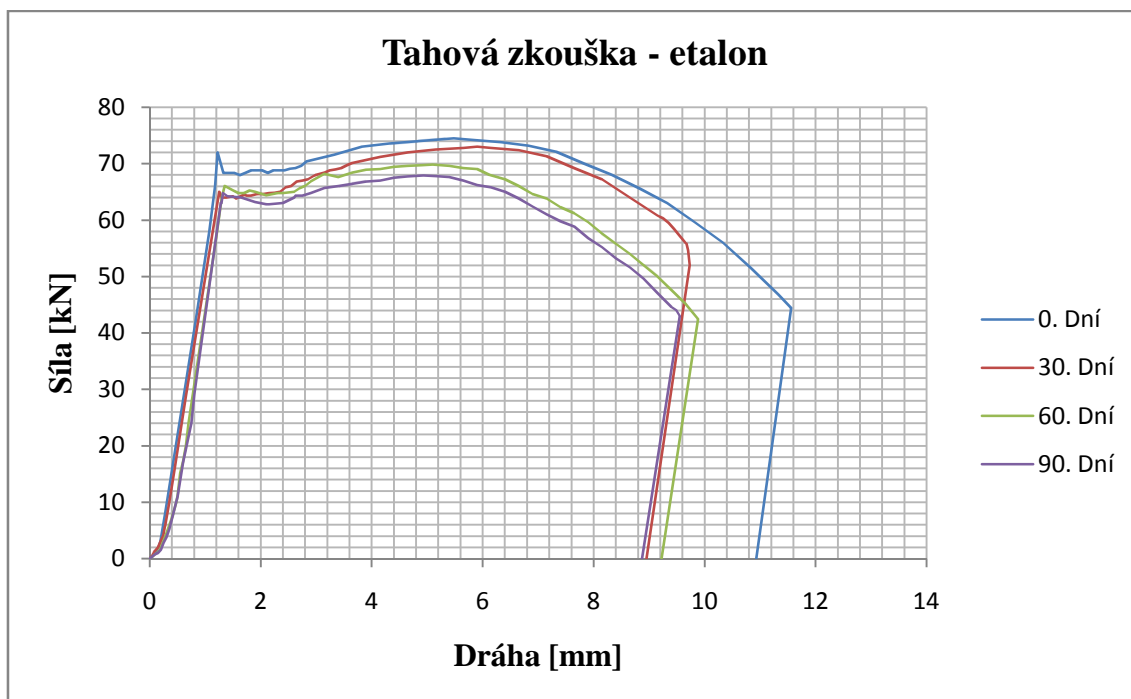
Obrázek 40: Uchycení zkušebního tělesa

Na obr. 40 můžeme vidět, jak je zkušební těleso uchyceno do pohyblivého a nepohyblivého příčnících. Při tahové zkoušce se horní příčník posouvá směrem nahoru. Příčník na zkušební těleso působí silou a těleso je postupně namáháno. Během působení síly se do počítače zaznamenává mez pevnosti v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce daného materiálu. Pomocí těchto výsledných dat se sestaví tahový diagram, kde je vše názorně zobrazeno.

Je důležité, aby každé vyhodnocení těchto zkoušek proběhlo ze tří naměřených hodnot. To znamená, že jde o aritmetický průměr hodnot získaných během měření. Pokud by se měření skládalo pouze z jednoho měření zkušební tahové tyčinky a ne ze tří, bylo by měření nevěrohodné, především kvůli velké odchylce naměřených hodnot.

