

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301      Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Měřicí technika v provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování

Autor:                      **Ladislav NAVRÁTIL**  
Vedoucí práce:        **Ing. Jiří Hájek, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

**V Plzni dne:** .....

.....  
**podpis autora**

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. za cenné rady, podněty, připomínky a trpělivost v celém průběhu zpracování bakalářské práce.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Navrátil	<b>Jméno</b> Ladislav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulu)</b> Ing. Hájek, Ph.D	<b>Jméno</b> Jiří	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Měřicí technika v provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	48	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	40	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato bakalářské práce se zabývá měřicí technikou v provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Poskytuje stručný přehled měřidel používaných v průmyslu. Dále se zabývá měřidly, které jsou použity na lince chemicko-tepelného zpracování na ZČU.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Chemicko-tepelné zpracování, cementace, nitridace, měřicí technika, mikrostruktura, mikrotvrdost, uhlíkový potenciál, dusíkový potenciál

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Navrátil	Name Ladislav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hájek, Ph.D	Name Jiří	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KKM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Measurement technique in heat and chemical heat treatment		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	48	<b>TEXT PART</b>	40	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This bachelor thesis deals with the measurement techniques in heat and chemical-heat treatment operations .</p> <p>It provides a brief overview of the measuring instruments used in the industry.</p> <p>It also deals with measuring instruments that are used on the line of chemical-heat treatment on the Western Bohemian University.</p>
<b>KEY WORDS</b>	Chemical-heat treatment, carburizing, nitriding, measurement techniques, microstructure, microhardness, carbon potential, nitrogen potential

## Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>1 Zařízení pro ohřev.....</b>	<b>3</b>
1.1 Rozdělení zařízení pro ohřev .....	3
1.2 Prostředí, v kterých se provádí TZ, CHTZ .....	3
1.3 Údržba zařízení pro ohřev .....	6
<b>2 Měřicí technika .....</b>	<b>6</b>
2.1 Základní pojmy .....	6
2.2 Rozdělení měřicí techniky .....	7
2.3 Zařízení pro měření teploty .....	8
2.4 Měření tlaku .....	10
2.5 Měření průtoku.....	12
2.6 Měření atmosfér v zařízení pro ohřev .....	14
<b>3 Vývoj měření a regulace v zařízení pro ohřev .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Experimentální část.....</b>	<b>20</b>
4.1 Popis školní linky pro chemicko-tepelné zpracování .....	21
4.2 Příprava vzorků.....	25
4.2.1 Materiály v dodaném stavu .....	26
4.2.2 Proces cementace .....	30
4.2.3 Proces nitridace .....	36
<b>5 Diskuze výsledků .....</b>	<b>39</b>
<b>6 Závěr.....</b>	<b>40</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>41</b>

## Úvod

Již v dějinách lidé dokázali učinit několik důležitých objevů. Jednalo se například o obyčejný oheň nebo o objevení gravitace a elektřiny. Mezi významné objevy patří i zpracování kovů. V minulosti nesloužily kovy pouze jako materiál, ale fungovaly i jako platidlo. Ale důležitou roli hrály i jako materiál pro vojenský průmysl, například na výrobu sečných zbraní, vytváření zbroje a pro výrobu ochranných štítů a brnění. Dnes už si život bez kovových materiálů nedokážeme představit. Kov je všude kolem nás, i když si to třeba ani neuvědomujeme. Kovové předměty používáme k denní potřebě, například v podobě příborů, hrnců, obrouček brýlí, zipů na oblečení, kovových knoflíků, propisovacích tužek, šperků, částí hodinek a mobilních telefonů, součástek televizí, počítačů apod. Můžeme ho vidět v různých dopravních prostředcích, jako například automobily, letadla, lodě, dále ho můžeme pozorovat i v lékařství, kde se používá na nejrůznější nástroje, které dennodenně zachraňují lidské životy. Kov se skrývá tam, kde jej nemůžeme na první pohled spatřit, například v budovách v podobě výztuží v betonu, rozvodných kabelů pro elektřinu nebo železných konstrukcí v mrakodrapech. V neposlední řadě se kov používá i v umění, například k výrobě soch z kovových materiálů.

Požadavky na zpracování kovů se v průběhu dějin zvyšovaly. První uživatelé kovových materiálů, byli schopni pouze roztavit kov v ohni, což mohli udělat jen s kovem o nízké teplotě tání, například s mědí. Postupem času lidé zkonstruovali zařízení pro ohřev, ve kterém byli schopni roztavit železo a přeměnit jej na ocel. Časem se zdokonalovaly metody zpracování oceli a neželezných kovů. Dnes klademe velký důraz na kvalitu a jakost výrobků. Abychom dosáhli požadovaných kritérií, musí se společně se zpracováním tepelným i chemicko-tepelným vyvíjet i měřicí technologie. V současné době máme velkou škálu měřících přístrojů a zařízení pro měření.

Měřicí technika zde byla již od počátku. Dříve se teplota kovů a chemické složení určovalo podle barvy. Kov se zvyšující teplotou měnil svojí barvu a podle této barvy mohl kovář určit přibližnou teplotu. Dnes používáme pro měření teploty a chemického složení termočlánky a sondy, které mohou být i digitální nebo analogové.

V této práci se zaměřím hlavně na měřicí přístroje a zařízení v provozu v oblasti tepelném a chemicko-tepelném zpracování. Především pak měřicí technikou používanou na nově nainstalované lince na ZČU. Budu se zabývat jejich rozdělení, výhody, nevýhody a jejich principy, neopomenu ani jejich vývoj a směr, kterým se budou vyvíjet. Dále zmíním prostředí a zařízení, v kterých se tepelné a chemicko-tepelné zpracování odehrává.

# 1 Zařízení pro ohřev

V současné době se klade velký důraz na kvalitu výrobků tepelného zpracování. Proto, aby se dosáhlo určité kvality, jsou důležitá mimo jiné zařízení pro ohřev. Volba typu zařízení závisí na několika faktorech, např.: velikost a tvar výrobku, druhu tepelného zpracování, výkonu atd.

## 1.1 Rozdělení zařízení pro ohřev

Pro tepelné zpracování se používají zařízení zvané ohřívací pece. V těchto zařízeních proběhne ohřev ( popř. sycení povrchu ) a následné ochlazení (chladící látka může být přímo v peci nebo mimo ni). Ohřívací pece rozdělujeme podle následujících kritérií:

### Podle druhu topiva:

- Palivové
- Elektrické

### Podle teploty:

- Nízkoteplotní do 600 °C
- Středněteplotní 600-1100 °C
- Vysokoteplotní nad 1100 °C

### Podle atmosféry v pecním prostoru:

- S atmosférou normální (vzduch)
- S atmosférou řízenou
- Vakuové

### Podle pohybu vsázky:

- Stabilní s přerušovaným provozem
- Kontinuální (průběžné)

### Podle technologického postupu:

- Popouštěcí
- Žíhací
- Víceúčelové
- Pro chemicko-tepelné zpracování [1]

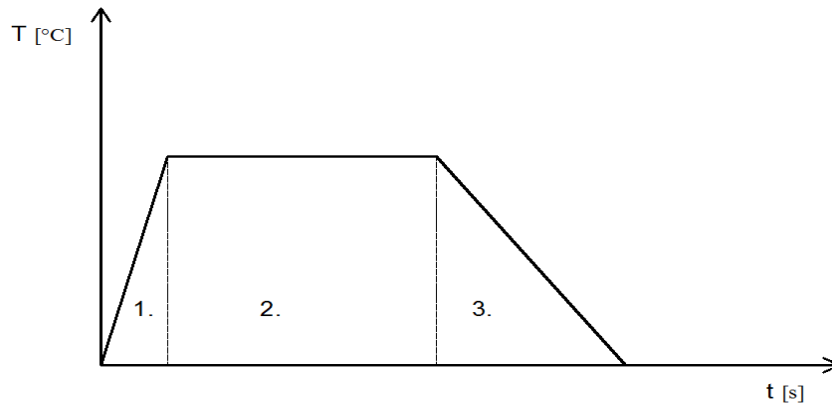
Pro experimentální část se bude používat zařízení, které je určeno pro chemicko-tepelné zpracování oceli. Celé zařízení se skládá z několika částí, kde nejdůležitější z nich jsou pecní zařízení a to cementační a nitridační.

## 1.2 Prostředí, v kterých se provádí TZ, CHTZ

Při tepelném zpracování kovů je velmi důležité, aby byl výrobek určitou dobu a při určité teplotě vystaven vhodnému prostředí a následnému ochlazení (Obr.1.2-1). Volba vhodného prostředí je velmi důležitá, protože to nám v konečném výsledku udává vlastnosti



výrobku. Ohřev je prováděn v pecním zařízení, přičemž ochlazovací prostředí může být uvnitř pecního zařízení či mimo něj.

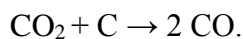


Obr.1.2-1 Schéma průběhu tepelného zpracování / 1. Ohřev, 2. Výdrž na dané teplotě, 3. Ochlazení

Tato prostředí rozdělujeme do tří skupin:

**Kapalná:** celý chemický proces se odehrává v reakčním prostředí (v kapalině), které obsahuje prvek, jímž chceme sytit daný povrch. Například se jedná o lázně chloridových solí (NaCl, KCl, BaCl<sub>2</sub>). Tento způsob je vhodný pro výrobky střední velikosti.

**Pevná:** jedná se o nejstarší způsob. Při tomto způsobu zpracování je důležité, aby výrobek byl dobře vysušen a byl čistý. Reakční prostředí je v tomto případě sypké, například černé uhlí (může být i s přidavkem koksu), dále je zde aktivátor BaCO<sub>3</sub>. Výrobek se vkládá do plechových žáruvzdorných krabic, do kterých je přidán prášek z uhlí. V peci uhlík reaguje s kyslíkem a vzniká CO podle chemické rovnice



**Plynná:** používají se ochranné atmosféry, které se dále rozdělují na generátorové atmosféry a na přívod plynu přímo z nádoby. Generátorové atmosféry vznikají nedokonalým spalováním uhlovodíků. Při spalování vzniká CO, H<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>. Podle obsahu plynů ve spalovací komoře lze atmosféru rozdělit na chudou( poměr 4:1 ) a bohatou( poměr 2,5:1 ).

Při přívodu plynu přímo z nádoby tyto plyny tvoří přímo ochranné atmosféry. Jejich výhody jsou snadná regulace ( jakýkoliv poměr plynů ) a údržba, okamžitý vstup požadované atmosféry atd. Pro případ této bakalářské práce se používají plyny jako metanol, dusík, vzduch, propan a čpavek z tlakových nádob.

Po ohřevu a výdrži na teplotě následuje další velmi důležitá část cyklu tepelného zpracování a to zchlazení výrobku ve vhodném chladícím prostředí (voda, oleje, emulze, atd). Podle typu tepelného zpracování se volí chladící prostředí (volba chladícího prostředí určuje rychlost ochlazování). V málem pracovišti od firmy LAC se jako ochlazovací prostředí používají olejové lázně.

### Prostředí pro ohřev:

- Tuhá prostředí: jedná se o nejjednodušší, ale také nejhůře kontrolovatelné a z hlediska přenosu tepla nejméně účinné. Mezi tuhá prostředí patří koks, litinové třísky, práškovou kyselinu boritou (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)atd.
- Fluidní prostředí: jedná se o prášky zviřené profukováním plynu, které mají při vhodné rychlosti plynu podobné vlastnosti jako mají kapaliny. K víření prášku, např.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  se používá vzduch nebo inertní plyn. Jaký plyn se použije při procesu závisí na spotřebě plynu (vysoké náklady) a přípustnosti částečné oxidace.

- c) Roztavené soli: pro nízké teploty ( do  $550^\circ\text{C}$ ) jsou soli tvořeny alkalickými dusičnany a dusitany, ferokyanid, atd. Tyto soli mají při vyšších teplotách oxidační charakter a proto kvůli bezpečnosti nesmí přijít do styku s nauhličujícími látkami. Pro teploty do  $900^\circ\text{C}$  se používají směsi  $\text{NaCl}$  a  $\text{KCl}$  s přísadami  $\text{NaCN}$ ,  $\text{BaCl}_2$  a  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , pro teploty do  $1300^\circ\text{C}$  je vhodný  $\text{BaCl}_2$ , popřípadě jeho směs s 5%  $\text{NaCl}$  a dalšími desoxidujícími přísadami.
- d) Ochranné atmosféry: zabraňují oxidaci a změnám chemického složení na povrchu výrobku. Podle počtu složek se dělí na jednosložkové a mnohosložkové. Plyny ochranné atmosféry jsou vodík, dusík, štěpený čpavek, štěpený metanol a vzácné plyny.

Exo-atmosféry se vyrábí nedokonalým spalováním snadno dostupných uhlovodíků (zemní plyn, propan). Exotermická reakce probíhá nad  $1200^\circ\text{C}$  a množství vzduchu je omezeno na 55-98% hodnoty potřebné pro dokonalé spálení. Při vyšších podílech vzduchu vzniká chudá atmosféra a při nižších podílech vzduchu vzniká bohatá atmosféra. Exo-atmosféry se používají jen pro ochranu oceli, která má méně než 0,4% uhlíku.

Endo-atmosféry jsou ochranné a nosné atmosféry, které se vyrábějí nedokonalým spalováním nejčastěji propanu nebo butanu se vzduchem. Endotermická reakce vyžaduje přítomnost katalyzátoru. Disociace a spalování jsou řízeny tak, aby  $\text{CO}_2$  a vodní páry byly nízké. Endo-atmosféry se používají jako ochranné atmosféry při kalení a jako nosné atmosféry při cementování a nitridování. Jsou jedovaté a výbušné proto se z důvodu bezpečnosti do pecního zařízení zavádějí až při teplotách nad  $750^\circ\text{C}$  a po odstranění kyslíku propláchnutím pomocí dusíku. [1], [2]

### **Prostředí pro ochlazení:**

Ochlazovací prostředí se posuzuje intenzitou ochlazování, průběhem ochlazování a rychlostí ochlazování.

- a) Vzduch: ochlazování na klidném vzduchu je velmi pomalé a závisí na velikosti výrobku. Chladný vzduch, který proudí pod malým podtlakem má oproti klidnému vzduchu řádově větší ochlazovací účinek. Mnohem intenzivnější je ochlazování vodní mlhou.
- b) Rztavené soli a kovy: předností těchto prostředí je, že maximum rychlosti ochlazování leží v oblasti vysokých teplot, a že rychlost ochlazování při nižších teplotách je do jisté míry ovlivněna teplotou lázně. Solné lázně jsou tvořeny taveninou dusičnanů, dusitanů a chloridů sodíku a draslíku. Jako roztavené kovy se nejčastěji používá olovo, případně jeho slitiny s cínem.
- c) Voda a její roztoky: jedná o prostředí, která mění své skupenství. Vyznačuje se vysokou intenzitou ochlazování vlivem velké tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a entalpie vypařování. Okolo výrobku se vytvoří vrstva vodní páry, kterou je třeba narušovat relativní pohybem výrobku a prostředí. Intenzitu ochlazování je možno zvýšit cirkulací vody nebo přísadami, které snižují stabilitu parního polštáře.
- d) Oleje: jsou velmi rozšířené jako kalící prostředí. Stejně jako u vody je ochlazovací účinek založen na odpařování oleje. Ochlazovací účinek oleje závisí na jeho chemickém složení, viskozitě a teplotě vzplanutí. [1], [2]

### 1.3 Údržba zařízení pro ohřev

V zařízení pro ohřev se odehrávají různé chemické reakce, ať už se jedná o hoření nebo nauhličování oceli. Zařízení pro ohřev jsou vždy tepelně i chemicky namáhány, proto je důležitá jejich pravidelná kontrola. Podle toho, jak často se kontrola provádí, můžeme rozdělit kontrolu na :

**Denní**, kde kontrolujeme chlazení, ventilátory, plášť studené komory zařízení pro ohřev a provádí se též vizuální kontrola hořáků a tlakových klapek. Dále mezi denní kontrolu patří i kontrola tlaku v potrubí.

**Týdenní**, kde kontrolujeme hladiny oleje v hydropneumatických zařízeních (popřípadě jejich doplnění), kalící kapaliny, vizuální kontrola pístů a vizuální kontrola (kontrolujeme netěsnosti škrábance i jiná viditelná poškození).

**Měsíční** kontrolu, která obsahuje i technickou údržbu, kde se provádí například odstranění nánosů, kontrola těsností, zdali jsou ložiska správně mazána, atd.

**Půlroční** kontrola, kde se provádí jako celková kontrola motorů, kontrola termočlánků (sond), kontrola prasklin a deformace uvnitř pecního zařízení, kontrola filtrů oleje atd. Roční kontrola, kde se provádí kompletní rozebrání hořáků, kontrola spojů, čištění sání a chladícího potrubí + se provádí veškeré činnosti, jež se prováděly při půlroční kontrole.

**Kalibrace měřících zařízení:** při měření požadujeme po měřidle určitou přesnost. Je-li měřidlo využíváno v provozu ztrácí svojí přesnost měření, proto je důležitá pravidelná kontrola a následná kalibrace. Doba mezi jednotlivými kontrolami závisí na prostředí, kterému jsou měřidla vystavena. Kalibrace se může provádět v laboratořích nebo přímo v provozu. Všechny kalibrace se musí provádět podle normy, kterou určuje český metrologický institut. [3]

## 2 Měřící technika

Měřící technika slouží k určování různých parametrů v tepelném a chemicko-tepelném zpracování jako např. teplota, chemické složení atmosféry, tlak atd. Tyto parametry určují jaké bude mít výrobek vlastnosti a tím i jak bude kvalitní. Přesnými měřidly lze získat přesné informace o tom jak celý proces tepelného či chemicko-tepelného zpracování probíhá, a tím jej případně regulovat. Všechna měřidla a měřící přístroje musí být správně zkalibrovány, musí být přesné a jednotné to zajišťuje metrologický ústav. Tato kapitola se bude věnovat těmto měřícím přístrojům a jejich rozdělení.

### 2.1 Základní pojmy

**Měření fyzikální veličiny** lze vyjádřit jako její číselnou hodnotu.

**Měřící metoda** je buď přímá nebo nepřímá, přičemž přímou metodou získáme rovnou měřenou veličinu a nepřímou vycházíme na závislosti měřené veličiny na jiné veličině.

