

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Bakalářská práce**

**Materiály teplovodních kotlů na biomasu**

**Martin Hölbl**

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Hölbl

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Materiály teplovodních kotlů na biomasu

Název anglicky

Materials of biomass boilers

---

Cíle práce

Literární rozbor materiálů používaných při výrobě teplovodních kotlů spalujících biomasu. Analýza stávajícího vybraného kotle do 50 kW.

Metodika

Úvod

Technologie spalování biomasy

Materiály pro výrobu teplovodních kotlů

Tepelné pole kotle do 50 kW

Analýza vybraných skupin materiálu

Závěr

#### Doporučený rozsah práce

40

#### Klíčová slova

materiály kotlů, změny fyzikálních vlastností materiálů, optimalizace životnosti kotlů

---

#### Doporučené zdroje informací

- CALLISTER, William D.; et al. Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley, 2007.
- GALE, William F.; TOTEMEIER, Terry C. (ed.). Smithells metals reference book. Butterworth-Heinemann, 2003.
- GHOSH, Ahindra; CHATTERJEE, Amit. Iron Making and Steelmaking: Theory and Practice. PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- HUME-ROTHERY, William. The structures of alloys of iron: an elementary introduction. Elsevier, 2013.
- CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. Nauka o materiálu. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. Kotle malých výkonů na pevná paliva. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- KUBASCHEWSKI, Ortrud. Iron—Binary phase diagrams. Springer Science & Business Media, 2013.
- LYČKA, Zdeněk. Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN 978-80-904914-2-7.
- MACEK, Karel a Petr ZUNA. Strojírenské materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth E.; SHERIF, Mohamed. Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint). CRC press, 2009.

---

#### Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

#### Vedoucí práce

doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

#### Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 10. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2024

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Materiály teplovodních kotlů na biomasu" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2024

---



## **Poděkování**

Rád(a) bych touto cestou poděkoval(a) především doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za perfektní vedení práce a velkou trpělivost, Ing. Lence Křivánkové, za pomoc a spolupráci v laboratoři a také rodině za podporu.

# **Materiály teplovodních kotlů na biomasu**

## **Abstrakt**

Tato práce je věnována materiálům teplovodních kotlů na biomasu. Nejprve pojednává o technologii spalování biomasy a základních konstrukčních prvcích teplovodních kotlů. Dále práce objasní problematiku materiálů teplovodních kotlů a detailněji se zaměří na ocelové materiály. Ke konci části o materiálech se práce věnuje ekonomickému porovnání dvou odlišných materiálů. V další části práce je objasněna problematika tepelného pole kotle. Konec práce je zaměřen na analýzu vybraných skupin materiálů a je zde popsán průběh laboratorních prací vykonávaných v rámci této bakalářské práce.

**Klíčová slova:** materiály kotlů, změny fyzikálních vlastností materiálů, optimalizace životnosti kotlů

# **Materials of biomass boilers**

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on materials of biomass boilers. At first there is biomass combustion technology and basic construction elements of hotwater boilers. After that thesis will clarify problematics about materials of hotwater boilers and steel materials in the detail. In the end of materials part there is economy comparsion of two diferent types materials. In another part of thesis there is clarifed problematics about thermal field of the boiler. In the end of this thesis there is analysis of selected group of materials and there is description of work in laboratory within this bachelor thesis.

**Keywords:** boiler materials, change in the physical properties of materials, optimization of the service life of boilers

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Cíl práce a metodika .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Technologie spalování biomasy a materiály pro výrobu teplovodních kotlů .....</b>	<b>3</b>
3.1    Technologie spalování biomasy .....	3
3.1.1    Biomasa .....	3
3.1.2    Sklizeň a zpracování dřevní biomasy .....	5
3.1.3    Spalování na roštu.....	6
3.1.4    Spalování se spodním přívodem paliva .....	7
3.1.5    Zplynovací kotel .....	8
3.1.6    Konstrukční prvky teplovodních kotlů .....	9
<b>Kotlové těleso.....</b>	<b>10</b>
<b>Násypka paliva, Zásobník paliva.....</b>	<b>10</b>
<b>Ohniště, popelník .....</b>	<b>10</b>
<b>Spalinové cesty, odtahové hrdlo .....</b>	<b>11</b>
<b>Odtahová klapka, zatápěcí klapka .....</b>	<b>11</b>
<b>Regulátor teploty, omezovač teploty .....</b>	<b>11</b>
<b>Pojistný výměník tepla .....</b>	<b>12</b>
<b>Hořák .....</b>	<b>12</b>
<b>Žáruvzdorná vyzdívka, vnější izolace kotle .....</b>	<b>12</b>
3.1.7    Zapojení teplovodních kotlů do otopného systému .....	13
3.2    Materiály pro výrobu teplovodních kotlů .....	14
3.2.1    Oceli .....	15
3.2.2    Výroba oceli.....	15
3.2.3    Značení oceli .....	16
3.2.4    Rovnovážný diagram železo-uhlík .....	18
3.2.5    Krystalické mřížky oceli .....	20
3.2.6    Ekonomické zhodnocení ocelových materiálů .....	22
<b>4 Tepelné pole kotle do 50kW .....</b>	<b>24</b>
4.1    Konstrukce kotle do 50kW.....	25
4.2    CFD výpočty .....	26
4.3    Zlepšení konstrukce na základě CFD.....	29
<b>5 Analýza vybraných skupin materiálů .....</b>	<b>30</b>

5.1	Příprava vzorků .....	31
5.1.1	Odebrání vzorků .....	31
5.1.2	Hrubá úprava vzorků .....	32
5.1.3	Přesná úprava vzorků .....	33
5.1.4	Zalévání do pryskyřice .....	34
5.1.5	Broušení a leštění .....	35
5.2	Rozbor vzorků .....	36
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>41</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1	zplynovací kotel na dřevo (Stupavský 2010) .....	9
Obrázek 2	Otopný systém (Bajgar 2020) .....	14
Obrázek 3	rovnovážný diagram železo-karbid železa (upraveno) (Anon. [b.r.] .....	19
Obrázek 4	kubické struktury materiálů (upraveno) (Sushko 2015) .....	21
Obrázek 5	hranová a šroubová dislokace (upraveno) (Abel 1993) .....	22
Obrázek 6	schéma automatického kotle (upraveno) (Buczyński et al. 2015) .....	25
Obrázek 7	vstupní naměřené hodnoty pro CFD (upraveno) (Buczyński et al. 2015) .....	27
Obrázek 8	oblast retorty a deflektoru .....	28
Obrázek 9	CFD model (upraveno) (Buczyński et al. 2015) .....	29
Obrázek 10	inovace kotle na základě CFD (upraveno) (Buczyński et al. 2015) .....	30
Obrázek 11	vzorek CZ01 po vyříznutí z kotle a úbytek materiálu (vlastní zdroj) .....	32
Obrázek 12	všechny vzorky po rozstříhání na rozměr (vlastní zdroj) .....	33
Obrázek 13	řezání vzorků na metalografické pile – A a B, vzorky před zalitím – C (vlastní zdroj) .....	34
Obrázek 14	zalití vzorků do pryskyřice (vlastní zdroj) .....	34
Obrázek 15	leštění pomocí leštičky metalografických vzorků – A a B, připravené vzorky – C (vlastní zdroj) .....	35
Obrázek 16	nerovnoměrný úbytek materiálu (vlastní zdroj) .....	36
Obrázek 17	CZ01-A-povrch voda (vlastní zdroj) .....	36
Obrázek 18	CZ02-A-střed-vlevo a CZ03-A-střed-vpravo (vlastní zdroj) .....	37
Obrázek 19	CZ02-B-střed-vlevo a D01-B-střed-vpravo (vlastní zdroj) .....	37
Obrázek 20	liniové složení plechu vlevo, graf liniového složení plechu vpravo (vlastní zdroj) .....	38
Obrázek 21	liniová charakteristika (vlastní zdroj) .....	38

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Příklady značek ocelí .....	17
Tabulka 2	díly kotlového tělesa .....	23
Tabulka 3	cena materiálu pro výrobek 1 .....	24
Tabulka 4	cena materiálu pro výrobek 2 .....	24

# 1 Úvod

Kotel je zařízení sloužící k ohřevu látky, která přenáší teplo vytvořené kotlem do dalších místností. V kotli se vytváří teplo díky spalování paliv. Tato práce bude věnována kotlům teplovodním. Teplovodní kotel využívá jako teplonosnou látku vodu, popřípadě její roztoky např. nemrznoucí směs a pracuje s nejvyšší teplotou vody do 110 °C. Další typy kotlů využívající jiné teplonosné látky jsou kotle horkovodní, parní, nebo teplovzdušné. Kotle, kterým je věnována tato práce, jsou určeny pro systémy ústředního vytápění. Ústřední vytápění spočívá v tom, že je teplo vytvářeno kotlem v jedné místnosti (kotelně) a systémem trubek je rozváděno do všech ostatních místností objektu, popřípadě skupiny objektů, pomocí teplonosné látky. Dalším systémem je vytápění lokální. U lokálního vytápění je zdroj tepla přímo ve vytápěné místnosti např. krb, nebo kamna. V poslední době se také rozvíjí kombinace obou zmíněných systémů za použití kamen s teplovodním výměníkem. Posledním typem vytápění je centralizované zásobování teplem, kdy kotelna není umístěna přímo ve vytápěném objektu, ale teplo je dodáváno externě. Teplo je v tomto případě získáváno buď z výtopen (jednotka která se zabývá pouze výrobou tepla), nebo z tepláren (jednotka která vyrábí teplo a elektřinu). (Lyčka 2012)

U teplovodních kotlů na tuhá paliva se používá velké množství materiálů např. keramické vyzdívkové, nebo izolační materiály z minerálních vláken. Pro výrobu kotlového tělesa (hlavní části kotle) se však využívají pouze dva typy materiálů, a to oceli a litiny. V případě oceli se jedná o svařenec z jednotlivých dílů, převážně plechů, u litin se jedná o odlité články sestavené dohromady. Kotlová tělesa z litiny disponují vysokou odolností proti propálení a kondenzátu a jejich konstrukční řešení jsou velmi jednoduchá, díky tomu tyto kotle dosahují vysokých emisí. Naproti tomu kotlová tělesa vyrobená z oceli umožňují vytvoření složitých konstrukčních řešení (soustavy výměníků a spalinových cest) a díky tomu mají tyto kotle potenciál, aby mohly pracovat s maximální účinností a minimálními emisemi. Kotlová tělesa vyrobená z oceli jsou tedy ideální volbou pro moderní ekologické kotle, a tudíž právě ocelovým kotlům bude věnována tato bakalářská práce. (Lyčka 2012)

## **2 Cíl práce a metodika**

Cílem této práce je popis technologií spalování biomasy, popis ocelových materiálů a zhodnocení tepelného pole kotle do 50 kW. Součástí práce je také ekonomické porovnání dvou druhů materiálů pro výrobu kotlů. Práce jako celek má za cíl posoudit fyzikální vlastnosti materiálů pro výrobu kotlů do 50 kW při jejich zpracování a během používání v provozu. Hlavní metodikou práce je literární rešerše z odborných zdrojů, která tvoří většinu práce. Fyzikální vlastnosti vzorků byly zjišťovány pomocí zkoušek tvrdosti a zkoumání struktury pod mikroskopem.

## **3 Technologie spalování biomasy a materiály pro výrobu teplovodních kotlů**

### **3.1 Technologie spalování biomasy**

Biomasa je obnovitelný zdroj energie a v České republice je takto využívána již stovky let. Energie je z biomasy získávána nejčastěji spalováním. Pomocí hoření se energie uložená v biomase uvolňuje jako teplo. Získané teplo lze přeměnit na další typy energie, např. na energii pohybovou (parní stroj, parní turbína) a dále např. na energii elektrickou pomocí generátorů. Ovšem v případě, že je naším cílem vytápění bytů, popřípadě ohřev pitné vody, tak získané teplo pouze rozvádíme na požadované místo nebo akumulujeme. Nejčastější formou biomasy pro spalování v malých kotlích do 50 kW je biomasa dřevění. Dnes se pro vytápění využívá mnoho typů dřevěných paliv a to, kusové dřevo, dřevní brikety, dřevní pelety, štěpky, špalíky, ale i odpady ze dřevozpracujících podniků, a to hobliny a piliny. Okrajově se také využívá k vytápění biomasy, která je vypěstována na polích např. různé zrno obilnin nebo sláma. (Hupa et al. 2017)

V historii se používaly technologie spalování biomasy v kotlích prohořivacího a odhořivacího typu. Ovšem díky přísným emisním požadavkům na moderní kotle se dnes vyrábějí u výkonů do 50 kW kotle zplynovací a automatické. Ve zplynovacích kotlích je spalováno kusové dřevo, dřevní brikety, štěpky, špalíky, hobliny a piliny. V automatických kotlích využíváme k vytápění dřevní pelety a štěpku. (Hupa et al. 2017)

#### **3.1.1 Biomasa**

Pod označením biomasa je definováno mnoho paliv. Hlavním parametrem je původ biomasy, podle kterého můžeme určit, zda se jedná o biomasu bylinnou či dřevní. Bylinná biomasa je mladá hmota jednoletých nebo dvouletých rostlin s nevyzrálým buněčným pletivem. Dřevní biomasa je již vyzrálé buněčné pletivo, které rostlo mnoho let. Oba druhy biomasy mají podobné množství hořlavin a tím i podobnou výhřevnost, změna ovšem nastává v podílu popelovin. Dřevní biomasa obsahuje do 0,5 % popelovin, bylinná biomasa ovšem 5 až 10 % díky tomu je zde velké nebezpečí spékání a vytváření strusky, zvláště v případech, kdy byla kvalitní dřevní biomasa (dřevní pelety) zaměněny za bylinnou biomasu (např. pelety z různých typů obilí). (Lyčka 2012)



První formou biomasy mohou být piliny a štěrka. Přesnou charakteristiku těchto paliv definuje norma ČSN 83 8250, ČSN EN 14 961-4. Tato paliva by měla mít vlhkost do 30 %. Kvalita těchto paliv je podmíněna obsahem dalších nežádoucích látek např. kůra, listí a hlína. Tato paliva jsou však využívána k vytápění rodinných domů spíše okrajově. Je to dáno především jejich nároky na skladovací prostory. Piliny a štěrky zabírají mnoho prostoru a ve standardně řešených domech pro ně není dostatečný prostor, a také v případě naskladnění příliš vlhkých paliv je zde riziko zapaření a následného samovznícení. Naproti tomu v provozovnách (obzvláště zaměřených na zpracování dřeva), skladech, či průmyslových kotelnách jsou tato paliva využívána velmi často. (Lyčka 2012)

Další (nejrozšířenější) formou paliva je kusové dřevo. Kusové dřevo je upraveno normou ČSN EN 14 961-5. Moderní kotle na kusové dřevo jsou především kotle zplynovací. Ve zplynovacích kotlích je potřeba topit dřevo do vlhkosti 20 %. Kusové dřevo dosahuje výhřevnosti  $14\text{--}15 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Pro dosažení optimální vlhkosti dřeva je potřeba dřevo skladovat alespoň 1,5 roku. Pro spalování ve zplynovacích kotlích je optimální využít měkké dřevo. Jednak díky jeho vyšší výhřevnosti, ale také díky tomu, že nemá takové tendence k vytváření dehtů při spalování. (Lyčka 2012)

Forma paliva, které je optimální pro automatizaci celého procesu je peleta (ČSN EN 14 961-2). Jedná se o válcovité výlisky, které mají průměr od 6 do 8 mm a dosahují délky která nepřekračuje pětinasobek jejich průměru. Disponují výhřevností až  $17,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a jejich hustota je díky slisování až  $1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . S tímto na paměti můžeme provést jednoduchý test kvality při nákupu pelet, a to že kvalitní peleta po ponoření do vody neplave. Pelety jsou prodávány v pytlích, vacích nebo cisternách a skladovány mohou být buď přímo v místnosti nebo v pytlích, ve kterých byly dodané. Důležité je brát zřetel na prostředí skladu, konkrétně pak na jeho vlhkost, při kontaktu pelety s vodou může peleta zvýšit svůj objem rozpadnout se a být znehodnocena. Ze skladu do kotle mohou být pak pelety dopravovány buď ručně, nebo za použití šnekových či pneumatických dopravníků. (Lyčka 2012)