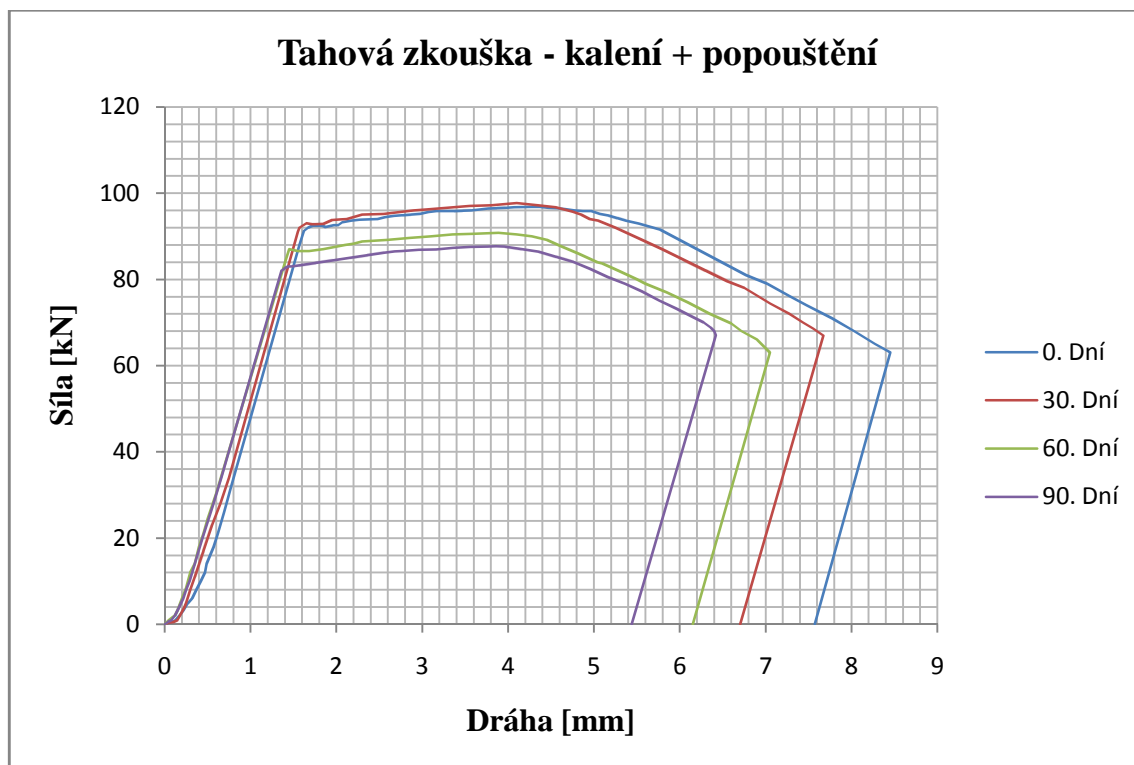
7.6.1.1.1 Výsledky tahových zkoušek

- Zkouška tahová - etalon



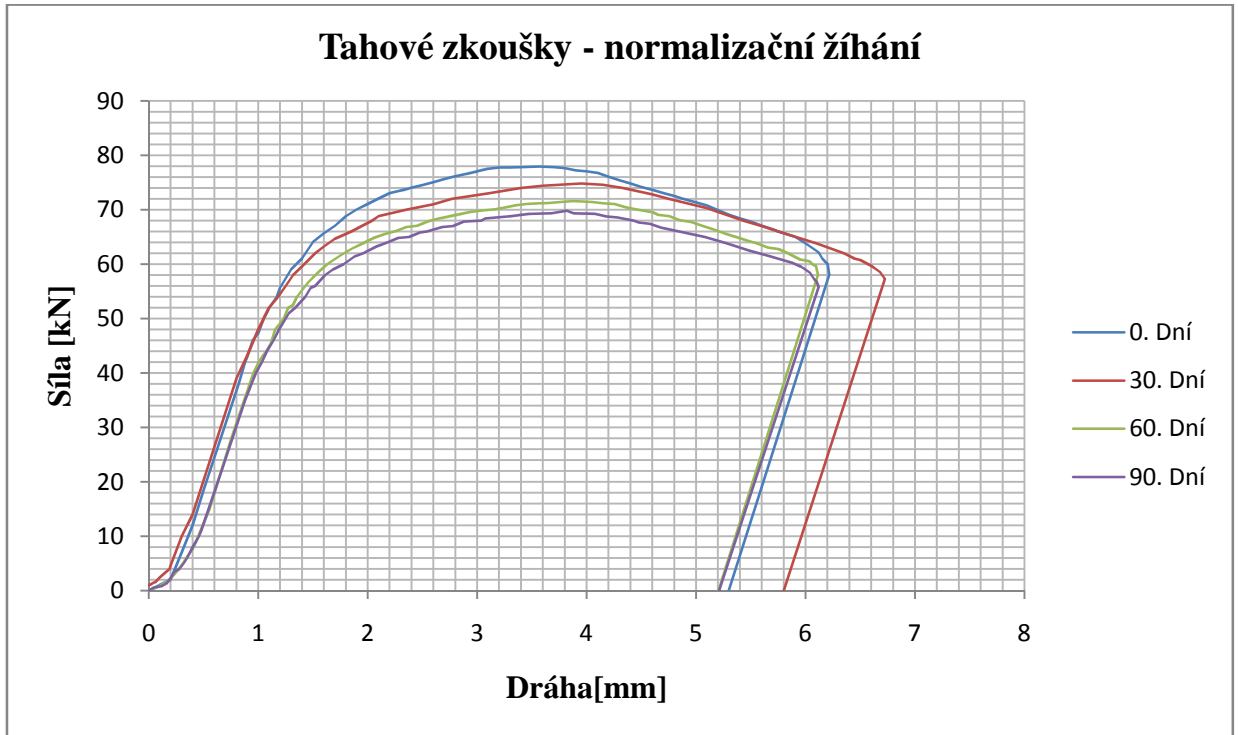
Obrázek 41: Tahová zkouška – etalon

- Zkouška tahová – kalení a následné popouštění



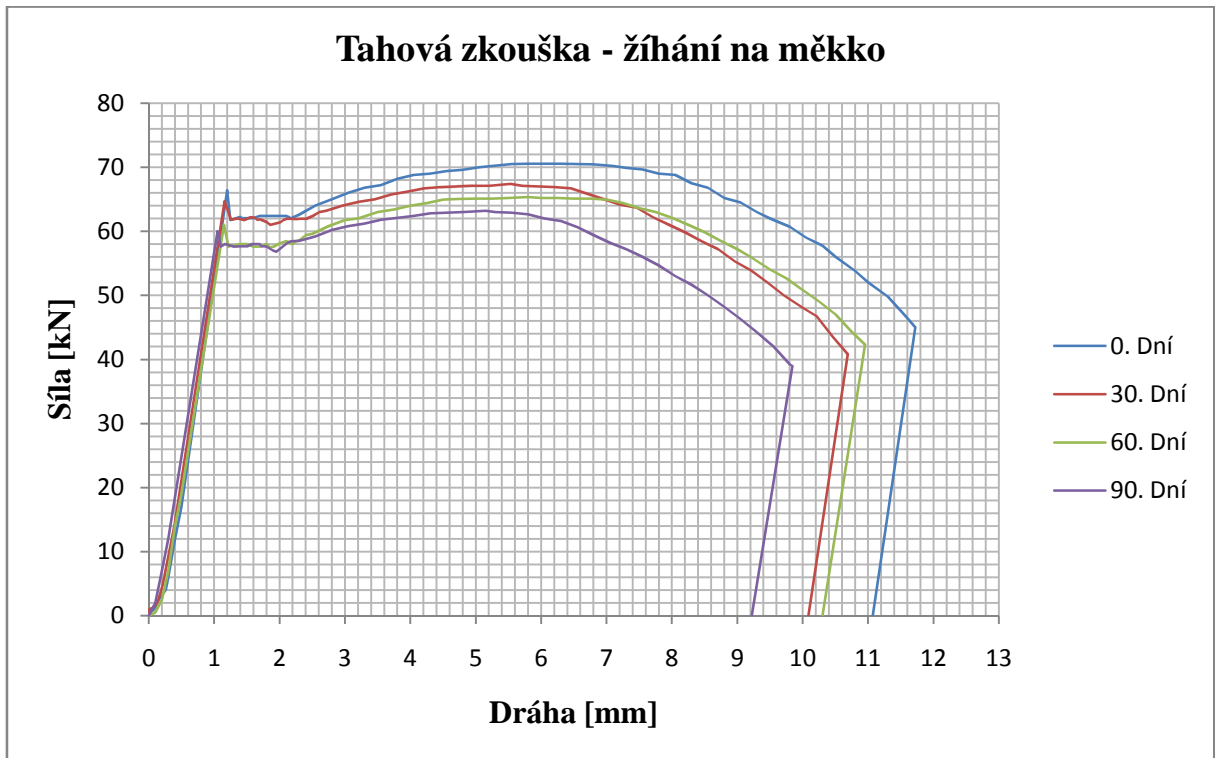
Obrázek 42: Tahová zkouška - kalení + popouštění