**Měřící přístroje** jsou buď analogové nebo digitální a zjišťujeme pomocí něho měřenou veličinu.

**Měřící řetězce** si můžeme představit jako řadu spolu zapojených členů, které dohromady tvoří měřící obvod. Tyto členy dohromady slouží k zjištění ,zpracování a sdílení informací o měřené veličině.

**Čidla a snímače** snímají časový průběh veličin a převádějí je na tzv. směrnou veličinu neboli signál.

**Signál** můžeme rozdělit na spojitý a nespojitý přičemž spojitý signál je v čase nepřetržitý a nespojitý neboli diskretní signál je v čase přetržitý. Mírou tohoto signálu je amplituda v rozsahu od 0 do 1.

**Měřicí a funkční převodníky** slouží k převodu signálu.

**Měřicí kanály** slouží pro přenos informace.

**Vyhodnocovací přístroje** mají za úkol zpracovat signál. Používají se úchylkové, kompenzační a integrační přístroje.

**Řídící systémy** slouží především pro využití informace v automaticky řízených obvodech. [4]

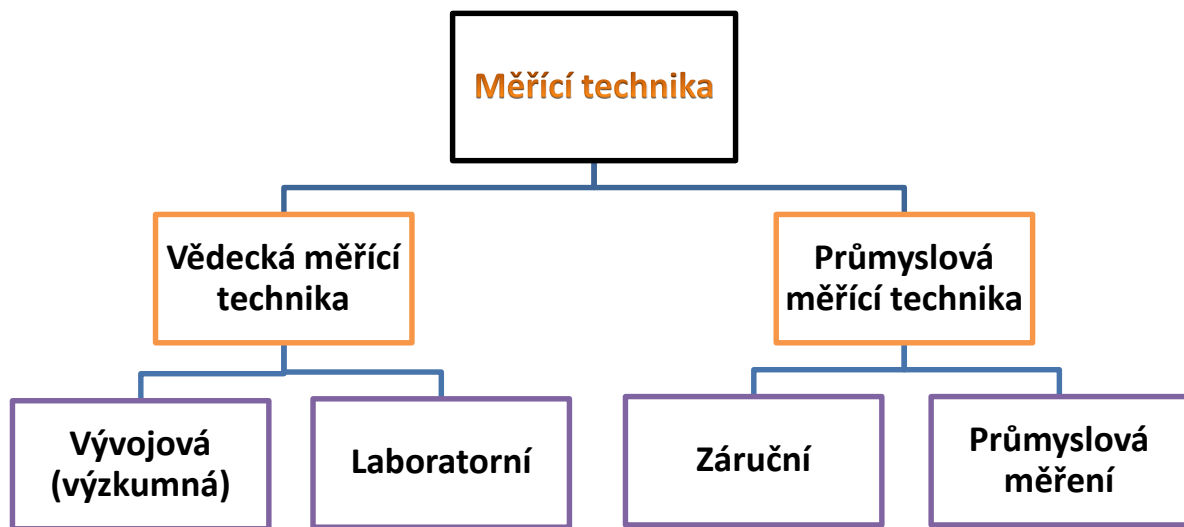
## 2.2 Rozdělení měřicí techniky

Protože je dnes velké množství měřidel a způsobů měření a i jejich využití se výrazně liší, provádí se rozdělení měřicí techniky.

Měřicí technika se rozděluje do dvou skupin (viz Obr.2.2-1). Jednou z nich je měřicí technika vědecká, kterou se dále dělí na vývojovou (výzkumnou) a laboratorní. Ve vývojové (výzkumné), měřicí technice se získávají údaje pro vývoj a zdokonalování měřicí techniky, proto je kladen velký důraz na přesnost měření. Laboratorní měření slouží spíše ke kalibraci etalonů a pracovních přístrojů. Pro tento typ měření je přesnost měření závislá na požadavcích jednotlivých druhů operací.

Průmyslová měřicí technika se používá především v průmyslu, kde jejím hlavním úkolem je získání určitých údajů, které slouží k posouzení kvality či jakosti výrobku. Tato měřicí technika se velmi rychle rozvíjí, protože její význam stále stoupá. Rozděluje se na dvě skupiny a to na záruční techniku a průmyslová měření. Záruční neboli garanční měření je vhodné pro získávání a zhodnocení informací o výrobku garantované výrobcem. Obvykle se jedná o rozsáhlá měření, kde můžeme měřit několik parametrů současně. Všechny použité přístroje musí být přísně kontrolovány a řádně testovány, aby se dosáhlo co nejpřesnějšího měření.

Průmyslová měření nám zajišťují měření výrobků tak, aby byl zajištěn bezporuchový a hospodárný průběh technologického procesu. Je snaha o co nejpřesnější požadované vlastnosti výrobku. Při tomto měření je kladen největší důraz na spolehlivost a dostatečnou přesnost měřících přístrojů. [4]



Obr2.2-1 Schéma rozdělení měřicí techniky

### 2.3 Zařízení pro měření teploty

V tepelném a chemicko-tepelném zpracování je jednou z nejdůležitějších veličin teplota. Značí se  $t$  (T) a její jednotky jsou stupně Celsia [°C], Kelvina [K], Fahrenheita [°F]. K jejímu měření se využívá fyzikálních principů jako jsou změny elektrického odporu (termočlánky), tepelná roztažnost kovů (rtuťové teploměry) atd. Pro jednotnost měření se zavádí **termodynamická teplotní stupnice**, odvozená z vratného tepelného stroje (Carnotův ideální stroj) jednotkou je kelvin [K].

V praxi se používají dva typy měřicích přístrojů: kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní měřicí přístroj se přímo dotýká měřeného objektu. Bezkontaktní měřicí přístroje fungují na principu tepelného záření. Zařízení pro měření teploty může být umístěno přímo v prostorách pecního zařízení nebo může být měřený objekt měřen na dálku.

#### **Kontaktní teploměry se rozdělují na:**

- dilatační – využívají teplotní roztažnosti tuhých látek, plynů a kapalin
- parní – využívají teplotní závislost tlaku syté páry teploměrové kapaliny
- odporové – využívají teplotní závislosti elektrického odporu vodičů a polovodičů
- termoelektrické – využívají teplotní závislosti termoelektrického napětí
- speciální – využívají změny vybraných fyzikálních vlastností tuhých látek a kapalin

#### **Bezkontaktní teploměry se rozdělují na:**

**Pyrometry** : lze rozdělit podle různých hledisek, jako je spektrální oblast využitého záření, způsob měření, optický systém apod. Pro praxi je nejvhodnější rozdělení podle spektrální oblasti využitého záření, a to na:

- spektrální - využívají záření při jedné vlnové délce
- pásmové – využívají záření v úzkém pásmu vlnových délek dle absorpčních vlastností detektoru záření.

- barvové – využívají tepelného záření při vlnové délce 0,55mm a 0,65mm
- radiační – využívají tepelného záření ve velké oblasti vlnových délek

**Termovize:** využívá ke snímání povrchových teplot předmětů speciální kamery s detektorem tepelného záření pouze v infračervené oblasti. Rozložení teploty na měřeném povrchu je zobrazeno na monitoru s barevnou nebo černobílou obrazovkou.

**Fototermometrie:** využívá klasického fotoaparátu s velkou světelností a fotomateriálem sensibilovaným na infračervené záření. [4]

Volba vhodného měřicího přístroje pro měření teploty závisí na prostředí kde se bude měřit teplota, a jakým teplotám bude měřicí přístroj vystaven. Umístění měřicího přístroje do nevhodného prostředí nebo do vyšších (nižších) teplot než co může měřicí přístroj snést, může mít za následek jeho trvalé poškození nebo nepřesné měření.

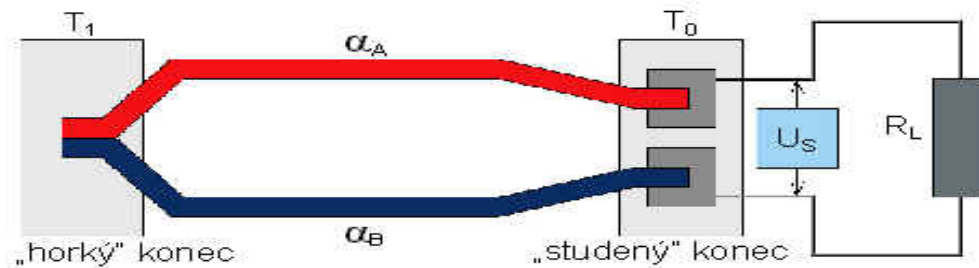
V provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování se používají nejčastěji odporové teploměry, termočlánky a pyrometry. Tyto měřicí přístroje slouží k měření a případné regulaci teploty. Je důležité znát dobu, za kterou je měřicí přístroj schopen ukázat přesnou teplotu. V zásadě platí, že čím kvalitnější měřicí přístroj je v provozu použit jeho reakční doba je kratší. Měřená teplota může nabývat hodnot kladných i záporných, kde měřicí rozsah je například u pyrometrů do  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $3000^{\circ}\text{C}$ .

**Odporové teploměry:** (Obr.2.3-1) využívají pro měření teplotní závislost na elektrickém odporu materiálu. Odporové teploměry mohou být konstrukčně provedeny jako tyčové, závitové, plášťové, atd. Jako materiál ochranné jímky se používá nerezová ocel CrNi nebo mosaz. Jsou vhodné do nižších teplot od  $-50^{\circ}\text{C}$  až do  $800^{\circ}\text{C}$  a jejich odezva je rychlá. Nejčastěji se používají pro měření teploty kapalin a plynů. Tyto teploměry mají své využití nejen ve strojírenském průmyslu, ale i v lékařském průmyslu, potravinářském průmyslu a ve vzduchotechnice. [2], [5]



Obr.2.3-1 závitový odporový teploměr s přípojovací hlavicí [6]

**Termočlánky:** (Obr.2.3-2) jsou nejvíce používaná měřidla v provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Jejich měřicí rozsah je od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $1200^{\circ}\text{C}$ . Pro měření teploty využívají termoelektrického jevu (Seebeckův jev), kde při styku dvou nesterorodých materiálů vzniká v elektrickém obvodu elektromotorická síla. Tato síla je závislá na druhu materiálu použitých drátů (vodičů) a rozdílu teplot spojů. Konstrukčně jsou dva různorodé dráty pevně spojeny v jednom bodě a navzájem od sebe odděleny tak, aby mezi dráty nedošlo ke kontaktu. Dráty jsou od sebe odděleny pomocí pouzder nebo nevodivých oxidů. Vodiče jsou kladné a záporné a je řada různých druhů, např. měď-konstantan Cu-Ko, který má rozsah od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$ . Volba materiálu termočlánku závisí na prostředí, kde se měří teplota. [4], [5]



Obr.2.3-2 Princip termočlánku [7]

**Pyrometry:** (Obr.2.3-3) používají se do prostředí, kde teploty dosahují až 3000°C, nebo kde je obtížné dosáhnout spojení termočlánku s měřeným objektem. Je to bezkontaktní měřicí přístroj, který měří tepelné záření měřeného objektu. Pyrometry mají velmi rychlou odezvu od 1ms a spektrální odezvou 1μm až 14μm. Pyrometry jako měřiče tepla se dělají i jako přenosná zařízení. Pyrometry nacházejí svoje využití v chemickém průmyslu, tepelném a chemicko-tepelném zpracování, sklářském průmyslu, atd. [2], [5]



Obr.2.3-3 Přenosný pyrometr AX-6520 s laserovým zaměřovačem a pod světelným zobrazovačem [8]

## 2.4 Měření tlaku

Měření tlaku v prostorech zařízení pro ohřev je důležitý pro jakost výrobku a bezpečnost celého provozu. Podle způsobu vyvolání tlaku můžeme tlak rozdělit na tlak vyvolaný silou působící na plochu a na hydrostatický tlak. Tlakoměry v provozech bývají umístěny například na tlakových nádobách, na vstupu a výstupu ze zařízení pro ohřev atd. Je důležité, aby všechny spojovací části tlakoměru byly dobře utěsněny.

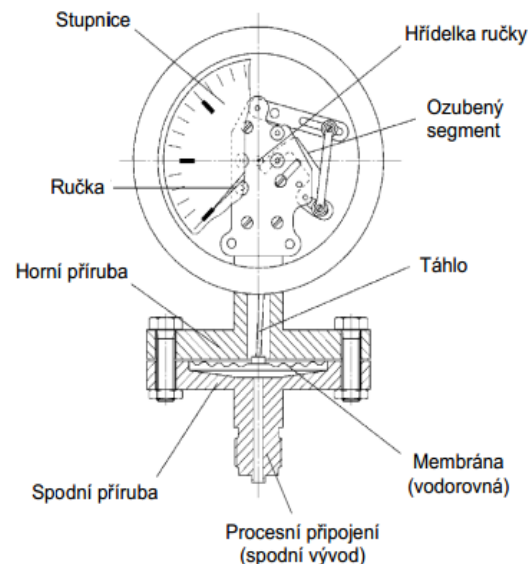
Přístroje, které se používají na měření tlaku, se nazývají tlakoměry. Ty dále můžeme rozdělit podle použití na:

- **manometry:** jedná se o deformační tlakoměry, které se používají pro měření přetlaku.
- **vakuometry:** se používají k měření malých absolutních tlaků.
- **tahoměry:** jedná se o kapalinové nebo deformační tlakoměry, které se používají pro měření malých podtlaků.
- **manovakuometry:** jedná se o deformační tlakoměry, které se používají pro měření podtlaku i přetlaku.
- **diferenční tlakoměry:** používají se k měření tlakových rozdílů. [4]

Měření tlaku v průmyslu tepelného a chemicko-tepleného zpracování se nejčastěji provádí deformačními tlakoměry. Tyto měřicí přístroje využívají pružné deformace, podle kterých pak lze určit měřený tlak. Aby se předešlo nepříznivým vlivům (trvalé deformace, elastické dopružování, apod.) deformačních tlakoměrů je vhodné materiál deformačního prvku nechat stárnout. Zestárlý materiál se zbaví vnitřních pnutí a přitom si zachová své pružné vlastnosti. Kvůli malým pružným deformacím je nutno mezi deformační prvek a ukazatel tlaku zařadit mechanický převod (snímat deformace lze i indukčně, kapacitně, apod.). Při změně teploty se mění mechanické vlastnosti materiálu deformačního prvku, proto je důležité, aby teplota mechanického převodu nepřesáhla hranici 80°C. Překročí-li teplota maximální hranici, musí se problém nepřesného měření vyřešit konstrukčně, např. dostatečně dlouhé vedení.

V praxi se tlak v pecních prostorách měří pomocí membránového tlakoměru a tlakoměru s Bourdonovou trubicí. Tyto tlakoměry mají v sobě zabudované deformační prvky. Pokud je na tyto prvky vyvinut tlak vznikne deformace, která se pomocí mechanického převodu ukáže na analogovém (popř. digitálním) budíku. Obecně platí, že tlakoměry by neměli být vystaveny rázům a ani vibracím. Mohlo by to mít za následek nepřesné měření tlaku a tím způsobit chybu v měření.

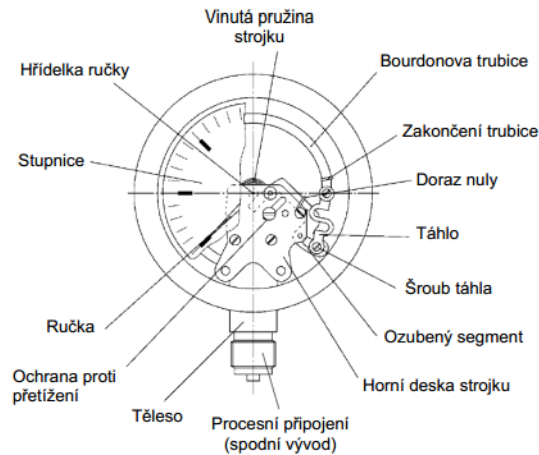
**Membránový tlakoměr:** (Obr. 2.4-1) tento tlakoměr je vhodný do prostředí se stálým tlakovým zatížením, kde je omezen jen rozsahem stupnice měření. Pokud by se membránový tlakoměr použil v prostředí, kde je tlak proměnný je rozsah zhruba 90% stupnice. Membrány jsou zvlněné a vyrobeny z kovového dostatečně pružného materiálu, který může být v tlakoměru uložen vodorovně nebo svisle. Z jedné strany na membránu působí tlak a měří se průhyb membrány. [9]



Obr.2.4-1 Membránový tlakoměr s vodorovnou membránou [9]

**Tlakoměr s Bourdonovou trubicí:** (Obr.2.4-2) stejně jako membránový tlakoměr je vhodný do prostředí se stálým působením tlaku v tomto případě je limitován pouze rozsahem stupnice. Při použití v prostředí s proměnným tlakem je rozsah stupnice zhruba 90%. Při menších tlacích je možno rozsah stupnici zvětšit až o 30%. Bourdonova trubice je oválného průřezu a zahnutá do tvaru C (kruhové provedení) nebo je do šroubovice (vinuté provedení). Je-li do trubice přiveden tlak, oválný průřez se mění na kruhový a působením tlakové síly se oblouk (vinutí) narovná. Volný konec Bourdonovy trubice vykonává pohyb, který je funkcí tlaku. Tento pohyb je využit pro vlastní měření tlaku. [9]





Obr.2.4-2 Tlakoměr s Bourdonovou trubicí C-provedení [9]

### Příslušenství tlakoměrů:

**Uzavírací armatury:** montují se mezi měřené místo a tlakoměrem, vhodné pro kontrolu popř. výměnu tlakoměru za provozu.

**Držáky přístrojů:** pro uchycení tlakoměru.

**Kondenzační smyčky:** měří-li se médium s vyšší teplotou používají se kondenzační smyčky (dlouhé přívodní potrubí), které médium ochladí a tím zabrání ohřívání tlakoměru.