Poslední formou paliva z biomasy jsou brikety. Brikety jsou definovány normou ČSN EN 14 961-3. Technické parametry i podmínky skladování tohoto paliva jsou identické jako u pelet. Rozdíl nastává pouze v jejich velikosti, a také v možnostech spalování. Zatímco pelety jsou spalovány v automatických kotlích, brikety naproti tomu můžeme spalovat nejčastěji ve zplynovacích kotlích a dalších roštových topeništích. (Lyčka 2012)

### 3.1.2 Sklizeň a zpracování dřevní biomasy

Dřevní biomasa pochází většinou z lesů, plantáží rychlorostoucích dřevin, nebo jako odpad při péči o krajinu např. parky, okolí silnic a zanedbané pozemky. Pro každý ze zmíněných zdrojů dřevní biomasy je vhodná jiná technologie sklizně, a také volíme technologii sklizně podle toho, jaký produkt chceme z dřevní biomasy získat. (Ochodek et al. 2007)

Při sklizni biomasy v lesích jsou využívány nejčastěji velmi výkonné moderní stroje pro sklizeň dřeva. Samotná sklizeň je realizována pomocí harvesterů, strojů, které strom pokácí, odvětví a rozřežou na požadovanou délku. Dále je pak dřevo vyváženo vyvážečkami. Vyvážečky jsou vybaveny hydraulickou rukou pro nakládání klád a také korbou pro převoz dřeva. Aby byla zajištěna průchodnost těchto strojů lesním terénem, jsou tyto stroje vybaveny podvozky s více nápravami a také mohou být nápravy osazeny pásy. Vyvážečky vyvezou dřevo většinou k nejbližší pozemní komunikaci, kde je dřevo překládáno na nákladní automobily, které již dřevo dopraví do dřevozpracujících podniků. V těchto podnicích jsou již ze dřevní biomasy vyráběny jednotlivé produkty jako kusové dřevo, dřevní brikety, dřevní pelety. Větve, které zbyly z předešlého zpracování mohou být dále zpracovány štěpkovači na štěpky. (Ochodek et al. 2007)

V případě menšího rozsahu zpracování dřeva v lese (které má také významnou roli) je dřevo zpracováváno pomocí motorových pil a odváženo lesnickými traktory. (Stelte et al. 2011)

Sklizeň plantáží rychlorostoucích dřevin může být realizována pomocí řezaček se speciálním adaptérem určeným pro tuto práci. Z těchto pozemků je získáván materiál zpravidla pro výrobu štěpky, popřípadě dřevních pelet a briket. (Stelte et al. 2011)

Při péči o ostatní pozemky (parky, okraje pozemních komunikací) bývá dřevní biomasa odpadem který však po dalším zpracování můžeme využít k vytápění objektů. (Stelte et al. 2011)

Štěpka je vyráběna pomocí štěpkovačů, což jsou stroje, které přesekávají dřevní hmotu napříč vlákny a produkují tak štěpku o požadované velikosti. Podle sekacího ústrojí můžeme štěpkovače rozdělit na diskové, bubnové a šroubové. Diskové štěpkovače jsou nejrozšířenější a nejvýkonnější, nože jsou zde umístěny na rotujícím disku. Bubnové štěpkovače pracují na principu hoblovačky a jsou vhodné pro zpracování surovin menších rozměrů, např. lesní odpad. Šroubové štěpkovače jsou využívány jako menší zahradní štěpkovače. (Stelte et al. 2011)

Pro výrobu pelet a briket využíváme peletovací a briketovací lisy. Ty se dělí na pístové hydraulické nebo mechanické lisy, šnekové lisy jednovřetenové a protlačovací lisy (granulační). Celý výrobní proces pelet nebo briket je sušení, rozdrčení, úpravy, vlastní peletizace, chlazení a balení. (Stelte et al. 2011)

### **3.1.3 Spalování na roštu**

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší technologii spalování biomasy. Stroje s touto technologií zpravidla nedosahují takové účinnosti jako jiné, modernější technologie spalování biomasy.

Palivo je dodáváno na rošt, kde dochází ke spalování. Pod roštem je do paliva dodáván vzduch. Dodávka vzduchu záleží na konstrukčním řešení stroje, vzhledem k tomu, že se jedná o jednodušší zařízení, je vzduch většinou nasáván přirozeným tahem komína. Přívod vzduchu může být neregulovaný (většinou krb), ovšem obzvláště pokud se jedná o zařízení vybavené teplovodním výměníkem je regulace v podstatě nutností, aby nedošlo k přetopení systému. Regulace může být provedena jednodušším způsobem, a to manuální klapkou která přivírá přísun vzduchu, tuto klapku ovládá obsluha, nebo automatickou regulací, kdy nejrozšířenějším způsobem je použití regulátoru tahu. Regulátor tahu funguje (např. Honeywell FR124 tak, že měří teplotu vody v kotli a v případě, že se blíží teplota nastavené hodnotě začne pomocí táhla přivírat klapku, tím sníží přísun vzduchu a teplota kotle se začne snižovat. Dodávka vzduchu může být též zajištěna pomocí ventilátoru buď radiálního nebo axiálního. Regulace dodávaného vzduchu může být v tomto případě realizována stále systémem regulátoru tahu, ovšem přibyla nám zde i možnost regulace pomocí otáček ventilátoru. Rošt také zajišťuje to, že popel propadává drážkami v roštu dolů do popelníku.

Spaliny, které odchází z topeniště mohou putovat rovnou do komína, nebo u sofistikovanějších zařízení mohou procházet systémem dutin a kanálů a prohřívát okolní materiál typicky kachlová kamna. U systémů s ústředním a topením a teplovodním okruhem pak většinou spaliny procházejí přes teplovodní výměník a odvádějí své teplo do vody (např. krbová kamna s výměníkem, kotle). (Ochodek et al. 2007)

Technologie spalování na roštu je využíváno u krbů, krbových kamen, kachlových kamen a starších typů kotlů. Výkon těchto zařízení je regulovatelný pomocí množství paliva, které určuje obsluha a také množství vzduchu. (Ochodek et al. 2007; Baláš M et al. 2012)

### 3.1.4 Spalování se spodním přívodem paliva

Technologie spalování se spodním přívodem paliva je velmi moderním a často používaným řešením. Této technologii je využíváno především u automatických teplovodních kotlů. Na tomto principu fungují jak automatické kotle na uhlí, tak automatické kotle na biomasu, a to na pelety a na štěpku. Palivo je uloženo v zásobníku a do místa spalování je dodáváno pomocí šnekového dopravníku. Díky podobným vlastnostem drobného uhlí a pelet je kotel i hořák v mnoha případech technicky identický pro obě paliva. Odlišnost nastává pouze v nastavení parametrů na řídicí jednotce. Ovšem pro spalování štěpky je třeba využít technické odlišnosti obzvláště v konstrukci hořáku a zásobníku. Štěpka díky svému tvaru má tendenci vytvářet v zásobníku klenbu a tím pádem nedohází k její dopravě k místu spalování. Řešením tohoto problému je například použití speciálního zásobníku se systémem střešacích stěn, které zabezpečí, aby nedocházelo k vytváření klenby. Dále díky velikosti a tuhosti štěpky je nutné použití odlišných šnekových dopravníků než na dávkování pelet. Šnekové dopravníky pro dávkování štěpky musí mít robustnější konstrukci a zároveň musí být vybaveny silnějšími motory. (Lyčka 2012; Ochodek et al. 2007)

Automatický kotel se spodním přívodem paliva funguje tak, že palivo např. pelety jsou uloženy v zásobníku. Zásobník bývá dimenzován tak, aby kotel vydržel fungovat bez obsluhy 1 týden. Pelety jsou do zásobníku doplňovány buď ručně, nebo může být kotelná vybavena například pneumatickým doplňováním zásobníku. Ze zásobníku propadávalo palivo do šnekového dopravníku, který dopravuje palivo do litinového kolene a odtud se palivo vytlačuje do retorty, na které dochází ke spalování paliva do retorty je zároveň vháněn po jejím obvodu primární vzduch pomocí ventilátoru. Kotel může pracovat pouze s primárním vzduchem, ovšem některé konstrukce využívají i vzduch sekundární. Nad retortou je nutné, aby byl kotel vybaven reflexním keramickým tělesem, které odráží plameny zpět do retorty, zapalují nové palivo a udržují rovnoměrnou teplotu v ohništi. Popel a spálené palivo přepadávají přes okraje retorty dolů do popelníku. Popelník je dimenzován tak aby pojal popel z 1 vypotřebovaného zásobníku paliva, díky tomu obsluha kotle provádí údržbu v průměru 1 týdně a jinak kotel pracuje naprosto samočinně. Spaliny odchází kolem keramických dílů z ohniště do teplovodního výměníku a poté do komína. (Lyčka 2012; Ochodek et al. 2007)

Řídicí jednotka kotle zajišťuje regulaci výkonu kotle a také střídá pracovní režim s takzvaným režimem útlumu. Výkon automatického kotle se spodním přívodem paliva je

velmi dobře regulovatelný ve velmi širokém spektru výkonu. Takové regulace je dosaženo především díky regulaci dodávky vzduchu, ta je určena otáčkami ventilátoru a také díky regulaci množství dodávaného paliva. Tyto kotle jsou nejčastěji spojovány s pokojovým termostatem, který dává řídicí jednotce pokyn, zda má kotel natápět systém nebo ne. V případě že ano, pracuje kotel v pracovním režimu, kdy ventilátor vhání vzduch do kotle neustále (vypíná pouze při dosažení maximální teploty kotle) a k tomu šnekový dopravník v určitých intervalech podává palivo do retorty. V případě že je kotel v režimu útlumu tak čeká na povel od pokojového termostatu a pouze udržuje malou část paliva žhavou pomocí občasného spuštění ventilátoru a šnekového dopravníku. V případě že přijde pokyn, aby kotel začal natápět systém jsou žhavé části paliva rozfoukány a spouští se pracovní režim kotle. (Lyčka 2012; Ochodek et al. 2007)

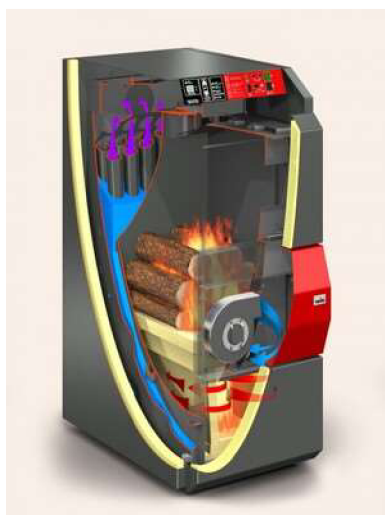
Údržba automatického kotle je prováděna v průměru jednou týdně a spočívá v doplnění zásobníku palivem, pročištění teplovodního výměníku a vynesení popele z popelníku. Údržba a čištění kotle může být usnadněno pomocí konstrukčních prvků např. čistící klapka. (Lyčka 2012; Ochodek et al. 2007)

### **3.1.5 Zplynovací kotel**

Technologie spalování biomasy pomocí zplynování je v této bakalářské práci velmi důležitá hlavně proto, že i vzorek pro kapitolu 5 (Analýza vybraných skupin materiálů), byl vybrán ze zplynovacího kotle na biomasu. Zplynovací kotel na biomasu je v porovnání s automatickými kotli na pelety a štěpku levnější alternativou, také nemá takové prostorové nároky na montáž. Nevýhodou oproti automatickým kotlům je nutnost obsluhy kotle několikrát denně. Ovšem moderní zplynovací kotle vydrží hořet s plně naloženou komorou až 8 hodin. (Stupavský 2010; Lyčka 2012)

Zplynovací kotel na biomasu je využíván jako zdroj teplé vody pro systémy ústředního vytápění, ta může sloužit jak k vytápění objektu, tak pro ohřev vody v kombinovaném bojleru. Zplynovací kotle fungují tak, že palivo je přikládáno do spalovací komory, ta je uzavřená a je v ní buď přetlak vzduchu nebo podtlak, to záleží na konstrukci kotle (buď je využit ventilátor odtahový nebo tlačný). Vlivem teploty je zde vytvářen hořlavý plyn, ten (vlivem přetlaku nebo podtlaku) nemá jinou možnost, než pokračovat přes trysku do dohořivacího prostoru kde probíhá spalování za přístupu sekundárního vzduchu. Spaliny

pokračují z dohořivacího prostoru do výměníku, kde odevzdávají své teplo do vody. Z výměníku odchází spaliny do sběrače spalin. Odtud v případě konstrukce kotle s tlačným ventilátorem odchází spaliny přes lopatky ventilátoru do komína, v případě konstrukce s odtahovým ventilátorem odchází spaliny přímo do komína. Do komína jsou standardně odváděny spaliny přes trubku o průměru 150 mm. Oba způsoby použití ventilátoru mají své výhody a nevýhody. V případě použití ventilátoru odtahového je zde zajištěn dokonalý odvod spalin při příkládání a kotel tudíž nekouří do prostor kotelny, ovšem jeho lopatky bývají zanášeny nečistotami ze spalin. Když použijeme ventilátor tlačný, tak při příkládání do kotle se spoléháme pouze na přirozený tah komína ovšem výhodou je, že nedochází k zanášení lopatek ventilátoru. Tím, že tyto kotle využívají ventilátory je eliminován vliv komínového tahu na kvalitu spalování. Také díky ventilátoru můžeme velmi přesně regulovat výkon kotle a průběh spalování paliva uvnitř. Spalovací komory jsou u meších kotlů (do 50kW) konstruovány na délky polen 0,25 až 0,5 m. Tato hodnota je limitující především v případě, že topíme kusovým dřevem, v případě topení briketami lze brikety přelomit a vložit i do kotlů s menším prostorem pro příkládání. Účinnost zplynovacích kotlů na biomasu se pohybuje od 88 do 92 %. Moderní kotle také mohou být vybaveny systémem automatizovaného zapalování paliva díky elektricky předehřátému vzduchu. (Stupavský 2010; Lyčka 2012)



Obrázek 1 zplynovací kotel na dřevo (Stupavský 2010)

### 3.1.6 Konstrukční prvky teplovodních kotlů

Popis hlavních konstrukčních prvků teplovodních kotlů nezbytných pro jeho správnou funkci. Jedná se o konstrukční prvky kotlů s automatickou dodávkou paliva tak i o konstrukční prvky kotlů s ruční příkládkou paliva.