- Zkouška tahová – normalizační žíhání



Obrázek 43: Zkouška tahová - normalizační žíhání

- Zkouška tahová – žíhání na měkko



Obrázek 44: Zkouška tahová - žíhání na měkko

7.6.1.2 Výsledky tahových zkoušek

Získané informace z tahových zkoušek byly zaznamenány do následujících tabulek a následně vyhodnoceny v další kapitole.

Tabulka 8: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - etalon

42CrMo4 – Bez tepelného zpracování					
Vzorek číslo	1	2	3	4	
Doba vystavení v solné mlze [den]	0	30	60	90	
Získané a zpracované hodnoty	Pevnost Rm [MPa]	945	923	887	865
	Mez kluzu [Mpa]	870	813	834	818
	Tažnost [%]	20	16,4	16,7	16,2
	Kontrakce [%]	65	54	65	66
	Prodloužení [mm]	10,87	8,935	9,22	8,86

Tabulka 9: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Kalení + popouštění

42CrMo4 – Kalení a následné popouštění					
Vzorek číslo	1	2	3	4	
Doba vystavení v solné mlze [den]	0	30	60	90	
Získané a zpracované hodnoty	Pevnost Rm [MPa]	1 227	1 239	1 154	1 111
	Mez kluzu [Mpa]	1 175	1 181	1 103	1 058
	Tažnost [%]	13,4	11,8	11,1	9,9
	Kontrakce [%]	55	52	51	47
	Prodloužení [mm]	7,545	6,7	6,15	5,44

Tabulka 10: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Normalizační žíhání

42CrMo4 – Normalizační žíhání					
Vzorek číslo	1	2	3	4	
Doba vystavení v solné mlze [den]	0	30	60	90	
Získané a zpracované hodnoty	Pevnost Rm [MPa]	993	949	907	882
	Mez kluzu [Mpa]	690	663	634	612
	Tažnost [%]	9,4	10,4	9,2	9,3
	Kontrakce [%]	44	44	43	42
	Prodloužení [mm]	5,28	5,8	5,18	5

Tabulka 11: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Žíhání na měkko

42CrMo4 – Žíhání na měkko					
Vzorek číslo	1	2	3	4	
Doba vystavení v solné mlze [den]	0	30	60	90	
Získané a zpracované hodnoty	Pevnost Rm [MPa]	896	856	833	802
	Mez kluzu [Mpa]	788	783	733	734
	Tažnost [%]	20,5	18,5	19,3	17,4
	Kontrakce [%]	63	66	65	68
	Prodloužení [mm]	11,02	10,1	10,3	9,22

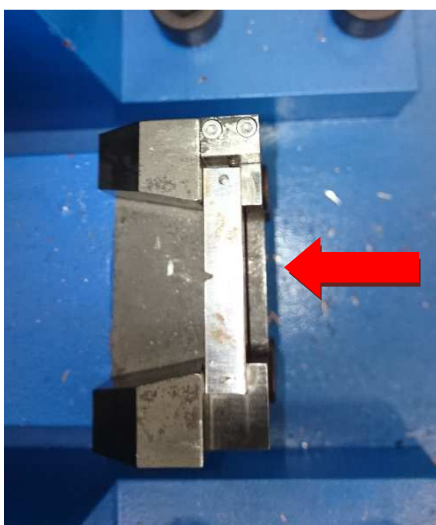
7.6.2 Zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti probíhala pomocí metody Charpy. Zkoušky probíhaly ihned po vydělávání vzorků ze solné komory. Zkoušky byly prováděny po důkladném očištění rázových zkušebních těles od koroze. Zkoušky probíhaly na Charpyho kladivě LabTest CHK 300J a následně byly vyhodnoceny.



Obrázek 45: Charpyho kladivo Lab Test CHK 300 J

Na obr. 46 je k uchopení vzorků pro vrubové zkoušky. Zkušební tělesa o rozměrech $10 \times 10 \times 55$ mm byly očištěny a uchopeny do stroje.