**Oddělovací prvky:** ochrana tlakoměru před vnikem agresivního média.

**Pojistný ventil:** chrání tlakoměr před přetížením.

**Regulační ventil:** slouží k regulaci protékajícího média. [9]

## 2.5 Měření průtoku

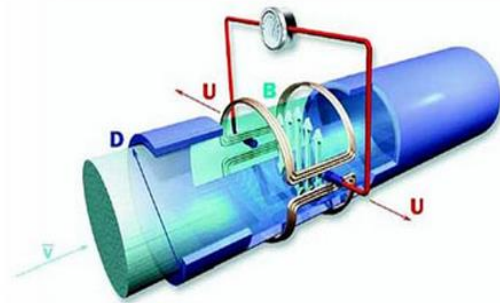
Měření průtoku je jednou z nejčastěji měřených veličin v tepelném a chemicko-tepelném průmyslu. Měří se (lineární či nelineární) množství daného média, které proteče za jednotku času neboli hmotnostní (objemový) průtok. Tímto měřením se získají informace o tom kolik kilogramů média proteklo potrubím, zda není někde závada či poškozené potrubí a jako regulační popřípadě bezpečnostní prvek. Měřící přístroje na měření průtoku se nazývají průtokoměry. Průtokoměry využívají nejrůznějších principů jako na příklad změny tlaku (teploty), polohy plováku, elektrického napětí atd.

Pro správnou volbu průtokoměru je potřeba se zamyslet nad tím, jaké je měřené médium (voda, pára, čpavek, olej atd.). Záleží na viskozitě měřeného média, na čistotě, na tlaku i na teplotě. Dalším faktorem výběru vhodného průtokoměru je zda-li jsou tyto veličiny konstantní nebo s časem proměnné. Důležité je také znát velikost potrubí kam chceme průtokoměr nainstalovat.

V tepelném a chemicko-tepelném průmyslu má měření průtoku význam například pro zachování poměru plynů v atmosféře, z ekonomického a bezpečnostního hlediska. Je-li potrubí protrženo (vyskytla se trhlinka) a dochází k úniku média, tím dochází ke ztrátám popřípadě k havárii. Proto jsou některé průtokoměry vybaveny senzory, které při poklesu (zvýšení) rychlosti (tlaku) vypnou tok média a tím zamezí vzniku škod. V provozech se

používají nejčastěji indukční průtokoměry, ultrazvukové, rotametry a hmotnostní Coriolisovy průtokoměry.

**Indukční průtokoměry:** (Obr.25-1) jsou to průtokoměry, vhodné pro všechny kapaliny, které mají elektrickou vodivost  $5 \mu\text{S/cm}$  a výše. Pro měření se využívá indukčnosti (Faradayův zákon), kde vodič je vytvořen protékající kapalinou. Při pohybu kapaliny v magnetickém poli se indukuje napětí, které zaznamená senzor, velikost napětí je přímo úměrná rychlosti média. Výsledky měření se poté odečtou na analogovém (digitálním) měřidle. Mezi hlavní výhody indukčního průtokoměru patří vysoká přesnost měření, měření nezávisí na hustotě (viskozitě), tlaku a ani na teplotě měřeného média. U některých typů průtokoměru lze měřit průtok média v obou směrech. Indukční průtokoměry se používají například v potravinářském průmyslu, ve vodárenství, v tepelném a chemicko-tepelném zpracování atd. [10]



Obr.2.5-1 Indukční průtokoměr [11]

**Ultrazvukové průtokoměry:** (Obr.2.5-2) jsou vhodné pro kapaliny i plyny, dají se používat pro agresivní prostředí. Měření se provádí na principu měření průletu ultrazvukového signálu (Dopplerův jev) v kapalině, který se odráží od pevných částic a bublinek, a to ve směru i proti směru proudění. Ultrazvukové průtokoměry jsou velmi přesné, mají vysokou a dlouhodobou stabilitu. Vyznačují se též téměř žádnou tlakovou ztrátou a nenáročnou údržbou. Ultrazvukové průtokoměry se využívají ve strojírenství, v chemickém průmyslu, v kanalizacích apod. [12]



Obr.2.5-2 Ultrazvukový průtokoměr [13]

**Rotametry:** (Obr.2.5-3) jsou vhodná měřidla pro měření průtoku kapalin a plynů. Při použití jiného média, než pro které je daný rotametr určen se musí rotametr korigovat. Jedná se o kuželovou svislou trubici, ve které je uloženo rotační tělísko (plovák). Tělísko může být uloženo v trubici volně nebo s vedením. Stupnice měření je na trubici, která je průhledná. Velikost průtoku ukazuje výška rotujícího tělíska, která se odečte na stupnici. Rotametry se nejčastěji vyskytují v tepelném a chemicko-tepelném zpracování. [2]



Obr.2.5-3 Rotametr [14]

**Coriolisovy hmotnostní průtokoměry:** (Obr.2.5-4) jsou nejuniverzálnější průtokoměry, můžou měřit prakticky všechny kapaliny a plyny (vodivé-nevodivé, agresivní-neagresivní). Měření využívá Coriolisovy síly, kde na těleso o určité hmotnosti pohybující se přímočarou rychlostí při otáčení danou úhlovou rychlostí, působí Coriolisova síla. Výhodami Coriolisových hmotnostních průtokoměrů jsou nízké pořizovací náklady, přesná měření, vysoká stabilita apod. tyto hmotnostní průtokoměry mají své zastoupení ve všech odvětví průmyslu (strojírenský, chemický, potravinářský, lékařský atd.), v laboratořích a je vhodný pro měření několika veličin najednou. [15]



Obr.2.5-4 Kompaktní Coriolisův průtokoměr [16]

## 2.6 Měření atmosféry v zařízení pro ohřev

Při tepelném a chemicko-tepelném zpracování je důležité znát složení atmosféry v prostoru zařízení pro ohřev. Jak atmosféra působí na výrobek, nám určuje teplota, tlak, a chemické složení atmosféry. V provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování se zjišťuje především obsah vodní páry (rosný bod) a obsah oxidu uhličitého.

Rosný bod je teplota vzduchu, při které je maximálně nasycen vodními parami. To znamená, že relativní vlhkost vzduchu je 100%. Jestliže teplota vzduchu klesne pod teplotu rosného bodu, nastane kondenzace. Vzduch při určité teplotě, může obsahovat jen určité procento vodních par. Čím je teplota vyšší, tím se zvětšuje i schopnost pohltit vlhkost. Při ochlazování začne vodní pára kondenzovat. [2]

**Lithiové čidlo:** v praxi nejčastěji používané měřidlo pro obsah vodní páry v atmosféře. Čidlo se skládá z termočlánku (odporového teploměru) v tenkém kovovém pouzdře, který je pokryt skleněným pletivem. Na pletivu jsou do spirály namotány dráty ze zlata a stříbra, které jsou od sebe odděleny a je na nich vloženo napětí. Skleněné pletivo je nasyceno chloridem lithiovým, který je hygroskopický. Chlorid lithiový při styku s atmosférou pohlcuje vodní páry a tím se stává vodivým. Čím více vodní páry pohltí tím je vodivější. Průtokem proudu vzniká teplo, které snižuje schopnost chloridu lithiového pohlcovat vlhkost. Při určité teplotě se ustaví na stacionárním stavu. Rovnovážný stav obsahu vody v elektrolytu je závislá na teplotě elektrolytu ta, je pak funkcí parciálního tlaku vodních par v okolí vzduchu. Teplota se měří lithiovým čidlem zasunutým v trubici, ze které se zjišťuje vlhkost. [2]

**Měření rosného bodu pomocí adiabatické expanze:** v provozu méně používané měření. Dvě platinové elektrody, které jsou nabitý napětím jsou umístěny vedle sebe na izolačním podkladu a jsou omývány atmosférou. Atmosféra je expandující po předchozím izotermickém stlačení. Při adiabatický expanzi dojde k ochlazení atmosféry. Po dostatečném ochlazení atmosféry se čidlo orosí a tím dojde k uzavření elektrického okruhu mezi elektrodami. Tím se

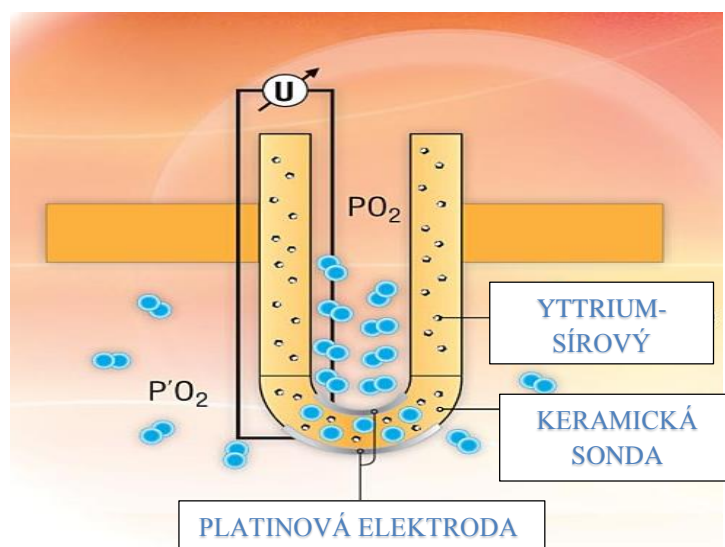
vyšle signál do přístroje pro měření teploty (měřič musí mít malou odezvu), který zjistí teplotu orosení. Zároveň se sepne okruh topného vynutí, který ohřeje zkondenzovanou vodní páru a tím jí odpaří. [2]

Uhlíkový potenciál v pecní atmosféře je definován jako obsah uhlíku v procentech z nelegovaného austenitu, který je v rovnováze s odpovídající atmosférou. Uhlíkový potenciál je funkcí teploty. Matematicky je uhlíkový potenciál definován jako:

$$K_c = \frac{p(\text{CO}_2)p(\text{H}_2)}{p(\text{CO})p(\text{H}_2\text{O})}; \text{ kde } p \text{ je parciální tlak}$$

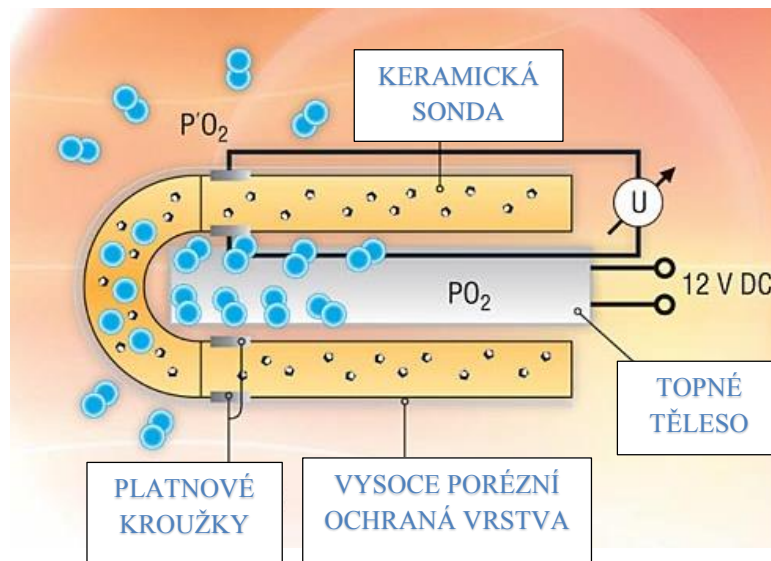
[17]

**Kyslíková sonda:** (Obr.26-1) v provozech chemicko-tepelného zpracování (především se jedná o proces cementace) je kyslíková sonda standardně používána. Kyslíková sonda má vyšší přesnost stanovení hladiny uhlíku, než analyzátoři CO<sub>2</sub>. Kyslíková sonda je tvořena kyslíkovým senzorem ZrO<sub>2</sub>, poseta oxidy yttria. To zvyšuje stabilitu měření, vodivost iontů a zvyšuje odolnost proti tepelnému a mechanickému namáhání. Další součástí kyslíkové sondy jsou termočlánky, ochranná pouzdra a hlavice. Zirkonové pouzdro je spojené platinou se dvěma elektrodami. Elektrody jsou vnější a vnitřní, kde vnější sonda je ochranné pouzdro s vysokou odolností. Oxid zirkonu vede při vyšších teplotách (nad 700°C) kyslíkové ionty. To způsobí napětí mezi vnitřním a vnějším povrchem čidla. Přesnost měření závisí na teplotě čidla a poměru parciálních tlaků. Tato sonda je nainstalována v pecním zařízení pro cementaci ve školní lince na ZČU, na které byla provedena experimentální část bakalářské práce.[17]



Obr.2.6-1 Princip kyslíkové sondy [18]

**Lambda sonda:** (Obr.2.6-2) má stejnou funkci jako kyslíková sonda a i princip jejich měření je dost podobný. Lambda sonda má keramický povrch pokryt mikroporézní platinovou vrstvou uvnitř i venku. Tyto vrstvy slouží jako elektrody. Vnější vrstva je pokryta ochranou porézní keramickou vrstvou. Pro umožnění pohybu iontů kyslíku slouží niklové topné tělísko, které slouží k ohřívání keramiky uvnitř lambda sondy. Lambda sonda se využívá v provozech chemicko-tepelného zpracování a je i častým prvkem u automobilů. [17]



Obr.2.6-2 Princip lambda sondy [19]

**Infračervená analýza:** využívá infračerveného spektra pro analýzu plynů a určení tak podílu této plynné složky v atmosféře pecního zařízení. Jedno plynné (oxid uhelnatý) nebo více plynné (metan, oxid uhličitý, oxid uhelnatý) analyzátoři umožňují v atmosféře detekovat přítomnost těchto plynů. Množství oxidu uhličitého v atmosféře je nepřímý způsob jak měřit množství uhlíkového potenciálu dané atmosféry. Dnes se používají tři plynné analyzátoři pro sledování oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a metanu. Jednotlivé plyny absorbují infračervené záření ve velmi specifických vlnových délkách. Množství absorbovaného infračerveného světla se zvyšuje s koncentrací plynů. Přístroj pracuje na principu, že vzorek plynu prochází komůrkou, kde je vyhříván drát, který vysílá infračervené záření o známé vlnové délce. Snímač převádí prošlé infračervené záření na elektrický signál. Tato metoda má velkou výhodu v rychlé odezvě a ve snadné kalibraci. [20]

**Měření disociovaného amoniaku:** (Obr.2.6-3)  $\text{NH}_3$  je zcela rozpustný ve vodě, proto se využívá vodní byrety ke zjištění procenta disociovaného amoniaku. Výfuky ze zařízení pro ohřev prochází vertikální byretou a ta se poté uzavře na vstupu i na výstupu pomocí ventilů. Po uvolnění horního ventilu voda začne téct a pohlcovat amoniak. Tok vody se zastaví až tehdy je-li všechen amoniak spotřebován. Měření disociovaného amoniaku má velký význam u nitridace kde je proces řízen nitridačním potenciálem. Nitridační potenciál je matematicky definován:

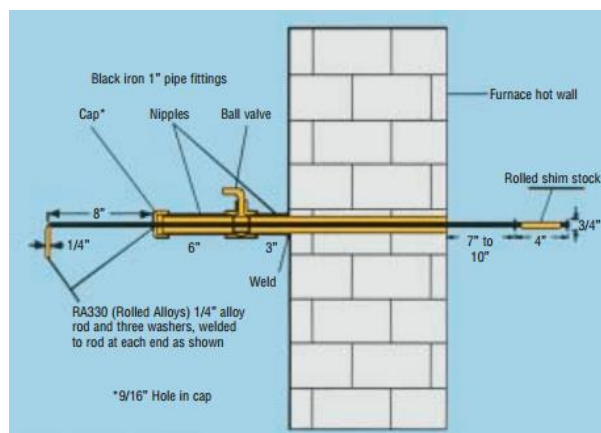
$$K_N = \frac{p\text{NH}_3}{(p\text{H}_2)^{\frac{3}{2}}}; \text{ kde } p \text{ je parciální tlak}$$

[21]



Obr.2.6-3 Vodní byreta pro měření % disociovaného amoniaku [21]

**Shim stock analýza:** (Obr.2.6-4) je v hodná metoda pro zjištění uhlíkového potenciálu atmosféry v pecním zařízení. Shim stock je tenký plech o tloušťce 0,1, 0,25 nebo 0,38 mm. Tento plech má velmi nízký obsah uhlíku. Přesnost měření je dána čistotou plechu (mastnoty, koroze, zbytky oleje atd.). Před měřením by plechy by neměli být čištěny rozpouštědlem. Takto připravený plech se zváží předtím než je vložen do pecního zařízení. Plech je zavěšen na tyč, která je vložena do pecního zařízení skrze stěnu nebo střechu pecního zařízení. Délka tyče vložená do pecního zařízení musí být dostatečně dlouhá, aby mohla pecní atmosféra volně cirkulovat okolo plechu. Plech je v pecním zařízení uložen po určitou dobu (doba závisí na teplotě). Poté se plech z pecního zařízení



Obr.2.6-4 Typické uspořádání Shim stock analýzy [22]

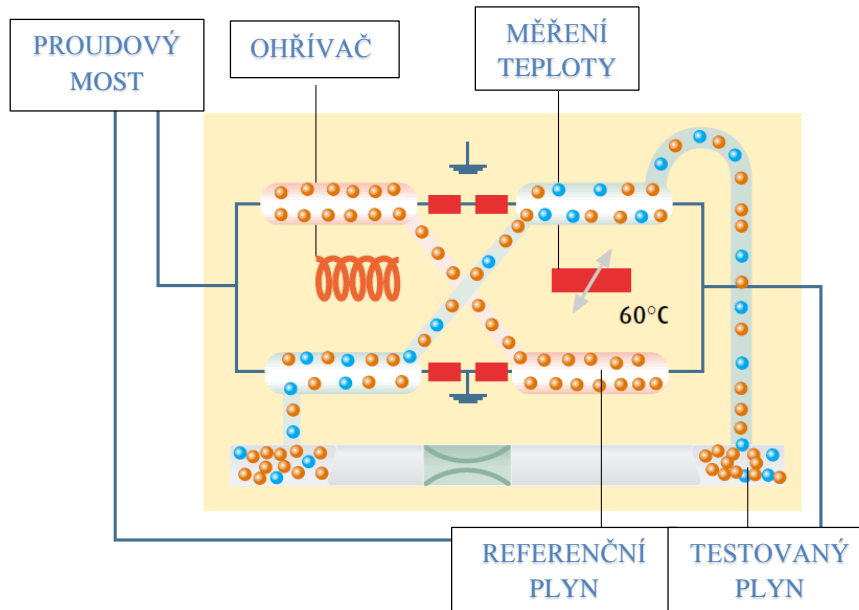
vytáhne a ochladí. Ochlazení probíhá určitou dobu, která se určí z teploty a tloušťky plechu. Poté se plech opět zváží a podle následujícího vzorce se spočítá uhlíkový potenciál.

$$C_p = \frac{(W_g \cdot 100)}{W_f} + \%C_0$$
 ; kde  $C_p$  je uhlíkový potenciál atmosféry,  $W_g$  je rozdíl hmotností před a po měření,  $W_f$  je hmotnost plechu po měření a  $C_0$  je původní obsah uhlíku plechu. [22]

**Analýza vodíku a amoniaku:** jsou dva principy na zjištění složení atmosféry. První je infračervená analýza amoniaku, která založena na schopnosti molekul absorbovat infračervenou vlnovou délku, která je specifická pro každou molekulu plynu. Infračervený paprsek je rozdělen na dva samostatné svazky. Jeden svazek prochází skrze komoru, kde je umístěn plyn vzorku. Druhý paprsek prochází přes komorou referenčního plynu (např. dusíkem). Na konci se paprsky dostanou do detektoru, množství amoniaku získá porovnáním dvou detekovaných signálů paprsků.