## **Kotlové těleso**

Tvoří základní část kotle, ve které probíhá vlastní ohřev vody, která proudí skrz kotlové těleso. Jedná se o buď o odlitek z litiny, nebo o svařenec z oceli. Na kotlovém tělese jsou osazené další součásti kotle. Na kotlovém tělese závisí životnost kotle, v případě že začne z kotlového tělesa unikat voda vlivem opotřebení materiálu, je nutné naplánovat výměnu kotle. (Lyčka 2012)

## **Násypka paliva, Zásobník paliva**

Násypka paliva je součástí u kotlů s ruční příkládkou paliva. Právě do Násypky paliva obsluha kotle přikládá palivo. To, jak dlouho vydrží kotel, na jedno přiložení hořet, a tudíž i komfort obsluhy zaleží právě na objemu násypky paliva, moderní kotle mají dobu hoření kolem 8 hodin. Do násypky se palivo přikládá skrze dvířka. (Lyčka 2012)

Naproti tomu zásobník paliva se používá u kotlů automatických. Zásobník je situován mimo vlastní těleso kotle ovšem je s ním přímo spojen. Palivo je dodáváno ze zásobníku paliva na rošt zcela samostatně pomocí řídicí jednotky kotle. Díky automatickému dávkování ze zásobníku paliva není u těchto kotlů vyžadována přítomnost obsluhy od několika dnů až týden, to závisí na spotřebě tepla. (Lyčka 2012)

## **Ohniště, popelník**

Ohniště se skládá z roštu a spalovacího prostoru. Na roštu leží základní vrstva paliva a dochází zde k primárnímu hoření. Pod rošt je nezbytné přivádět primární spalovací vzduch pomocí ventilátoru. Spalovací prostor se nachází nad roštem a dochází zde k primárnímu hoření pevných hořlavín, zároveň vlivem teploty také dochází k vytváření prchavé hořlaviny, která se zde také spaluje, a to díky sekundárnímu hoření. Aby sekundární hoření probíhalo bez problému je do prostoru spalovacího prostoru přiváděn také sekundární spalovací vzduch. Ten se míchá s prchavou hořlavinou a společně tvoří hořlavou směs. U kotlů s ruční dodávkou paliva se spalovací prostor prolíná s násypkou paliva. (Lyčka 2012)

Popelník je součástí kotle, která je určena k zachycování pevných zbytků spalování. Popelníky mohou být vybaveny výsuvnou zásuvkou, která usnadňuje obsluhu odstraňování pevných zbytků spalování. (Lyčka 2012)

## **Spalinové cesty, odtahové hrdlo**

Na spalovací prostor přímo navazují spalinové cesty. Ty se od spalovacího prostoru liší především teplotou. Ve spalinových cestách již neprobíhá hoření, tudíž je zde pouze teplota spalin nikoliv teplota spalování. Zároveň ve spalinových cestách teplota spalin průběžně klesá díky tomu, že spaliny odevzdávají své teplo otopné vodě. Místo, kde dochází k předání tepla ze spalin do vody se nazývá teplovodní výměník. Předání tepla probíhá ve výměníku přes teplosměnnou plochu. Spalinové cesty přímo navazují na odtahové hrdlo. Této části kotle dosahují spaliny po tom, co jsou dostatečně ochlazeny ve výměníku. Na odtahové hrdlo je již připojen kouřovod, který však již není součástí kotle, tudíž když spaliny opouštějí odtahové hrdlo, zároveň opouštějí celý kotel. (Lyčka 2012)

## **Odtahová klapka, zatápěcí klapka**

Pomocí odtahové klapky regulujeme přirozený tah komína. Je důležité, aby nebyla překročena maximální hranice komínového tahu. Tu má každý kotel danou svým konstrukčním řešením, avšak její překročení nepříznivě ovlivňuje kvalitu spalování. Naproti tomu zatápěcí klapka je zařízení, které otevírá spalinám cestu ze spalovacího prostoru přímo do komína. Většinou dochází k tomu, že když je zatápěcí klapka otevřena spaliny neprocházejí ani výměníkem. Zatápěcí klapku použijeme zejména při roztápění kotle, když ještě studený komín nevykazuje dostatečný tah na to, aby probíhalo dokonalé hoření. Dále pak použijeme zatápěcí klapku při přikládání do kotle. Ovšem je potřeba dbát na to, aby po roztopení kotle byla zatápěcí klapka obsluhou zavřena a spaliny proudily správně. (Lyčka 2012)

## **Regulátor teploty, omezovač teploty**

Regulátor teploty udržuje nastavenou teplotu kotle, zajišťuje, aby nedošlo k přetopení systému a udržuje výkon kotle. U jednodušších kotlů, které nejsou vybaveny ventilátorem je regulátor teploty mechanický termostat, který v nastavené teplotě přes systém řetízků ovládá dusivku (klapku), která přivíráním omezuje množství vzduchu které do kotle proudí. Tím začne docházet ke snižování teploty v kotli. V případě dnes častějších kotlů, které jsou vybaveny, ventilátorem hlídá teplotu kotle elektronický termostat, který po dosažení nastavené teploty začne snižovat otáčky ventilátoru čímž, také dojde k postupnému snížení teploty a snížení výkonu kotle. Provozní teplota teplovodních kotlů se pohybuje od 60 do 90°C. Když dojde k poklesu teploty o nastavenou hodnotu, funkce ventilátoru je



automaticky obnovena. Tato hodnota se nazývá hysterze. Na rozdíl od regulátoru teploty, omezovač teploty je zařízení, které po dosažení teploty také vypíná ventilátor a u automatických kotlů také dodávku paliva, ale v tomto případě se funkce obnoví pouze po zásahu obsluhy. Konstrukčně bývá toto zařízení řešeno také pomocí termostatu a známější je pod pojmem havarijní termostat. Tento termostat se zpravidla nastavuje na 95 °C a k jeho sepnutí při standardním provozu nedojde. Většinou k jeho sepnutí dochází v případě, že je zde nějaká závada na kotli nebo častěji když obsluha kotle něco zanedbala např. pootevřená dvířka nebo, otevřenou zatápěcí klapku. (Lyčka 2012)

### **Pojistný výměník tepla**

Pojistný výměník tepla je součást kotle, která zabraňuje přetopení. Znamější je pod pojmem dochlazovací smyčka a musí jím být vybaveny všechny kotle s ruční příkládkou paliva a uzavřenou otopnou soustavou. Technicky se jedná v podstatě o malý teplovodní výměník umístěný v horní části kotlového tělesa. Důležité je, aby celý systém byl ovládaný mechanicky bez elektrické energie, aby když dojde k výpadku elektrické energie, zde bylo zařízení, které stabilizuje teplotu systému na únosné hranici. To znamená, že jako zdroj vody pro dochlazovací smyčku může být použita prakticky jen tlaková voda z řádu. Spouštěcí ventil je mechanický a bývá nastaven na 95 °C. Když tedy dojde k problému, kotel se začíná přetápět, tlaková voda je spuštěna mechanickým ventilem, prochází přes pojistný výměník tepla, odebírá teplo z kotle, a nakonec odtéká do kanálu. (Lyčka 2012)

### **Hořák**

Jedná se o zařízení, které zajišťuje nejdokonalejší spalování pevného paliva, a to díky tomu, že je zde možnost regulace množství vzduchu, ale i regulace množství paliva. Využívá se u automatických kotlů. Automatické kotle mají díky hořáku snadno nastavitelné a velmi široké spektrum výkonu. (Lyčka 2012)

### **Žárovzdorná vyzdívka, vnější izolace kotle**

Moderní kotle jsou vybaveny díly ze žárovzdorného betonu. Tyto díly dosahují různých tvarů a slouží k usměrnění toku spalin, ale také k akumulaci tepla uvnitř kotle, a také pro udržení provozních teplot v různých částech kotle. Kotle také jsou vybaveny izolační vrstvou, která musí být nehořlavá a nesmí se z ní během provozu kotle uvolňovat zdraví škodlivé látky. Tato vrstva musí být odolná proti mechanickému a tepelnému namáhání. (Lyčka 2012)

### 3.1.7 Zapojení teplovodních kotlů do otopného systému

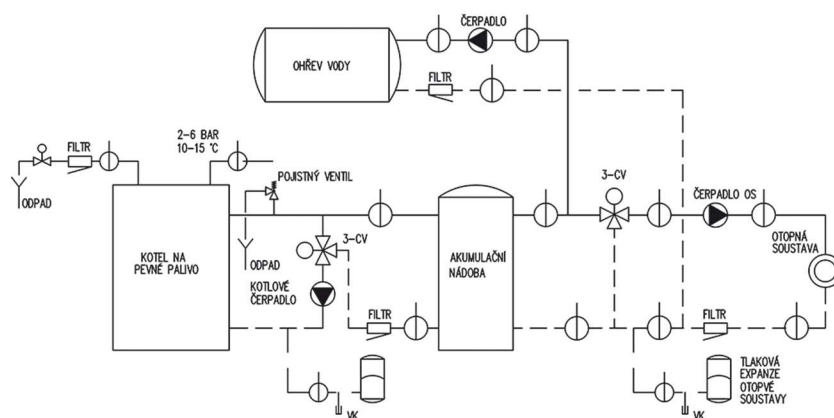
Teplovodní kotle na biomasu slouží jako zdroj teplé vody pro systémy ústředního vytápění. Celý systém ústředního vytápění funguje na principu, že je celý objekt o mnoha místnostech vytápěn zdrojem, který je umístěn v jedné místnosti. To může být i místnost obyvatelná, kdy jsou zde umístěna kamna s možností ohřevu vody do celého okruhu, nebo častější řešení kdy se jedná o přímo místnost určenou pro umístění zdroje vytápění (nejčastěji kotle), to jsou různé kotelny a technické místnosti. Dalším systémem vytápění je ještě použití pouze kamen v jedné z obyvatelných místností bez možnosti ohřevu vody. To již ovšem není systém ústředního vytápění ale systém lokálního vytápění. V systémech ústředního vytápění je teplo rozváděno teplou vodou o teplotě maximálně 82 až 90 °C (v těchto systémech nedochází k varu vody). V jednotlivých vytápěných místnostech se potom teplo z vody do vzduchu v místnosti předává díky tepelným výměníkům nebo radiátorům. Radiátory bývají v místnostech umístěny nejčastěji na nejstudenější místo, to znamená zpravidla u oken. K rozvodu teplé vody po celém objektu je využíváno systémů trubek, aby voda bez problémů cirkulovala do všech míst, je voda poháněna čerpadly. Pro optimalizaci teplot v daných místnostech podle potřeby a také pro optimalizaci teploty kotle používáme různé ventily a kohouty. Každá budova je však jiná to znamená, že je potřeba systém ústředního vytápění navrhovat a dimenzovat na míru do každé budovy. (Kubba 2017)

Další možností pro vytápění objektu pomocí ústředního vytápění je podlahové topení. Podlahové topení je realizováno pomocí silných a ohebných trubek zalitých v podlaze. Jedná se o pozvolný ohřev objektu teplem od podlahy. Jedná se o velmi efektivní systém vytápění. Podlahové topení má dva typy, a to elektrické a teplovodní, pro napájení od teplovodního kotle využijeme pouze typ teplovodní. Teplovodní systém podlahového vytápění se hodí pro většinu objektů ať už se jedná o novostavbu, nebo o renovovaný starší objekt. Je však potřeba aby návrh celého systému provedl odborník, protože se jedná o velmi složitý systém. (Shi et al. 2022)

Pro zapojení kotle do systému může být využit například 3cestný, nebo 4cestný mixovací ventil. Ten udržuje v kotli vyšší teplotu, než je teplota zbytku okruhu a zejména pro kotel je to výhodné proto, že rychleji dosáhne provozní teploty. Provozní teplota kotle znamená, že se teplota zpátečky (voda vracějící se do kotle) pohybuje nad hranicí 50 °C (u kotlů s ruční příkládkou paliva ideálně nad 60 °C). Celý systém je tedy rozdělen na okruh kotlový a okruh

otopný. Ovládání směšovacího ventilu může probíhat buď manuálně nebo u systémů s pokročilejší regulací je ventil ovládán pomocí servopohonu. Celý okruh může být řešen buď samotížně, nebo může být poháněn čerpadlem. Čerpadlo je spouštěno až po dosažení nastavené teploty a umožňuje pružnější mixování ve ventilu. (Vanwormer a Grassl 2018; Lyčka 2012)

Pokud kotel není regulovatelný od 30 % do 100 % výkonu (většinou se jedná o kotle s ruční příkládkou paliva), musí být zapojen s akumulací, jak je vyobrazeno na obrázku 2. V tom případě kotel přebytečné teplo ukládá do akumulací. Uživatel potom může vytápnout objekt z tepla, které má uloženo v akumulaci. (Lyčka 2012)



Obrázek 2 Otopný systém (Bajgar 2020)

### 3.2 Materiály pro výrobu teplovodních kotlů

K výrobě teplovodních kotlů na tuhá paliva se používá mnoho typů a skupin materiálů. Jednotlivé materiály jsou v kotli použity podle konstrukčního řešení kotle. K výrobě kotlů je v první řadě využíváno ocelí, dále pak žáruvzdorné keramiky, litiny, žáruvzdorné izolační materiály atd. V této práci se budeme zabývat převážně tím hlavním materiálem pro výrobu kotlů a to ocelí. V případě že je kotlové těleso svařenec je ocel hlavním materiálem kotlového tělesa. Dále je ocel využívána pro výrobu krycích plechů, nebo ovládacích mechanismů kotle (páky, klapky atd). Časté je, že za kotlovou ocel jsou označovány vysoce legované materiály nicméně to platí hlavně v případě velkých parních kotlů, v případě malých teplovodních kotlů je materiál namáhán méně, a tudíž se k jejich výrobě využívá běžných méně odolných ocelí. Samozřejmě běžné oceli jsou levnější než vysoce legované materiály a jejich použití při výrobě je tak nezbytné pro konkurenceschopnost výrobku na trhu. Jako kotlové oceli tedy označujeme všechny materiály uvedené v normě ČSN 42 0090 Materiály pro energetická zařízení. Nejpoužívanější ocelí pro výrobu malých teplovodních kotlů je tak jednoznačně ocel 11 373 (S235JR). To je shodou okolností hned první možná

nabízená ocel (v případě plechů) pro tepelná energetická zařízení, dle normy ČSN 42 0090-2. Její použití je však podmíněno tím, že nevyšší tlak bude 4 MPa při teplotě 200 °C, nebo 3,2 MPa při teplotě až 300 °C. Maximální pracovní přetlak zplynovacího kotle je 0,25 MPa a vzhledem k tomu že se jedná o teplovodní kotel, tak teplota nemůže být větší než bod varu vody, podmínku materiál tedy splňuje. (Úřad pro normalizaci a měření 1976; Lyčka 2012)

### 3.2.1 Oceli

Oceli jsou slitiny železa s obsahem uhlíku do 2,11 %. Některé zdroje tuto hodnotu zaokrouhlují na 2 %. Oceli dále obsahují další přísadové prvky jako chrom, wolfram, vanad, molybden, či nikl, které zlepšují její technické vlastnosti. Obohacování ocelí dalšími prvky, za účelem zlepšení jejich technických vlastností, nazýváme legování. Pomocí legování a různému obsahu uhlíku můžeme vytvářet typy ocelí, které jsou zaměřené a navrženy přímo pro svůj účel. Jedná se například o nerezové, žáruvzdorné, nástrojové, nebo automatové oceli. Naproti tomu také oceli obsahují nežádoucí prvky, které zhoršují její vlastnosti, a dostaly do ní během výroby. Obsah těchto prvků se snažíme eliminovat. Díky svým technickým vlastnostem jsou oceli označovány za nejdůležitější technický materiál. (Hluchý M 1986; Schweitzer A. Philip 2003)

### 3.2.2 Výroba oceli

Základem pro výrobu oceli je surové železo. Výroba surového železa probíhá ve vysoké peci. K výrobě surového železa využíváme železnou rudu, ocelový šrot, struskotvorné přísady, palivo a vzduch. Před závozem do vysoké pece je nutné železnou rudu nadrtit a na magnetických separátorech ji roztřídit (odstranit nečistoty např.: kameny). Jako struskotvorná přísada je nejčastěji využíván vápenec. Ten usnadňuje uvolňování železa ze železné rudy a vytváří strusku, ve které se soustředí nečistoty ze železných rud, a zároveň se vytvořená struska pohybuje nad roztaveným surovým železem, a tudíž brání oxidaci železa.