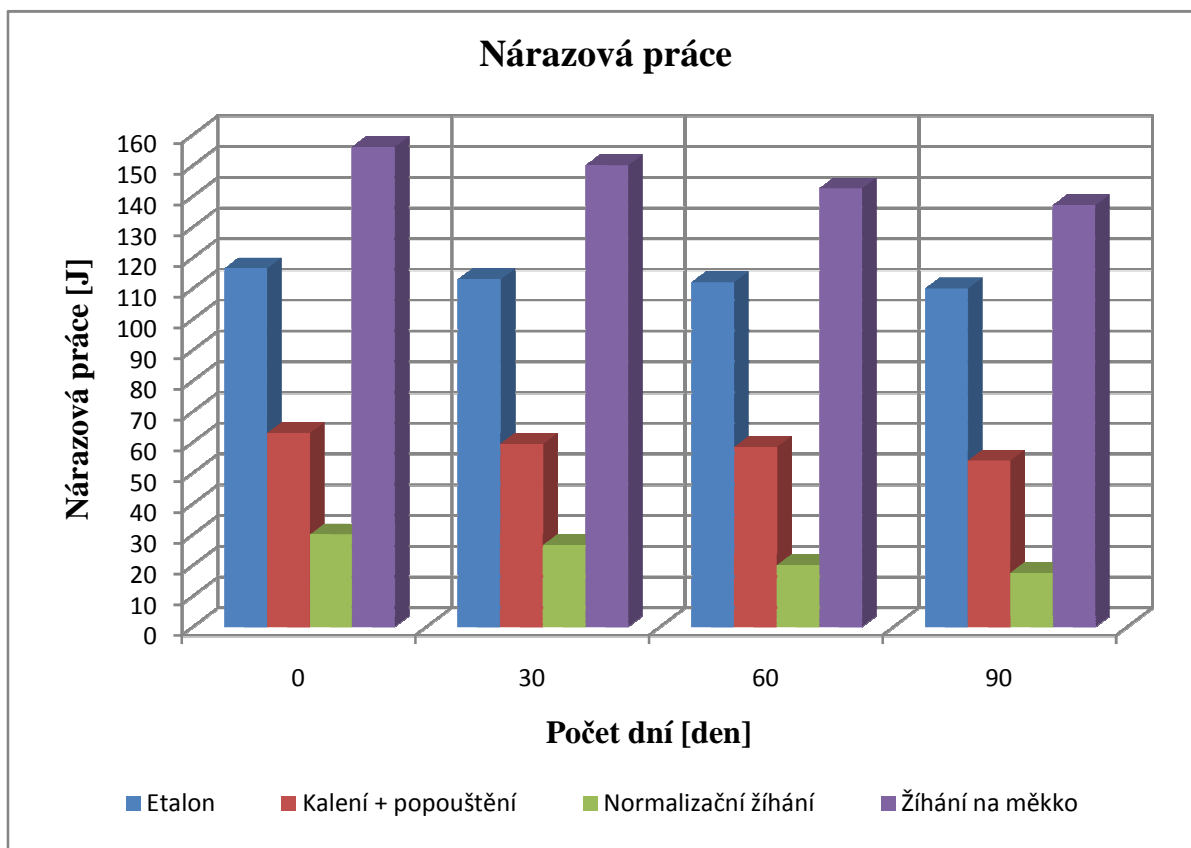


Obrázek 46: Uchopení zkušebního tělesa

Červená šipka znázorňuje pohyb kladiva. Při samovolném pohybu kladiva nastává náraz kladiva na vzorek, tím dojde k přeražení vzorku a zaznamenání potřebné síly.

Síla potřebná k přeražení je zaznamenána do počítače. Při přeražení zkušební tělesa počítač zaznamená, jaká byla potřebná nárazová práce a vrubová houževnatost. Tyto získané informace se uloží do počítače, který je připojen k Charpyho stroji.

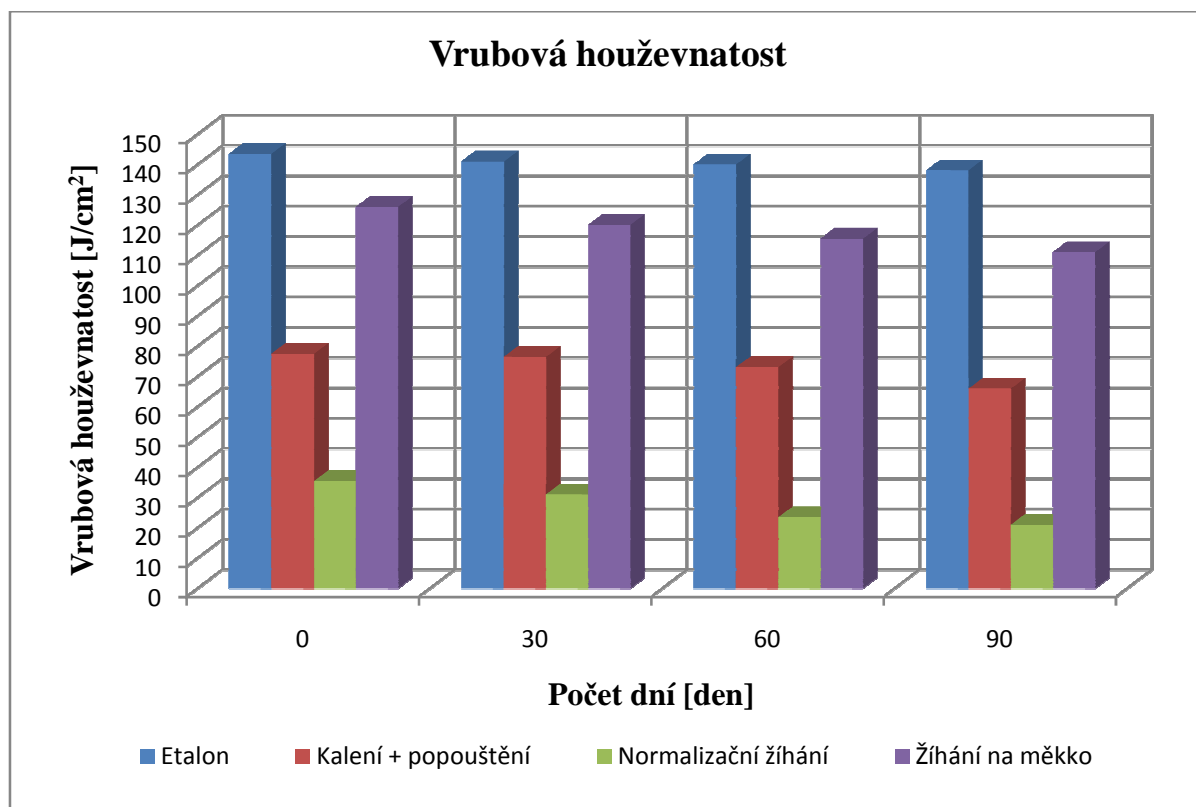
V přiložených grafech nárazové práce a vrubové houževnatosti je zjištěno, že u všech použitých technologií je zjištěna opět klesající tendence jako u tahových zkoušek. S tím rozdílem, že každá technologie tepelného zpracování má jiné vlastnosti a tím i jinou potřebnou nárazovou práci k přeražení.