Druhý princip probíhá podobně jako u kyslíkové sondy. Snímač používá trubici, která snímá rozdíl parciálního tlaku vodíku mezi referenčním plynem uvnitř senzoru a na druhém konci trubice. Výstupní signál udává přímo hodnotu koncentrace vodíku v atmosféře. [23]

**Vodíková sonda:** plynný vodík je jednoatomový plyn, proto nemůže být analyzován infračervenou analýzou. Ovšem kvůli vysoké tepelné vodivosti ho můžeme změřit analýzou založené na tepelné vodivosti. Konstrukce detektoru tepelé vodivosti využívá Wheatstoneův můstek. Zde je odpor, který je v kontaktu s měřeným plynem. Změny koncentrace vodíku mají za následek změnu teploty. V případě že je neznámé množství proměného amoniaku/dusíku lze použít dva vodíkové analyzátory pro přesné měření dusíkového potenciálu. Analyzátory jsou umístěny tak, že jeden měří v pecním zařízení koncentraci parciálního tlaku vodíku a druhý měří koncentraci vodíku po disociaci amoniaku. Z těch to dvou měření se dá vypočítat dusíkový potenciál. Princip metody je na Obr. 2.6-5. [23]



Obr.2.6-5 Princip vodíkové sondy [23]

Ve školní lince, na které se provedla experimentální část bakalářské práce je jako prvek pro měření atmosféry u pecního zařízení pro nitridaci nainstalována **H<sub>2</sub>Smart** Obr.2.6-6. Jedná se o vodíkovou sondu, která slouží k velmi přesnému měření vodíku v atmosféře při nitridaci a nitro-cementaci. Slouží také pro výpočet parametrů nezbytných pro celý proces. H<sub>2</sub>Smart je vhodná pro výpočet následujících parametrů: pH<sub>2</sub>, pNH<sub>3</sub>, pO<sub>2</sub>, pCO, pCO<sub>2</sub>, K<sub>N</sub>, K<sub>C</sub> a disociace.



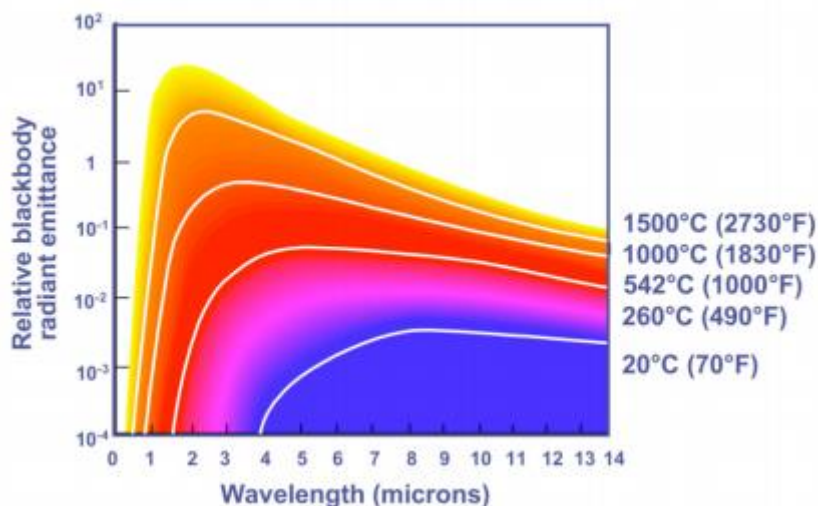
Obr.2.6-6 H<sub>2</sub>Smart [24]

**Protherm 500** je používán v provozech chemicko-tepelného zpracování jako řídicí jednotka. Jedná se o černou krabičku s několika vstupy a výstupy sloužící ke komunikaci s „okolním světem“ (s jinými součástmi). Protherm 500 je řídicí systém, který má tři hlavní funkce a to řízení plyné atmosféry, řízení teploty a řízení koordinace pohybů. Protherm 500 přijímá signály z kyslíkové a vodíkové sondy, které následně vyhodnocuje. Pomocí informací, které systém získá je schopen řídit složení atmosféry v zařízení pro ohřev. Software umožňuje také řídit celý proces sám na základě vstupních údajů (např. chemické složení výrobku). Řídicí systém protherm 500 je vybaven PLC SIMATIX S7-200, což je řada malých programovatelných automatů (řídicích systémů), které slouží pro řízení jednoduchých aplikací. Protherm 500 a PLC SIMATIX S7-200 spolu komunikují prostřednictvím PROFIBUS. Profibus je průmyslová sběrnice určená pro automatizaci výrobních linek. Pomocí těchto automatů se řídit pohyb vsázky v pecních prostorech, kontrola a řízení teploty kalící lázně atd. [25]

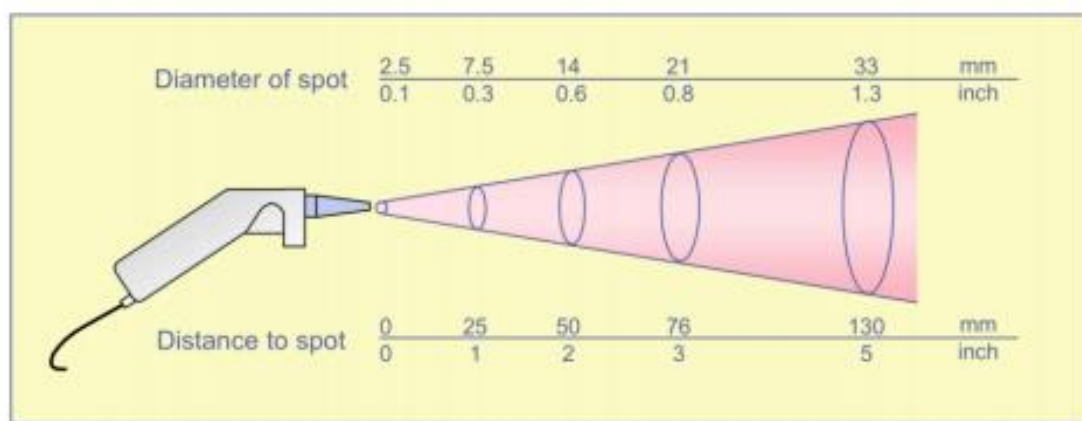
### 3 Vývoj měření a regulace v zařízení pro ohřev

V dnešní době je kladen velký důraz na jakost a kvalitu výrobku. Trendem je co nejkvalitnější výrobek za co možná nejnižší cenu. Důsledkem této snahy je vývoj nové technologie pro měření a regulaci v zařízení pro ohřev. Dnes se zdokonalují stávající metody pro měření a regulaci a také se vyvíjejí zcela nové technologie měření. Měřidla jsou přesnější, snadněji se ovládají, mají více funkcí atd. S technicky dokonalejšími měřidly se značně zvyšuje kvalita celé výroby.

**Měření teploty pomocí infračerveného záření:** tato metoda se používá již několik let a stále se vyvíjí. Především se dále rozvíjí přesnost měření, spolehlivost a zjednodušení použití přístrojů. Infračervené záření je vhodné pro měření a regulaci teploty. Velkou výhodou je velké rozsahy měřících teplot. Výhodou metody je i měření na větší vzdálenosti bez fyzického kontaktu s výrobkem a možnost měření pohyblivých objektů. Metoda využívá Planckova zákona o záření dokonale černého tělesa. Zákon uvádí, že každý objekt vyzařuje energii záření a intenzita tohoto záření je funkcí teploty měřeného objektu (viz. Obr.17). Snímač jednoduše měří intenzitu záření, čímž se měří teplota měřeného objektu. Infračervená technologie není nový objev, ale až nedávné inovace (snížení pořizovacích nákladů, zvýšení spolehlivosti, snížení velikosti zařízení) umožňují, aby se začala používat v průmyslové výrobě. Optické rozlišení infračerveného teploměru je dán poměrem D/S, kde D je vzdálenost měřeného objektu od senzoru a S je velikost (průměr) měřeného místa (viz. Obr. 3-1). [24]



Obr.3-1 Závislost mezi teplotou a energií [26]



Obr.19 Optické rozlišení, závislost D/S [26]



**Line scanners:** tyto skenery mají obvykle podobu tepelného čidla, který snímá měřený objekt z jednoho okraje k druhému (měřený objekt se může i pohybovat). Velkou výhodou oproti bodovému měření je možnost zjistit kolísání teploty po celém povrchu měřeného objektu. Další výhodou oproti bodovému měření teploty je i cena. Pokud by jsme chtěli měřit teplotu po celé délce objektu bodovými senzory, muselo by se jich do zařízení pro ohřev umístit hned několik vedle sebe, což by mělo za následek vysoký vzrůst nákladů. I přes tuto skutečnost by zde byli tak by zde byli neměřené mezery mezi jednotlivými senzory. Měření se provádí bezkontaktně a měří teplotu objektu přímo. Skenery využívají záření s vysokou rychlostí odezvy. Klasické skenery pracují s rychlostí 100-150 snímků za sekundu na 1 000 datových bodů v každém testu. To má výhodu především v měření rychle se pohybujících objektů. Umístění senzorů je za robustním ochranným sklem, který ho chrání před nepříznivými vlivy prostředí. [27]

Měření různých potenciálů v nitridační nebo karbonitridační atmosféře, které tyto systémy používají jsou známy již mnoho let. Nicméně, je zde několik zásadních rozdílů v tom, jak jsou přístroje navrženy a jak se chovají v provozu ve srovnání s laboratorním prostředím. Nejdůležitějším úkolem při nitridaci a karbonitridaci je kromě perfektní kontroly teploty, kontrola nitridačních vlivů atmosféry. Správné nitridační podmínky jsou stanoveny pomocí pevného toku plynů.

**SAE AMS 2759/6A:** atmosféra je řízena v % disociace v jednom nebo ve dvou stupních v závislosti na oceli a požadovaném procesu.

**SAE AMS 2759/10:** atmosféra je řízena nitridačním potenciálem. Zde nejsou obvykle žádné údaje pro kontrolu procesu karbonitridace. Nicméně, modernější a přesnější systémy řídí nitridační a cementační potenciál stejně jako nitridační proces. Uhlík je zde většinou ve formě plynu CO<sub>2</sub>.

**SAE AMS 2759/12:** tento poměrně nový systém vyžaduje řízení dvou potenciálů najednou. Jedná se o nitridační potenciál a cementační potenciál, které je důležité udržovat na nastavených hodnotách. Systém je vhodný pro výrobu nepřetržitě složené vrstvy pomocí plynného procesu.

Existují i další procesy jako oxi-nitridování, který nebyl ještě úředně definován, ale v provozech se již používá. Tento proces se zaměřuje především na ošetření chromovaných dílů. Kyslík se používá k přerušení pasivační vrstvy, které můžeme najít u těchto ocelí. V procesu oxi-nitridaci se musí kontrolovat zároveň nitridační potenciál a kyslíkový potenciál. [26]

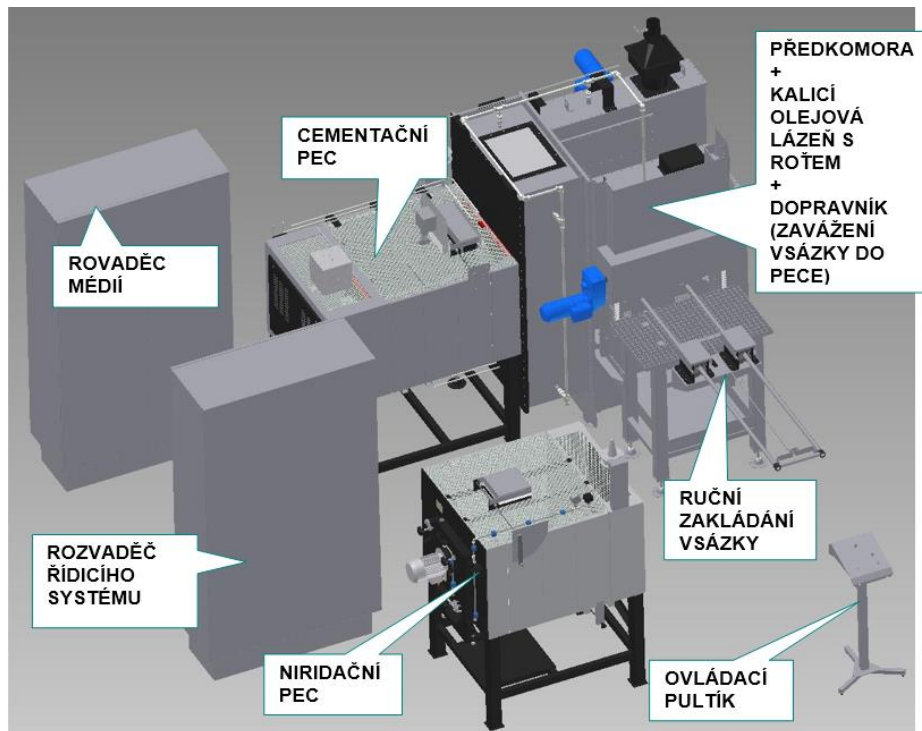
## 4 Experimentální část

Experimentální část byla provedena na školní lince pro chemicko-tepelné zpracování. Na této lince se v pecním zařízení při různém nastavení (teploty, atmosféry) bude zpracováno několik vzorků různých ocelí. Jedná se o oceli pro cementaci **16MnCr5**, **C15** a pro nitridaci **34CrAlNi7**, **31CrMoV9**. Pro cementaci byly zvoleny cementační teploty 920, 880 a 950°C a různé doby sytíci a difúzní periody. Pro nitridaci byly zvoleny nitridační teploty 520, 540 a 560°C a různé doby sytíci a difúzní periody. Z každé z výše zmíněných ocelí se vezme vzorek, na kterém se určí mikrostruktura a chemické složení v dodaném stavu. Dále se z každého testovaného materiálu připraví dvanáct vzorků, které budou následně chemicko-tepelně zpracovány. Z těchto vzorků bude použito šest pro metalografický výbrus a zjištění

hloubky cementační a nitridační vrstvy. Cílem této práce je testování měřidel (reprodukovatelnost) na základě naměřených hodnot na školní lince.

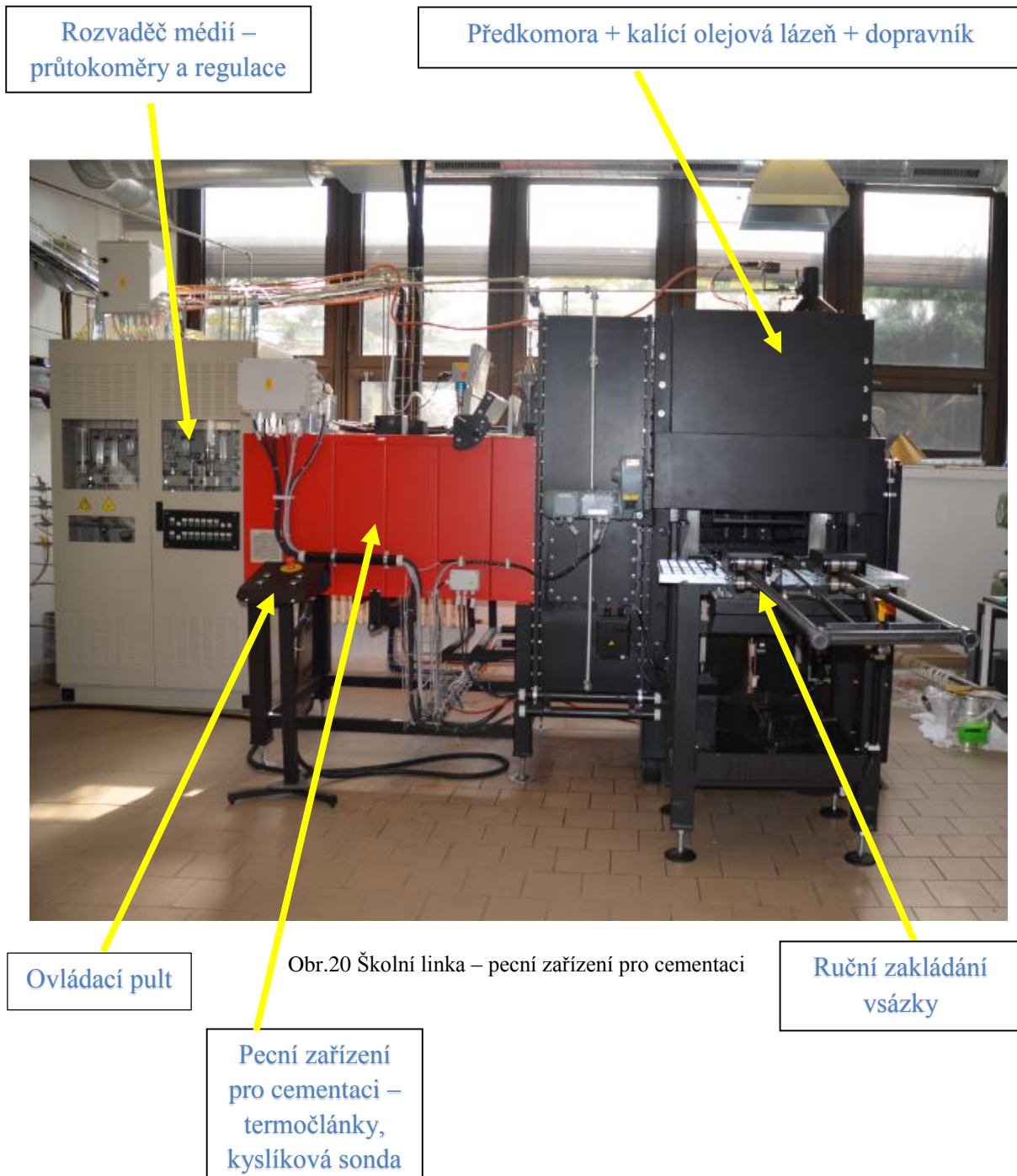
#### 4.1 Popis školní linky pro chemicko-tepelné zpracování

Školní linka pro chemicko-tepelné zpracování byla dodána a nainstalována firmou LAC s.r.o. Linka se skládá z pecního zařízení pro cementaci, jejíž součástí je i předkomora s olejovou lázní a z pecního zařízení sloužící k nitridaci. Nedílnou součástí školní linky je i rozvaděč medií a rozvaděč řídicího systému. Rozložení jednotlivých součástí je patrné z Obr.4.1-1 a jednotlivé součásti sou popsány níže.