Palivem ve vysokých pecích je koks, vyrobený z kvalitního černého uhlí. Pro správnou funkci vysoké pece je nezbytný vzduch. Vzduch, který je pomocí dmýchadel vháněn do vysoké pece se předehřívá až na teplotu kolem 1200 °C, předehřívání zajišťuje snížení nákladů na palivo a usnadňuje dosažení požadované teploty ve vysoké peci. Díky splnění všech podmínek nastává ve vysoké peci redukce oxidů železa, obsažených v železné rudě, oxidem uhelnatým.  $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$  Roztavené surové železo, což je hlavní produkt vysoké pece, se shromažďuje ve spodní části, odtud je vypouštěno do pánví, ze

kterých pokračuje k dalšímu zpracování. Dalším produktem vysoké pece je již zmíněná struska, ta je využívána např. k výrobě cihel. Posledním produktem je vysokopecní plyn, který slouží k vytápění ohřivačů vzduchu, ty ohřívají vzduch, který je vháněn do vysoké pece. (Vojtěch D 2006; Hluchý M 1986)

Ze surového železa je ocel vyráběna díky procesu, který se nazývá zkujňování. Zkujňování je snižování obsahu nežádoucích prvků na jejich optimální hodnotu. Zkujňování může probíhat v kyslíkových konvertorech, martinských pecích, obloukových pecích, a v indukčních elektrických pecích. Výroba oceli v kyslíkovém konvertoru probíhá tak, že dochází k oxidaci roztaveného surového železa s kyslíkem, který je foukán nad roztavenou lázeň. Uhlík odchází z konvertoru ve formě oxidu uhelnatého, který vznikl oxidací uhlíku. Síra se mění na sulfid a přechází do strusky, a rovněž prvky jako mangan, křemík a fosfor ve formě oxidů odcházejí také do strusky. Po zkujnění je nutné ještě ocel dezoxidovat, kvůli vysokému obsahu kyslíku. Po zkujňování se ocel odlévá do kokil, kde po ztuhnutí vznikají ocelové ingoty, ty se mohou dále zpracovávat např. ve válcovnách, nebo v případě oceli na odlitky se ocel odlévá do slévárenských forem. (Hluchý M 1986; Vojtěch D 2006)

### **3.2.3 Značení oceli**

Oceli se vyrábí v mnoha specializovaných variantách, a jsou rozděleny podle mnoha kritérií. Podle účelu použití se dělí např. na oceli konstrukční, nástrojové, pro tlakové nádoby atd. Dále se mohou oceli rozlišovat podle stupně legování, stupně desoxidace, nebo podle způsobu výroby. Samozřejmě s rostoucí kvalitou a specializací oceli roste i její cena, proto mají i běžné oceli své místo. Pro zjednodušení komunikace mezi dodavatelem a odběratelem, a vymezení všech požadavků je nezbytné oceli značit. Dle normy ČSN EN 10027, je možné oceli označovat buď podle přejatého evropského značení, nebo podle původního českého značení. Této normě budou věnovány následující odstavce. (Silbernagel et al. 2011)

Oceli jsou podle evropského značení rozděleny do dvou skupin. V první skupině jsou oceli označovány podle jejich použití, nebo podle mechanických a fyzikálních vlastností. Podle skupiny druhé jsou oceli označeny podle jejich chemického složení. Dle první skupiny se značka materiálu vytváří tak, že na prvním místě je písmeno, které určuje, pro jaké použití je ocel určena, respektive ještě před tímto písmenem může být symbol „G“, ten značí že je ocel vhodná na odlitky. Na druhém místě je trojčíferné číslo, které udává minimální mez kluzu materiálu v MPa. Na dalších pozicích mohou být přídatné symboly, které určují např.

nárazovou energii v Joulech při určité zkušební teplotě, zda byla ocel zušlechťena, zda se hodí pro žárové pokovování ponorem, zda je určená pro výrobu trubek, nebo když se jedná o ocel určenou pro stavbu plavidel. Toto platí pro většinu skupin ocelí ovšem např. u skupiny D (oceli pro ploché výrobky k tváření za studena) nastává výjimka v podobě absence označení mezi kluzu. Další výjimky nastávají např. u ocelí pro elektrotechniku, zde první trojčíslí označuje nejvyšší jmenovitou ztrátu, nebo v případě ocelí na kolejnice první trojčíslí označuje minimální tvrdost podle Brinella. První písmena, která určují použití oceli mohou být např. S – konstrukční oceli, P – oceli pro tlakové účely, L – oceli pro potrubí, E – oceli na strojní součásti atd. V tabulce 1 jsou uvedeny příklady značek ocelí. (Úřad pro technickou normalizaci 2017)

Tabulka 1 Příklady značek ocelí

Značka	Význam prvního písmena, typ oceli	Význam trojčíslí, význam prvního čísla	Význam doplňujícího symbolu, dalších značek
S235JR	Konstrukční ocel	Mez kluzu: 235 MPa	Nárazová energie 27 J při teplotě 20 °C
P355NH	Ocel pro tlakové účely	Mez kluzu: 355 MPa	Normalizačně žiháno, určeno do vysokých teplot
X10CrAlSi18	Žáruvzdorná ocel	X – minimální obsah alespoň jednoho legujícího prvku 5% 0,1 – střední předepsaná hodnota uhlíku	Legující prvky – chrom, hliník, křemík, střední obsah křemíku – 1,8
X15CrNiSi20-12	Žáruvzdorná ocel	X – minimální obsah alespoň jednoho legujícího prvku 5% 0,15 – střední předepsaná hodnota uhlíku	Legující prvky – chrom, nikl, křemík 20-12 – střední obsah legujících prvků zaokrouhlený na nejbližší vyšší číslo

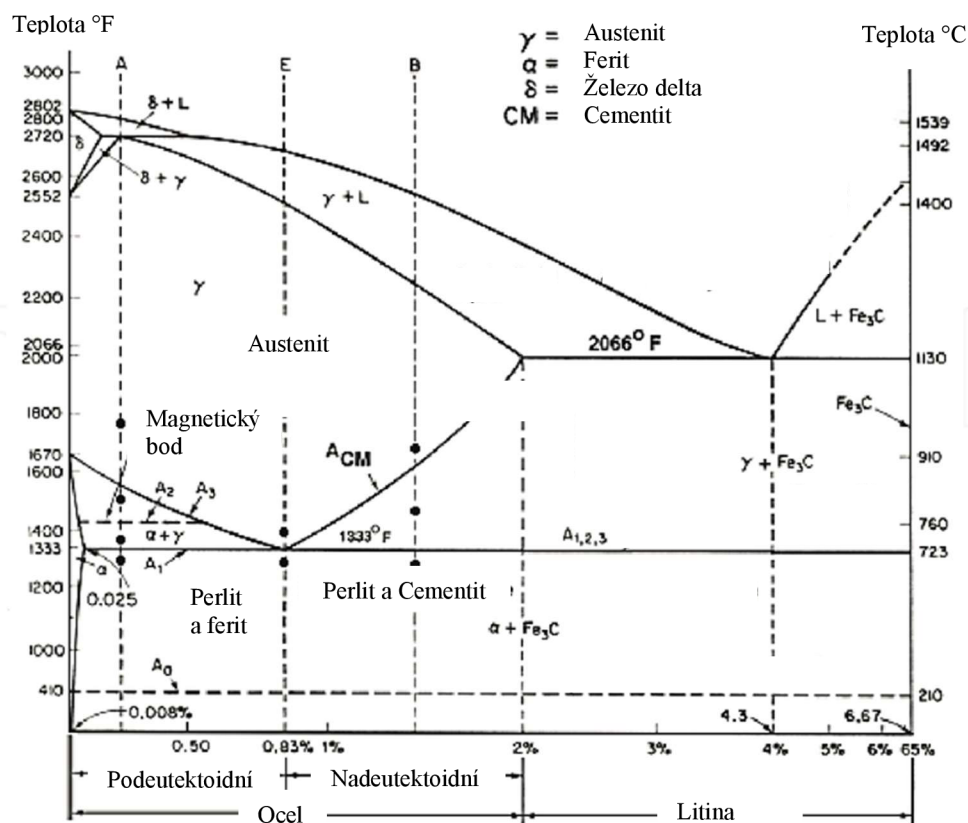
Označení ocelí dle jejich chemického složení, podle druhé skupiny je definováno v tabulkách 12 až 15 normy ČSN EN 10027-1. U korozivzdorných ocelí a u nelegovaných ocelí se středním obsahem manganu vyšším než 1 % a u legovaných ocelí, vyjadřuje první číslo stonásobek střední hodnoty rozsahu, předepsaného pro obsah uhlíku, u nelegovaných ocelí se středním obsahem uhlíku menším než 1 % je ještě před číslem přidáváno písmeno „C“ a na konec se přidávají písmena, která upřesňují použití dané oceli. U ocelí uvedených

v tabulce 13 a 14 normy ČSN EN 10027-1 se do značky vypisují jednotlivé legující prvky společně s koeficienty které vyjadřují jejich množství. V tabulce 15 jsou pak uvedeny rychlořezné oceli. Ty jsou na začátku označeny písmeny „HS“ a další označení je ve tvaru číslic oddělených spojovací čárkou. Jednotlivé číslice vyjadřují procentuální obsah legujících prvků zapsaných v tomto pořadí wolfram, molybden, vanad, kobalt. Zde je příklad oceli HS2-9-1-8. Jedná se o rychlořeznou ocel, která obsahuje 2 % wolframu, 9 % molybden, 1 % vanadu a 8 % kobaltu. (Úřad pro technickou normalizaci 2017)

Podle normy ČSN EN 10027-1 je možné označovat oceli podle číselného označování. První dvě číslice základní číselné značky vyjadřují třídu oceli. Třetí a čtvrtá číslice základní značky určuje informaci závislou na třídě oceli a pátá číslice je pořadová. Následuje doplňkové číslo, které je dvouciferné a první číslice vyjadřuje stav oceli v závislosti na tepelném zpracování a druhá číslice určuje stupeň přetváření. Základní číselná značka a doplňkové číslo je odděleno tečkou. Oceli jsou tedy rozděleny do devíti tříd. Třídy 10 až 12 jsou konstrukční oceli nelegované, třídy 13 až 17 jsou oceli konstrukční legované a oceli třídy 19 jsou oceli nástrojové. Třetí a čtvrtá číslice (dvojčíslí) vyjadřuje u konstrukčních ocelí 10 a 11 třídy přibližnou pevnost v tahu v 10 MPa. U ocelí třídy 12 až 16 určuje třetí a čtvrtá číslice součet středních obsahů legujících prvků, u ocelí 17 třídy vyjadřuje třetí číslice typ legování jednotlivými prvky a čtvrtá číslice charakterizuje obsah hlavních legovacích prvků. V případě ocelí 19. třídy charakterizuje třetí a čtvrtá číslice střední obsah uhlíku. (Úřad pro technickou normalizaci 2017)

#### **3.2.4 Rovnovážný diagram železo-uhlík**

Rovnovážný diagram železo-uhlík zobrazuje jednotlivé fáze slitiny železa a uhlíku při určitém obsahu uhlíku a při určité teplotě, před tím, než je dosaženo taveniny. Diagramy mohou být dva, podle toho, v jaké formě se uhlík vyskytuje, a to buď stabilní diagram  $Fe - C$  (kde se uhlík vyskytuje ve formě grafitu), nebo významnější metastabilní diagram  $Fe - Fe_3C$  ve kterém je uhlík obsažen ve formě karbidu železa. Oba diagramy jsou prakticky totožné, liší se pouze teplotou a obsahem uhlíku ve stejných bodech. Na obrázku 3 je zobrazen metastabilní diagram  $Fe - Fe_3C$ . (Vojtěch D 2006; Silbernagel et al. 2011)



Obrázek 3 rovnovážný diagram železo-karbid železa (upraveno) (Anon. [b.r.]

Na metastabilním diagramu železo – karbid železa je viditelné základní rozdělení na oceli a litiny. Na tomto diagramu byla jako hranice použita zaokrouhlená hodnota 2 % uhlíku, v případě že má slitina železa obsah uhlíku do 2 % jedná se ocel, v případě že má slitina obsah uhlíku vyšší jak 2 % jedná se o litinu, jak již bylo zmíněno ze začátku této kapitoly. Další důležitou hranicí vyznačenou na ose x, je hranice obsahu uhlíku 0,83 %. Tato hranice rozděluje oceli na podeutektoidní (s obsahem uhlíku do 0,83 %), eutektoidní (s obsahem uhlíku 0,83 %) a oceli nadeutektoidní (s obsahem uhlíku od 0,83 % do 2 %). Podeutektoidní oceli jsou využívány jako konstrukční, nadeutektoidní oceli jsou využívány jako nástrojové. Většina všech vyrobených ocelí jsou oceli podeutektoidní a mají obsah uhlíku do 0,3 %. V případě ocelí eutektoidních vyplývá z grafu, že při zahřívání přechází slitina z tuhého roztoku rovnou do fáze  $\gamma$ -austenit a čistý austenit vzniká při nejmenší možné teplotě a to při 723 °C. Na ose y jsou v diagramu vyznačeny teploty. Vzhledem k tomu že se jedná o diagram ze zahraničního zdroje, jsou zde uvedeny teploty jak ve °F, tak ve °C. Na ose y je tedy první důležitá teplota již zmíněná teplota s označením  $A_1$ , eutektoidní teplota 723 °C. Se snižujícím se, nebo zvyšujícím se obsahem uhlíku však teplota pro vznik  $\gamma$ -austenitu stoupá. V případě obsahu uhlíku 0,008 % je teplota pro vznik  $\gamma$ -austenitu 910 °C a v případě obsahu uhlíku do 2 % je teplota 1130 °C. Pomocí těchto tří zmíněných teplot vznikají křivky



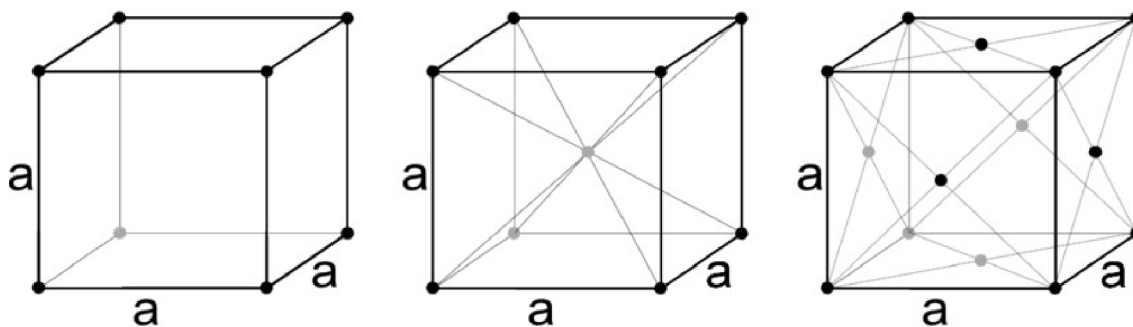
$A_3$  a  $A_{CM}$ , tyto křivky určují vznik  $\gamma$ -austenitu mezi těmito teplotami. V případě tuhého roztoku obsahuje vytváří ocel různé mikrostruktury. Feritická mikrostruktura se týká pouze ocelí s velmi nízkým obsahem uhlíku (0,01 %), oceli s obsahem uhlíku vyšším než tato hodnota, ovšem pouze do 0,83 %, vytváří feriticko-perlitickou strukturu oceli. Perlitická mikrostruktura nastává pouze u eutektoidních ocelí a jedná se o lamelární směs  $\alpha$ -feritu a cementitu  $Fe_3C$ . Naopak oceli nadeutektoidní vytváří mikrostrukturu, ve které jsou perlitická zrna obklopena cementitem. (Silbernagel et al. 2011; Vojtěch D 2006; Anon. [b.r.]

U ocelí s nízkým obsahem uhlíku vzniká z austenitu ve vysokých teplotách fáze- $\delta$  a u ocelí s vyšším obsahem uhlíku se postupně přeměňuje austenit na roztok austenitu a taveniny. Tavenina se v případě oceli s obsahem uhlíku 0,008 % vytváří při teplotě 1539 °C. Se vzrůstajícím obsahem uhlíku teplota vzniku taveniny klesá. Oceli, které vytváří fázi- $\delta$  před tím, než dosáhnou taveniny, projdou ještě fází roztoku  $\delta$  + tavenina. (Anon. [b.r.]