Obrázek 47: Nárazová práce

Z přiloženého grafu vyplývá, že největší potřebná nárazová práce byla u materiálu, který byl tepelně ovlivněn a to žíháním na měkko. U žíhání na měkko dále platí to, že je zde největší rozptyl nárazové práce. To znamená, že zde je největší rozdíl ve velikosti nárazové práce potřebné k přeražení materiálu.

Vrubová houževnatost materiálu je též získána pomocí Charpyho kladiva. V příloženém grafu je vidět, že největší vrubová houževnatost byla u materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Je zde také názorně vidět, že materiál, kde byla největší vrubová houževnatost došlo, ke změně pouze o pár jednotek ke snížení i po časových intervalech strávených v solné komoře.



Obrázek 48: Vrubová houževnatost

Je zde patrné, že u oceli 42CrMo4 bez tepelného zpracování došlo jak u nárazové práce, tak u vrubové houževnatosti ke snížení o pár jednotek před vložením do solné komory. Po dodržení časových intervalů byla opět klesající tendence, ale pouze v řádech jednotek.

V příložené tab. 12 jsou obsaženy vypočítané hodnoty z měření. Hodnoty jsou vypočítány pomocí aritmetického průměru. Aritmetický průměr je zde vypočítán z třech použitých vzorků. Při každém měření byly k dispozici tři zkušební vzorky, aby bylo dosaženo větší průkaznosti měření a také, aby nedošlo k milnému vyhodnocení, tudíž špatné analýze naměřených výsledků.

7.6.2.1 Výsledky vrubových zkoušek

V příložené tabulce jsou doložené průměrné hodnoty z vrubových zkoušek. Z tabulky je patrné, že každé tepelné zpracování reagovalo jinak na korozi materiálu.

Tabulka 12: Vypočítané hodnoty vrubové zkoušky

Tepelné zpracování	Počet dní	Nárazová práce [J]	Vrubová houževnatost [J/cm²]
Bez tepelného zpracování	0	116,5	143,5
	30	113	141
	60	112	140
	90	110	138
Kalení a následné popouštění	0	63	77,5
	30	59,5	76,5
	60	58,5	73
	90	54	66
Normalizační žihání	0	35,5	30
	30	31	26,5
	60	23,5	20
	90	21	17,5
Žihání na měkko	0	126	156
	30	120	150
	60	115,5	142,5
	90	111	137

8 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Interpretace výsledků byla provedena na základě získaných výsledků z tahové a vrubové zkoušky.

8.1 Výsledky tahových zkoušek

Ze získaných a následně zpracovaných hodnot lze pozorovat, že hodnota meze pevnosti v tahu má u všech použitých technologií klesající tendenci s přibývajícím dnem vystavení v solné komoře. Z toho plyne, že ze stanovených časových intervalů žádný zkušební materiál nedolal korozní degradaci. Degradace nastala u všech tepelně zpracovaných i nezpracovaných zkoušených těles. U zkoušeného tělesa se objevuje výrazněji, u některého naopak méně.

- **Etalon**

Je základní vzorek, který byl testován a je zobrazen na Obr. 41 a výsledné hodnoty jsou zaznamenány do Tab. 8. Mez pevnosti ocele 42CrMo4 bez tepelného zpracování je 945 MPa. Mezi prvním vzorkem a vzorkem, který byl v solné komoře umístěn 90 dní je v mezi pevnosti rozdíl 80 MPa, což je pokles meze pevnosti o 8,47 %. Mez kluzu mezi prvním a posledním vzorkem se změnila o 52 MPa, zde také zjišťujeme, že zde nastal pokles a to celkem o 5,98 % oproti prvnímu vzorku, který nebyl vystaven korozní degradaci.

První zkouška etalonu dosahovalo natažení zkušebního tělesa o 10,4 mm. Následně u druhého tělesa, které bylo umístěno v solné komoře po dobu 30 dní, došlo k natažení a následného přetržení na celkových 8,93 mm. Po 60 dnech v komoře se dráha natažení dosáhla hodnoty 9,22 mm, ale pouze díky tomu, že zde bylo dosahováno větší meze kluzu o cca 20 MPa a tím i následného prodloužení oproti předešlému zkušebnímu vzorku. U zkoušeného tělesa, které strávilo 90 dní v solné komoře, bylo dosaženo celkového prodloužení 8,86 mm.

- **Kalení a následné popouštění**

Jak můžeme zjistit na Obr. 42 a v Tab. 9, tak meze pevnosti a meze kluzu se výrazně změnilo. U meze pevnosti bylo změřeno, že po 90 dnech vystavení vzorků nastala změna o 116 MPa. Z toho plyne, že mez pevnosti se snížila o 9,45 % oproti prvnímu vzorku, který nebyl umístěn v solné komoře. U meze kluzu nastala také změna a to o celkových 117 MPa, což nám dokazuje, že zde proběhlo snížení meze kluzu o 9,96 %.