Obr.4.1-1 Schéma školní linky [28]

**Pecní zařízení pro cementaci:** na Obr.4.1-1 je zobrazena školní linka pro cementaci. Vsázka se ručně vloží do předkomory, ze které se pomocí dopravníku zaveze do pecního zařízení. Zde se ohřeje na cementační teplotu a z rozvaděče medií je přiveden plyn do atmosféry. Po ukončení procesu se vsázka pomocí dopravníku přemístí zpět do předkomory. Odtud je přemístěna do spodní části předkomory, kde je kalící olejová lázeň. Teplota zde je měřena pomocí termočlánků a složení atmosféry pomocí kyslíkové sondy. Jako pracovní plyn pro cementaci je zde použit metanol, který má průtokové množství nastaveno na 0,132 l/hod. Přívod metanolu ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) je ovládán elektromagnetickým ventilem. Tyto ventily jsou vždy dva v sérii a to z bezpečnostních důvodů. Pro zvýšení uhlíkového potenciálu  $C_P$  je do atmosféry střídavě přiváděn propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). Průtokové množství propanu je nastaveno na 2,6-3 NI/hod. Stejně jako metanol je propan řízen pomocí dvou elektromagnetickým ventilů řazených do série.





Obr.21 Ruční zakládání vsázky



Obr.22 Dopravník mezi předkomorou a pecním zařízením

### Parametry pecního zařízení pro cementaci:

<b>Příkon topení pecního zařízení</b>	<b>13 kW</b>
<b>Přípojný příkon topení pecního zařízení</b>	<b>17,3 kVA</b>
<b>Jmenovitý proud topení pecního zařízení</b>	<b>19 A</b>
<b>Příkon motorů (ventilátor cirkulace + motor pohonu dveří)</b>	<b>0,55 (0,37 + 0,18) kW</b>
<b>Maximální teplota pecního zařízení</b>	<b>950°C</b>
<b>Maximální hmotnost vsázky</b>	<b>15 kg</b>

Tab.1 Parametry pecního zařízení pro cementaci [28]

### Parametry předkomory:

<b>Příkon topení lázně</b>	<b>3 kW</b>
<b>Přípojný příkon topení lázně</b>	<b>6,9 kVA</b>
<b>Jmenovitý proud topení lázně</b>	<b>4,5 A</b>
<b>Motor pohonu dopravníku</b>	<b>0,37 kW</b>
<b>Motor pohonu roštu</b>	<b>0,12 kW</b>
<b>Motor pohonu míchání oleje</b>	<b>0,55 kW</b>
<b>Motor pohonu vstupních dveří</b>	<b>0,18 kW</b>
<b>Celkový příkon motorů (motor pohonu míchání + motor pohonu roštu + motor pohonu dopravníku + motor pohonu dveří)</b>	<b>1,22 kW (0,55 + 0,12 + 0,37 + 0,18)</b>
<b>Maximální teplota lázně</b>	<b>120°C</b>
<b>Maximální hmotnost vsázky (zatížení roštu)</b>	<b>15 kg</b>

Tab.2 Parametry předkomory [28]

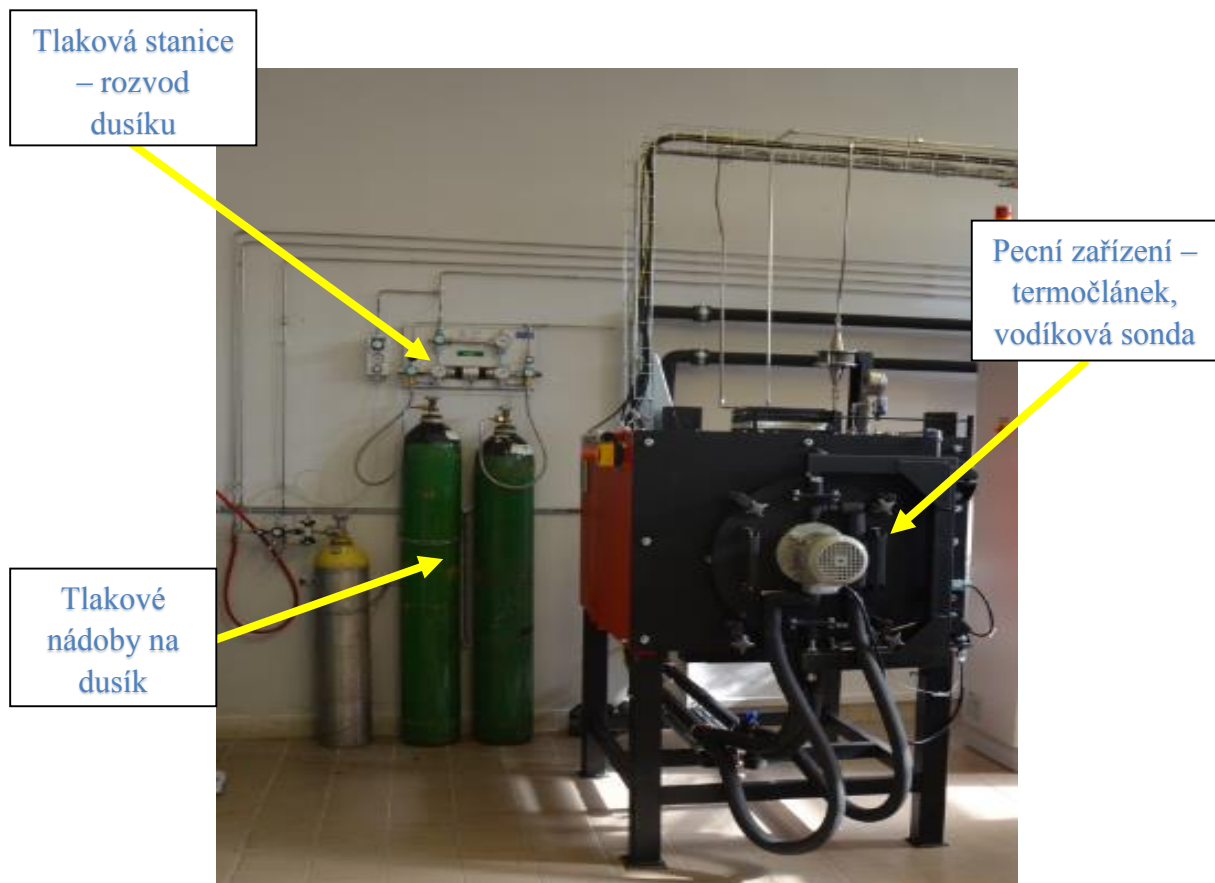
### Regulace teploty a monitorování limitní teploty pecního zařízení:

Teplota je regulována prostřednictvím PLC SIMATIC S7-200 a přístroje PROTHERM, které spolu komunikují prostřednictvím rozhraní PROFIBUS. Programy pro řízení pece jsou vytvářeny v přístroji PROTHERM 500. PROTHERM porovnává žádanou hodnotu s hodnotou měřenou (získanou z PLC SIMATIC) a na základě velikosti regulační odchylky (rozdíl mezi žádanou a naměřenou hodnotou teploty) posílá PLC hodnotu regulačního zásahu (výkonu) v %. Topení pecního zařízení je spínáno polovodičovými

spínacími relé, která jsou řízena tranzistorovým výstupem PLC. Jsou to výstupy s pulsní šířkovou modulací (PWM - Pulse Width Modulation) pro regulaci teploty. Napájení topení pecního zařízení je spínáno stykačem, řízeným výstupem PLC. Napájení topení pecního zařízení lze zapnout pouze v případě, že je spuštěna cirkulace vzduchu v pecním zařízení a limitní jednotkou pecního zařízení není registrována limitní teplota u spirál (nastaven limit 1000°C) a limitní pecního zařízení není registrována limitní teplota v retortě pece (nastaven limit 960°C).

Teplota komory je snímána termočlánkem. Hodnota této teploty je předávána do PROTHERMU. Limitní teplota spirál je monitorována termočlánkem (připojen na vstup PLC) a termočlánkem. Termočlánek kyslíkové sondy je také připojen na vstup PLC. Hodnota teploty, měřená tímto termočlánkem, je společně s hodnotou napětí (mV) měřenou kyslíkovou sondou posílána do PROTHERMU, kde jsou využity pro výpočet nauhličovacího potenciálu. [28]

**Pecní zařízení pro nitridaci:** na Obr.22 je fotografie školní linky pro nitridaci. Zde se vsázka zakládá ručně přímo do pecního zařízení. Ohřev je prováděn na nitridační teplotu (nižší než u cementace). Dusík je do atmosféry přiveden z rozvaděče médií (viz Obr.19). Pro měření teploty v pecním zařízení je zde termočlánek. Pro měření složení nitridační atmosféry se používá vodíková sonda. Jako základní vybavení pro rozvod dusíku je tlaková stanice, která je složena ze dvou vysokotlakých nádob a redukčního panelu. Ten je vybaven armaturami a vlastními redukcemi. Vysokotlaké lahve jsou s redukčním panelem propojeny tlakovými hadicemi, zde je tlak z vysokotlakých lahví redukován na tlak pracovní. Všechny prvky rozvodu plynů jsou označeny dle ČSN 13 0072 a ČSN EN 1775. Jako procesní plyn je zde dusík jehož průtokové množství je nastaveno na 60 l/hod.



Obr.23 Školní linka – pecní zařízení pro nitridaci



Obr.24 Vnitřní prostor pecního zařízení



Obr.25 Rozvod dusíku – ventily

**Parametry pecního zařízení pro nitridaci:**

<b>Příkon topení pecního zařízení</b>	<b>13 kW</b>
<b>Přípojný příkon topení pecního zařízení</b>	<b>17, 3 kVA</b>
<b>Jmenovitý proud topení pecního zařízení</b>	<b>19 A</b>
<b>Příkon motoru</b>	<b>0, 37 kW</b>
<b>Maximální teplota pecního zařízení</b>	<b>650°C</b>
<b>Maximální hmotnost vsázky</b>	<b>50 kg</b>

Tab. 3 Parametry pecního zařízení pro nitridaci [28]

Ve školní lince jsou použity solenoidové ventily, který slouží k regulaci průtoku plynů nebo kapalin. Principiálně jde o elektromagnetický ventil. Solenoidový ventil je ovládán elektrickým proudem, který je propojen s cívkou. Je-li cívka pod napětím vytváří magnetické pole, které způsobí že píst uvnitř cívky se může pohybovat. V závislosti na konstrukci ventilu píst buď ventil uzavírá nebo otevírá. Vypne-li se přívod elektrického proudu z cívky píst se vrátí do původní polohy. Běžné elektromagnetické ventily mají dva porty: vstup a výstup. Složitější ventily však mohou mít tři i více portů to záleží na provedení ventilu. Tyto ventily mají dlouhou životnost, vysokou spolehlivost a rychlou obsluhu. [29]

**4.2 Příprava vzorků**

Vzorky, použité pro experimentální část bylo nutno upravit před vlastním chemicko-tepelným zpracováním. Výše uvedené materiály byly dodány ve formě tyčí kruhového průřezu. Všechny vzorky pro tepelné zpracování byli nařezány na metalografické pile. Vzorky dále byly broušeny na metalografické brusce a ošetřeny lihem. Povrch vzorků bylo nutno upravit proti následné korozi, proto byly vzorky mořeny v 1/3 kyseliny chlorovodíkové (HCl) a inhibitoru. Poté se vzorky očistily v destilované vodě a vysušily. V dalším kroku byly vzorky odmaštěny v ultrazvuku, kde byl roztok 5% SYNTHASOLU a nastaveny pracovní podmínky teplota 50°C na 25 minut. Vzorky byly dále očištěny ACETONEM a byly připraveny pro vsázkování. Aceton je velmi dobré rozpouštědlo organických látek s charakteristickou skupinou karbonylu jeho chemický vzorec je C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O.

Z každého materiálu použitého v experimentu byl vyroben vzorek na kterém byl udělán metalografický výbrus. Vzorky byly leptány 3% NITALEM, což je roztok  $\text{NHO}_3$  v etanolu a následně provedena metalografická pozorování. Určovala se zde mikrostruktura, chemické složení a mikrotvrdość.

#### 4.2.1 Materiály v dodaném stavu

**Ocel k cementaci 16MnCr5 ( ČSN 14 220):** nejčastěji používaná cementační ocel pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Prokaluje do hloubky cca 30 mm. Ve stavu kaleném a popuštěném je použitelná pro průměry do cca 35 mm. Je svařitelná a vhodně tepelně zpracovaná též dobře tváritelná za studena. Přísadou bóru (0,0008 až 0,0050%) se docílí zvýšené houževnatosti cementované vrstvy a vyšší prokalitelnosti. [30]

Chemické složení podle normy ČSN EN 10084 [%]:

C	Mn	Si	Cr	P	S
0,14-0,19	1,00-1,30	max 0,40	0,80-1,10	max 0,035	max 0,04

Tab. 4 Chemické složení podle normy ČSN EN 10084

Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba B9573 [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	W
0,19	0,28	1,26	0,022	0,04	0,9	0,16	0,17	0,01	0,01

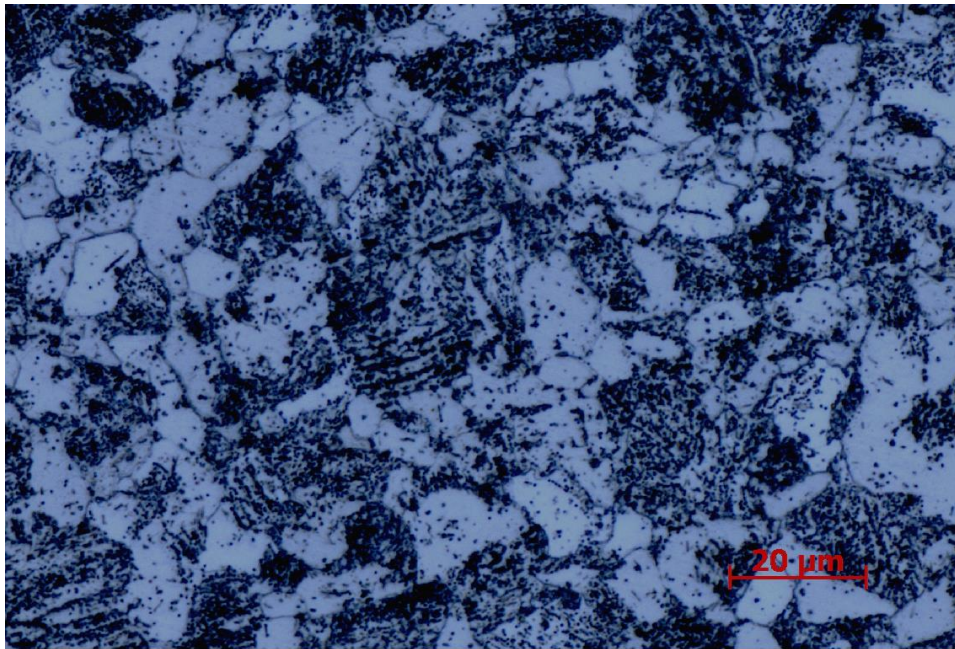
Tab.5 Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba B9573

Chemické složení naměřené na vzorku [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	W
0,18	0,28	1,39	0,021	0,03	1,1	0,12	0,19	0,01	0,004	0,006

Tab.6 Chemické složení naměřené na vzorku

Na Obr.4.2-1 je fotografie mikrostruktury oceli 16MnCr5, která je zvětšena 500x. Struktura je perlitická, morfologie cementitu a je zde převážně globulární cementit.



Obr. 4.2-1 ocel 16MnCr5

**Ocel k cementaci C15 (ČSN 12 020):** je určena pro méně namáhané cementované strojní díly menších rozměrů se střední pevností v jádře (méně namáhaná ozubená kola, vačkové hřídele, řetězová kola vodítka a pod.). [31]

Chemické složení podle normy ČSN EN 10084 [%]:

C	Mn	Si	P	S
0,12-0,18	0,3-0,6	max 0,40	max 0,035	max 0,035

Tab.7 Chemické složení podle normy ČSN EN 10084

Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Nb
0,14	0,19	0,54	0,011	0,006	0,08	0,06	0,17	0,018	0,001	0,002	0,023	0,0107

Tab.8 Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele

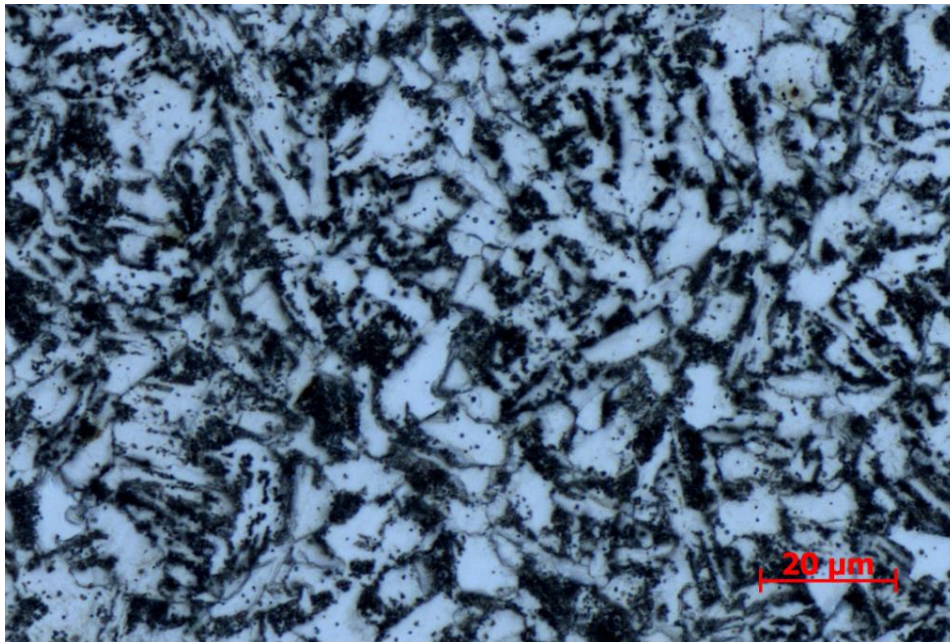
Chemické složení naměřené na vzorku [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Nb	W	Co
0,148	0,177	0,539	0,007	0,003	0,056	0,016	0,195	0,013	0,001	0,025	0,002	0,005	0,005

Tab.9 Chemické složení naměřené na vzorku

Na Obr.4.2-2 je fotografie mikrostruktury oceli C15, která je zvětšena 500x. Struktura je opět tvořena směsí feritu a cementitu (převážně globulárního). Cementit je vyloučen po hranicích feritických zrn.