Další mikrostruktura, které může v oceli vzniknout se nazývá Martenzit. Martenzit není zakreslen v diagramu, protože se vyskytuje ve stejné teplotě jako tuhý roztok ocelí, ovšem jeho je podmíněn splněním základních podmínek. Pro vznik Martenzitu je nezbytné, aby ocel byla nahřátá natolik aby dosáhla fáze  $\gamma$ -austenit, po dosažení této fáze musí být materiál prudce zchlazen (zakalen) na pokojovou teplotu. Martenzit je považován za mikrostrukturu, která je přesycená uhlíkem, protože by byla jeho struktura stabilnější, když by byl obsah uhlíku menší. Fáze martenzit je velmi tvrdá a otěruvzdorná, ovšem také křehká. Martenzit je často využíván během výroby výrobku, ovšem na dokončených výrobcích je častější, že je martenzit ještě upraven na jiné, vhodnější mikrostruktury. (Schweitzer A. Philip 2003)

### **3.2.5 Krystalické mřížky oceli**

Krystalické mřížky materiálů určují, jaké je uspořádání stavebních jednotek v prostoru. Materiály mohou být buď krystalické, to je uspořádání atomů, která se pravidelně opakuje anebo mohou být amorfní, to je uspořádání, kdy stavební jednotky materiálu netvoří pravidelné tvary. Jednotlivé atomy jsou uspořádány v krystalové mřížce, a celý materiál je složen z jednotlivých elementárních buněk. Elementární buňka je tvořena tak, aby měla co nejmenší objem, ale co nevyšší počet pravých úhlů. Elementární buňky mohou být primitivní, bazálně centrované, prostorově centrované a plošně centrované. (Vojtěch D 2006)



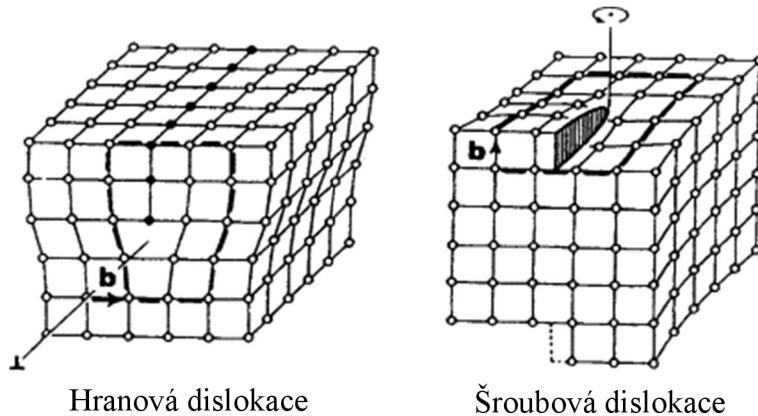
Jednoduchá kubická      Kubická prostorově centrovaná      Kubická plošně centrovaná

Obrázek 4 kubické struktury materiálů (upraveno) (Sushko 2015)

Krystalická mřížka kubická prostorově centrovaná je označována zkratkou „bcc“, z anglického „body-centered cubic“ a tvar krystalické mřížky je krychle (všechny strany jsou stejně dlouhé a všechny úhly jsou  $90^\circ$ ). Atomy, ze kterých je krystalická mřížka složená, jsou umístěny ve vrcholech krychle a v průsečíku tělesových úhlopříček. V případě oceli je tato krystalická mřížka typická pro tuhý roztok  $\alpha$ -Fe, v případě dalších kovů se vyskytuje např. u molybdenu, vanadu, wolframu a chromu. Krystalická mřížka kubická plošně centrovaná je označována zkratkou „fcc“ (face-centered cubic) a její atomy jsou umístěny ve vrcholech krychle a také ve středech všech stěn krychle. U oceli se vyskytuje ve fázi  $\gamma$ -Fe-austenit, dále se vyskytuje např. u zlata, stříbra, hliníku, platiny a mědi. (Vojtěch D 2006)

Takto jsou popsány pouze ideální případy krystalických mřížek kovů, v reálných materiálech však dochází k odchylkám od těchto případů. Odchyly od ideální krystalické mřížky materiálů nazýváme poruchy krystalové struktury. Poruchy mohou být bodové, čárové, plošné a prostorové. Bodové poruchy v kovech mohou být vakance, intersticiály a substituce. Vakance je bodová porucha, při níž dochází k tomu, že v mřížce atom chybí. Vakance může nastat, když dochází k tepelným vibracím atomu, atom má pak tendenci se z mřížky uvolnit. Další bodovou poruchou je intersticiál. Intersticiál je opakem vakance a jedná se o poruchu kdy naopak atom v mřížce přebývá, důvodem může být příměsový atom a koncentrace těchto poruch vzrůstá společně s rostoucí teplotou. Substituce je nahrazení atomu původního materiálu atomem příměsi, nastává tehdy, je-li velikost atomů základního materiálu a velikost atomů příměsi podobná. Hlavní čárovou poruchou jsou dislokace, ty se dělí na hranové a šroubové. Jedná se o čárové poruchy proto, že rozkládají vždy podél myšlené čáry. Hranová dislokace je definována jako, hrana polovrstvy atomů vložená do jinak celistvého materiálu. Šroubová dislokace vypadá tak, jako když by byla odříznuta část materiálu ve tvaru válce v jeho ose, a následně by byly obě jeho části a posunuty o jednu meziatomovou vzdálenost. V reálných materiálech však málokdy

nastane typická šroubová nebo hranová dislokace, častěji dochází ke kombinaci obou typů dislokací a vzniká tedy dislokace smíšená. Na obrázku 5 je ukázka hranové dislokace vlevo, a ukázka šroubové dislokace vpravo. (Vojtěch D 2006)



Obrázek 5 hranová a šroubová dislokace (upraveno) (Abel 1993)

Dalším typem poruch jsou plošné poruchy. První plošnou poruchou je hranice zrn. Hranice zrn vznikají, když byl materiál zahřátý na vysokou teplotu a dochází k jeho chladnutí. Jak materiál chladne vzniká struktura tuhého roztoku na více místech v materiálu najednou. Tyto oblasti struktury tuhého roztoku se zvětšují se snižující se teplotou, až dojde k tomu, že se dvě různé oblasti potkají. To vytvoří hranici zrn a původní oblasti struktury tuhého roztoku vytváří jednotlivá zrna. Na hranici zrn je vyšší koncentrace bodových a čárových poruch a také je zde snižená chemická odolnost materiálu. Při metalografickém výzkumu se metalografické vzorky naleptávají, aby byly hranice zrn lépe viditelné. Další plošnou poruchou jsou mezifázové hranice. Mezifázové hranice mohou vznikat u polyfázových materiálů a můžeme je najít při navázání krystalových struktur mezi dvěma různými fázemi. Poslední plošnou poruchou je povrch krystalu. Vlivem slaběji navázaných atomů ve struktuře krystalů vzniká silně zdeformovaná Beilbyho vrstva, jejíž vlastnosti jsou odlišné od zbytku krystalu. Jako prostorové poruchy mohou vznikat dutiny, trhliny a vměstky. Dutiny vznikají při tuhnutí roztavené slitiny, nebo v případě rozpuštěných plynů v tavenině. Trhliny mají tendenci vznikat, když je v materiálu vnitřní pnutí, např. při svařování a vměstky vznikají v důsledku znečištění materiálu. (Vojtěch D 2006)

### 3.2.6 Ekonomické zhodnocení ocelových materiálů

Pro ekonomické zhodnocení oceli bylo navrženo vzorové kotlové těleso zplynovacího kotle inspirované obrázkem 1. Budou následovat výpočty množství potřebného materiálu na jeden výrobek. Nakonec budou vybrány dva vzorové materiály a z nich vypočítaná výrobní cena vzorového kotlového tělesa. V tabulce jsou tedy rozepsané počty a velikosti dílů potřebných

pro výrobu. Celé kotlové těleso bude složeno z plechových dílů o tloušťce 5 mm, to budou díly, které budou přicházet do styku s plameny a z plechových dílů o tloušťce 3 mm, to budou pouze díly na vnějších částech tělesa. Dále pro výrobu výměňkové části kotlového tělesa budou využity bezešvé trubky.

Tabulka 2 díly kotlového tělesa

Název	Množství	Tloušťka	Rozměry
Centrální plech	1	5 mm	360×1470
Přední plech – 5 mm	1	5 mm	360×340
Bok – 5 mm	2	5 mm	380×980
Zadní výplň	2	5 mm	100×70
Bok – 3 mm	2	3 mm	480×1000
Vrchní kryt	1	3 mm	440×400
Přední kryt	1	3 mm	300×400
Zadní část	1	3 mm	400×880
Spalinové cesty	1	3 mm	80×800
Spalinové cesty – štít	1	3 mm	200×400
Dno	1	3 mm	480×400
Trubka bezešvá	4	4 mm (pro výrobek 2 2,9 mm)	700 / díl = 2800 celkem

Všechny plechové díly budou vypáleny na CNC laserovém pálicím stroji. Byly sestaveny tedy dva pálicí plány. První pro plech tloušťky 5 mm a po rozvržení dílů a vypočítání rozměrů jsem dospěl k závěru, že bude stačit tabule plechu o rozměrech 1000×2000 mm. Druhý pálicí plán byl rozpočítán pro plech tloušťky 3 mm. Bohužel z důvodu počtu a rozměrů dílů budeme muset využít tabuli plechu o rozměrech 3×1250×2500 mm. U pálicího plánu pro plech o tloušťce 5 mm bude odpad 0,59 m<sup>2</sup>, zatímco u pálicího plánu pro plech o tloušťce 3 mm bude odpad 1,18 m<sup>2</sup>.

Výběr materiálů byl proveden s ohledem na normu ČSN 42 0090 (materiály pro tepelná energetická zařízení) ovšem vlivem stáří normy již nejsou některé materiály aktuální, proto byly zvoleny materiály obdobné, ale moderní. Jako levnější materiál pro plechy byla zvolena konstrukční ocel S235JRC+N, jako dražší materiál pro plechy byla zvolena nerezová ocel X5CrNi18-10. V případě trubek byl zvolen pro výrobek 1 materiál 11 353.1 a pro výrobek 2 materiál X6CrNiTi18-10 v obou případech se jedná o bezešvé trubky. Následující ceny ocelových materiálů byly získány z internetových stránek obchodu s hutním materiálem Feron<sup>1</sup> a.s. kromě trubek pro výrobek 2 cena těchto trubek byla získána na internetovém

<sup>1</sup> URL: <<https://www.online.ferona.cz/>> [cit. 2024-3-20]

obchodě firmy ATREON<sup>2</sup> s.r.o. V následujících dvou tabulkách jsou shrnuty výpočty ceny materiálů pro výrobek 1 (levnější alternativa), výrobek 2 (dražší z kvalitnějších materiálů).

Tabulka 3 cena materiálu pro výrobek 1

Zboží	Materiál	Množství	Cena bez DPH
Plech válcovaný za tepla EN 10051 5×1000×2000	S235JRC+N	1 ks	2 469,26 Kč
Plech válcovaný za tepla EN 10051 3×1250×2500	S235JRC+N	1 ks	2 334,75 Kč
Trubka bezešvá přesná kruhová ČSN 42 6711.21 rozměr 60×4,0	11 353.1	2,8 m	530,13 Kč/m → 1 484,36 Kč
Celkem	x	x	6 288,37 Kč

Tabulka 4 cena materiálu pro výrobek 2

Zboží	Materiál	Množství	Cena bez DPH
Plech korozivzdorný válcovaný za studena EN ISO 9445 5×1000×2000	X5CrNi18-10	1 ks	8 712,00 Kč
Plech korozivzdorný válcovaný za studena EN ISO 9445 3×1250×2500	X5CrNi18-10	1 ks	8 043,75 Kč
Korozivzdorná trubka bezešvá kruhová rozměr 60,3×2,9	X6CrNiTi18-10	2,8 m	3 641,54 Kč/m → 10 196,312 Kč
Celkem	x	x	26 952,062 Kč

Cena materiálů na levnější výrobek 1 vyšla 6 288 Kč, zatímco cena materiálů pro výrobek 2 vyšla 26 952 Kč, záleží, jak by se nerezový materiál projevil na životnosti výrobku, ovšem aby se vyplatila výroba kotlového tělesa z nerezového materiálu musel by výrobek 2 vydržet 4,3krát déle, než výrobek 1. Samozřejmě do výpočtu nebyly zahrnuty náklady na pracovní sílu, nebo náklady na přídatný svařovací materiál.

## 4 Tepelné pole kotle do 50kW

Pomocí zkoumání a upravování tepelného pole kotle je dosaženo lepší konstrukce kotle. Lepší konstrukce kotle je nezbytná pro optimalizaci emisí, CO i popílku, ale také pro zlepšení účinnosti kotle. Tepelné pole kotle je zjišťováno pomocí CFD modelového výpočtu. Zkratka CFD vychází z anglického: „computational fluid dynamics“, neboli výpočetní dynamika tekutin. Díky CFD tedy dokážeme předpokládat, jak bude probíhat proudění vzduchu a spalin v kotli a také jakých teplot bude dosahováno v jednotlivých částech kotle.

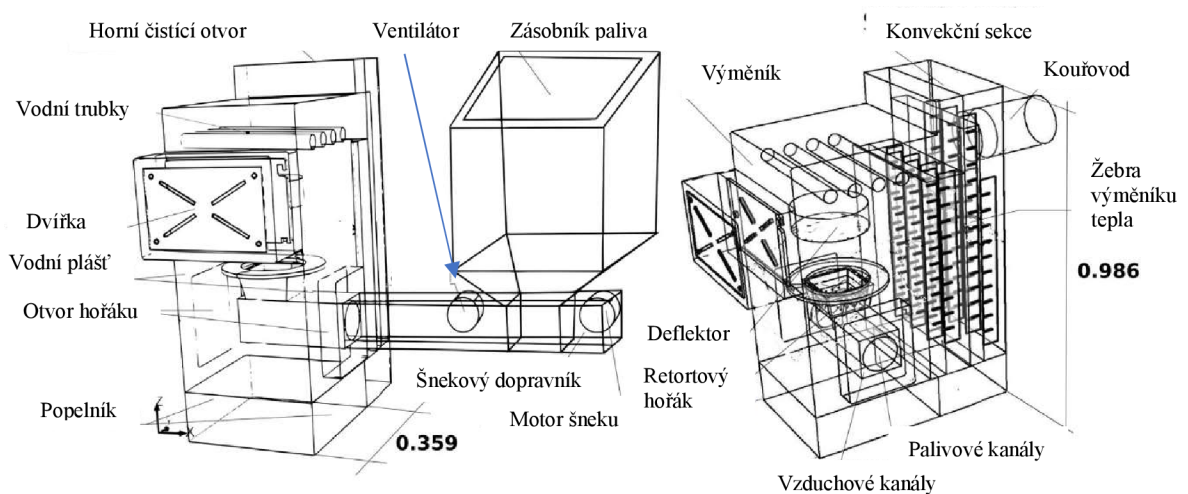
<sup>2</sup> URL: <<https://www.atreon.cz/nerezova-trubka-bezesva-60-3x2-9--1-4541/>> [cit. 2024-3-20]



CFD výpočty jsou výhodné jak pro optimalizaci stávajících kotlů, tak pro konstrukci kotlů nových. Celý model je vypočítáván pomocí složitých počítačových programů. Tuhá paliva jako uhlí, nebo biomasa, jsou primární zdroj tepelné energie v domácnostech v mnoha evropských zemích. (Buczyński et al. 2015; Chaney et al. 2012)

#### 4.1 Konstrukce kotle do 50kW

Následující kapitoly budou věnovány tepelnému poli automatického kotle a jeho schéma je zobrazeno na Obrázku 6. Jedná se o standardní automatický kotel, který má výměňkovou a konvekční sekci. Spalování paliva probíhá na pevném loži, které se nazývá retorta (retortový hořák). Palivo je skladováno v palivovém zásobníku a do retorty je dopravováno pomocí šnekového dopravníku a vlivem hromadění paliva je vytlačováno do horní části retorty. Vzduch, který umožňuje hoření paliva je dodáván ventilátorem, a to jako primární a sekundární. Primární vzduch je vháněn přímo na dno retorty, sekundární proudí okolo retorty do horní části a přispívá k hoření. Primární i sekundární vzduch je dodáván jedním ventilátorem. Celý spalovací proces je řízen řídicí jednotkou. Řídicí jednotka ovládá spalování pomocí řízení množství dodávaného paliva a vzduchu. Množství paliva je řízeno pomocí doby dodávání paliva šnekovým dopravníkem a doby prodlev šnekového dopravníku. Množství vzduchu řídicí jednotka nastavuje pomocí otáček ventilátoru. Řídicí jednotka řídí celý proces podle aktuální teploty kotle, kterou získá z teplotních senzorů, které kotel obsahuje. Nad retortou je umístěn keramický deflektor, který zlepšuje parametry kotle. (Buczyński et al. 2015)



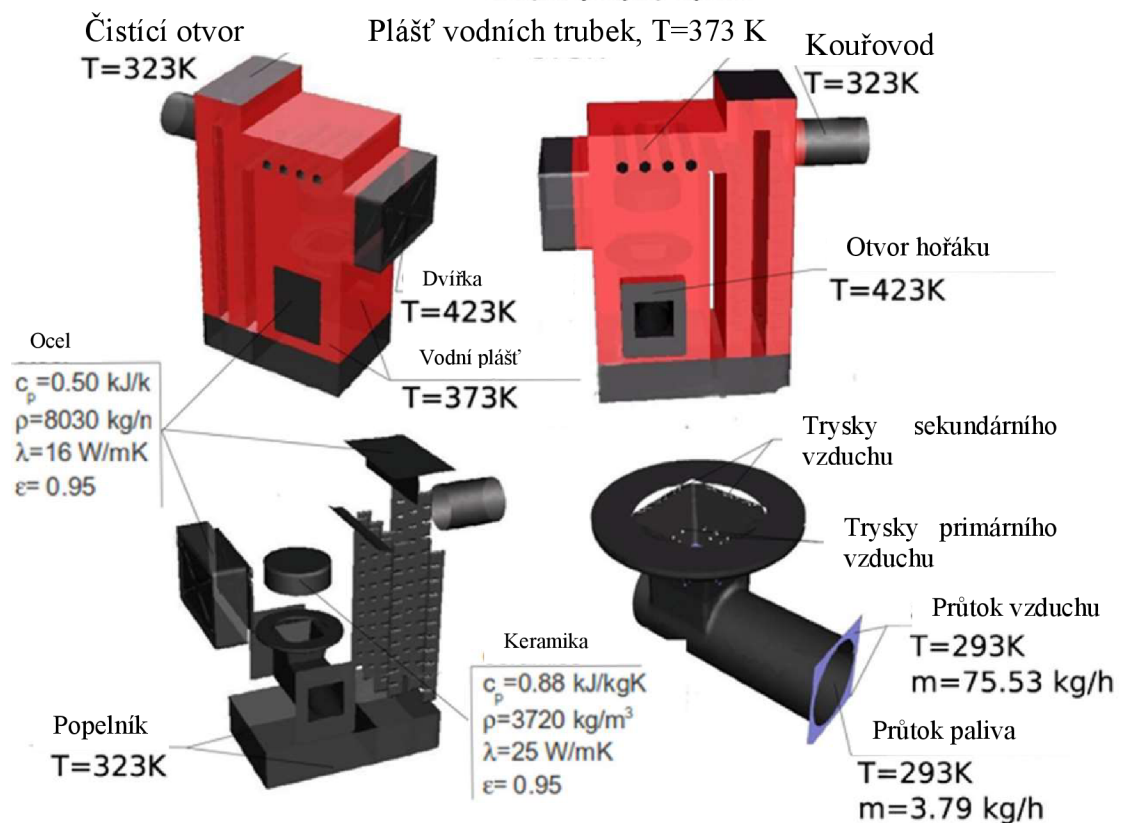
Obrázek 6 schéma automatického kotle (upraveno) (Buczyński et al. 2015)