První měření zkušebních vzorků, které byly tepelně zpracovány kalením a následným popouštěním, bylo zjištěno při tahové zkoušce, že zkušební těleso s vyraženou značkou č. 1 může dojít k celkovému prodloužení až na 7,545 mm. Po umístění a uplynutí 30. dní v solné komoře bylo zjištěno, že došlo k prodloužení 6,7 mm a následnému přetržení. Po časovém intervalu 60 dní to bylo 6,15 mm a po uplynutí 90 dní bylo naměřeno 5,44 mm.

- **Normalizační žíhání**

U zkušebních těles tepelně zpracované normalizačním žíháním nastala změna meze pevnosti o 111 MPa, což nám deklaruje Tab. 10. Mez pevnosti byla snížena o 11,18 %. Mez kluzu zde nebyla tak výrazná jak u předchozího tepelného zpracování. Zde byla snížena mez kluzu o 78 MPa, což je asi 11,3 %.

Při prvním měření zkušebních vzorků bylo naměřeno, že při tahové zkoušce dosahuje síla skoro až 80 kN. Zde u prvního měření nastalo prodloužení na celkových 5,3 mm. Naopak u druhého zkušebního tělesa bylo dosaženo o 0,5 mm více než u základního materiálu. Zde síla dosahovala okolo 75 kN. Hlavně zde byla tažnost o 1 % větší než u předchozí zkoušky, což je také jeden z aspektů, proč zde bylo prodloužení o 0,5 mm větší než u materiálu, který nebyl v solné komoře. Po 60 dnech zde bylo celkové prodloužení už 5,2 mm. Zde bylo dosaženo tahové síly 71 kN. Po 90 dnech v solné komoře zkoušeného materiálu bylo naměřeno celkové prodloužení v délce 5,19 mm.

- **Žíhání na měkko**

U žíhání na měkko byla snížena pevnost v tahu o 94 MPa, což nám dokazuje, že mez pevnosti byla snížena o 10,49 %. U meze kluzu byl zjištěn celkový rozdíl o 54 MPa, což je snížení o 6,85 %.

Při první etapě zkušebních vzorků bylo měřeno i zkušební těleso ovlivněné žíháním na měkko. Zde došlo k celkovému prodloužení na 11,02 mm. Po časovém intervalu 30 dní bylo naměřeno trvalé prodloužení 10,1 mm. Po vystavení zkušebního tělesa v solné komoře 60 dní bylo zjištěno, že těleso má větší tažnost o 0,8 % než předešlé zkušební těleso, a proto zde bylo zjištěno celkové prodloužení o 10,3 mm. Po uplynutí 90 dní v solné komoře bylo zjištěno celkové prodloužení 9,22 mm.

8.2 Výsledky vrubových zkoušek

Analýza vrubových zkoušek byla vyhodnocena z naměřených výsledků vrubové houževnatosti a nárazové práce. Naměřené hodnoty byly zanalyzovány a vyhodnoceny. U zkoušek byla zjištěna klesající tendence jak nárazové práce, tak vrubové houževnatosti. Každá z použitých tepelných zpracování ovlivňuje nárazovou práci a vrubovou houževnatost jinak. Proto u každé technologie je jiná nárazová práce a vrubová houževnatost. Všechny naměřené hodnoty jsou zaznamenány do Tab. 12.

- **Etalon**

Nárazová práce a vrubová houževnatost u materiálu bez tepelného zpracování lze charakterizovat úměrně struktuře materiálu. U nárazové práce byl mezi prvním a posledním vzorkem rozdíl 6,5 J. U vrubové houževnatosti je také malý rozdíl, který činí 5,5 J/cm².

- **Kalení a následné popouštění**

U oceli 42CrMo4, která byla nejdříve tepelně zpracována kalením, poté byla popouštěna, tak nedošlo k větším rozdílům při zkoušení nárazové práce a vrubové houževnatosti. Nárazová práce dosahovala 63 J u zkušebních těles, které nebyly umístěny v solné komoře. Po 90 dnech působení solné mlhy činila hodnota 54 J. Vrubová houževnatost byla při prvním měření 77,5 J/cm², po 90 dnech působení solné mlhy byl naměřen rozdíl o 12 J/cm² nižší.

- **Normalizační žihání**

Materiál tepelně zpracovaný normalizačním žiháním dosahoval při první zkoušce nárazovou práci 30 J a vrubové houževnatosti 35,5 J/cm². Při dodržení stanových časových intervalů se nárazová práce a vrubová houževnatost snížila. Po uplynutí 90 dní v solné komoře byla nárazová práce 17,5 J a vrubová houževnatost dosahovala snížení na hodnotu 21 J/cm².

- **Žihání na měkko**

U tepelného zpracování žihání na měkko materiál nejméně odolával působení solné mlhy. Z naměřených výsledků je patrné, že toto tepelné zpracování je nejméně odolné působení solné mlhy. Při prvním zkoušení dosahovala nárazové práce hodnoty 156 J. Po dodržení časového intervalu 90 dní byla nárazová práce 137 J. U vrubové houževnatosti bylo prvním měřením naměřeno 126 J/cm². Po skončení časového intervalu dosahovala hodnota 111 J/cm².

9 DISKUZE

Praktická část této diplomové práce je rozdělena do dvou hlavních bodů. Prvním dílčím bodem je tepelné zpracování ocele 42CrMo4 a vložení zkušebních těles do solné komory. Druhým dílčím bodem je odolnost materiálu, který je ovlivněn solnou mlhou v časových intervalech 30, 60 a 90 dní. Na to navazují destruktivní zkoušky, kde je použito tahové a vrubové zkoušky.