Obr.4.2-2 ocel C15

**Ocel k nitridaci 34CrAlNi7 (ČSN 16 347):** materiál vhodný pro strojní díly určené k nitridaci. Vyznačuje se vyšší pevností při dostatečné houževnatosti ve stavu po zušlechťení. Vysoká prokalitelnost dovoluje ocel použít i na rozměrnější strojní díly. Nitridovaná vrstva je odolná proti opotřebení a korozi v méně agresivních prostředích. Nitridací se též docílí zvýšení meze únavy povrchové vrstvy při střídavém namáhání. Ocel lze použít i jako ocel k zušlechťování bez následné nitridace. [32]

Chemické složení podle normy ČSN EN 10084 [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,3-0,37	max. 0,4	0,4 - 0,7	max. 0,025	max. 0,035	1,50 - 1,8	0,8 - 1,2	0,12 - 0,28	0,8 - 1,2

Tab. 10 Chemické složení podle normy ČSN EN 10084

Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba 306937 [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,348	0,23	0,6	0,01	0,002	1,52	0,91	0,21	0,985

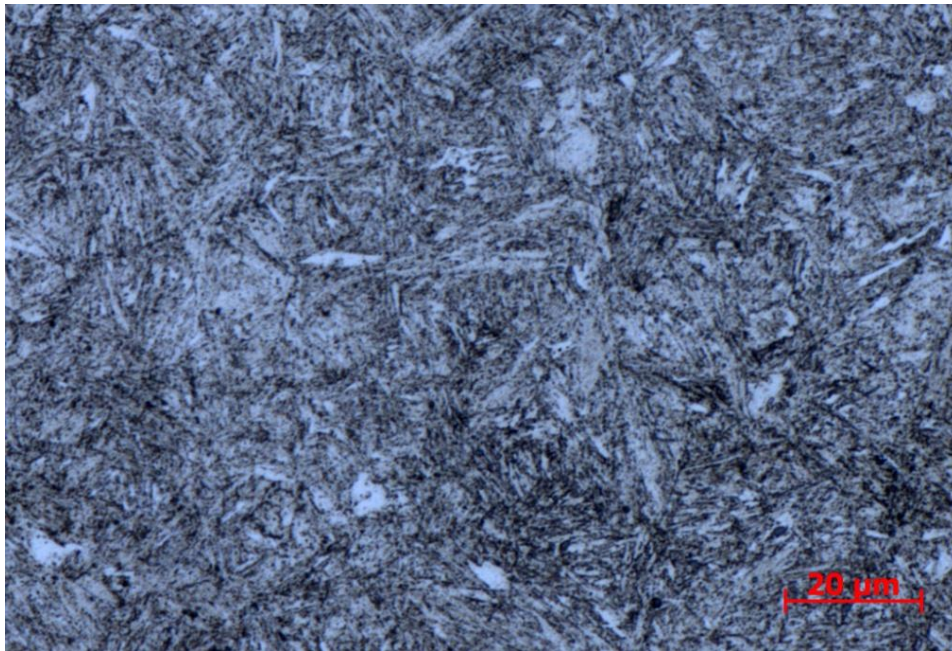
Tab.11 Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba 306937

Chemické složení naměřené na vzorku [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	W	Co
0,405	0,232	0,581	0,0136	0,0039	1,85	0,987	0,176	0,972	0,0215	0,0309

Tab.12 Chemické složení naměřené na vzorku

Na Obr.4.2-3 fotografie mikrostruktury oceli 34CrAlNi7, která je zvětšená 500x. Struktura je zušlechťená, proto se zde nachází sorbit. Ve struktuře jsou patrné zrna feritu.



Obr.4.2-3 ocel 34CrAlNi7

**Ocel k nitridaci 31CrMoV9 (ČSN 15 330):** materiál vhodný pro strojní díly určené k nitridaci. Vyznačuje se vyšší pevností při dostatečné houževnatosti ve stavu po zušlechtnění. Vysoká prokalitelnost dovoluje ocel použít i na rozměrnější strojní díly. Nitridovaná vrstva je odolná proti opotřebení a korozi v méně agresivních prostředích. Nitridací se též docílí zvýšení meze únavy povrchové vrstvy při střídavém namáhání. Ocel lze použít i jako ocel k zušlechťování bez následné nitridace. [32]

Chemické složení podle normy ČSN EN 10084 [%]:

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
0,27-0,34	0,36-0,74	max 0,40	2,2-2,8	0,15-0,25	0,08-0,22	max 0,030	max 0,040

Tab. 13 Chemické složení podle normy ČSN EN 10084

Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba T31566 [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,32	0,23	0,61	0,016	0,023	2,62	0,219	0,127

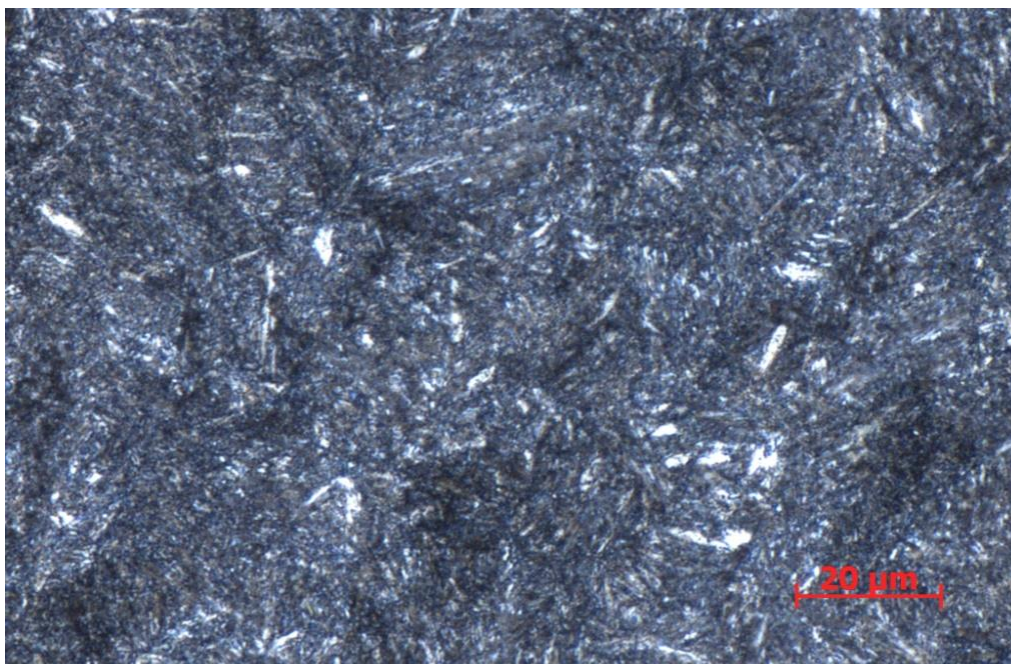
Tab.14 Chemické složení podle materiálového certifikátu dodavatele tavba T31566

Chemické složení naměřené na vzorku [%]:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	V	Al
0,327	0,23	0,622	0,0122	0,0184	2,79	0,0269	0,202	0,127	0,0225

Tab.15 Chemické složení naměřené na vzorku

Na Obr.4.2-4 je fotografie mikrostruktury oceli 31CrMoV9, která je zvětšená 500x. Je zde sorbitická struktura, která je relativně jemná. Jsou zde drobné karbidy. Opět jsou místy patrná masivní zrna feritu.



Obr.4.2-4 ocel 31CrMoV9

#### 4.2.2 Proces cementace

**Cementace v atmosférách:** je proces zpevňující povrch, při kterém se difúzně přidává uhlík do povrchu ocelových nízkouhlíkových (obvykle obsah nižší než C 0,25%) dílů. To se uskuteční prostřednictvím ohřevu oceli do oblasti homogeního austenitu (teploty od 880°C do 980°C) proces probíhá difúzí po stanovenou dobu v kontrolované nauhličující pracovní atmosféře. Po nasycení uhlíkem jsou díly rychle ochlazeny. Tím se v povrchové vrstvě vyloučí cementit a získá se povrchová vrstva s vysokou tvrdostí. Jádro pod vrstvou zůstává nedotčené.

Jedná se o široce používaný proces povrchového vytvrzování nízkouhlíkových ocelí. Důležitost cementace pro průmysl ukazuje její podíl na trhu. Celá jedna třetina všech kalení v tepelném zpracování se uskutečňuje v souvislosti s procesy cementace.

##### 1. proces cementace – proces nastaven ručně:

První proces cementace byl nastaven ručně. Vpravo na Obr.4.2.2-1 jsou kroky provedené během celého procesu. Zde jsou zobrazeny čísla kroků, název, požadované hodnoty, a doba trvání jednotlivých kroků. Z obrázku je patrné jak dlouho, který krok trval a jaká zde byla nastavena teplota.

No	Chamber	Name/Method	Set Point 1	Step Time	Runtime
1	UK	CEKANI NA USAZKU			
2	UK	PROPLACH PREDKOMORY		25	
3	UK	USAZKA DO PECE			
4	GK	USAZKA U PECE-GK	Zadan 900		
5	GK	OHREV/PROPLACH	Zadan 920		
6	GK	CP SYTICI	Zadan 920	195	
7	GK	CP DIFUZIONI	Zadan 920	50	
8	GK	USAZKA Z PECE	Zadan 920		
9	AK	USAZKA/KALENI	Rych. 80		
10	AK	KALENI UYDRZ	Rych. 80	20	
11	AK	ODKAPAVANI	Rych. 80	5	
12	AK	USAZKA Z PREDKOMORY	Rych. 80		

Obr.4.2.2-1 Počet kroků procesu cementace

1. krok: vsázka je v předkomoře. Předkomora se zatím neproplachuje.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Presun			Off						
Predk. proplachnuta									Off
Usadzka v predkomore									On
Usázka v peci									Off

Obr.4.2.2-2 První krok procesu cementace

2. krok: vsázka je v předkomoře. Předkomora se proplachuje dusíkem po dobu 25min o průtoku 400 NI/min.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Presun			Off						
Predk. proplachnuta									On
Usadzka v predkomore									On
Usázka v peci									Off

Obr.4.2.2-3 Druhý krok procesu cementace

3. krok : proplach skončil. Vsázka se z předkomory přesouvá do pecního zařízení .

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Presun			On						
Predk. proplachnuta									---
Usadzka v predkomore									---
Usázka v peci									On

Obr.4.2.2-4 Třetí krok procesu cementace

4. krok: probíhá ohřev na zadanou teplotu. Do pecní komory je přiváděn procesní dusík o průtoku 25NI/hod.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Zadana tep	°C	=	900	0	0	0	0		
CP-potenci	%	=	0.00	0.00	0.00	0	0		
Proplach sondy			Off						
N2_proplach			Off						
N2_proces			On						
Presun			Off						
Methanol			Off						
Predkomora prolach			Off						
Usazka v peci									On
Usazka v kal.lazni									---

Obr.4.2.2-5 Čtvrtý krok procesu cementace

5. krok: probíhá proplach sondy o průtoku 60NI/hod a stále je přiváděn procesní dusík. Zadaná teplota se zvýšila na 920°C.

6. krok: teplota se nemění. Do komory je přiváděn procesní dusík o průtoku 60NI/hod společně s metanolem o průtoku 0,132 l/hod, který zvýší uhlíkový potenciál. Pro dosažení zadaného uhlíkového potenciálu je zde střídavě vstříkovan propan. Celý krok trvá 195min.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Zadana tep	°C	=	920	0	0	0	0		
CP-potenci	%	=	0.00	0.00	0.00	0	0		
Proplach sondy			Off						
N2_proplach			Off						
N2_proces			On						
Presun			On						
Methanol			Off						
Predkomora prolach			Off						
Usazka v peci									---
Usazka v kal.lazni									On

Obr.4.2.2-6 Šestý krok procesu cementace

7. krok: uhlíkový potenciál se sníží z 1,15% na 0,7% podobu 50min.

8. krok: přívod metanolu je uzavřen → uhlíkový potenciál je nulový. Stále se přivádí procesní dusík o průtoku 60Nl/hod. Vsázka se přesouvá z pecního zařízení do předkomory.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Zadana tep	°C	=	920	0	0	0	0		
CP-potenci	%	=	1.15	0.00	0.00	0	0		
Proplach sondy			Off						
N2 proplach			Off						
N2 proces			On						
Presun			Off						
Methanol			On						
Predkomora prolach			Off						
Usazka v peci									On
Usazka v kal.lazni									---

Obr.4.2.2-7 Osmý krok procesu cementace

9. krok: vsázka je přesunuta do kalící lázně o teplotě 80°C.

10. krok: vsázka je v kalící lázni a začíná cirkulace oleje po dobu 20min.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Rych.nich.		=	80	0	0	0	0		
Konec odkapani			Off						
Konec kaleni			Off						
Cirk. oleje dolu			On						
Usazka v kal.lazni									On
Usadzka vylozena									Off

Obr.4.2.2-8 Desátý krok procesu cementace

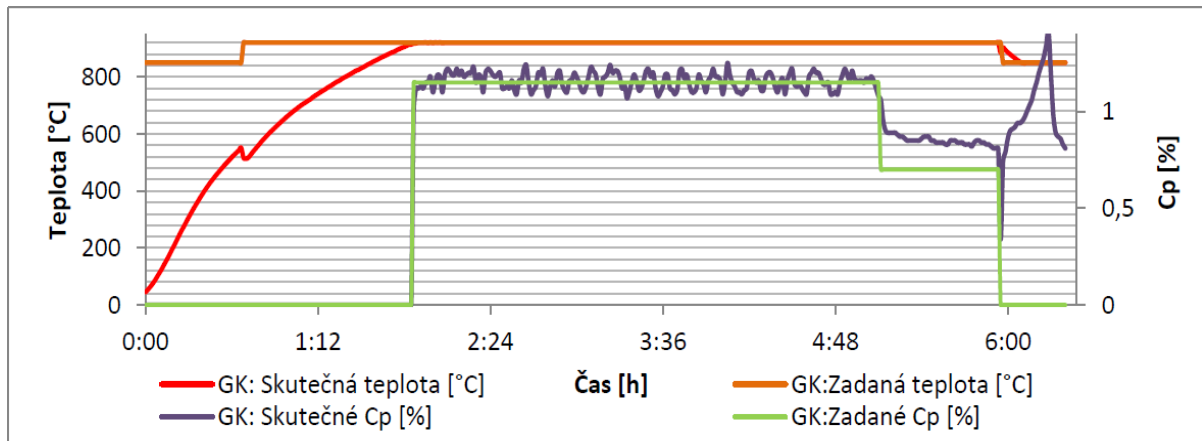
11. krok: kalení je u konce a vsázky vyjíždí zpět do předkomory.

Variable	Unit	Ctrl.	Variable	Tol+	Tol-	T1	T2	Step	Ends at
Rych.nich.		=	80	0	0	0	0		
Konec odkapani			Off						
Konec kaleni			On						
Cirk. oleje dolu			Off						
Usazka v kal.lazni									---
Usadzka vylozena									Off

Obr.4.2.2-9 Jedenáctý krok procesu cementace

12. krok: vsázka se nechá okapat a poté se může z předkomory vytáhnout.

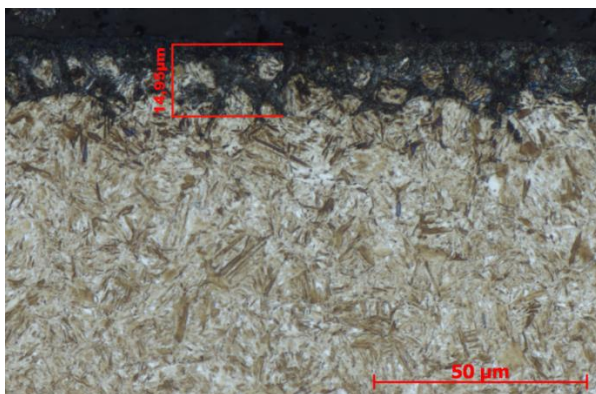
Graf 1. znázorňuje průběh procesu první cementace, jež byl zaznamenán řídicím systémem. Graf ukazuje závislost teploty (svislá osa v levo) a uhlíkového potenciálu (svislá osa v pravo) na čase. Z grafu je patrné, že nárůst teploty probíhal plynule. Uhlíkový potenciál se během sytícího stádia pohyboval v rozmezí 1,15-1,22 %. V průběhu difúzního stádia se uhlíkový potenciál pohyboval kolem 0,85%.



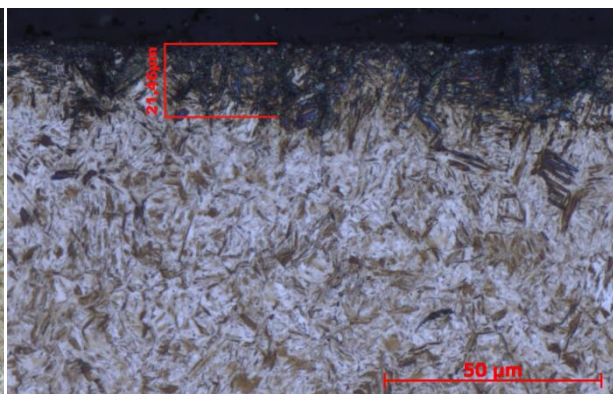
Graf 1. Průběh prvního procesu cementace

Mikrostruktura oceli 16MnCr5 po cementaci: na Obr.4.2.2-10 je ocel která byla zakalena. Struktura je tvořena martenzitem a bainitem.. Místy se zde objevují sulfidy.

Mikrostruktura oceli C15 po cementaci: na Obr.4.2.2-11 je ocel která byla zakalena stejně jako ocel předchozí. Struktura je tvořena především martenzitem a bainitem.



Obr. 4.2.2-10 ocel 16MnCr5 povrch po cementaci zvětšeno 500x



Obr. 4.2.2-11 ocel C15 povrch zvětšeno 500x

Měření mikrotvrdomosti provádíme za účel zjištění hloubky vrstvy. Pro měření cementační vrstvy se používá stupnice tvrdosti od HV0,1 – HV 2,5. Hraniční hodnoty tvrdosti pro cementované vrstvy je 550 HV 0,1.

Hloubka cementované vrstvy se stanoví pomocí měření mikrotvrdomosti. Dle normy je limitní hodnota tvrdosti 550 HV 0,1. Z hodnot vycházející z Tab.15 ocel C15 těchto hodnot nedosahuje a ocel 16MnCr5 dosahuje hloubky 0,86 mm.

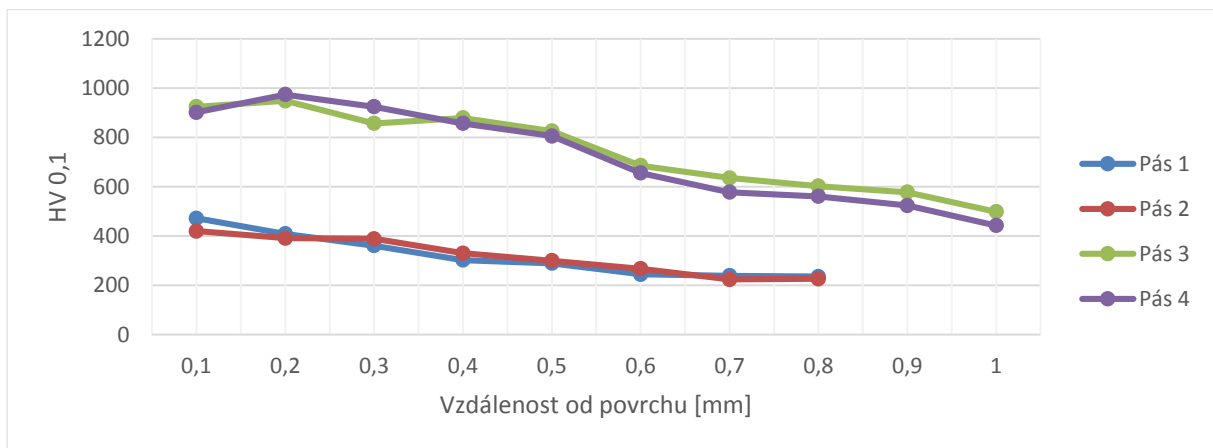
C15			
pás 1		pás 2	
X [mm]	HV 0,1	X [mm]	HV 0,1
0,05	472	0,1	420
0,15	409	0,2	392
0,25	361	0,3	389
0,35	303	0,4	331
0,45	290	0,5	300

16MnCr5			
pás 3		pás 4	
X [mm]	HV 0,1	X [mm]	HV 0,1
0,05	925	0,1	902
0,15	949	0,2	974
0,25	857	0,3	925
0,35	879	0,4	857
0,45	826	0,5	806

0,55	245	0,6	268
0,65	239	0,7	224
0,75	236	0,8	227
0,85		0,9	
0,95		1	
CHD 550 HV 0,1			
-		-	
CHD=0 mm			

0,55	686	0,6	656
0,65	636	0,7	578
0,75	603	0,8	561
0,85	578	0,9	524
0,95	499	1	443
CHD 550 HV 0,1			
0,89		0,83	
CHD=0,86 mm			

Tab.16 Měření mikrotvrdosti prvního procesu cementace oceli C15 a 16MnCr5



Graf 2 Průběh měření mikrotvrdosti první cementace

## 2. proces cementace – proces nastaven pomocí softwaru:

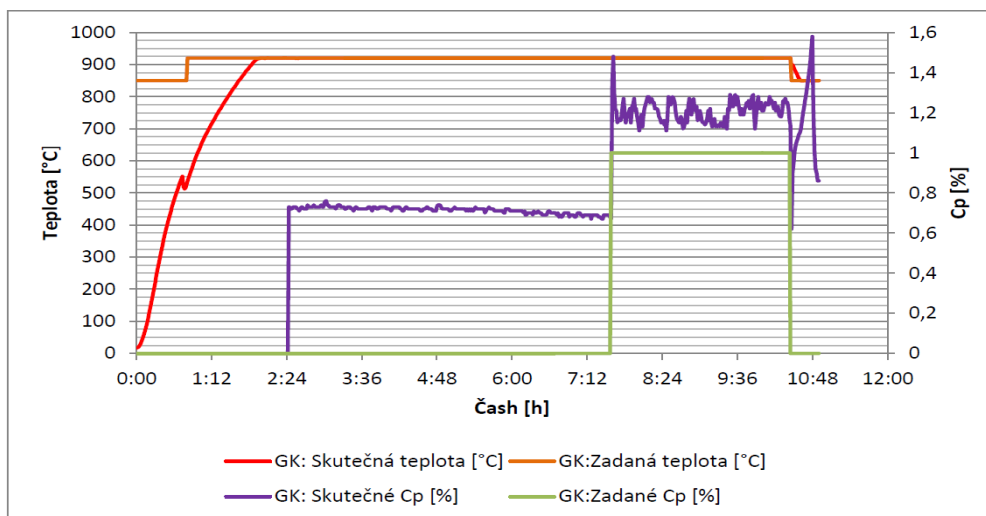
Proces 2. cementace je obdobný jako u 1. cementace proto jsou zde popsány kroky, které se liší.

Prvním rozdílem je, že se do softwaru zadali hodnoty, ze kterých se automaticky propočítají hodnoty důležité pro řízení procesu. Chemické složení vzorků pro cementaci je jedním z nejdůležitějších hodnot pro propočet. Dále bylo nutné zadat intenzitu kalícího média, reprezentativní průměr vzorků, tvrdost HV ve vrstvě (dle normy 550 HV), velikost zrna a konečná teplota po zpracování. Na Obr.4.2.2-12 je možné vidět hodnoty zadané do softwaru.

C	0.180	Mn	1.300	Si	0.280	Cr	1.100	Ni	0.120
Mo	0.010	V	0.004	Al	0.000	Cu	0.190	P	0.021
Quenching Intensity		0.50							
Rep. Part Diameter		20.0 mm							
Effective Case Hardness		550 HV							
Grain Size [ASTM]		8							
Final Temperature		20 °C							
Tempering Temp.		0 °C							

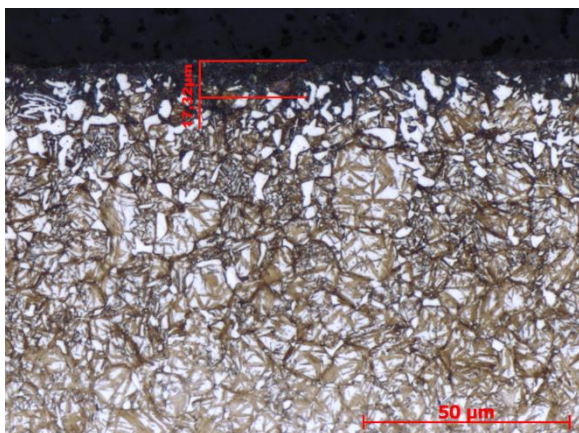
Obr.4.2.2-12 Vstupní hodnoty do softwaru

Graf 3 znázorňuje průběh procesu druhé cementace, jež byl zaznamenán řídicím systémem. Graf ukazuje závislost teploty (svislá osa v levo) a uhlíkového potenciálu (svislá osa v pravo) na čase. Kvůli nesprávnému nastavení programu je v první části sytícího stádia dosaženo minimálního uhlíkového potenciálu 0,7%. Poté uhlíkový potenciál dosáhl hodnoty 1,2%. Graf ukazuje pouze sytící stádium, protože ani po 10 hodinách nedošlo k dostatečnému nauhličení. Proto byl proces předčasně ukončen.

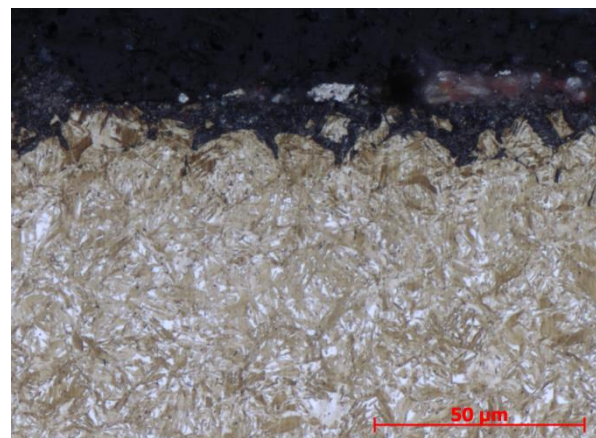


Graf 3 Průběh druhého procesu cementace

Mikrostruktura oceli 16MnCr5 po cementaci: na Obr.4.2.2-13 jsou pravděpodobně značnou cementitu a velký podíl zbytkového austenitu. Toto je dáno nevhodným uhlíkovým potenciálem nastaveným samotným softwarem. Získáváme tedy informace o tom jak nemá cementační vrstva vypadat.



Obr. 4.2.2-13 ocel 16MnCr5 povrch zvětšeno 500x



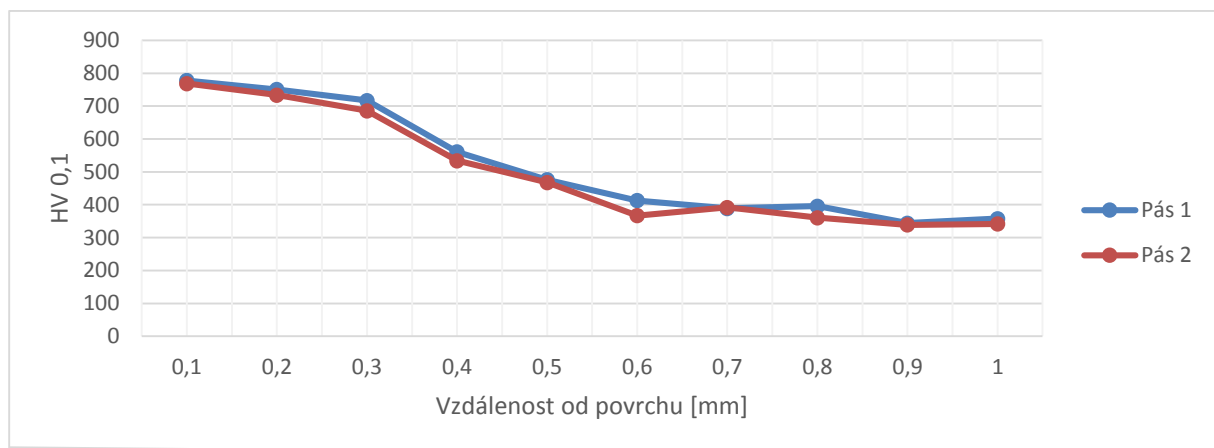
Obr. 4.2.2-14 ocel C15 povrch zvětšeno 500x

Zkouška mikrotvrdosti proběhla na oceli 16MnCr5. Zde se provedlo 10 měření po 0,1 mm. Podle normy je limitní tvrdost 550 HV 0,1. U této oceli se stanovila hloubka cementační vrstvy 0,4 mm.



16MnCr5			
pás 1		pás 2	
X [mm]	HV 0,1	X [mm]	HV 0,1
0,05	778	0,1	769
0,15	751	0,2	734
0,25	717	0,3	686
0,35	561	0,4	534
0,45	476	0,5	468
0,55	413	0,6	367
0,65	389	0,7	392
0,75	396	0,8	361
0,85	344	0,9	339
0,95	358	1	342
CHD 550 HV 0,1			
0,36		0,44	
CHD=0,4 mm			

Tab.17 Měření mikrotvrdosti druhého procesu cementace

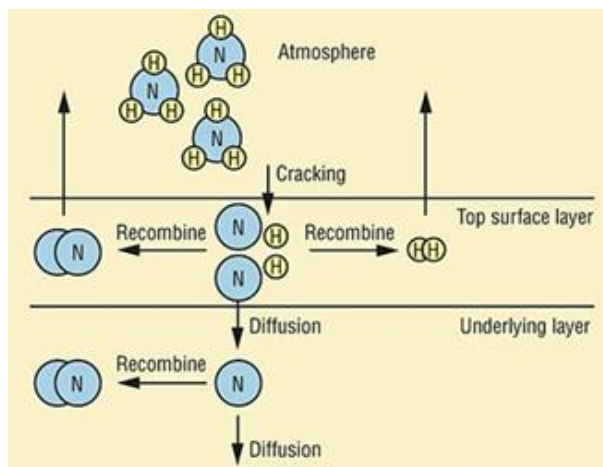


Graf 4 Průběh mikrotvrdosti druhého procesu cementace

### 4.2.3 Proces nitridace

**Nitridace v plynu:** je proces chemicko-tepelného zpracování při relativně nízké teplotě (obvykle 520 °C) s nízkou mírou deformace. Provádí se za účelem zlepšení povrchových vlastností ocelí. V případě přidání plynu uvolňujícího uhlík se proces nazývá karbonitridace. Vrstva se obvykle skládá ze dvou zón – sloučeninové vrstvy (bílá vrstva), která může být tvořena kubickým či hexagonálním nitridem, pod kterou se nachází vrstva rozpuštěného dusíku a precipitátu tvrdých karbonitridů. Sloučeninová vrstva na povrchu součástí přináší hlavní výhody v podobě vysoké odolnosti vůči opotřebení, odírání, oděru a zadírání. Difuzní vrstva přispívá k lepší mezi únavy a funguje jako podpora tvrdé sloučeninové vrstvy. Regulací teploty a řízením atmosféry zpracování lze ovlivnit složení vrstvy od tenkých sloučeninových vrstev pro lepší mez únavy až po tlusté sloučeninové vrstvy dusíku a uhlíku

při použití plynné nitrocementace a následné oxidace pro dosažení dobré odolnosti vůči opotřebení a korozi.



Obr.4.2.3-1 Sycení povrchu dusíkem [2]

### 1.proces nitridace:

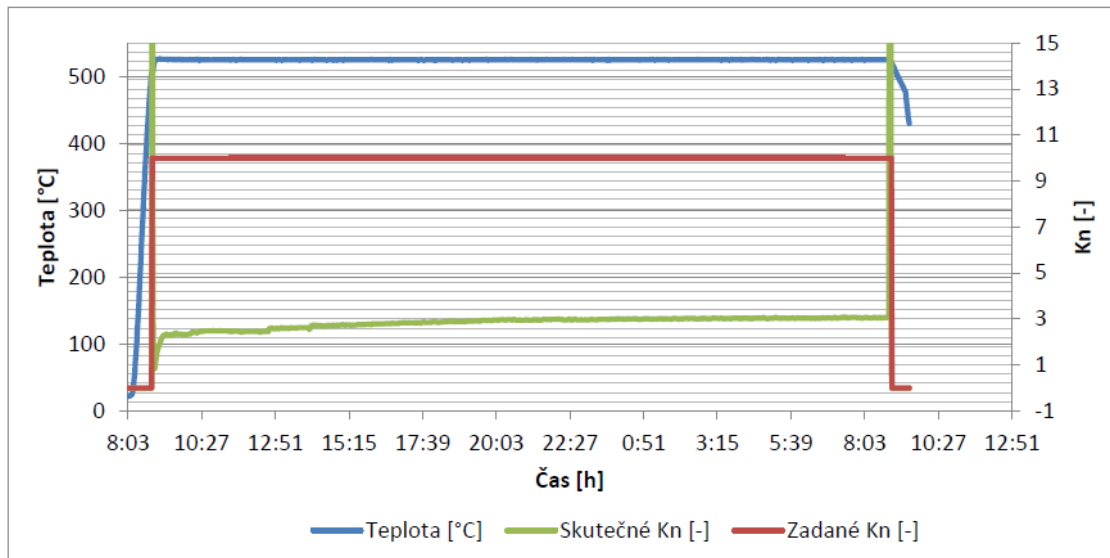
1. krok: vsázka se ručně vloží do pecního zařízení.
2. krok: probíhá proplach dusíkem o průtoku 1,1 Nm<sup>3</sup>/hod. Teplota se zvyšuje na 510°C.

No	Chamber	Name/Method	Set Point 1	Step Time	Runtime
1	Nitriera	CEKANI NA USAZKU	Zádan 0		
2	Nitriera	N2 PROPLACH	Zádan 510		
3	Nitriera	KN1	Zádan 525	1440	
4	Nitriera	PROPLACH/CHLAZENI	Zádan 20		
5	Nitriera	UVJMUTI USAZKY	Zádan 20	1	

Obr.4.2.3-2 Popis jednotlivých kroků procesu nitridace

3. krok: teplota se zvýší na 525°C.do pecní komory je přiváděn NH<sub>3</sub> o průtoku 0,2 m<sup>3</sup>/hod. Dusíkový potenciál se zvýší na 2.5% a postupně se zvyšuje až na 3%. Stupeň disociace je okolo 50%.
4. krok: probíhá ochlazování na 20°C a zároveň proplach 1,1 Nm<sup>3</sup>/hod.
5. krok: vsázka se ručně vyndá z pecního zařízení.