Automatické kotle jako ten na obrázku 6 dosahují výkonů od 25 do 50 kW. Po naplnění zásobníku vydrží kotel bez obsluhy kolem 4 dnů, záleží na odebíraném výkonu a na velikosti

zásobníku. Obsluha kotle musí také při doplnění zásobníku odebrat popel. Popel vzniká na retortě při spalování paliva a přepadává přes okraj retorty do popelníku. Přepadávání popele dopomáhá nové palivo přiváděné na retortu, které vytlačuje z retorty popel. Další možností, jak přivést palivo na palivové lože je nasypávat palivo shora přímo do palivového lože, to ovšem není případ tohoto kotle. Tyto automatické kotle zpravidla bývají konstruované na spalování biomasy ve formě dřevních pelet a na spalování hnědého uhlí. Tento příklad bude využívat jako palivo uhlí ovšem celý spalovací proces je úplně stejný pro obě paliva. Na základě CFD výpočtů je možné zlepšit emisní parametry kotlů a jejich účinnost. Zvláště u malých domácích kotlů je zde prostor, protože malé kotle mají horší emisní parametry a horší účinnost než velké průmyslové kotle. (Buczyński et al. 2015)

## **4.2 CFD výpočty**

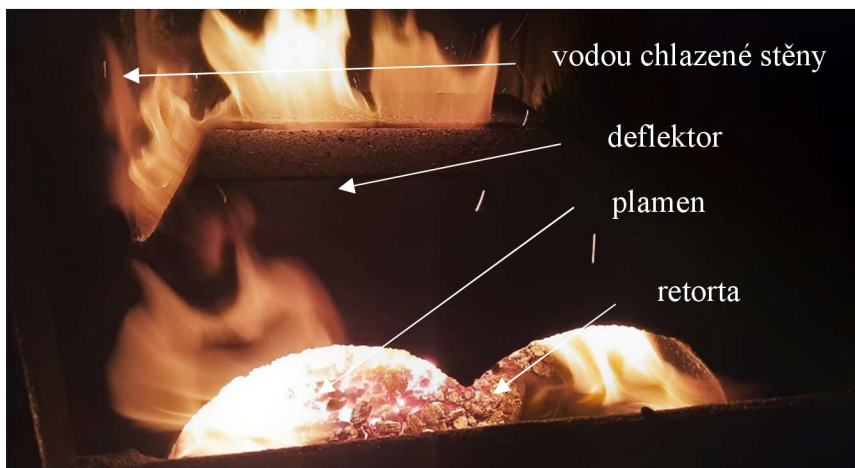
Retortový hořák je v podstatě pevné lože, ze kterého jsou vedeny stěny s otvory, ze kterých vychází vzduch pro spalování. Palivo je zapáleno v horní části hořáku, kde hoří směs těkavých látek uvolňovaných palivem a vzduchu vháněného ventilátorem. CFD model je řešen na základě rovnic o hybnosti, hmotnosti a zachování energie pro plynnou a pevnou fázi ve trojrozměrném modelu. Reakce jsou vypočítávány v jednotlivých výpočetních buňkách. Z výpočtů, které byly prováděny ve zdroji (Buczyński et al. 2015) vyplývá, že pevné lože opouští nadměrné množství CO. Kvůli velmi zjednodušeným výpočetním schémátům spalování CO, je tedy otázkou, jaké množství, CO a dalších těkavých látek je ve skutečnosti v plynné fázi spalování spáleno. (Buczyński et al. 2015)



Obrázek 7 vstupní naměřené hodnoty pro CFD (upraveno) (Buczyński et al. 2015)

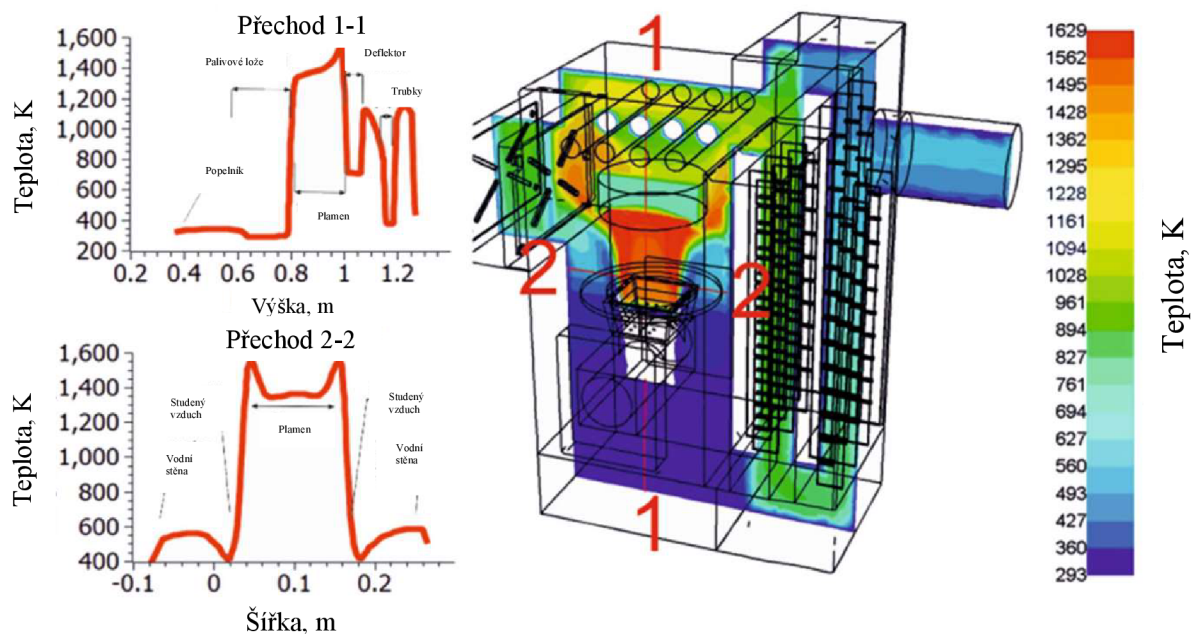
Do kotle pro výpočet CFD modelu bylo dodáváno 30 kW paliva (3,83kg/h), vzhledem k tomu, že kotel pracuje s účinností 84 %, na ohřevu vody byl naměřen výkon kotle 25,5 kW. Na stěnách vodního pláště kotle, který je na obrázku 7 zakreslen červenou barvou, byla naměřena teplota 373 K, což přibližně odpovídá teplotě 100 °C. Nejprve byly odhadnuty pravděpodobné hodnoty koncentrací a teplot, poté byly hodnoty ověřeny měřením, naměřené hodnoty byly určeny jako výchozí hodnoty pro výpočty. Měření hodnot bylo prováděno speciální vodou chlazenou sondou. V případě oxidu uhličitého a kyslíku, zde byla sledována velmi dobrá shoda mezi hodnotami naměřenými a předpokládanými, ovšem v případě oxidu uhelnatého, byla jeho koncentrace ve předpokladech silně podhodnocena. (Buczyński et al. 2015)





Obrázek 8 oblast retorty a deflektoru

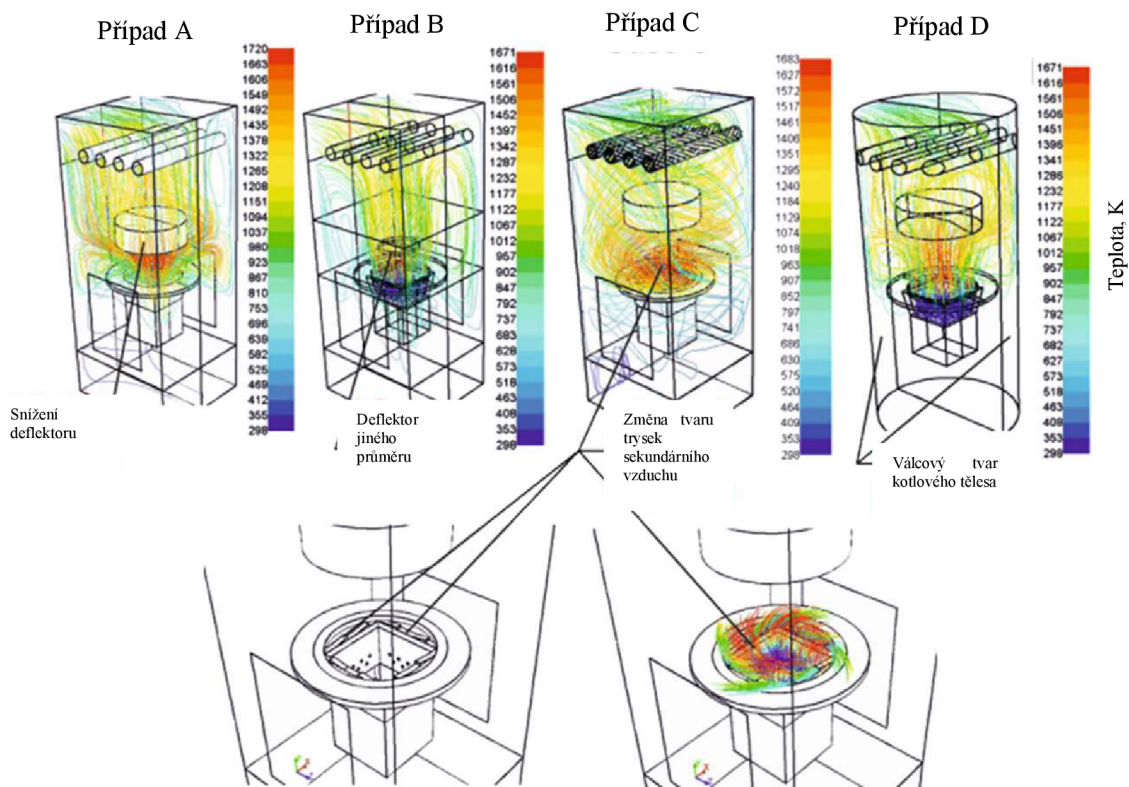
Na obrázku 9 je vyobrazen vypočítaný CFD model. Ze simulace vyplývá, že nejvyšší teplota v kotli, 1 630 K, je mezi keramickým deflektorem a retortou, v místě, kde se spaluje, CO a těkavé látky vznikající v retortě. Oblast mezi retortou a deflektorem je vyobrazena v činnosti na obrázku 8. V okolí deflektoru je možné pozorovat prudký pokles teploty, až o několik set °C, na velmi krátké vzdálenosti. To může vést k nedokonalému spalování. Teplota povrchu keramického deflektoru je spíše nižší, kolem 800 K. Hlavním důvodem je to, že keramický deflektor má dobrou schopnost emise tepla do okolí, zvláště do vodou chlazených stěn, a proto si udržuje tuto teplotu. Ve spodní části kotle (v popelníku) je simulována teplota od 400 do 500 K. Hlavním důvodem může být to, že do popelníku přepadávají kusy paliva, které nejsou zcela spáleny. V celé simulaci je pozorován velký rozdíl teplot mezi oblastmi kolem vodou chlazených stěn a oblastí středu kotle. Materiál použitý v analýze vybraných skupin materiálů byl vystaven podobným podmínkám jako vodní stěna vedle deflektoru na obrázku 9. Spaliny proudí okolo deflektoru do výměníku a opouštějí spalovací a výměňkovou část kotle v teplotách kolem 850 K. V okolí retorty je možné pozorovat proud vzduchu o velmi nízké teplotě, je to vlivem vhánění studeného vzduchu do kotle. Pro kvalitní spalování je důležité, aby vzduch vháněný do retorty neproudil příliš rychle, to by mělo za následek nedostatečné zdržení reaktantů na místě reakce. (Buczyński et al. 2015)



Obrázek 9 CFD model (upraveno) (Buczyński et al. 2015)

### 4.3 Zlepšení konstrukce na základě CFD

Zdroj, který simulaci vypracoval uvedl tři návrhy na zlepšení stávající konstrukce kotle. Prvním návrh, který je uvedený, spočívá ve snížení prostoru mezi retortou a deflektorem ze stávajících 18 cm na nových 11,5 cm. Výsledkem je zlepšení mísení reaktantů, a tudíž dokonalejší spalování. Druhou inovací je změna otvorů pro sekundární vzduch. Změna velikosti, a hlavně geometrického tvaru otvorů má za následek víření vzduchu opouštějícího retortu. Víření vzduchu dopomáhá snížení koncentrace, CO ve spalinách. Poslední inovací, kterou zdroj uvádí je změna tvaru celé spalovací komory. Z CFD simulace vyplývá, že rohy kvádrového kotle jsou podchlazeny, to zhoršuje spalovací proces a zvyšuje emise CO. Navržená změna počítá s válcovou spalovací komorou, to bude mít za následek rovnoměrnou teplotu v prostoru kotle, dokonalejší spalování a lepší emise CO. Všechny popsané inovace jsou znázorněny na obrázku 10. (Buczyński et al. 2015)



Obrázek 10 inovace kotle na základě CFD (upraveno) (Buczyński et al. 2015)

## 5 Analýza vybraných skupin materiálů

V rámci této bakalářské práce byla provedena analýza vzorků materiálů teplovodních kotlů. Analýze byly podrobeny celkem čtyři vzorky materiálů, z nichž jeden vzorek byl vyroben z nového nedotčeného materiálu a zbylé tři vzorky byly vyrobeny ze třech různých těles tří kotlů, které byly vyřazeny svými majiteli z důvodu konce životnosti kotlového tělesa. Všechny tři kotle byly od stejného výrobce a byly to kotle stejného typu, a to Agromechanika AM Energo, jedná se o zplynovací teplovodní kotel na biomasu s ruční příkládkou paliva. Kotlové těleso těchto kotlů bylo vyrobeno z konstrukční oceli S235JRC+N, tento materiál je tedy zároveň i předmětem naší analýzy. Části tělesa kotle, které nepřichází do styku s plamenem či se spalinami jsou vyrobeny z plechů o tloušťce 3 mm ovšem části, které jsou ve styku s plamenem jsou vyrobeny z plechů o tloušťce 6 mm takto byly také vyrobeny všechny tři tělesa ze kterých pochází vzorky. Pro analýzu bylo vybráno nejkrizovější místo v kotlovém tělese, a to nijak nechráněná střední část zadní stěny příkladací (spalovací) komory o tloušťce 6 mm. U všech tří těles byl tedy odebrán vzorek materiálu ze stejného místa.