Tahové zkoušky materiálu jsou zpracovány na Obr 41. – 44. a k tomu doložené naměřené a dopočítané hodnoty, které jsou v příložených Tab 8-11. Tahové zkoušky prokázaly, že nejlepší tahové vlastnosti má materiál, který není tepelně zpracován a materiál který je zpracován normalizačním žháním. U tahových zkoušek etalonu bylo zjištěno, že u prvního měření došlo k největšímu prodloužení asi o 2 mm více než u zbylých třech měření. Zbylá tři měření se liší maximálně o 0,3 mm. U materiálu, který byl tepelně zpracován normalizačním žháním, došlo k dobrým tahovým vlastnostem i po uplynutí všech časových intervalů. Všechny zkoušky jsou v rozmezí 0,3 mm kromě druhého měření, kde došlo k největšímu prodloužení a to na 5,8 mm. Vrubové zkoušky u etalonu dopadly nejlépe. U materiálu dochází k postupnému snižování nárazové práce a vrubové houževnatosti v řádech jednotek. U materiálu, který byl tepelně zpracován kalením a následným popouštěním, normalizačním žháním a žháním na měkko dochází při měření k největšímu rozptylu hodnot v řádech desítek. U materiálu, který byl tepelně zpracován kalením a následným popouštěním je klesající tendence u nárazové práce a vrubové houževnatosti v řádu jedné desítky. U normalizačního žháním a žháním na měkko je už rozdíl hodnot větší. Nejméně odolným materiálem při vrubových zkouškách byl materiál, který byl tepelně zpracován žháním na měkko. U použití tohoto tepelného zpracování došlo k největšímu rozptylu hodnot během měření. První měření nárazové práce bylo dosaženo 156 J a u vrubové houževnatosti bylo naměřeno 126 J/cm². Po uplynutí 90 dní měření dosáhly hodnot u nárazové práce 137 J. Vrubová houževnatost po 90 dnech byla naměřena 111 J/cm², což nám udává pokles o 15 J/cm².

Z experimentu bylo dokázáno, že ocel 42CrMo4 bez tepelného zpracování (etalon) nejvíce odolává korozi. Materiálu bez tepelného zpracování ve všech časových intervalech ubylo celkem 8 g. Naopak nejhůře odolávajícím materiálem vůči působení solné mlhy je materiál, který je ovlivněn žháním na měkko. Hmotnostní úbytek materiálu činí 32 g, což je čtyřikrát více než u etalonu. Hmotnostní úbytek materiálu činí 19,3 % z celkové hmotnosti.

10 ZÁVĚR

Korozní degradace kovových materiálů je celosvětový závažný problém. Koroze je děj, který je nevratný. Tudíž je velmi dbáno na důkladnou ochranu materiálu. Vlivem působením koroze na materiál vzniká postupné znehodnocení materiálu, nebo celkové znehodnocení dané funkčnosti. Z toho plyne, že u využívaných kovových materiálů se nemění pouze jejich mechanické, fyzikální, ale i estetické vlastnosti.

Praktický experiment diplomové práce je zaměřen na celkové sledování ocele 42CrMo4. Využití oceli 42CrMo4 je značně rozsáhlé. Tato ocel je určena především pro zušlechťování, k povrchovému kalení, pro velké výkovky a velmi namáhané hřídele. Tepelná zpracování tepelně ovlivnily strukturu materiálu a tím především i mechanické vlastnosti. Tepelně zpracovaná zkušební tělesa byla testována pomocí zrychlené zkoušky v umělé atmosféře – Zkouška solnou mlhou ČSN EN ISO 9227. Zkušební tělesa jsou monitorována po celou dobu působení solné mlhy v počtu 30, 60 a 90 dní strávených v solné komoře. V solné komoře solná mlha napadala zpočátku pouze povrch materiálu, kde vznikala bodová koroze. Postupně z bodové koroze byla na povrchu materiálu koroze rovnoměrná. Postupným působením solné mlhy degradovaly zkušební tělesa. Zkušební tělesa nebyla chráněna žádnou antikorozní ochranou. Zkušební tělesa nebyla chráněna žádnou antikorozní ochranou proto, aby bylo zjištěno, které tepelné zpracování nejvíce odolává solné mlze. Postupná degradace materiálu ovlivňovala tahové a vrubové vlastnosti materiálu, které byly vyhodnoceny.

Po zrychlené korozní zkoušce byly provedeny hmotnostní analýzy. Hmotnostními analýzami bylo zjištěno, u kterého tepelného zpracování vznikl největší úbytek hmotnosti. Dalším důkazem byly tahové a vrubové zkoušky materiálu, z kterých postupně vyplynulo, která metoda tepelného zpracování nejvíce odolává působení solné mlhy. Zkušební tělesa tepelně zpracovaná žíháním na měkko byla nejméně odolná solné mlze. U tohoto tepelného zpracování byl největší úbytek hmotnosti. Z výsledků experimentálního měření vyplývá, že ocel 42CrMo4, která nebyla tepelně zpracována se při hmotnostních analýzách, tahových a vrubových zkouškách projevila jako nejlepší ze zkoušených zkušebních vzorků.

11 POUŽITÁ LITERATURA

Knižní zdroje:

- [1] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [2] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu]*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 141 s. ISBN 978-80-01-03686-0.
- [3] HAZLINGER, Marián, Roman MORAVČÍK a Ľubomír ČAPLOVIČ. *Degradačné procesy a predikcia životnosti materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 223 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3334-2.
- [4] CHOVANCOVÁ, Marta, Eugen ŠPIRK a Pavel FELLNER. *Základy korózie a povrchovej úpravy kovových materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002, 269 s. Edíciaskrípt. ISBN 80-227-1688-x.
- [5] SKÁLOVÁ, Jana, Vladimír BENEDIKT a Rudolf KOVAŘÍK. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 175 s. ISBN 80-7082-021-7.
- [6] BARTOŇ, Karel. *Atmosférická koroze kovů*. Praha, 1969
- [7] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991, 157 s.
- [8] KAŠPAR, Ervín. *Koroze a povrchová úprava materiálu*. Praha, 1964.
- [9] FIALA, Jaroslav, Pavol ŠUTTA a Václav MENTL. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 572 s. ISBN 80-200-1223-0.
- [10] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I. 2003. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.*
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE, Richard G BUDYNAS a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [12] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [13] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: kovy a kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 207 s. ISBN 80-010-2424-5.