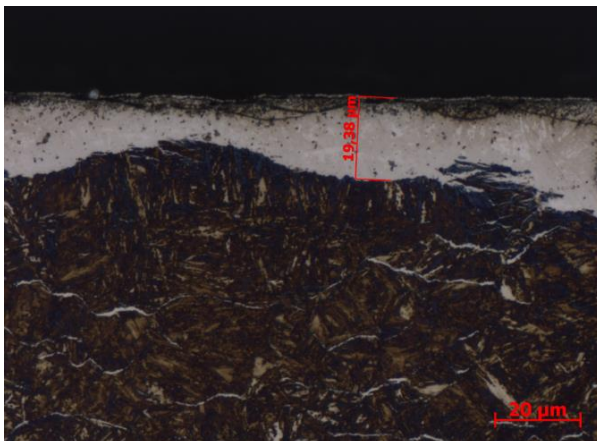
Graf 5 znázorňuje průběh procesu první nitridace, jež byl zaznamenán řídicím systémem. Graf ukazuje závislost teploty (svislá osa v levo) a dusíkového potenciálu (svislá osa v pravo) na čase. Požadovaná hodnota dusíkového potenciálu byla 10, ale ustalil se na hodnotě 3.



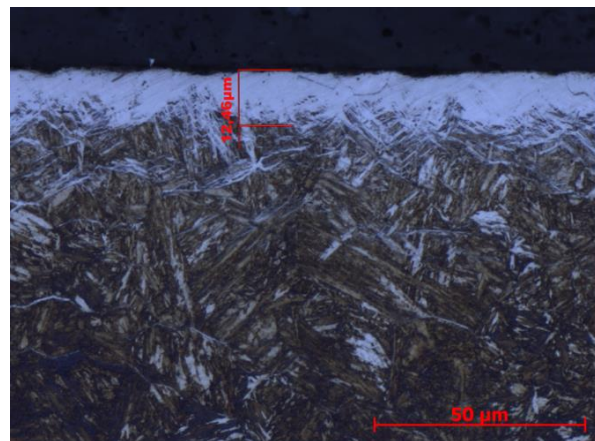
Graf 5 Průběh procesu nitridace

Mikrostruktura oceli 34CrAlNi7 po nitridaci: Obr.4.2.3-3 ve struktuře se nachází sorbit a bílá vrstva je přibližně 12,5  $\mu\text{m}$ .

Mikrostruktura oceli 31CrMoV9 po nitridaci: Obr.4.2.3-4 ve struktuře se nachází sorbit a bílá vrstva je přibližně 19  $\mu\text{m}$ .



Obr. 4.2.3-4 ocel 31CrMoV9 povrch zvětšeno 500x



Obr. 4.2.3-3 ocel 34CrAlNi7 povrch zvětšeno 500x

Pro stanovení nitridační vrstvy je změřena mikrotvrdost. V první řadě bylo provedeno 5 vtisků v jádře vzorku, kde se aritmetickým průměrem zpočítala limitní tvrdost vrstvy. Limitní tvrdosti ocelí pro nitridaci jsou uvedeny v Tab.17. Pro ocel 34CrAlNi7 byla stanovena hloubka vrstvy 0,35mm a u oceli 31CrMoV9 0,34mm.

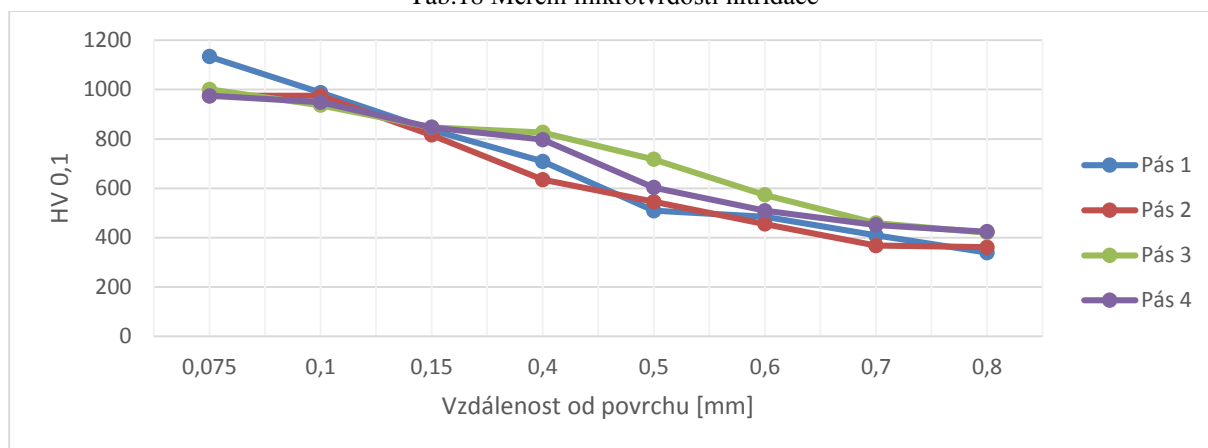
34CrAlNi7			
pás 1		pás 2	
X [mm]	HV 0,1	X [mm]	HV 0,1
0,05	1134	0,075	975
0,1	988	0,1	975
0,15	836	0,15	816
0,2	709	0,4	635

31CrMoV9			
pás 3		pás 4	
X [mm]	HV 0,1	X [mm]	HV 0,1
0,05	1001	0,075	975
0,1	937	0,1	949
0,15	847	0,15	847
0,2	826	0,4	797

0,25	509	0,5	545
0,3	485	0,6	455
0,35	409	0,7	367
0,4	339	0,8	361
Lim. Tvrdost = 372HV +50HV = 422 HV 0,1			
0,334		0,336	
CHD=0,35mm			

0,25	717	0,5	603
0,3	573	0,6	509
0,35	459	0,7	451
0,4	420	0,8	424
Lim. Tvrdost = 456HV +50HV = 506 HV 0,1			
0,334		0,336	
CHD=0,34 mm			

Tab.18 Měření mikrotvrdosti nitridace



Graf 6 Průběh mikrotvrdosti nitridace

## 5 Diskuze výsledků

**Proces 1. cementace:** tento proces cementace proběhl se dvěma stádii nauhličení po kterých následovalo kalení. První stádium bylo sytící, kde byla nastavena hodnota uhlíkového potenciálu na 1,15% ovšem skutečná hodnota se pohybovala i přes 1,2%. Druhé stádium bylo difúzní, kde byla nastavena hodnota uhlíkového potenciálu na 0,7%, ale ten se ve skutečnosti pohyboval okolo 0,85%.

Ocel 16MnCr5: hloubka cementační vrstvy byla zjištěna pomocí mikrotvrdosti HV 0,1. Bylo zde dle normy provedeno deset měření po 0,1mm, ze kterých je patrné, že tloušťka cementované vrstvy je 0,86mm.

Ocel C15: u této oceli došlo k nauhličení, ale podle měření mikrotvrdosti je cementační vrstva nulová. Tato nízká tvrdost je způsobena nízkou prokalitelností oceli.

U obou ocelí po první cementaci je struktura tvořena martenzitem a bainitem.

**Proces 2. cementace:** druhá cementace byla řízená pomocí programu, který si sám nastavil hodnotu uhlíkového potenciálu. Cementace se nepovedla, protože ani po 10 hodinách nedošlo k nacementování vsázky. Proto se cementace ukončila předčasně. Uhlíkový potenciál se zde nejprve pohyboval okolo 0,7% a poté se zvýšil na 1,2%.

Ocel 16MnCr5: u tohoto vzorku se opět provedlo měření průběhu tvrdosti. To nám ukázalo, že hloubka cementační vrstvy je 0,4 mm. Ve struktuře se pravděpodobně nachází zrna cementytu a velký podíl zbytkového austenitu.

**Proces 1. nitridace:** proces nitridace byl prováděn s jedním dusíkovým potenciálem, který byl nastaven na hodnotu 10. Ve skutečnosti se však dusíkový potenciál během procesu nedostal přes hodnotu 3. Supeň disociace čpavku se pohyboval okolo 50%.

Ocel 34CrAlNi7: při měření mikrotvrdosti se zjistilo, že tloušťka nitrídané vrstvy je dle normy 0,35 mm. Největší tvrdosti dosahuje v tloušťce 0,05 mm a to hodnoty 1134 HV 0,1. Struktura je sorbitická a na povrchu se objevuje bílá vrstva.

Ocel 31CrMoV9: podle mikrotvrdosti, která byl na tomto vzorku provedena se zjistilo, že tloušťka nitrídační vrstvy je 0,34 mm. Tento vzorek má menší pevnost na povrchu než 34CrAlNi7 a to o 133 HV 0,1. Struktura oceli je sorbitická a na povrchu se objevuje bílá vrstva.

## 6 Závěr

Tato práce byla zaměřena na měřicí techniku v provozech tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Především se zabývá měřidly, které byly instalované na školní lince chemicko-tepelného zpracování na ZČU. V pecním zařízení pro cementaci byla využita kyslíková sonda CS87 a termočlánek typu K. V pecním zařízení pro nitridaci byla použita vodíková sonda H<sub>2</sub>SMART a termočlánek typu K. Cílem této práce bylo ověřit reprodukovatelnost výsledků na základě na měřených hodnot z regulátorů a teoretických výpočtů a tuto zkušenost experimentálně ověřit.

Pro experiment byly zvoleny čtyři materiály a to C15, 16MnCr5, 31CrMoV9 a 34CrAlNi7. Na těchto materiálech se v dodaném stavu zkoumala mikrostruktura a zjistilo se chemické složení. Poté první dva materiály byly použity pro proces cementace, na kterých se následně provedla měření mikrotvrdost HV 0,1 a rozbor mikrostruktury. To samé bylo provedeno i pro třetí a čtvrtý materiál, které ovšem byli použity pro proces nitridace.

U prvního procesu cementace se dvěma stádii uhlíkového potenciálu byl hlavním cílem dosáhnout vrstvy o tloušťce 0,8mm. U oceli 16MnCr5 tloušťka vrstvy odpovídá požadavku na tloušťku vrstvy, která se vyhodnotila pomocí měření mikrotvrdosti. U oceli C15 se z důvodu nízké prokalitelnosti nepovedlo získat základnou strukturu, proto se zde podle mikrotvrdosti nedala určit tloušťka cementační vrstvy. Pro získání tloušťky vrstvy by byla třeba udělat vhodná chemická analýza.

U druhého procesu cementace si sám software určil uhlíkový potenciál. Požadovalo se stejné tloušťky vrstvy jako u prvního procesu cementace. U tohoto procesu nedošlo ani po 10 hodinách k nauhličení, proto se proces předčasně ukončil. Z naměřených hodnot vyplývá, že hloubka cementační vrstvy u oceli 16MnCr5 byla pouze 0,4mm. Cementační vrstva u druhého procesu cementace neodpovídá požadavku na tloušťku vrstvy 0,8 mm.

U prvního procesu nitridace byl nastaven dusíkový potenciál na hodnotu 10. V průběhu procesu se ovšem dostal pouze na hodnotu 3. Požadovaná tloušťka nitrídační vrstvy byla 0,3 mm a předpokládalo se že se zde vyskytne bílá vrstva. Požadovaná vrstva byla dosažena jak u oceli 34CrAlNi7 tak i u oceli 31CrMoV9. Dle obrázků 33 a 34, na kterých je patrné, že se zde vyskytuje i očekávaná bílá vrstva.

Závěrem lze říci, že měřicí technika nainstalovaná na školní lince chemicko-tepelného zpracování je schopná provozu. Z naměřených hodnot lze usoudit, že se u prvního procesu cementace a u prvního procesu nitridace dosáhlo požadovaných hodnot. Dále doporučuji zopakovat druhý proces cementace, který byl předčasně přerušeno.

## Použitá literatura

- [1] Kraus, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň : ZČU Plzeň, 2000
- [2] Hájek, Jiří. *Přednášky, cvičení z předmětu Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň : ZČU Plzeň
- [3] Mackovič, Roman, Onderčanin, Jozef. *Opravy a servis atmosférických pecí v kaliarniach*. Praha, 2012
- [4] Jenčík, Josef, Volf, Jaromír. *Technická měření*. Praha : ČVUT Praha, 2003
- [5] Jumo [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.jumo.cz/>
- [6] Závitový odporový teploměr s přípojovací hlavicí formy J (90.2030). In: *Závitový odporový teploměr s přípojovací hlavicí formy J (90.2030)* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.jumo.cz/produkty/teplota/odporov%C3%A9-teplom%C4%9By/celkov%C3%BD-p%C5%99ehled/902030/z%C3%A1vitov%C3%BD-odporov%C3%BD-teplom%C4%9Br-s%C2%A0p%C5%99ipojovac%C3%AD-hlavic%C3%AD-formy-j-902030.html?parentId=3397>
- [7] Termoelektrický článek. In: *Termoelektrický článek* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s\\_8\\_2.htm](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_8_2.htm)
- [8] Pyrometry AX-6520 s laserovým zaměřovačem a podsvětlením zobrazovače. In: *Pyrometry AX-6520 s laserovým zaměřovačem a podsvětlením zobrazovače* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://www.tme.eu/html/CZ/pyrometry-ax-6520-s-laserovym-zamerovacom-a-podsvetlenim-zobrazovace/ramka\\_3005\\_CZ\\_pelny.html](http://www.tme.eu/html/CZ/pyrometry-ax-6520-s-laserovym-zamerovacom-a-podsvetlenim-zobrazovace/ramka_3005_CZ_pelny.html)
- [9] Tlakoměry. In: *Tlakoměry* [online]. 2000 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.atio.cz/datasheets/Work-instruction-cz.pdf>
- [10] *Indukční průtokoměry* [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.badgermeter.cz/produkty/indukcni-prutokomery/?gclid=CKDwvqPAI7sCFdQ82wodsVQAMQ>
- [11] Indukční průtokoměry COMACCAL. In: *Indukční průtokoměry COMACCAL* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.e-voda.cz/vytisknout-clanek/31>
- [12] Ultrazvukové průtokoměry. In: *Ultrazvukové průtokoměry* [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.badgermeter.cz/produkty/ultrazvukove-prutokomery/>
- [13] Ultrazvukové průtokoměry kapalin. In: *Ultrazvukové průtokoměry kapalin* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.elis.cz/cs/produkty/ultrazvukove-prutokomery-kapalin.html>

- [14] Advantages & Limitations of Variable Area / Rotameter Meters for Flow Measurement. In: *Advantages & Limitations of Variable Area / Rotameter Meters for Flow Measurement* [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.icenta.co.uk/flow-technology/variable-area/-rotameter>
- [15] Přístroje pro měření průtoku - Hmotnostní průtokoměry (Coriolis). *Přístroje pro měření průtoku - Hmotnostní průtokoměry (Coriolis)* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.cz.endress.com/eh/sc/europe/cz/cs/home.nsf/#products/~hmotnostni-coriolis-měření-průtoku>
- [16] Sitrans FC430 - Kompaktní Coriolisův průtokoměr. In: *Sitrans FC430 - Kompaktní Coriolisův průtokoměr* [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/aktuality/aktuality/seznam\\_aktualit/sitrans-fc430-kompaktni-coriolisuv-prutokomer.html](http://www.jsp.cz/cz/aktuality/aktuality/seznam_aktualit/sitrans-fc430-kompaktni-coriolisuv-prutokomer.html)
- [17] MIKULOVIC, Džo. Carbon Controlling with O<sub>2</sub>-Probe and L-Probe. *Carbon Controlling with O<sub>2</sub>-Probe and L-Probe* [online]. 4 march 2011 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/89832-carbon-controlling-with-o2-probe-and-l-probe>
- [18] Principle of the O<sub>2</sub> probe. In: *Principle of the O<sub>2</sub> probe* [online]. 4 march 2011 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/ext/resources/IH/Home/Images/ih0311-psi-fig1-lg.jpg>
- [19] Principle of the L-probe. In: *Principle of the L-probe* [online]. 4 march 2011 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/ext/resources/IH/Home/Images/ih0311-psi-fig4-lg.jpg>
- [20] Considerations in Heat Treatment (Part Two: Furnace Atmosphere Control). *Considerations in Heat Treatment (Part Two: Furnace Atmosphere Control)* [online]. 3.prosinec 2009 [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/88452-considerations-in-heat-treatment-part-two-furnace-atmosphere-control>
- [21] A Practical Approach to Controlling Gas Nitriding and FNC. *A Practical Approach to Controlling Gas Nitriding and FNC* [online]. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/91206-a-practical-approach-to-controlling-gas-nitriding-and-fnc>
- [22] Furnace Atmosphere Analysis by the Shim Stock Method. *THE HEAT TREAT DOCTOR* [online]. 2004 [cit. 2014-06-26]. Dostupné z: <http://www.heat-treat-doctor.com/documents/shimstockanalysis.pdf>
- [23] Furnace Atmospheres No. 3 Gas Nitriding and Nitrocarburising. *The linde group*.
- [24] Intelligent Hydrogen Sampling System for Nitriding & Nitrocarburizing. *Intelligent Hydrogen Sampling System for Nitriding & Nitrocarburizing* [online]. 2010 [cit. 2014-02-

- 17]. Dostupné z:  
[http://www.metaltech.com.br/arquivos/catalogos/Broc015\\_H2Smart\\_rev4.pdf](http://www.metaltech.com.br/arquivos/catalogos/Broc015_H2Smart_rev4.pdf)
- [25] How to configure a PT500. *Working with PT500*.
- [26] INFRARED TEMPERATURE MEASUREMENT: NEW ADVANCEMENTS IMPROVE PERFORMANCE. *INFRARED TEMPERATURE MEASUREMENT: NEW ADVANCEMENTS IMPROVE PERFORMANCE* [online]. 10.října 2008 [cit. 2014-02-17]. Dostupné z:  
<http://www.industrialheating.com/ext/resources/IH/Home/Files/PDFs/Raytek%20White%20Paper.pdf>
- [27] Evolving Temperature Measurements in the Steel Industry. *Line Scanners* [online]. 5.října 20012 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z:  
<http://www.industrialheating.com/articles/90707-evolving-temperature-measurements-in-the-steel-industry>
- [28] Průvodní dokumentace
- [29] What is a Solenoid Valve?. *What is a Solenoid Valve?* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.solenoid-valve-info.com/solenoid-valve-definition.html>
- [30] Přehled vlastností oceli 16MnCr5. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z:  
<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/ocelikcementovani/16MnCr5/>
- [31] Přehled vlastností oceli 16MnCr5. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z:  
<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/ocelikcementovani/C15/>
- [32] Přehled vlastností oceli 34CrAlNi7-10. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z:  
<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/knitridovani/34CrAlNi7-10/>
- [33] Přehled vlastností oceli 31CrMoV9. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z:  
<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/knitridovani/31CrMoV9/>