## 5.1 Příprava vzorků

### 5.1.1 Odebrání vzorků

Z vyřazených starých kotlových těles určených k likvidaci jsem náhodně vybral tři. Jedno vybrané těleso sloužilo v zahraničí, konkrétně v Německu, zbylé dvě v České republice. Jak jsem již psal v úvodu této kapitoly, pro získání vzorků jsem zvolil zadní stěny příkládacích komor. Učinil jsem tak na základě zkušeností, protože právě v tomto místě se nejčastěji projevuje konec životnosti kotlového tělesa. Nastává zde úbytek materiálu který, v případě že je dostatečně rozsáhlý, způsobí že z kotle začne unikat voda. Únik vody může samozřejmě nastat i v jiných částech kotle, ovšem když k tomu dojde, jedná se nejčastěji pouze o bodovou netěsnost vlivem např. vadného svaru. Většinou lze tuto závadu vyřešit odbroušením starého svaru a vytvořením svaru nového, a to díky tomu, že v okolí netěsnosti je tloušťka okolního materiálu téměř na své původní hodnotě, když byl kotle nový. V případě úniku vody na zadní stěně příkládací komory se však většinou jedná o rozsáhlý úbytek materiálu a v případě, že bychom se tuto závadu rozhodli opravit např. opět svařováním s velkou pravděpodobností by se nová netěsnost projevila zanedlouho buď o kousek vedle, nebo na úplně stejném místě. K opotřebení dochází dle mého předpokladu hlavně díky teplotě v příkládacím prostoru kotle, jak jsme již řešili v kapitole o tepelném poli kotle do 50 kW.

Na samotné vyříznutí zadních stěn jsem si připravil plazmovou řezačkou. Pomocí plazmové řezačky jsem ze všech tří těles vyřízl ve tvaru lichoběžníku. Díky tomu, že jsem využil dílenský svařovací magnet nedošlo k propadnutí oddělených plechů do kotle a mohl jsem je tak pohodlně vyjmout ven. Při řezání plazmovou řezačkou dochází ovšem ke znehodnocení okolí řezu, a proto jsem záměrně vyřezával vzorky o mnoho větší, než byly ve skutečnosti potřeba.



Obrázek 11 vzorek CZ01 po vyříznutí z kotle a úbytek materiálu (vlastní zdroj)

### 5.1.2 Hrubá úprava vzorků

Po vyříznutí každého vzorku jsem malou část vzorku očistil úhlovou bruskou a vyrázil raznicemi na každý vzorek jeho označení. Vzorky z těles používaných v České republice jsem označil jako „CZ01“ a „CZ02“, vzorek z tělesa používaného v Německu jsem označil jako „D01“ a vzorek který jsem potom přidal jako vzorek nového nedotčeného materiálu jsem označil jako „CZ03“.

Již po vyříznutí vzorků jsem byl překvapen úbytkem materiálu. Jak jsem již zmínil původní tloušťka všech vzorků u nových těles byla 6 mm. U vzorku D01 jsem naměřil tloušťku materiálu 5,3 mm, zde tedy téměř žádný úbytek nenastal. Na vzorku CZ02 jsem naměřil tloušťku 2 mm, u tohoto vzorku tedy úbytek byl ovšem byl úměrný stáří tělesa. Nakonec jsem změřil vzorek CZ01, kde jsem naměřil 1,8 mm, v tomto případě byl tedy úbytek materiálu markantní. Pro ověření skutečnosti, že i u tělesa CZ01 byla původní tloušťka materiálu 6 mm jsem pomocí plazmové řezačky vyřízl ještě jeden kontrolní vzorek na místě, kde jsem nepředpokládal značné opotřebení a po změření tloušťky kontrolního vzorku jsem doložil skutečnost že i těleso CZ01 bylo původně vyrobeno z materiálu o tloušťce 6 mm.

Dále bylo potřeba vytvořit z velkých vzorků vzorky malé, které se dají následně upnout do metalografické pily. Jako vhodný tvar a rozměr vzorků byl zvolen obdélník o rozměrech 100 mm na 50 mm. Pro rozdělení materiálu jsem využil tabulové nůžky na plech, protože při stříhu okolí stříhu není znehodnoceno. Pro další zpracování vzorků jsem vystřížené vzorky převezl do laboratoří Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze.





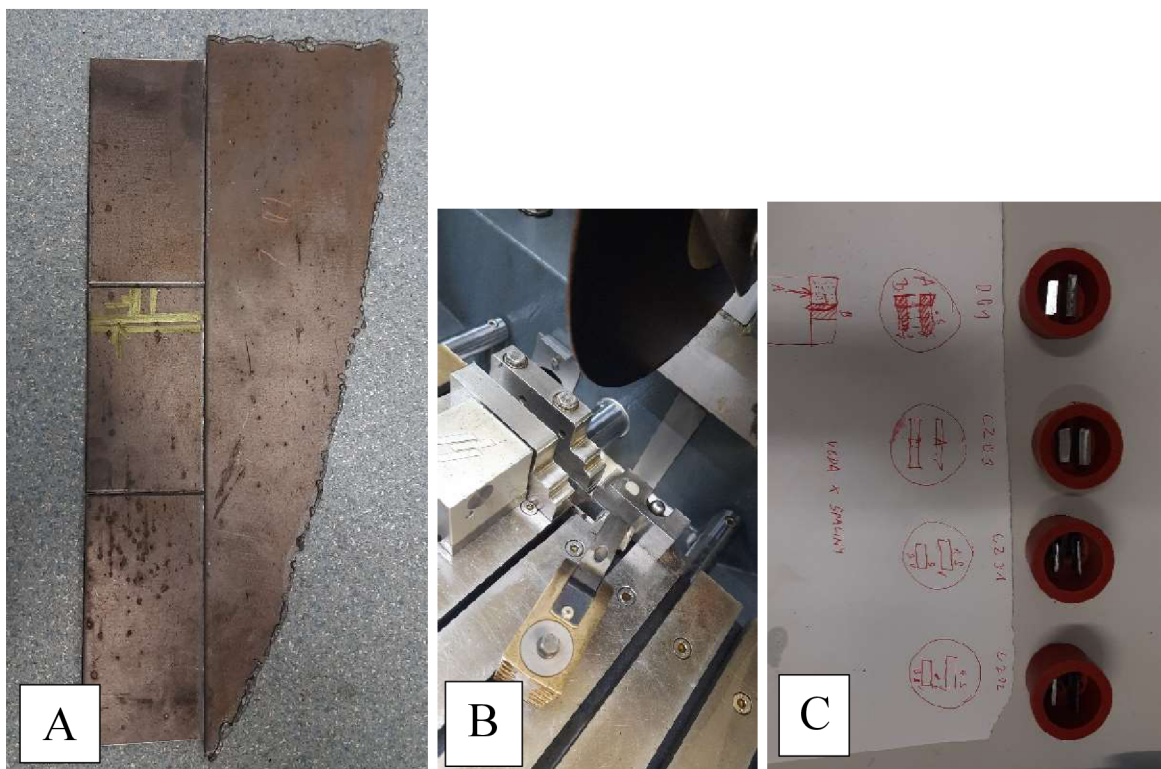
Obrázek 12 všechny vzorky po rozstříhání na rozměr (vlastní zdroj)

### 5.1.3 Přesná úprava vzorků

Ze zastřížených vzorků byl z každého plechu vybrán jeden ze stejného místa, který následně bude podroben analýze. Na vybrané vzorky byly nakresleny čáry, podle kterých budou orientované řezy. Z každého vzorku byly získány dvě části, které následně budou zalité do pryskyřice. Dvě části jsme získávali proto, že nevíme směr válcování plechu, a tak každá část vzorku bude zobrazovat jeden řez. Řezy zobrazené dvěma částmi z jednoho vzorku jsou na sebe kolmé.

Pro výběr správného řezného kotouče bylo nutné změřit tvrdost materiálu. Pro zkoušku tvrdosti byl vybrán pouze vzorek nového materiálu a jeden ze vzorků z používaných kotlů. Předpokládáme, že tvrdost materiálu ze všech používaných kotlů bude podobná. Pro zkoušku tvrdosti byla využita metoda zkoušení tvrdosti materiálů podle Rockwella. Dále jsme předpokládali, že tvrdost původního nedotčeného materiálu bude menší než u materiálu používaného, nicméně díky zkoušce tvrdosti se ukázalo že naopak tvrdost u nedotčeného materiálu je větší. Na základě měření tvrdosti jsme vyhodnotili jako nejvhodnější řezný kotouč 3020. Po prvním řezu se však ukázalo že vhodnější bude použít kotouč 3025, pomocí kterého jsme poté řezali všechny vzorky.

Všechny řezy byly prováděny na metalografické pile Struers disco tom-10. Vzorky jsou na metalografické pile při řezání chlazeny a díky tomu nedochází ke znehodnocení povrchu řezu. Každý vzorek byl řezán třemi řezy, aby vznikly dva malé odřezky s řezy vzorků tak, aby jeden odřezek měl řeznou plochu ve směru válcování plechu a druhý kolmo na směr válcování plechu. Následně byly na všech vzorcích odstraněny otřepy a části vzorků byly skládány do předem umytých pryžových formiček.



Obrázek 13 řezání vzorků na metalografické pile – A a B, vzorky před zalitím – C (vlastní zdroj)

#### 5.1.4 Zalévání do pryskyřice



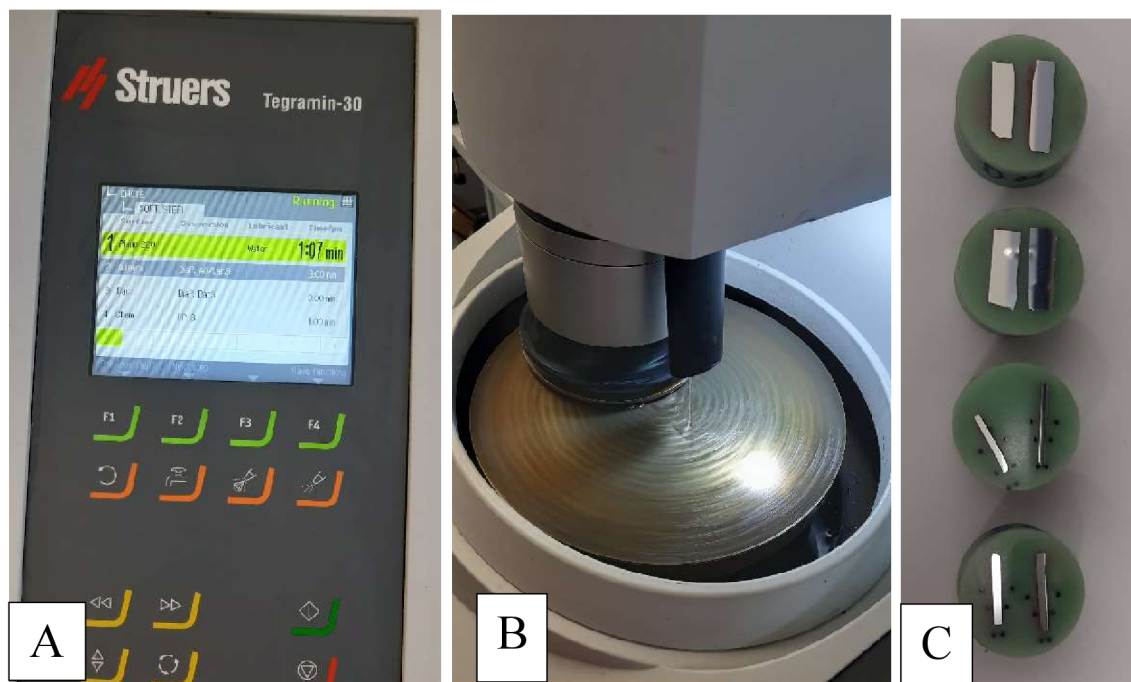
Obrázek 14 zalití vzorků do pryskyřice (vlastní zdroj)

Celkem byly tedy připraveny čtyři pryžové formičky. Každá forma představuje jeden vzorek, a tedy do každé formy bylo nutné vložit dva odřezky vzorků. Odřezky vzorků byly do formy vkládány zkušební řeznou hranou na dno formy, aby po ztuhnutí a následnému vyklopení došlo k zobrazení zkoumaných ploch. Vzorky, které měly větší tloušťku byly do formy vkládány rovnou (bez opory), naopak vzorky, které byly příliš tenké na to, aby vydržely ve svislé poloze samovolně musely být doplněny o plastové opory. Dále byla

namíchána směs pryskyřice, která se skládá z prášku, tvrdidla a vody. Směs byla nalita do formiček a nechali jsme ji tři hodiny ztuhnout. Po třech hodinách jsme odlitky vyjmuli z formiček, srazili jsme ostré hrany a všechny tři odlitky označili pomocí výše popsaného značení.

### 5.1.5 Broušení a leštění

Vzorky byly broušeny a leštěny pomocí leštičky metalografických vzorků Struers Tegramin 30. Pro naše vzorky (měkká ocel) byl připraven program o čtyřech operacích. Na každou operaci byly vzorky uchyceny do unašeče metalografických vzorků a následně byla spuštěna daná operace. Mezi jednotlivými operacemi byly všechny vzorky důkladně omyty a ihned usušeny z důvodu kontaminace následné operace abrazivem z operace předešlé. Všechny operace byly prováděny za určitého přítlaku vzorků na disk a byla přiváděna kapalina. Na první operaci byl použit disk Piano 220, kapalina voda, přítlak 20 N a probíhala 3 minuty. Druhá operace probíhala pomocí disku Allegro MD, jako kapalina byla použita diamantová suspenze DIAPRO o abrazivu o velikosti 9  $\mu\text{m}$ , přítlak byl 20 N a operace probíhala opět 3 minuty. Třetí operace probíhala za použití disku DAC, kapalinou byla opět diamantová suspenze DIAPRO ovšem nyní s abrazivem o velikosti 3  $\mu\text{m}$ , přítlak byl 20 N a operace probíhala 3 minuty. Na poslední čtvrtou operaci byl použit disk CHEM a kapalina OP-S.



Obrázek 15 leštění pomocí leštičky metalografických vzorků – A a B, připravené vzorky – C (vlastní zdroj)



## 5.2 Rozbor vzorků

U každého vzorku, kromě vzorku nového plechu, byla označena jedna strana jako „spaliny“ a druhá jako „voda“, aby bylo možné identifikovat, jaké prostředí na daný povrch působilo. Připravené metalografické vzorky byly zkoumány pomocí elektronového mikroskopu, nejprve byl zkoumán nedotčený povrch a poté byl povrch vzorků naleptáván, aby bylo možné pozorovat mikrostrukturu zrn materiálu. U každého použitého vzorku byl tedy nafotografován snímek s povrchem spalin, středovou polohou a vodou. Také byl u každý vzorek zkoumán v pohledu A a v pohledu B (ve směru válcování a kolmo na směr válcování).



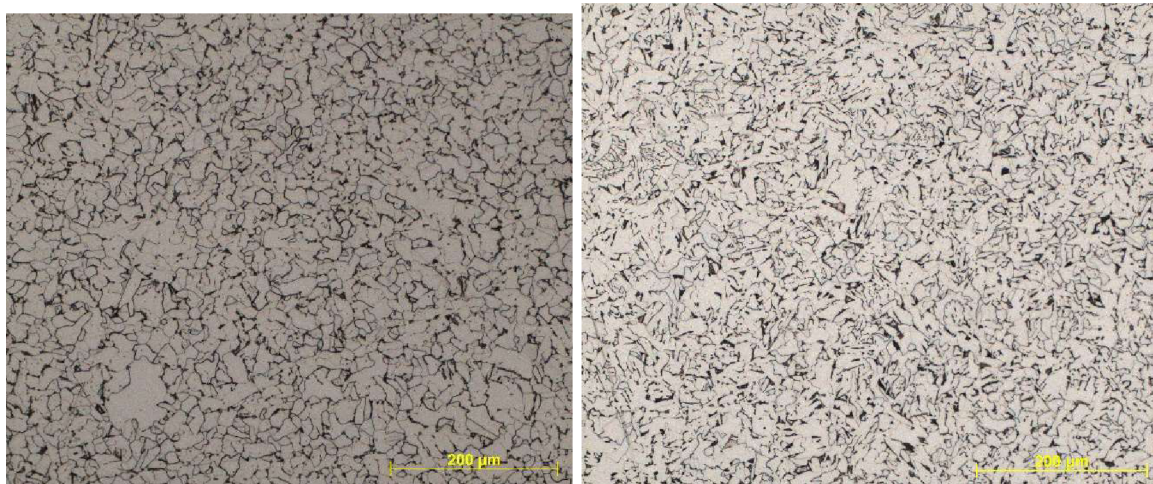
Obrázek 16 nerovnoměrný úbytek materiálu (vlastní zdroj)



Obrázek 17 CZ01-A-povrch voda (vlastní zdroj)

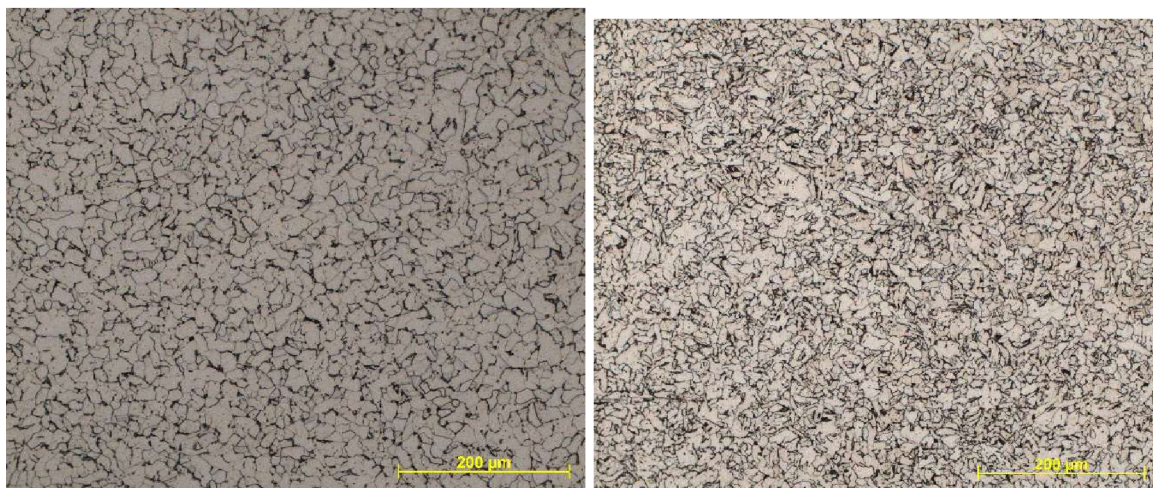
Na obrázku 16 je zobrazen nerovnoměrný úbytek materiálu. Jedná se o fotografii vzorku CZ02 z profilu, na levé části je povrch, na kterém byla voda, na pravé části je povrch, na kterém byly spaliny. Z obrázku je patrné, že úbytek materiálu na povrchu „voda“ nenastal, zatímco na povrchu spalin úbytek byl. Úbytek na povrchu spalin byl však nerovnoměrný,

v dolní části obrázku byl opal materiálu minimální, zatímco v horní části obrázku byl opal značný. Vlivem může být nerovnoměrná teplota spalin v jednotlivých částech povrchu, která vychází z tepelného pole kotle.