- [14] MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. *Strojírenská technologie*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 337 s. ISBN 978-80-7414-501-8.
- [15] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky: pro školu a praxi*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2007, 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [16] SKOČOVSKÝ, Petr a Alan VAŠKO. *Materiály a technológie*. 1. vyd. Bratislava: EDIS, 2004, 121 s. ISBN 80-8070-277-2.
- [17] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013, 168 s. ISBN 978-80-01-05248-8.

Internetové zdroje

- [18] *Bolzano* [online]. [cit. 2016-04-1]. Dostupné z: <http://bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli>
- [19] *ČVUT Fakulta strojní* [online]. [cit. 2016-04-1]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/prednes/Ch_predn13-Ko.pdf
- [20] *LABO* [online]. [cit. 2016-04-1]. Dostupné z: <http://www.labo.cz/kpi/martinek/pec001.htm>

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Průběh rychlosti oxidace ocelí v závislosti na čase [3]	11
Obrázek 2: Změna rychlosti oxidace v závislosti na teplotě a čase [3]	12
Obrázek 3: Schematické znázornění oxidačních vrstev na povrchu železa a slitin železa [3]	15
Obrázek 4: Princip vzniku galvanické koroze [3]	15
Obrázek 5: Rovnoměrná koroze [17]	16
Obrázek 6: Nerovnoměrná koroze [17]	16
Obrázek 7: Jamková, bodová koroze [17]	16
Obrázek 8: Mezi-krytalická koroze a trans – krytalické koroze [19]	17
Obrázek 9: Feriticko-perlitická mikrostruktura konstrukční oceli a Bainitická mikrostruktura (po kalení) [3]	19
Obrázek 10: Martenzitická mikrostruktura (po kalení) a Mikrostruktura legované nástrojové oceli [3]	19
Obrázek 11: Mikrostruktura chemicko-tepelně zpracované oceli s nízkým obsahem uhlíku [3]	19
Obrázek 12: Rovnovážný diagram Fe - C a Fe - Fe ₃ C [15]	21
Obrázek 13: Schéma průběhu teplot v závislosti na čase [13]	23
Obrázek 14: Přehled teplotních oblastí žhání ocelí [13]	24
Obrázek 15: Pásmo kalících teplot ocelí [13]	26
Obrázek 16: Trhací stroj [18]	29
Obrázek 17: Zkušební tyč před měřením [2]	30
Obrázek 18: Zkušební tyč po měření [2]	30
Obrázek 19: Pracovní diagram s výraznou a nevýraznou mezí kluzu	32
Obrázek 20: Anelastická při odlehčení pod mezí úměrností [1]	32
Obrázek 21: Anelastická při odlehčení a) Pod mezí úměrnosti b) Nad mezí kluzu [2]	33
Obrázek 22: Určování prodloužení při maximálním zatížení [1]	34
Obrázek 23: Zaškrcení kruhové tyče - krček [1]	35
Obrázek 24: Schéma Charpyho kladiva [1]	37
Obrázek 25: Výkresová dokumentace zkušebních vzorků pro vrubové zkoušky	39
Obrázek 26: Výkresová dokumentace zkušebních vzorků pro tahové zkoušky	39
Obrázek 27: Označení jednotlivých vrubových vzorků dle tepelného zpracování	40
Obrázek 28: Označení zkušebních tyčí na tahovou zkoušku	41

Obrázek 29: Muflová pec[20]	42
Obrázek 30: Zkušební těleso bez tepelného zpracování	43
Obrázek 31: Zkušební těleso kalené a následně popouštěné	43
Obrázek 32: Zkušební těleso normalizačně žíhání.....	44
Obrázek 33: Zkušební těleso žíhané na měkko	44
Obrázek 34: Snímek etalonu	45
Obrázek 35: Snímek kalené a následně popouštěné oceli.....	46
Obrázek 36: Snímek normalizačně žíhané oceli	47
Obrázek 37: Snímek oceli žíhané na měkko	47
Obrázek 38: Úbytek hmotnosti	50
Obrázek 39: Zkušební univerzální trhací stroj LabTest 5.200SP1	51
Obrázek 40: Uchycení zkušební tělesa	52
Obrázek 41: Tahová zkouška – etalon	53
Obrázek 42: Tahová zkouška - kalení + popouštění	53
Obrázek 43: Zkouška tahová - normalizační žíhání.....	54
Obrázek 44: Zkouška tahová - žíhání na měkko	54
Obrázek 45: Charpyho kladivo Lab Test CHK 300 J	57
Obrázek 46: Uchopení zkušební tělesa	57
Obrázek 47: Nárazová práce	58
Obrázek 48: Vrubová houževnatost	59

13 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Chemické složení zkoušeného materiálu	38
Tabulka 2: Mechanické zkoušky materiálu ocele 42CrMo4.....	38
Tabulka 3: Technické parametry [LABO]	42
Tabulka 4: Použité teploty a časové intervaly.....	43
Tabulka 5: Použitá teplota a časový interval.....	44
Tabulka 6: Použitá teplota a časový interval.....	44
Tabulka 7: Úbytek hmotnosti zkušebních vzorků.....	49
Tabulka 8: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - etalon.....	55
Tabulka 9: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Kalení + popouštění.....	55
Tabulka 10: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Normalizační žíhání.....	56
Tabulka 11: Naměřené a zpracované hodnoty oceli 42CrMo4 - Žíhání na měkko	56
Tabulka 12: Vypočítané hodnoty vrubové zkoušky.....	60