Obrázek 18 CZ02-A-střed-vlevo a CZ03-A-střed-vpravo (vlastní zdroj)

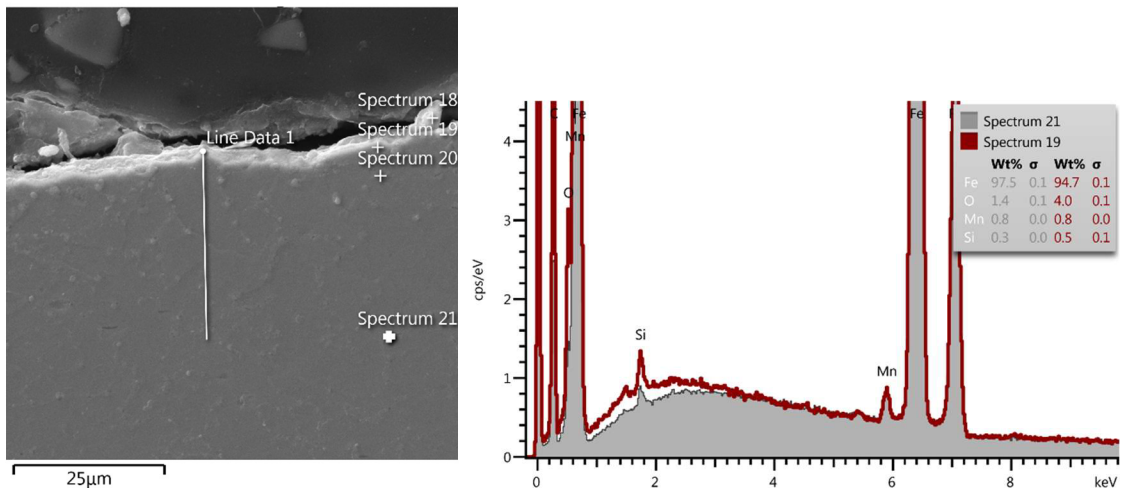
Na obrázku 18 jsou fotografie vzorků CZ02 (vlevo) a nepoužitého materiálu CZ03 (vpravo). Zatímco povrch použitých vzorků (CZ01 a CZ02) je velmi podobný, u nepoužitého vzorku CZ03 mikrostruktura mírně odlišná. Je tedy pravděpodobné, vzhledem k tomu že u vzorků CZ01 a CZ02 došlo ke změně zrn, že se teplota materiálu pohybovala v oblasti rekrystalizačních teplot přibližně od 700 °C do 1100 °C. (Silbernagel et al. 2011)



Obrázek 19 CZ02-B-střed-vlevo a D01-B-střed-vpravo (vlastní zdroj)

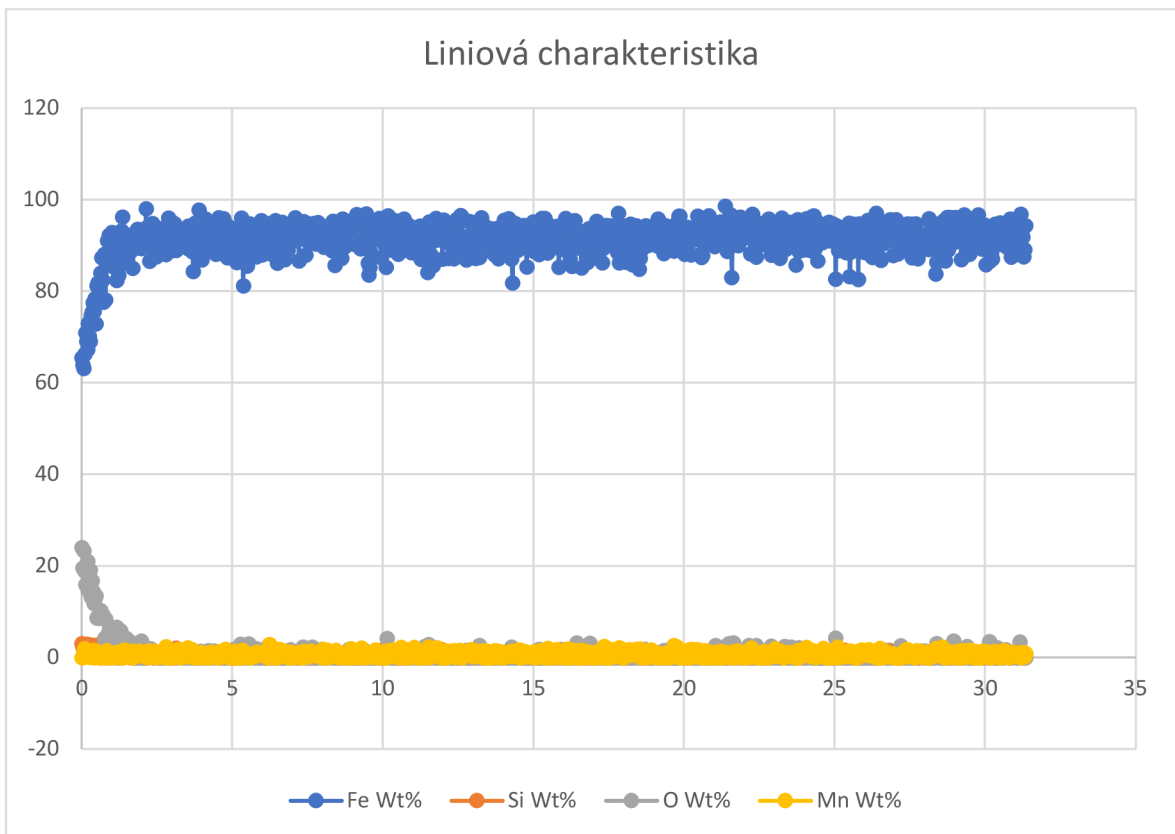
Na obrázku 19 je zachycen rozdíl mezi mikrostrukturou vzorku CZ02 a D01, ačkoliv se v obou případech jedná o použité materiály. Nicméně na vzorku D01 nebyl téměř žádný úbytek materiálu, zatímco na vzorku CZ02 úbytek materiálu byl. Je tedy pravděpodobné že rozdíl v mikrostruktuře způsobilo rozdílné uživatelské zacházení s výrobkem.





Obrázek 20 liniové složení plechu vlevo, graf liniového složení plechu vpravo (vlastní zdroj)

Na obrázku 20 je vyobrazeno liniové složení plechu v různých hloubkách pod povrchem. Z vysokého obsahu křemíku v menší hloubce lze usuzovat že do materiálu během používání výrobku křemík proniká.



Obrázek 21 liniová charakteristika (vlastní zdroj)

Na obrázku 21 je vyobrazen graf liniové charakteristiky, z linie 1 na levé části obrázku 20. Zde je opět viditelné že v nízké hloubce pod povrchem je obsah křemíku vyšší než ve zbytku materiálu. Také je možné na povrchu materiálu pozorovat vyšší obsah kyslíku a nižší obsah železa. Je důležité zmínit že povrch materiálu, ze kterého tato liniová charakteristika

vychází, je povrch vystavený spalinám. Z tepelného pole je patrné že zde nastává vysoký tepelný spád, a tudíž na povrch materiálu, který je vystaven spalinám, působí odlišné podmínky než na zbytek materiálu.

## **6 Závěr**

Nejprve práce objasnila pojem technologie spalování biomasy. Biomasa je tedy tradiční obnovitelný zdroj energie, a jako palivo může mít mnoho podob, ať už se jedná o kusové dřevo, pelety, brikety nebo štěpku. Technologie pro spalování těchto paliv jsou tedy spalování na roštu, známé např. z krbových kamen, spalování se spodním přívodem paliva, typicky automatické kotle, nebo spalování biomasy v moderních zplynovacích kotlích. U moderních kotlů je tedy použito mnoho konstrukčních prvků, např. kotlové těleso, odtahová klapka, hořák, nebo žáruvzdorná vyzdívka a izolace kotle.

V další části práce popisuje, jaké jsou materiály teplovodních kotlů, a především byla tato kapitola věnována ocelovým materiálům. Pro výrobu malých teplovodních kotlů nejsou většinou využívány vysoce legované plechy, ale všechny materiály, které jsou zapsané v normě ČSN 42 0090. Další části práce se věnovaly výrobě oceli, rovnovážnému diagramu železo-uhlík a krystalickým mřížkám, což je nezbytné pro následující zkoumání vzorků, v poslední kapitole práce. Ke konci této části bylo provedeno ekonomické zhodnocení materiálů pro výrobu tělesa teplovodního kotle. Náklady na výrobu vzorového tělesa byly počítány pro ocel S235JRC+N a pro X5CrNi18-10. V případě první zmíněné oceli náklady pro výrobu činily 6 288,37 Kč, v případě druhého zmíněného materiálu náklady činily 26 962,062 Kč. Druhý materiál je tedy výrazně dražší než standardní konstrukční ocel a výrobek z tohoto materiálu by nebyl konkurence schopný vůči ostatním kotlům.

V kapitole tepelné pole kotle do 50kW, je řešena numerická simulace teplot vzorového kotle. Materiál vzorového kotle je přitom vystaven podobným podmínkám jako materiál, který byl následně zkoumán v analýze vybraných skupin materiálů. V tepelné analýze kotle se tedy ukazuje, že nejvyšší teploty v kotli nastávají v oblasti mezi hořákem a deflektorem. Deflektor má dobrou schopnost emitovat teplo do okolí, a tedy i do vodou chlazených stěn kde dochází k předání tepla.

V poslední kapitole se práce věnovala analýze vybraných skupin materiálů. Pro analýzu byly odebrány vzorky materiálů z vyřazených kotlových těles a následně podrobeny testům v laboratoři. Pro srovnání zde byl vzorek nového nepoužitého materiálu. Z testů tvrdosti bylo

zjištěno, že nepoužitý materiál má vyšší tvrdost než odebraný vzorek z používaného kotle. Dále byl u použitých vzorků zjištěn úbytek materiálu, který byl u každého vzorku odlišný. U jednoho vzorku však dosáhl úbytek hodnoty až 4,2 mm, takže z původních 6 mm klesla tloušťka materiálu na 1,8 mm. Na dalším vzorku bylo možné pozorovat že úbytek materiálu byl pouze na povrchu, na který působily spaliny a úbytek nebyl rovnoměrný, ale měnil se pravděpodobně společně s různou teplotou, vycházející z tepelného pole kotle. Nakonec byl proveden rozbor metalografických vzorků na elektronovém mikroskopu. Z rozboru bylo zjištěno že mikrostruktura u vzorku z použitého kotle je odlišná, oproti mikrostruktuře nepoužitého materiálu.

## 7 Seznam použité literatury

- ABEL, A., 1993. Dislocation-associated elastic energy storage in mechanical deformations. *Fundamental Aspects of Dislocation Interactions* [online]. 220–225 [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-4832-2815-0.50033-4
- Anon., [b.r.]. *Fe-Fe<sub>3</sub>C phase diagram [1]. | Download Scientific Diagram* [online] [vid. 2024-03-07]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Fe-Fe<sub>3</sub>C-phase-diagram-1\\_fig1\\_364074119](https://www.researchgate.net/figure/Fe-Fe3C-phase-diagram-1_fig1_364074119)
- BAJGAR, Miloš Ing., 2020. *Z topenářské praxe do soudní síně | TOPIN* [online] [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/z-topenarske-praxe-do-soudni-sine-detail-8539>
- BALÁŠ M, LISÝ M a MOSKALÍK J, 2012. Kotle - 2. část. <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>.
- BUCZYŃSKI, Rafał, Roman WEBER a Andrzej SZLEK, 2015. Innovative design solutions for small-scale domestic boilers: Combustion improvements using a CFD-based mathematical model. *Journal of the Energy Institute* [online]. **88**(1), 53–63 [vid. 2024-03-13]. ISSN 1743-9671. Dostupné z: doi:10.1016/J.JOEI.2014.04.006
- HLUCHÝ M, 1986. *Strojírenská technologie I*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.
- HUPA, Mikko, Oskar KARLSTRÖM a Emil VAINIO, 2017. Biomass combustion technology development – It is all about chemical details. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. **36**(1), 113–134 [vid. 2023-12-11]. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCI.2016.06.152
- CHANEY, Joel, Hao LIU a Jinxing LI, 2012. An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach. *Energy Conversion and Management* [online]. **63**, 149–156 [vid. 2024-03-12]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENCONMAN.2012.01.036

KUBBA, Sam, 2017. Impact of Energy and Atmosphere. *Handbook of Green Building Design and Construction* [online]. 443–571 [vid. 2023-11-28]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-810433-0.00009-5

LYČKA, Zdeněk, 2012. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva*. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o.

OCHODEK, T., J. KOLONIČNÝ a M. BRANC, 2007. *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*.

SHI, Ganquan, Andong QIU a Zhouwang YANG, 2022. A hierarchical layout approach for underfloor heating systems in single-family residential buildings. *Energy and Buildings* [online]. 268, 112208 [vid. 2023-11-28]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENBUILD.2022.112208

SCHWEITZER A. PHILIP, 2003. *Metallic materials*. New York: Marcel Dekker, Inc. .

SILBERNAGEL, Arnošt, Vojtěch HRUBÝ, Miroslav GREGER a Jiří NĚMEC, 2011. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava - Poruba: KOVOSIL.

STELTE, Wolfgang, Jens K. HOLM, Anand R. SANADI, Søren BARSBERG, Jesper AHRENFELDT a Ulrik B. HENRIKSEN, 2011. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel* [online]. 90(11), 3285–3290 [vid. 2023-11-06]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/J.FUEL.2011.05.011

STUPAVSKÝ, Vladimír, 2010. Zplynovací kotel na kusové dřevo, polena a dřevěné brikety. <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovaci-kotel-na-kusove-drevo-polena-a-drevene-brikety>.

SUSHKO, Gennady, 2015. *Atomistic molecular dynamics approach for channeling of charged particles in oriented crystals*. B.m. b.n.

ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ, 1976. *Materiály pro tepelná energetická zařízení - plechy*. 1976. Česká Republika: Česká státní norma.

ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. *Systémy označování ocelí - Část1: Stavba značek oceli*. 2017.

VANWORMER, Catie a David GRASSL, 2018. Best practices for condensing boilers. *ASHRAE Journal*. 60(9), 18–27.

VOJTĚCH D, 2006. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha.