VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POUŽITÍ SEKUNDÁRNÍ METALURGIE PŘI VÝROBĚ OCELI
APPLICATION OF SECONDARY METALLURGY DURING STEEL MANUFACTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Filip Škeřík
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Filip Škeřík**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Použití sekundární metalurgie při výrobě oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Progresivní výroby oceli v ocelárnách a slévárnách využívají prvků sekundární metalurgie. Jejich použití má za cíl zejména zvýšení výrobnosti a dosažení vyšší jakosti vyráběného materiálu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést popis jednotlivých užívaných postupů sekundární metalurgie, konstrukci jednotlivých zařízení a jejich metalurgické možnosti a výhody jejich zavedení v praxi.

Seznam doporučené literatury:

ŠENBERGER, J., Z. BŮŽEK, A. ZÁDĚRA, K. STRÁNSKÝ, V. KAFKA. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM. 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3-32-9.

ŠENBERGER, J., L. MARTÍNEK. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárenství XLVII, 1999, č. 6/7, s. 372-378. ISSN 0037-6825.

MARTÍNEK, L., J. ŠENBERGER, P. FILA, M. BALCAR. Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárenství, roč. 54, č. 6, 2006, s. 218–221. ISSN 0037-6825.

KNÜPPEL, H. Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen, Band 1. Verlag Stahleisen M.B.H./ Düsseldorf 1970.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠKEŘÍK Filip: Použití sekundární metalurgie při výrobě oceli

Práce je literární rešerše na téma použití sekundární metalurgie při výrobě oceli. Obsahuje základní rozdělení SM a stručný popis a využití jednotlivých pochodů. Hlavní část je zaměřena na popis konstrukčních prvků elektrické obloukové pece, pánvové pece a zařízení VD/VOD. Druhá část práce je věnována experimentu, ve kterém jsou porovnány technicko-ekonomické náklady na výrobu nízko a středně legovaných ocelí a ocelí vysoce legovaných. Jsou zde zahrnuty náklady na vsázku, spotřebu elektrické energie, spotřebu grafitových elektrod, vyzdívku pece a vyzdívku víka.

Klíčová slova: Sekundární metalurgie, elektrická oblouková pec, pánvová pec, VD, VOD

ABSTRACT

ŠKEŘÍK Filip: Application of secondary metallurgy in steel manufacture

This bachelor thesis is a literary research on the use of secondary metallurgy in steel manufacture. It contains the basic division of SM and a brief description and use of individual processes. The main part is focused on the description of the structural parts of the electric arc furnace, ladle furnace and VD/VOD device. The second part of the thesis is devoted to an experiment, where the technical- economic costs of production of low and medium alloyed steels and high alloyed steels are compared. It includes costs on charging, electricity consumption, graphite electrode consumption and furnace and cover lining.

Keywords: Secondary metallurgy, electric arc furnace, ladle furnace, vacuum deggasing, vacuum oxygen decarburization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKEŘÍK, Filip. *Použití sekundární metalurgie při výrobě oceli*. Brno, 2018. 46s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V …… dne 25.5.2018

……

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Antonínovi Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a firmě ŽĎAS a.s. za spolupráci a poskytnutí podkladů a materiálů. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD 9
1 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ PROCESŮ SM 10
2 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC 14
2.1 Konstrukce EOP 14
2.2 Vyzdívky EOP 17
2.3 Intenzifikace EOP 18
3 PÁNVOVÁ PEC 20
4 POCHOD VD A VOD 26
4.1 Vakuová čerpadla 27
5 PRAKTICKÁ ČÁST 31
5.1 Porovnání výrobních nákladů na EOP1 a EOP2 31
5.2 Porovnání výrobních nákladů na LF1 a LF2 37
5.3 Porovnání nákladů na výrobu oceli různých jakostí 38
6 ZÁVĚRY 41

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků
Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3]

Sekundární metalurgie označuje zpracování tekutého kovu mimo tavící agregát. Je označována také jako mimopecní metalurgie a zahrnuje v sobě celou řadu pochodů, které se vyvíjely v průběhu 20. století [1]. Navazuje na metalurgii primární, jejíž podstatou je pouze roztavení, případná oxidace kovu. Dohotovení oceli probíhá až pomocí postupů sekundární metalurgie. To má za následek zvýšení výrobnosti tavícího agregátu, snížení jeho opotřebení a vytvoření lepších podmínek pro hlubokou dezoxidaci, odsíření a legování oceli. Sekundární metalurgie vznikla v důsledku požadavků zákazníků na zvýšenou kvalitu materiálů a současnému snižování výrobních nákladů na výrobu tekutého kovu ze strany výrobce.

Produkty sekundární metalurgie jsou používány při výrobě ingotů, které jsou pak dále používaný pro velmi náročné výkovky v dopravě a energetickém průmyslů, kde jsou požadovány velmi vysoké nároky na mechanické vlastnosti namáhaných součástí (železnice, lodní doprava, podvozky dopravních letadel, rotory turbín atd.) S využitím sekundární metalurgie se vyrábí i celá řada odlitků požívaných v energetice např. turbínové skříně, lopatky vodních turbín a součásti větrných elektráren. Zde všude se uplatňuje sekundární metalurgie a samozřejmě v i řadě dalších oborů, a proto má smysl se tímto oborem zabývat a je nezbytné jej rozvíjet.

Ve své práci se budu zabývat základním rozdělením postupů sekundární metalurgie a jejich charakteristice. Dále pak zejména zařízením používaným pro výrobu oceli z pohledu jejich konstrukčního řešení, funkčnosti a možnostem výroby na těchto zařízeních. Součástí práce je také praktická část, ve které bude porovnáno technicko- ekonomické zhodnocení výroby oceli na těchto zařízení, vzhledem k vyráběné jakosti oceli. Soubor dat pro tento experiment, byl poskytnut přímo z ocelárenského podniku ŽĎAS a.s., se kterým na své práci spolupracuji.

1 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ PROCESŮ SM [1], [2], [4], [5]

Sekundární metalurgie je zpracování kovu mimo tavící agregát. Podle literatury Metalurgie oceli na odlitky je v současné době používáno více než 50 způsobů mimopecní rafinace kovů, zahrnujících široké spektrum technologických prvků [1]. Jednotlivé způsoby jsou ve většině případů založeny na podobných principech a liší se pouze v detailech. Existuje cela řada modifikací a úprav různých zařízení a technologických postupů mimopecního zpracování oceli, které postupně vznikaly v průběhu let. Procesy sekundární metalurgie se dělí několika způsoby. První způsob je použití daného zařízení, a to buď pánve, nebo konvertoru.
Druhým kritériem k dělení je, zda tyto zařízení pracují za normálního atmosférického tlaku či za sníženého tlaku (ve vakuu), případně zda umožňují dmýchání inertních plynů, které způsobí snížení parciálního tlaku některých složek kovu. Níže je uvedeno základní rozdělení metod sekundární metalurgie podle podmínek, za kterých jsou pochody realizovány.

Postupy probíhající za atmosférického tlaku

- AP (Argon Pouring)
- IP (Injection Process)
- SL (Scandinavian Lancers)
- TN (Thüssen Niederhein)
- LF (Ladle furnace)
- AOD (Argon Oxygen Decarburisation)

Postupy probíhající ve vakuu

- VD (Vakuum Deggasing)
- VOD (Vakuum Oxygen Decarburisation)
- VAD (Vakuum Arc Degassing)
- ASEA-SKF
- DH (Dortmund Horder)
- RH (Rührstahl Heraeus)

Jako poslední se procesy sekundární metalurgie rozlišují na postupy s příhřevem a bez příhřevu. Ocel se v pánvi nebo konvertoru ohřívá buď chemickými exotermickými reakcemi, kde využívá reakčního tepla oxidace hliníku, křemíku a uhlíku, nebo elektricky.

Postupy bez příhřevu

- Proces IP, AP, SL, TN, VD

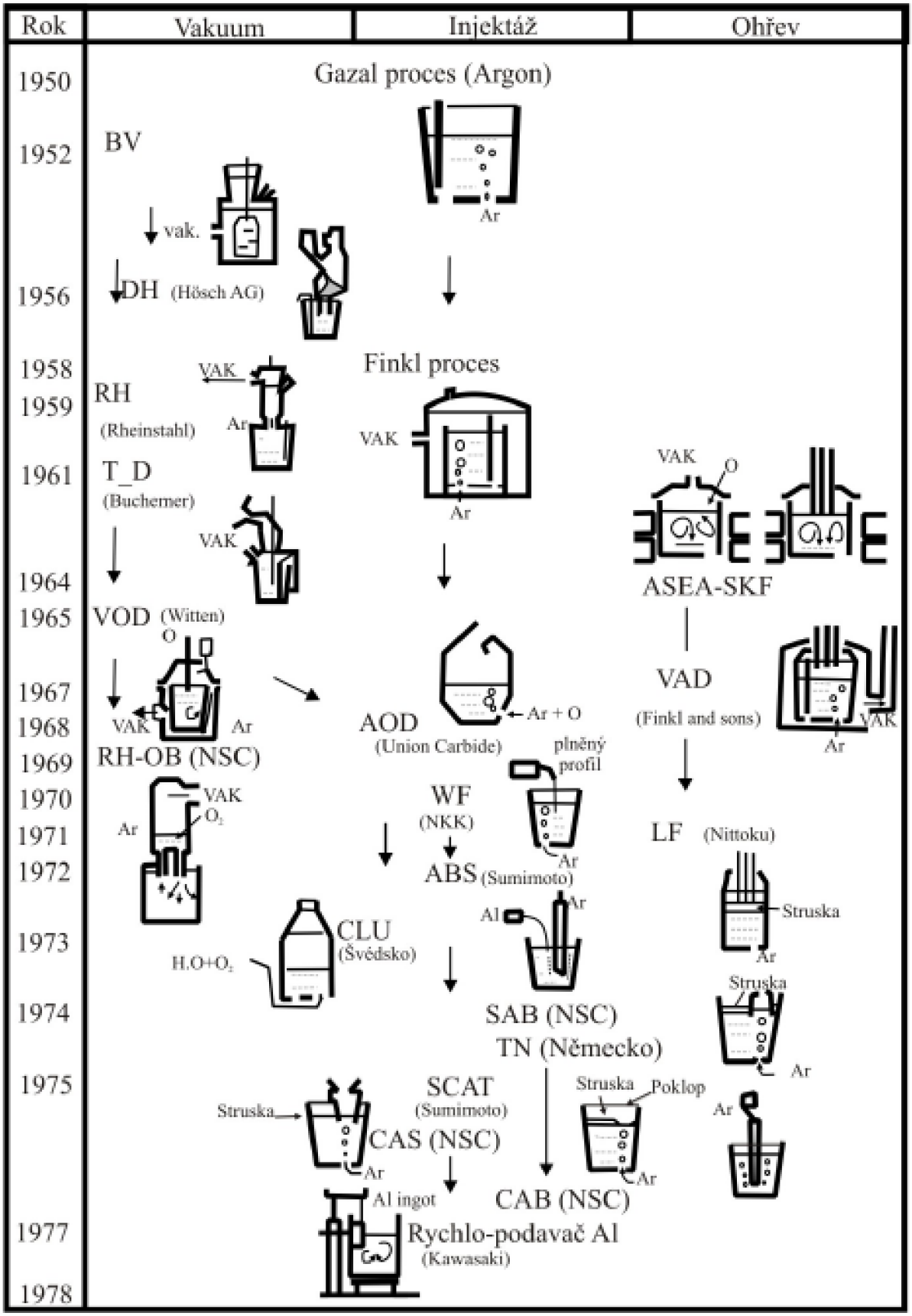
Postupy s příhřevem

- Proces LF, VAD, AOD, VOD, ASEA-SKF

Obr. 1 nacházející se na další straně ukazuje chronologický vývoj jednotlivých postupů sekundární metalurgie, jak se vyvíjely v průběhu 30-ti let od konce druhé světové války. Postupy zde uvedené byly vyvinuty převážně v období mezi lety 1950-1980 a v současné době v podstatě nedochází k dalšímu vývoji nových pochodů [1]. Nynější sekundární metalurgie využívá již existující postupy, které jsou dále modifikovány, vylepšovány a hlavně kombinovány mezi sebou, pro dosažení vyšší čistoty a požadovaného chemického složení vyráběné oceli. Krátký popis postupů sekundární metalurgie a jejich přínosy při výrobě oceli jsou shrnuty v **tab. 1**.

Tab. 1 Popis metod SM, jejich přínos a stručný popis [1]

Postup SM	Popis	Označení	Přínos
Dmýchání inertních plynů	Dmýchání argonu příp. dmýchání pod aktivní struskou	AP	Teplotní a chemická homogenizace, částečná rafinace oceli
Přidávání přísad do tekuté oceli	Zavádění prachových přísad (Ca apod.)	SL, TN, IP	Snížení O a S, modifikace vměstků a zvýšení mikročistoty
	Zavádění speciálních plněných profilů	SCAT	
Ohřev oceli pod aktivní struskou	Kov je ohříván a promícháván s aktivní struskou	LF	Teplotní a chemická homogenizace, snížení obsahu S, modifikace vměstků
Vakuové zpracování oceli	V komoře	RH, DH	Rychlé oduhličení, snížení obsahu vodíku
	S příhřevem pod aktivní struskou	ASEA-SKF, VAD	Hluboké odsíření, snížení obsahu vměstků a jejich modifikace, teplotní a chemická homogenizace
Oxidační vakuování	V pánvi	VOD	Hluboké oduhličení(použití u Cr ocelí), snížení obsahu H, N hluboké odsíření
Oxidace směsí Ar-O	V konvertoru	AOD	
Oxidace směsí H2O- O	V konvertoru	CLU	



Obr. 1 Vývoj pochodů sekundární metalurgie [1]

Ani jeden z prvků sekundární metalurgie nemůžeme považovat za zcela univerzální, každý je vhodný zpravidla pouze na některé metalurgické aplikace, popřípadě sortiment odlitků, nebo jakostí ocelí. Proto je nutné před samotným zavedením prvků sekundární metalurgie pečlivá analýza toho, co se od daného zařízení očekává, a také toho co nám přinese. Je nutné zhodnotit i ekonomické hledisko zařízení. Pro některé slévárny, především ty menší, je v důsledku kapacity, rozvoje a ohledu na jejich sortiment vhodné použít pouze základní prvky sekundární metalurgie. Naopak pro velké slévárny je výhodné použít prvky náročnější. V těchto případech je vhodné použít stavebnicový systém prvků sekundární metalurgie, který podle specifických podmínek slévárny umožňuje postupně realizovat řadu metalurgických variant, a také jednotlivé prvky mezi sebou vhodně kombinovat. V **tab. 2** lze vidět stručná charakteristika metalurgických možností některých výše uvedených postupů sekundární metalurgie.

Tab. 2 Metalurgické možnosti některých postupů SM [1]

Postup mimopecní rafinace		Snížení obsahu				Teplotní a chemická homogenizace	Přesné legování	Řízená desoxidace	Zvýšení mikročistoty	Modifikace vměstků	Ohřev oceli
		C	S	H	N						
Dmýchání inertních plynů	AP	n	n	č	č	a	č	n	č	n	n
Přidávání přísad do tekuté oceli	IP, SL, TN	n	a	n	n	a	a	a	a	a	n
Ohřev oceli pod aktivní struskou	LF	n	a	n	n	a	a	a	a	n	a
vakuové zpracování oceli	RH, DH	a	č	a	č	a	a	a	č	n	n
	VAD, ASEA-SKF	a	a	a	č	a	a	a	a	n	a
Oxidační vakuování	VOD	a	n	a	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí Ar-O	AOD	a	č	č	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí H2O-O	CLU	a	č	č	č	a	a	a	č	č	č

Pozn.: a- ano, n- ne, č- částečně

2 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC [1], [5], [6]

Elektrická oblouková pec (EOP) sice nepatří mezi zařízení sekundární metalurgie, ale žádná ocelárna vyžívající procesu SM se bez této pece neobejde. Slouží totiž jako tavící agregát kovu před jeho dalším mimopecním zpracováním. Navíc velká část složitějších pochodů sekundární metalurgie využívá příhřevu kovu elektrickým obloukem, který pracuje na stejném principu jako oblouková pec.

2.1 Konstrukce EOP [1], [2], [4], [5], [6], [7]

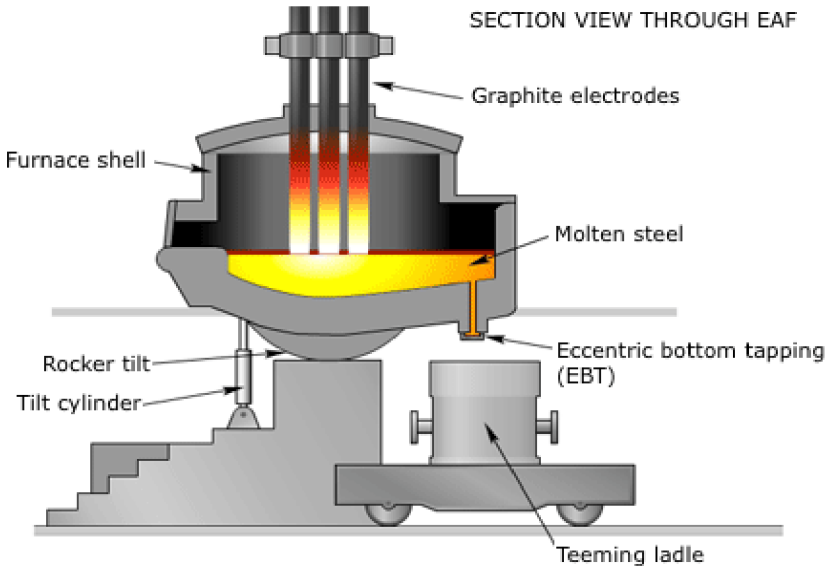
Tepelná energie pro tavení vsázky je vytvářena elektrickým obloukem, který hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Oblouk dosahuje teploty 3000 až 4000 °C. Teplo se přenáší z oblouku do vsázky sáláním a ve vsázce se šíří vedením a prouděním taveniny. Pece se vyrábí v mnoha variantách, kde hlavními kritérii jsou kapacita pece a výkon pecního transformátoru. Pec je napájena z elektrické sítě a podle velikosti pece je toto napětí transformováno pecním transformátorem. Pec je připojena na transformátor tzv. krátkou cestou měděnými lany. Lana u větších pecí jsou chlazena vodou. Malé a střední pece pracují s napětím 100 až 220 V a větší pece 600 V [1]. Avšak v ocelárenské výrobě jsou používány pece mnohem větších konstrukcí. Mohou mít kapacitu až 300 tun a transformované napětí se pohybuje v rozmezí 700 až 1600 V [7]. Největším a skoro jediným výrobcem elektrických obloukových pecí je v dnešní době firma SIEMENS. **Tab. 3** ukazuje základní parametry tří velkých pecí od této firmy, které jsou zavedeny v ocelárenských podnicích v Rusku a Turecku.

Tab. 3 Příklad EOP od firmy SIEMENS [7]

	EOP 1	EOP 2	EOP 3
Výkon transformátor	740 - 1025 V 100 MVA	740 - 1350 V 150 MVA	800 – 1600 V 240 MVA
Kapacita pece	90 t	120 t	320 t
El. energie	325 kWh/t	350 kWh/t	360 kWh/t
Doba roztavení vsázky	36 min	36 min	55 min
Produktivita	150 t/h	200 t/h	350 t/h

Tab. 3 uvádí údaje o silně intenzifikovaných pecích. Nejmenšího příkonu pecního transformátoru na jednu tunu oceli dosahuje největší z uvedených pecí EOP 3. Její příkon je 0,75 MW/t. Naopak nejvyšší příkon potřebuje transformátor EOP 2, a to 1,25 MW/t. Příkon transformátoru poslední z pecí EOP 1 je 1,1 MW/t. Dále v tab. 3 můžeme vidět závislost produktivity pece na její celkové kapacitě. Pece o vyšší kapacitě sice potřebují delší čas na roztavení vsázky, ale v přepočtu vyrobených tun oceli za jednu hodinu mají výrazně vyšší produktivitu než pece menších rozměrů. Výrobnost se v uvedených pecí pohybuje v rozmezí 150 až 350 t/h.

Nádoba pece je svařena z ocelového plechu a podle velikosti pece rozlišujeme způsob jejího uložení a způsob odpichu kovu z pece do pánve na dva typy. První, nyní ne už moc používaný typ, je kolébkové uložení pece s naklápěcím mechanismem. Takto uložená pec má dva protilehlé otvory pro odpich. Otvory se nacházejí v odlišné výšce pece. Otvor umístěný výše slouží pro odpich pecní strusky, která plave na hladině taveniny. Druhý otvor umístěný níže slouží k odpichu oceli. Za tímto otvorem je navařen nebo přišroubován odpichový žlab. Tento typ se používá pro malé pece. Z praktického hlediska není vhodné naklápět nádobu obsahující několik desítek tun roztaveného kovu, a proto se v ocelárnách používá druhý typ uložení se spodním bezstruskovým výstředníkovým odpichem, který zabrání průniku strusky do pánve. Tento způsob také využívá plování strusky na hladině kovu, zatímco dochází k odpichu neuklidněné oceli s velkým obsahem oxidů spodem nádoby (**obr. 2**). Následně se kov zpracovává na zařízeních SM.



Obr. 2 Schéma elektrické obloukové pece [8]

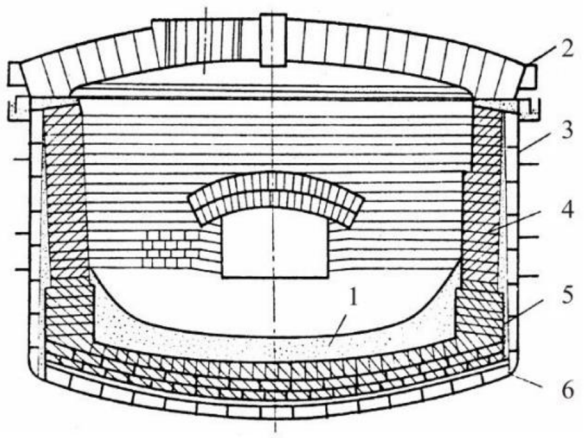
Shora je nístěj pece uzavřena odnímatelným víkem, které je osazeno odsáváním spalin vedoucím do filtračního zařízení. Separace prachových částic z odsávaných plynů se provádí suchými tkaninovými filtry. Ve víku pece se také nacházejí tři, vodou chlazené otvory pro grafitové elektrody, které chladí střed víka a tím zvyšují jeho životnost (**obr. 3**). Elektrody jsou umístěny v držáku elektrod a mají válcový tvar s co největší hladkostí povrchu, aby byl zajištěn co nejlepší kontakt mezi elektrodami a držákem. Vodivost mezi elektrodami a držákem zajišťuje měděná pásovina. Vyrábějí se lisováním z jakostního kalcinovaného petrolkoksu. Elektrody jsou během tavby opalovány a jsou tak zdrojem nauhličení oceli. Aby nevznikaly zbytečné ztráty již tak drahých elektrod, jsou odtavené zbytky napojovány pomocí grafitových šroubových vsuvek. Grafitové elektrody se vyrábí v různých průměrech. Jejich velikost závisí na maximální hodnotě proudu, který elektrodou prochází a na jakosti grafitu.

Obr. 3 Zavádění grafitových elektrod do EOP [10]

Aby byl zajištěn konstantní ohřev lázně, je potřeba s opalovanými elektrodami pohybovat pro zajištění stálého oblouku. Pohyb je řízen počítačovým softwarem, který snímá proud a napětí na jednotlivých fázích od konstantního nastaveného příkonu. Ty pak převádí na mechanický pohyb servomotoru, který pohybuje elektrodami.

2.2 Vyzdívky EOP [1], [2], [5], [6]

Pro vyzdění elektrické obloukové pece se nejčastěji používají zásadité vyzdívky. Vyzdívky mají buď válcový, nebo komolý kuželový tvar. V České Republice používá většina sléváren šikmé vyzdění stěn, z důvodu snadnější opravy. Opravárenská hmota na šikmé stěně drží lépe než na stěně rovné. Vyzdívka pece se dělí na dvě vrstvy, na izolační vrstvu a na samotnou vyzdívku pece. Jako izolační vrstva pláště pece se dříve používala žáruvzdorná folie z lepenky, na které byla nanesena přibližně 70 mm silná vrstva pěnového šamotu. V dnešní době se používají často mikroporézní izolační desky. Tyto desky vyrábí například firma PROMATH Praha. Pracovní vyzdívka pece je vyzděna z různých žáruvzdorných materiálů. Nístěj pece je vyzděna magnezitovými tvárnicemi a následně vydusána zrnitým magnezitem nebo dolomitem. Tvárnice se skládají ve více vrstvách tak, aby následující vrstva vždy překryla mezery předchozí vrstvy. Na poslední vrstvu tvárnic je nanesena vrstva magnezitového slínku bez pojiva a následně na sucho udusána vibrátorem na tloušťku 150 až 250 mm. Pro vyzdění víka elektrické obloukové pece byly dříve používány dinasové tvárnice. V současné době je střed víka nebo i celé víko odléváno z monolitického žárobetonu. Ke zvýšení životnosti víka pomáhají chladící kroužky, které izolují otvor kolem grafitových elektrod a chladí tím tak střed víka. Takto vyzděná pec je schopna zvládnout okolo 250 až 350 taveb, než je potřeba její oprava. Vyzdívce peci nejvíce škodí přerušovaný provoz pece. Během tavby dochází k tepelné dilataci vyzdívky, se kterou je potřeba počítat již při jejím zdění, aby nedošlo k jejímu vyboulení. Sloupky u pecních dvířek a okolí odpichového otvoru jsou vyzděny chrommagnezitem. Tento materiál lépe odolává střídání teplot, které způsobuje odlupování povrchu tvárnic. Chrommagnezit může být však použit pouze u částí pece, které nejsou ve styku s tekutým kovem, aby nedošlo k vyredukování chromu z vyzdívky do kovu.



1 – dusaná vrstva magnezitového slinku
2 – žárobetonové víko pece
3 – vrstva izolačních tvárnic
4 a 5 – magnezitové tvárnice
6 – ocelový plášť pece

Obr. 4 Schéma vyzdívky zásadité obloukové pece [1]

Zásaditá vyzdívka EOP musí splňovat následující požadavky:

- vysoká žáruvzdornost a nízká teplená vodivost;
- odolnost proti střídání teplot;
- chemická a mechanická odolnost;
- optimální poměr mezi cenou a životností.

2.3 Intenzifikace EOP [1], [2], [5], [6]

Intenzifikace pecí byla zavedena pro zvýšení hospodárnosti výroby oceli, zejména snížení zpracovacích nákladů, které tvoří velkou část z celkových nákladů (až 60 %) na výrobu oceli s požadovanou jakostí. Samotná investice do intenzifikace pece je velmi finančně náročná, a proto má smysl až po splnění běžných opatření, která vedou ke snížení nákladů na výrobu oceli. Mezi základní opatření patří vyloučení veškerých prostojů během chodu pece. S tím souvisí i plánování údržby pece v době její odstávky a co nejrychlejší naplnění pece vsázkou. Dalším opatřením je zajištění výroby s co nejmenším počtem pecí v provozu s plným vytížením. Ostatní pece stojí jako studená rezerva. Intenzifikace pece se zejména projeví ve snížení doby tavby, snížení spotřeby elektrické energie a také snížení spotřeby grafitových elektrod. Rozdíl mezi tavbou v peci s hmotností tavby 10t bez intenzifikace a středně nebo vysoce intenzifikovanou znázorňuje **tab. 4**.

Tab. 4 Porovnání pecí s intenzifikací a bez intenzifikace [1]

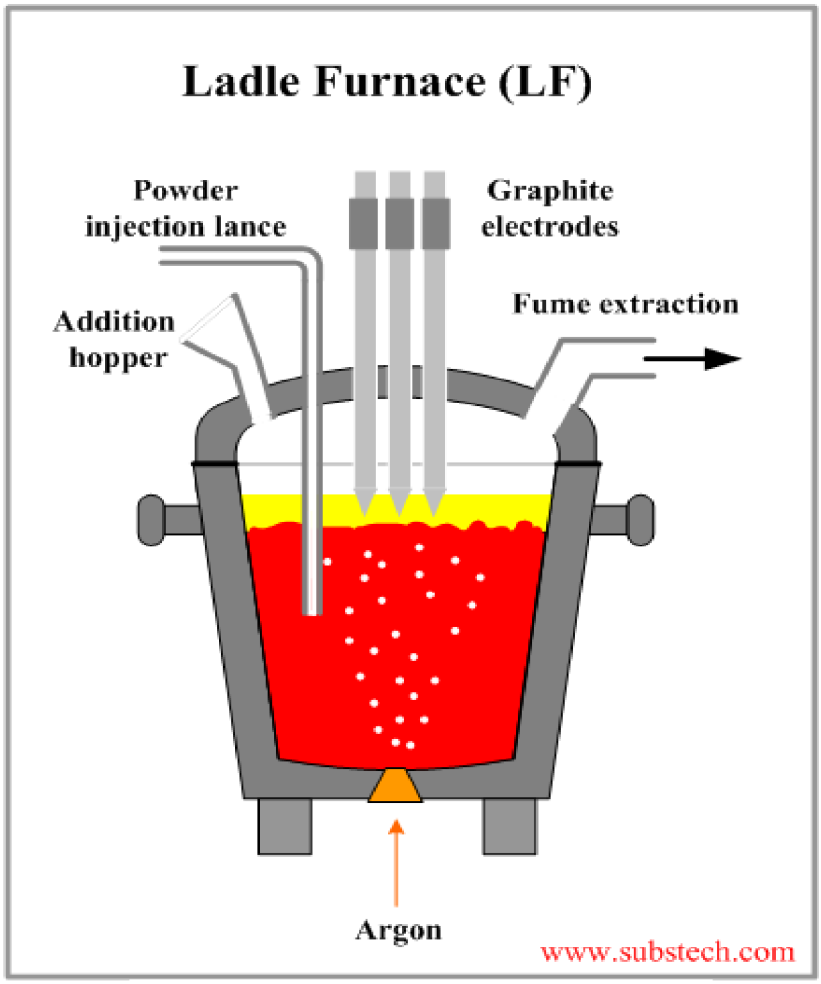
Stav intenzifikace	Doba tavby [min]	Spotřeba el. energie [kWh/t]	Spotřeba grafitových elektrod [kg/t]
Bez intenzifikace	160	590	4
Středně intenzifikovaná	135	550	3,5
Vysoce intenzifikovaná	110	500	3

Zásadní vliv na intenzifikaci elektrické obloukové pece mělo zavedení postupů sekundární metalurgie. EOP slouží pouze jako tavící agregát, který pracuje v tandemu s pánvovou pecí. Cílem elektrické obloukové pece je co nejrychleji a nejefektivněji roztavit vsázku, s co nejmenšími výrobními náklady. V důsledku toho, byla vyvinuta celá řada generací elektrických obloukových pecí s novými konstrukčními prvky. Pece jsou vodou chlazené a pracují s vysokým výkonem transformátoru a krátkými oblouky, které mají příznivý vliv na

životnost vyzdívky. Pro tyto vysoce výkonné pece se používají elektrody s nízkým elektrickým odporem. Snížení nákladů na výrobu se také dosahuje optimalizací použité energie. Využití jiných zdrojů tepla a tím snížení spotřeby primární elektrické energie na roztavení vsázky. Například dmýchání kyslíku do lázně a vytvoření tak exotermických reakcí, které ohřívají taveninu. Kyslík je nejčastěji dmýchán do lázně pomocí trysek přes pracovní dvířka pece. Taveninu je také možné ohřívat pomocí přidaných kyslíko-palivových hořáků. Teplota plamene je 2600 °C až 2800 °C. Dále se využívá tepla odcházejících spalin pro předehřev vsázky, případně dospalování vznikajícího oxidu uhelnatého uvnitř pece nebo v předehřívači ocelového odpadu.

3 PÁNVOVÁ PEC [1], [2], [9], [11], [12]

Jedním ze základních zařízení sekundární metalurgie oceláren je pánvová pec, označovaná zkratkou LF z anglického překladu Ladle Furnace. Pánvová pec byla vytvořena za účelem přenesení redukční fáze (odsíření) a fáze dohotovení z elektrické obloukové pece do pánve. To má za následek změnu technologie výroby na obloukové peci a tím i změnu celé organizace práce ve slévárně oceli. Elektrická oblouková pec slouží pouze jako tavící agregát, jehož hlavním úkolem je rychlé roztavení vsázky, oxidace uhlíku a fosforu kyslíkem. Poté co je tavenina ohřáta na požadovanou teplotu dochází k odpichu neuklidněné oceli (oceli s velkým obsahem nerozpuštěného oxidu železnatého) zbavené oxidační strusky do pánve, která je převezena do zařízení LF. Zde dochází k dezoxidaci kovu a zbylé strusky, tvorbě zásadité strusky a odsíření. Oceli vyráběné v pánvi se dají také poměrně přesně dolegovat.



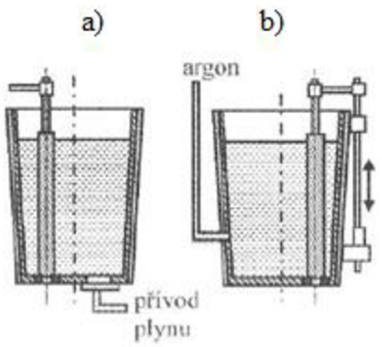
Obr. 5 Schéma pánvové pece [9]

3.1 Konstrukce LF [1], [2], [3], [4], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [16]

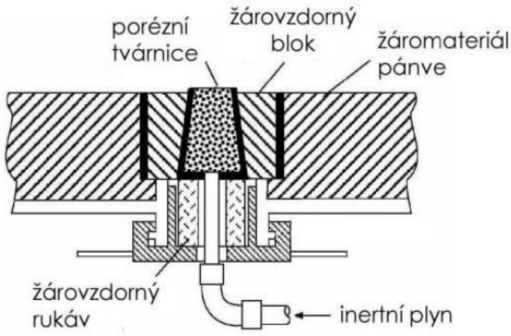
Nejvíce užívané jsou pánvové pece s elektrickým obloukovým příhřevem kovu (**obr. 5**). Pánev je přemístěna do stojanu LF, kde je na ni umístěn vodou chlazený kryt se třemi dutými grafitovými elektrodami připojenými k třífázovému obloukovému transformátoru. Funguje na stejném principu jako oblouková elektrická pec (EOP) a v již zaběhlých podnicích se může realizovat rekonstrukcí stávajících obloukových pecí. Jednou z hlavních úprav je seřízení výkonu pecního transformátoru. Optimální rychlost ohřevu taveniny je kolem 2 až 4°/min [14]. Ohřev je tedy znatelně pomalejší než u elektrické obloukové pece, aby nedošlo k přehřátí roztaveného kovu, ale pouze k jeho příhřevu. Od toho se odvíjí i průměr elektrod, který je oproti EOP významně menší.

Během celého procesu je do lázně dmýchán inertní plyn, nejčastěji argon. Může být dmýchán i dusík nebo oxid uhličitý. Ten roztavenou lázeň promíchává, čímž se zajišťuje lepší homogenizace teploty kovu společně s chemickým složením kovu a napomáhá vyplouvání vměstků. Inertní plyn je do lázně dmýchán přes keramickou tvárnici dvěma způsoby. První způsob je dmýchání skrze prodyšnou tvárnici ve stěně pánve (**obr. 6b**). Druhý a nejčastěji používaný způsob je dmýchání inertního plynu přes porézní tvárnici umístěnou ve dně pánve (**obr. 6a**.). Detail tvárnice a její uložení je na **obr. 7**.

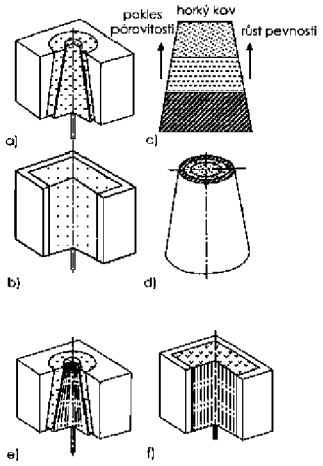
Porézní tvárnice mají různé tvary a mohou se skládat buď z jednoho typu materiálu, nebo z více prvků o rozlišné porozitě (**obr. 8**). Tvoří je kapiláry kónického nebo pravoúhlého tvaru. Tvárnice vyrobené ze stejného hutného žáruvzdorného materiálu, jako je vyzdívka pánve, jsou za sníženého tlaku argonu náchylné k proniknutí tekuté oceli.



Obr. 6 Způsoby dmýchání argonu [1]



Obr. 7 Uložení porézní tvárnice [11]



a),b) složené z jednoho kusu materiálu

c),d) složené z více kusů, směrem na horu porozita klesá

e) kónický tvar kapilár

f) pravoúhlí tvar kapilár

Obr. 8 Tvary porézních tvárnic [11]

Dmýchání inertních plynů do lázně je jedním ze základních procesů, bez kterého by se sekundární metalurgie neobešla. U velkých pánví se mohou používat 2 i více porézních tvárnic, aby zajistily dostatečné dmýchání argonu do lázně.

Výhody dmýchání argonu přes tvárnici umístěnou ve dně:

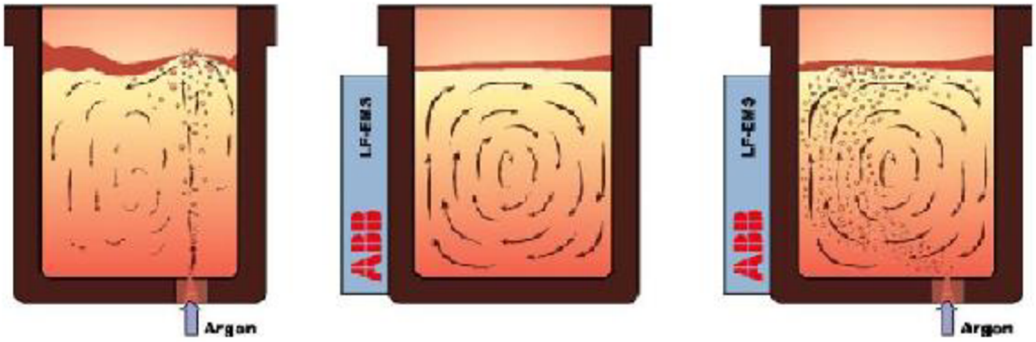
- rovnoměrné míchání lázně;
- malá oblast cirkulace;
- kontrola množství dmýchaného plynu;
- dobrý kontakt strusky s kovem;
- mírné oduhličení oceli.

Nevýhody dmýchání argonu přes tvárnici umístěnou ve dně:

- větší opotřebení vyzdívky pánve;
- větší nebezpečí průvalu (uvolnění tvárnice).

Kromě dmýchání argonu (**obr. 9a**), je možné kovovou lázeň promíchávat extérním indukčním míchačem – electromagnetic stirring (EMS). Ten je nainstalován na boční stěně pánve a vytváří elektromagnetického pole. Výsledné elektromagnetické síly pohybují s roztaveným kovem před induktorem a vytváří tak proudění kapaliny ve vodorovném směru (**obr. 9b**). Stejně tak jako dmýchání argonu, vytváří indukční promíchávání lázně rovnoměrné rozložení teplot v celé lázni, tím rychlejší ohřev lázně, lepší rozpustnost legujících prvků a tím i její jednotné chemické složení. Pro dosažení co nejlepšího promíchání lázně je možné dmýchání argonu a indukční míchání zkombinovat (**obr. 9c**). Podmínkou pro instalaci

indukčního míchače jsou tzv. průzařné pánve, vyrobené z nemagnetických materiálů, aby nedocházelo ke žhavení pánve v magnetickém poli.



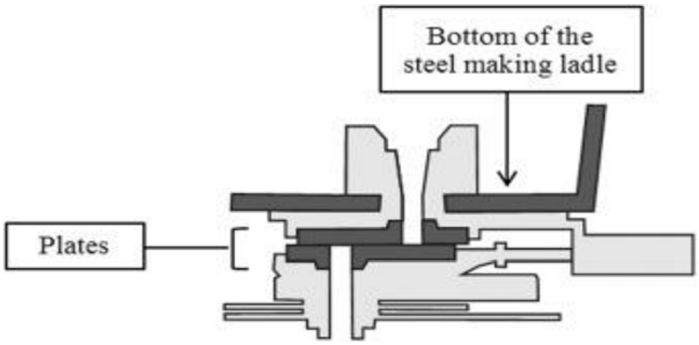
a) Argon

Obr. 9 Míchání lázně v pánvi [12]

Pro dosažení co největšího odsíření během redukčního údobí jsou pánvové pece vyzděny speciálními zásaditými žáruvzdornými vyzdívkami. Na vyzdění pece se nejčastěji používají dolomitická nebo magnezitová staviva, stejně jako u elektrické obloukové pece. U některých typů je vyzdívka pánve vytvořena z žárobetonu. Takto vyzděná pánvová pec dosahuje životnosti něco přes 100 taveb [11]. Poté je nutné vyzdívku opravit nebo zrekonstruovat.

Legující prvky a dezoxidační přísady se do lázně přidávají přes násypku v horní části vodou chlazeného víka. Zde se také nachází 3 otvory pro duté grafitové elektrody, vývod spalin a u některých typů i otvor pro plněné profily nebo vstřikovací trysku na injektáž prachových přísad pro hluboké odsíření.

Po té co je ocel odsířena a připravena k lití, se pánev vyjme z pece a je převezena k licí formě. K odtoku kovu dochází pomocí šoupátkového uzávěru na dně pánve (**obr. 10**). Ten je před odpichem do pánve zasypán chromitový pískem, který zamezí průtoku odpichového kovu. Před samotným litím je nutné prolití nad nádobou na zbytky tekutého kovu, protože po otevření šoupátkového uzávěru dojde k odstranění zásypu společně s tekutým kovem a poté až přestoupit k samotnému lití do formy. Je nutné počítat s takto vzniklými ztrátami, které mohou činit u malých pánví až 500 kg tekutého kovu. U velkých pánví jsou tyto ztráty kovu ještě o poznání větší. S ohledem na tyto ztráty je pánvová pec vhodná na odlévání odlitků a ingotů v řádech několika tun. Při výrobě vysoce jakostních ocelí následuje po pánvové peci další pochod sekundární metalurgie, a to pochod VD, případně VOD. Potom je celá pánev vyjmuta ze zařízení LF a převezena do vakuovacího zařízení.



Obr. 10 Šoupátkový uzávěr pánve [15]

Pánvové pece jsou vyráběny v různých rozměrech, a tak si každá slévárna oceli může vybrat právě optimální velikost vzhledem ke svým výrobním možnostem vyráběnému sortimentu. Kapacita pánve u nejmenších pecí je kolem 15 tun, zatímco ty největších jsou schopné pracovat až se 150 tuny roztaveného kovu. Od kapacity pánve se potom odvíjí i její jmenovitý výkon transformátoru a průměr používaných grafitových elektrod. Větší pánve potom mají i větší rychlost příhřevu kovu. V **tab. 5** je příklad vyráběných pánvových pecí přihřívaných elektrickým obloukem od zahraniční firmy CIMMUK.

Tab. 5 Typy LF od firmy CIMMUK [14]

Jmenovitá kapacita (Skutečná) [t]	Průměr víka [mm]	Jmenovitý výkon transformátoru [kVA]	Průměr elektrody [mm]	Průměr kroužku elektrody [mm]	Rychlost ohřevu [°C/min]
20 (15-20)	2 200	3 150	200	500	2-3
40 (30-40)	2 900	6 300	350	550	2-3
60 (50-60)	3 100	10 000	350	650	2-3,5
70 (60-70)	3 200	12 500	400	700	2-3,5
100 (90-100)	3 400	18 000	400	700	2-3,5
150 (100-150)	3 900	20 000	450	800	2-4

V tabulce 5 můžeme pozorovat poměrně malý rozdíl mezi průměry víka jednotlivých pecí s ohledem na jejich rostoucí kapacitu. Znamená to, že s rostoucí kapacitou pánve, roste také znatelně její výška. Zajímavé je i pozorovat průměr grafitových elektrod vůči jmenovitému výkonu transformátoru. V přepočtu použitého výkonu na jeden milimetr čtvereční elektrody, dosahují všechny pece podobné hodnoty 100 VA/mm^2.

Kromě nejčastěji používaných třífázových obloukových pánvových pecí se také můžeme setkat s pecemi na stejnosměrný proud. Tyto pece pracují na principu stejnosměrné elektrické obloukové pece. Nejsou však příliš rozšířeny. Dále také existují pánvové pece s indukčním ohřevem pánve, pracující na principu elektrické indukční kelímkové pece. U toho typu pecí se používají tzv. průzařné pánve, které jsou vyrobeny z nemagnetických materiálů, aby nedocházelo ke žhavení pláště pánve v magnetickém poli. Příkladem takového materiálu jsou austenitické korozivzdorné oceli.

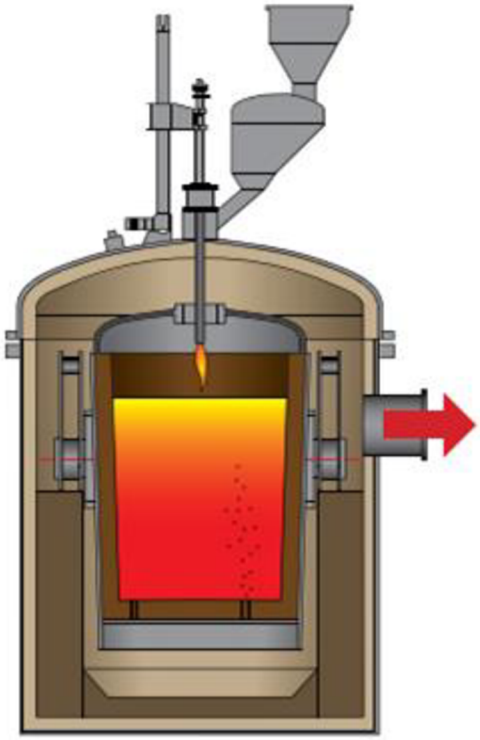
Výhody pánvové pece:

- hluboké odsíření;
- poměrně přesné řízení ohřevu;
- teplotní a chemická homogenizace;
- odstraněni nekovových vměstku;
- rafinace široké škály ocelí, kde není vyžadováno odplynění (odstranění vodíku).

Aby bylo zavedení pánvové pece do procesu výroby ekonomicky výhodné a nedošlo tak ke zvýšení nákladů na výrobu tekutého kovu, s ohledem na vzniklé ztráty při odlévání, je třeba disponovat plně vytíženou tavírnou s poměrně rovnoměrným odběrem kovu. Pro dosažení ještě lepších výsledků v oblasti čistoty, zejména odplynění oceli, je možné proces LF kombinovat s dalšími procesy sekundární metalurgie, které probíhají ve vakuu.

4 POCHOD VD A VOD [1], [4], [10], [11], [13], [17]

Pochody VD (Vacuum Degassing) a VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) patří mezi postupy sekundární metalurgie probíhající za sníženého tlaku. Mohou být označovány také jako metody vakuové metalurgie. Tyto pochody se v praxi běžně kombinují s ostatními postupy SM, jakou jsou LF, IP a AP. Vytvoření vakua nad hladinou taveniny vytvoří velmi dobré podmínky pro oduhličení tím, že sníží jeho afinitu ke kyslíku, a ten je následně odstraněn z oceli ve formě oxidu uhelnatého. Kromě oduhličení má snížený tlak i příznivé účinky na odplynění. Tedy pomocí sekundární metalurgie za sníženého tlaku získáme ocel s vysokou oxidickou čistotou a nízkým obsahem vodíku a dusíku. Proto jsou pochody VD a VOD užívány jako konečné zpracování oceli. Takový příklad kombinace zařízení při výrobě oceli je následující: první na řadu přijde elektrická oblouková pec, kde dojde k roztavení vsázky, následný přesun kovu na pánvovou pec, zde je kov odsířen a poté dohotovení (dezoxidace, odplynění a další odsíření) v zařízení vakuové metalurgie.



Obr. 11 Zařízení pro pochod VOD [10]

Hlavní princip obou pochodů VD a VOD je stejný. Pánev s tekutým kovem je zavezena do vakuového zařízení, technicky pojmenovaného jako keson. Schéma zařízení je vidět na **obr. 11**. Poté co je pánev uložena, je keson uzavřen utěsněným hermetickým víkem a vakuové čerpadlo vytvoří nejčastěji pomocí systému paroproudých vývěv podtlak uvnitř kesonu.

Během celého procesu je do lázně přes prodyšnou tvárnici, stejně jako u pochodu LF, dmýchán argon, který lázeň promíchává. Pochod VOD je navíc oproti pochodu VD doplněn tryskou, která dmýchá na hladinu taveniny kyslík, kde vytváří exotermické reakce, a dochází tak k ohřevu lázně. Pochod VD žádný příhřev nemá, a proto se musí kov před samotným vakuováním přehřát. U malých pánví, které rychleji ztrácí teplo do okolí, je toto přehřátí až o 150°C. Přehřátím dochází k většímu propalu chromu v oceli. Po skončení údobí dezoxidace, je možné ocel velmi přesně dolegovat. Legovací přísady jsou do lázně sypány přes dvoukomorovou propust. Ta je umístěna ve víku kesonu a umožňuje přidávání příměsí za zachování sníženého tlaku. Zařízení může být také vybaveno podavačem plněných profilů.

4.1 Vakuová čerpadla [18], [19], [20], [21]

Pro vakuové odplynění se nejčastěji používají tří typy čerpadel. Pro zvolení toho nejlepšího, je potřeba zvážit několik parametrů. Prvním parametrem je čas, který je k dispozici pro vytvoření vakua v komoře. Vyšší rychlost výroby vyžaduje rychlejší čerpání a čerpadlo s vyšší kapacitou. Druhým parametrem je objem rozpuštěných plynů, které mají byt odstraněny z oceli. Zde opět platí, čím vyšší rychlost odplynění, tím je potřeba výkonnější čerpadlový systém, který udržuje vakuum při čerpání uvolněných plynů. Je potřeba počítat i s odsáváním uvolněného argonu, který se používá k míchání roztavené oceli. Třetím parametrem je úroveň podtlaku potřebná k zajištění požadovaného odplynění. Posledním neméně důležitým parametrem je ekonomické hledisko čerpadla, tedy spotřeba páry a elektrické energie.

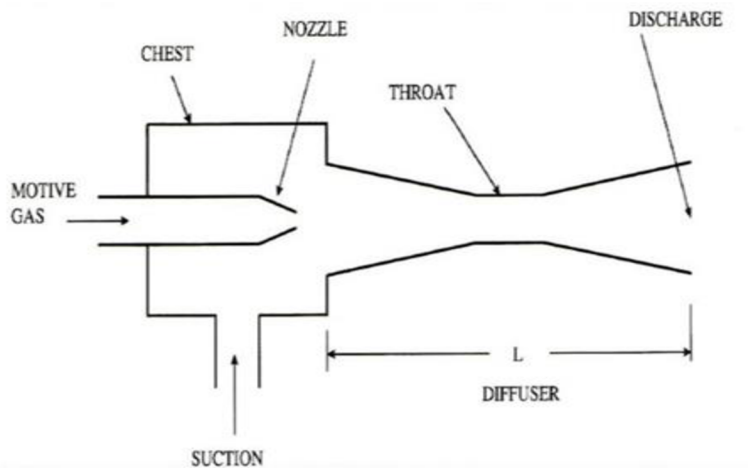
Typy vakuových čerpadel:

- parní vývěvy s potřebnými kondenzačními stupni;
- parní vývěvy v kombinaci s vodními kruhovými čerpadly;
- suché šroubové čerpadlo.

Parní vývěvy

K vytvoření vakua využívají parní vývěvy venturiho princip. Vyhřívače vytváří vodní páru, kterou trysky tlačí do komory. Zde se pára kontrolovaně rozpíná a vytváří tak podtlak. Tím jsou nasávány a zachycovány všechny plyny v okolí, které se s párou smísí a výpustí odchází ven z komory. Schéma parní vývěvy je uvedeno na **obr. 12**. Parní vývěvy se běžně používají ve vícestupňových fázích, pomocí sériového zapojení potrubí s kondenzačními částmi mezi nimi. Jednofázový ejektor vytváří tlak okolo 40mbar [18]. Výhodou parních vývěvy je vysoká spolehlivost a snadná údržba, protože nemají žádné

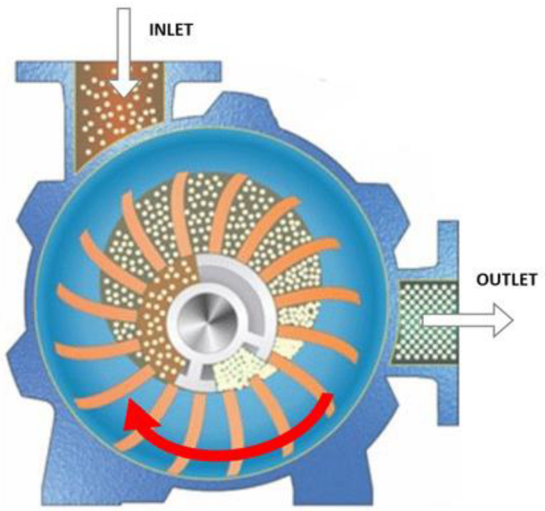
pohyblivé části. Hlavním kritériem při zvažování jejich pořízení je dostupnost a cena vodní páry.



Obr. 12 Schéma parního ejektoru [18]

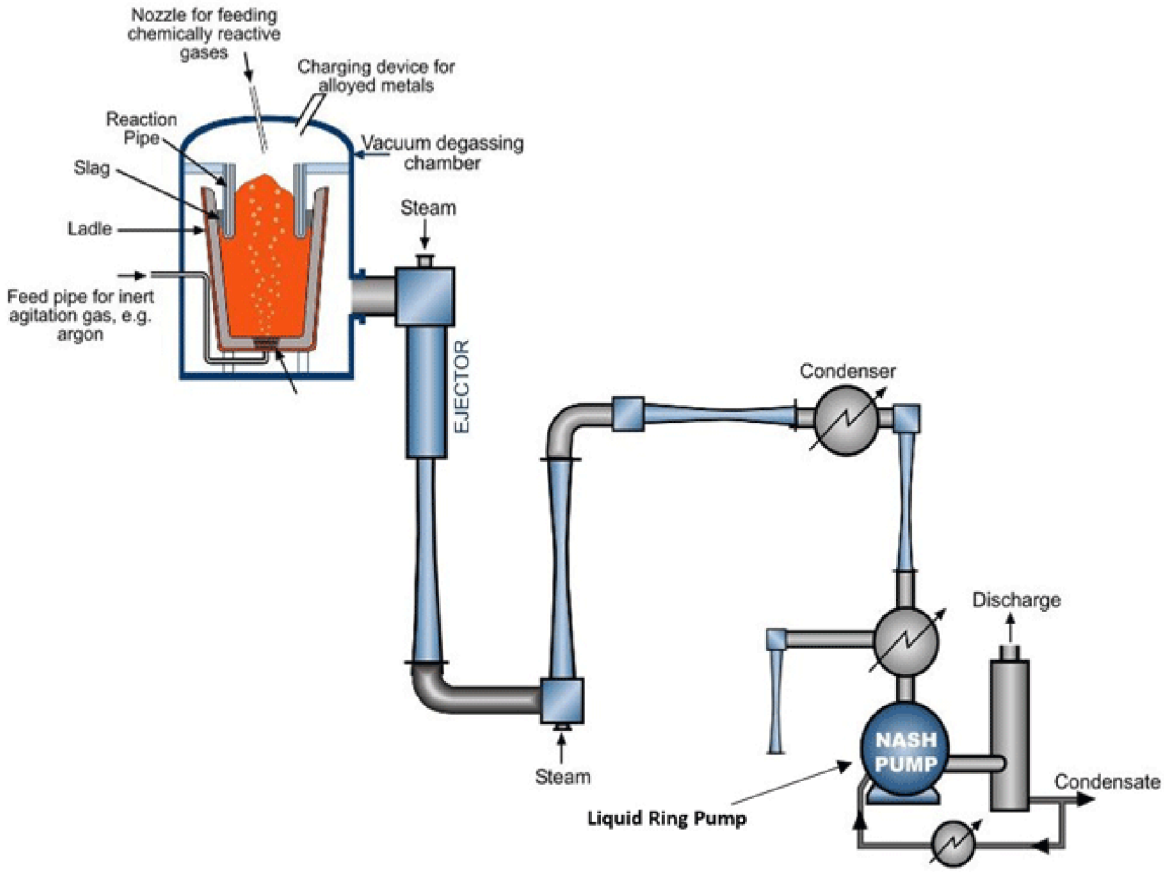
Čerpadla s vodními kroužky

Kruhové čerpadlo je čerpadlo s tzv. mokrým stykem. To znamená, že používá kapalinu pro těsnění mezi rotujícími lopatkami a skříní čerpadla. Vlivem excentrické síly vytvářené rotací oběžného kola uvnitř skříně je plyn stlačen a následně vypuštěn přes otvor na konci pouzdra (**obr. 13**). Tato čerpadla mohou vytvářet tlaky až 30 mbar a rychlost čerpání se pohybuje mezi 25 000 a 30 000 m^3/h [18].



Obr. 13 Řez čerpadla s vodními kroužky [18]

Čerpadla s vodními kroužky se používají v kombinaci s parními vývěvy. Ty jsou zapojeny v sérii před kruhovým čerpadlem (**obr. 14**). Parní ejektory vhání páru do systému, ta pak kondenzuje a vytváří tak těsnící kapalinu pro kruhové čerpadlo.

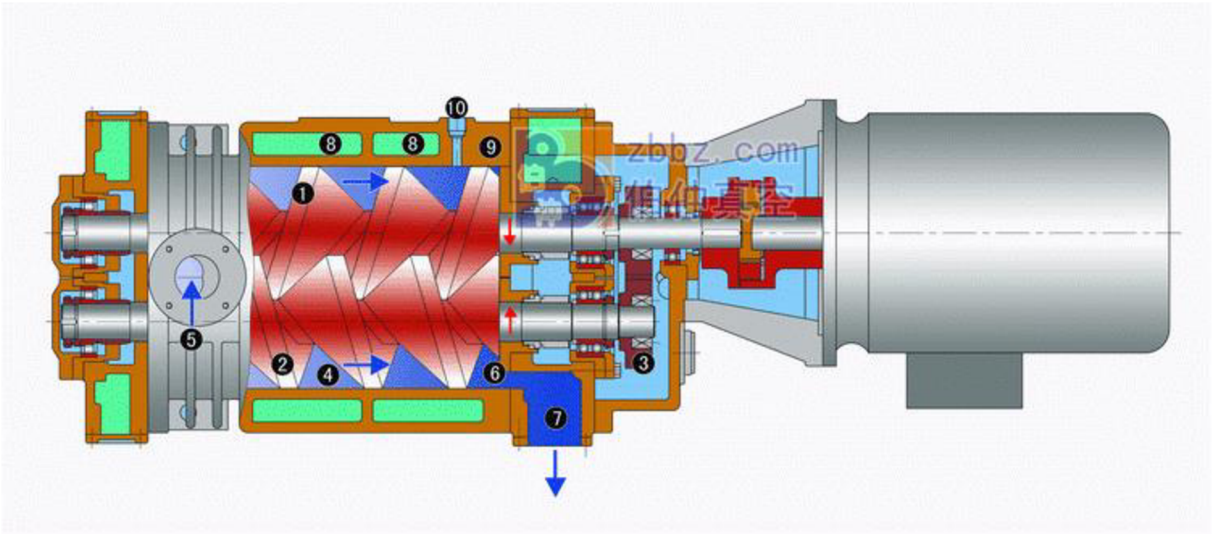


Obr. 14 Schéma zapojení parních vývěv s vodním kruhovým čerpadlem [18]

Suchá šroubová čerpadla

Dalším běžně používaným typem čerpadla je suché šroubové čerpadlo (**obr. 15**). Jako suché čerpadlo nevyžaduje zavádění kapaliny do systému, a proto jej nepředchází parní ejektory. Toto čerpadlo využívá rotace dvou šroubů, jednoho levotočivého a druhého pravotočivého. Šrouby rotují bez dotyku. Prostor mezi šrouby je velmi malý, šrouby musejí být přesně obrobeny s dostatečnou tolerancí. Tato tolerance společně s rotujícím pohybem vytváří těsnění, a zabraňují tak úniku plynu kolem šroubů. Šroubovitá trajektorie přenáší plyn z jednoho konce čerpadla na druhý. Šrouby jsou navrženy tak, aby se prostor mezi nimi zmenšoval. Procházející plyn se při průchodu stlačuje a dochází tak ke snížení tlaku u vstupu čerpadla. Suchá šroubová čerpadla nelze však použít za atmosférického tlaku. Nejdříve je nezbytné vytvořit tzv. primární vakuum o tlaku do 100 Pa [21]. To se provádí například pomocí olejových rotačních vývěv. Ty fungují na stejném principu jako vodní kroužková čerpadla, pouze těsnícím médiem je olej namísto vody. Olejová čerpadla za nízkého tlaku ztrácí čerpací rychlost a tak nastupují na řadu suchá šroubová čerpadla. Suché šroubové

čerpadlo má výbornou průchodnost, čistotu vakua a velkou čerpací rychlost. Rozsah rychlosti čerpání je 50 až 539 m^3/h [18].



Obr. 15 Suché šroubové čerpadlo [20]

Sekundární metalurgie za sníženého tlaku je konečný proces při výrobě oceli. V zařízeních vakuové metalurgie se provádí dohotovení oceli na požadované chemické složení a její přesné dolegování. Pochody za sníženého tlaku je možné provádět ve vakuovém kesonu nebo přímo v hermeticky uzavřené pánvi, popřípadě v jiném zařízeni SM. Hlavním principem vakuové metalurgie je využití rostoucí afinity uhlíku ke kyslíku při sníženém tlaku. To umožňuje výrobu nízkouhlíkových ocelí s vysokou oxidickou čistotou a současně s nízkým obsahem síry a plynů.

Výhody vakuové metalurgie:

- výroba oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku;
- snížení obsahu vodíku - zabránění křehnutí oceli;
- snížení obsahu kyslíku a získání lepší mikročistoty;
- snížení obsahu síry;
- přesné dolegování;
- zlepšení mechanických vlastností (rovnoměrná příčná tažnost, odolnost proti únavě).

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této práce je zaměřena na ekonomické posouzení výroby oceli společnosti ŽĎAS a.s. sídlící ve Žďáře nad Sázavou. Tato firma se mimo jiné aktivity zabývá výrobou ocelových odlitků a ingotů různých jakostí. Pro výrobu převážného podílu ocelí využívá tento podnik pochodů sekundární metalurgie. Slévárna disponuje třemi elektrickými obloukovými pecemi, sloužící převážně jako tavící agregát. Následné dohotovení většiny ocelí probíhá na pánvové peci LF a vakuovém zařízení pro pochody VD a VOD. Dvě ze tří obloukových pecí společně s dvěma pánvovými pecemi jsou předmětem praktické části, kde bude porovnáno jejich technicko- ekonomické zhodnocení výrobních nákladů. Tím je myšleno srovnání nákladů na vsázku, žáruvzdorné vyzdívky pecí, grafitové elektrody a spotřebu elektrické energie jednotlivých zařízení při výrobě oceli. Níže uvedené data, se kterými se pracuje, byla získána z informačního systému provozu ocelárny společnosti ŽĎAS a.s. v průběhu jednoho roku 2017.

5.1 Porovnání výrobních nákladů na EOP1 a EOP2

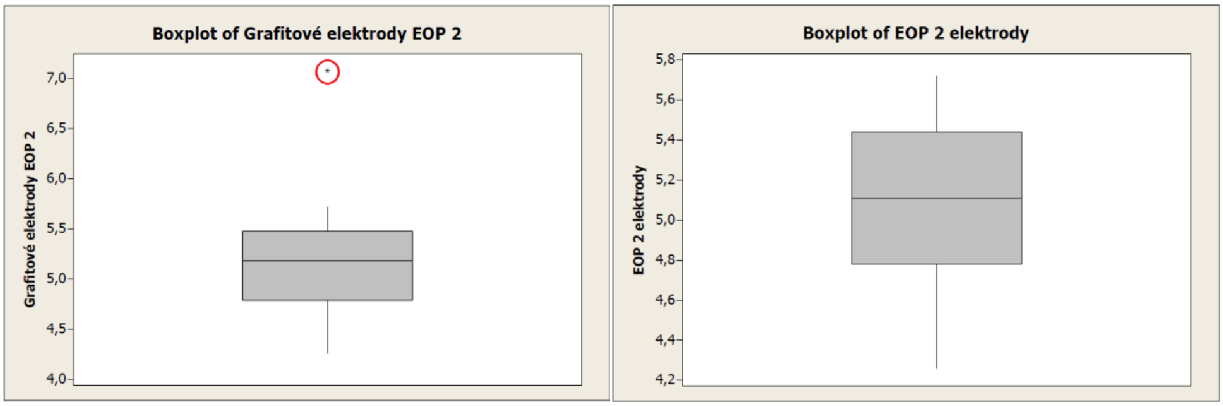
Základní parametry porovnávaných elektrických obloukových pecí jsou uvedeny v **tab. 6**.

Tab. 6 Základní parametry EOP 1 a EOP 2

	EOP 1	EOP 2
Hmotnost tavby	14 – 23 t	12 – 19 t
Příkon transformátoru	7.5 MVA	7.5 MVA
Intenzifikace	ANO	NE
Oxidace	Plynný kyslík	Plynný kyslík
Grafitové elektrody	Ø 350 mm	Ø 350 mm
Výroba	Uhlíkové, nízko a středně legované jakosti	Vysoce legované jakosti
Pochod	EOP + LF + VD	EOP + LF + VD/VOD

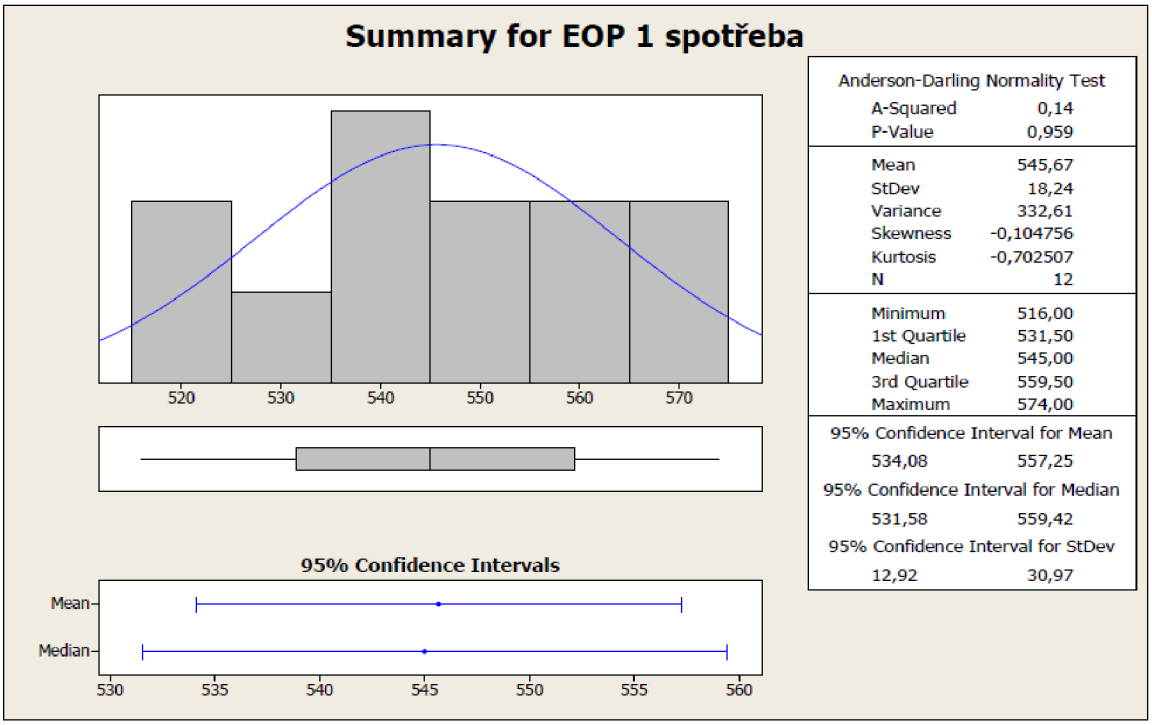
Získaná data pro porovnání výrobních nákladů na jednotlivých pecích byla statisticky zpracována v počítačovém programu MINITAB 15. Jako první se provedlo odstranění hrubých chyb ze všech naměřených hodnot. Hrubé chyby jsou hodnoty výrazně odlehlé od hodnot ostatních. Vznikají omylem, případně jsou způsobeny nečekanými potížemi během měření. Všechny naměřené hodnoty byly vloženy do statistické funkce BOXPLOT, která

graficky znázorní hrubé chyby. Hrubou chybu můžeme poznat tak, že se nachází mimo vyhrazené pole. Na **obr. 16** je příklad boxplotu naměřených hodnot pro spotřebu grafitových elektrod EOP 2. Vlevo lze vidět znázorněnou hrubou chybu (v červeném kroužku). Vpravo je boxplot po vyřazení hrubé chyby ze statistického výběru.



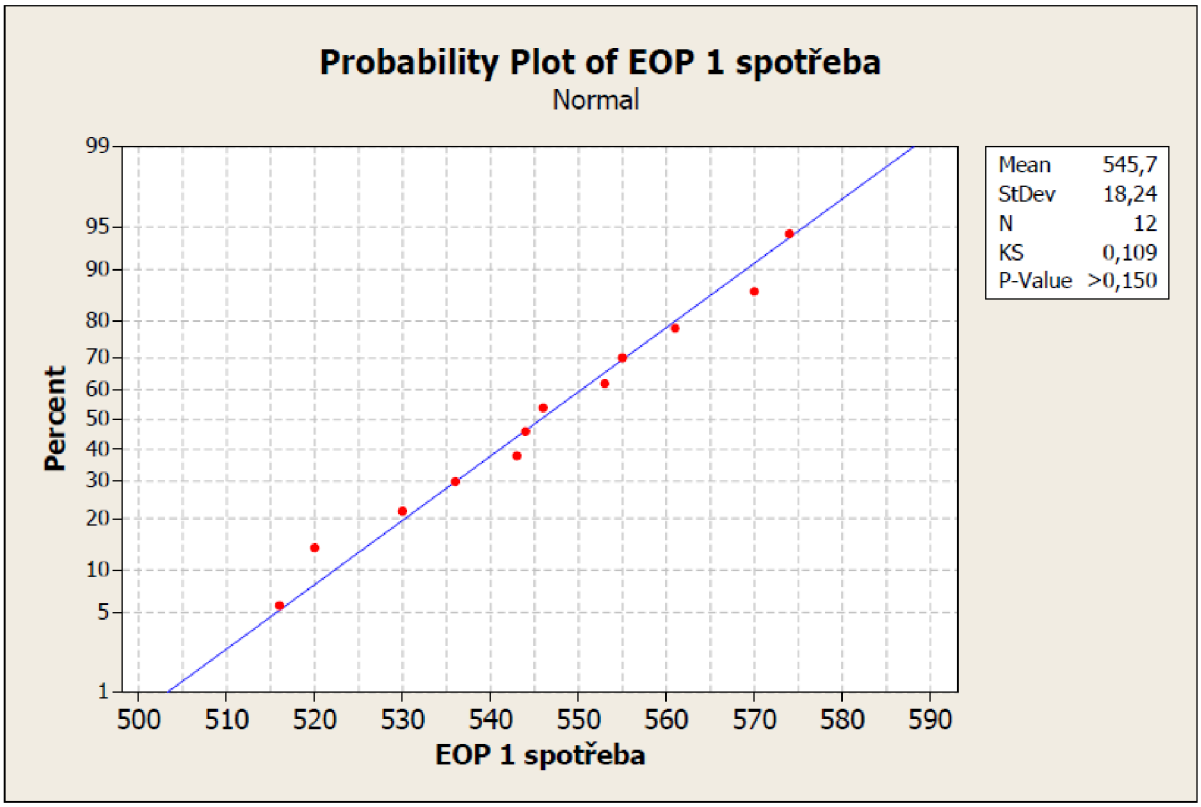
Obr. 16 Boxplot spotřeby grafitových elektrod EOP 2

Poté co byly vyřazeny všechny hrubé chyby z naměřených hodnot, byla tato data zpracována pomocí další funkce SUMMARY, která vypočítá a graficky znázorní základní prvky statistiky jako je průměrná naměřená hodnota, minimum a maximum, medián a směrodatnou odchylku od střední hodnoty. Výsledek zpracovaných dat pro spotřebu elektrické energie na EOP1 je na **obr. 17**.



Obr. 17 Summary spotřeby elektrické energie EOP 1

P hodnota Anderson-Darlingova testu je vyšší jak 0,05. To znamená, že naměřené hodnoty mají normální rozdělení, a je tedy možné pro ně provést parametrické testy jako F- test nebo T- test. Grafické znázornění rozdělení hodnot spotřeby elektrické energie na EOP 1 však jako normální rozdělení nevypadá, a proto byl pro kontrolu ještě proveden Kolmogorov-Smirnovův test normality, který normální rozdělení hodnot potvrdil. P hodnota testu (P=0,109) je vyšší než 0,05 (**obr. 18**). Výsledné hodnoty průměru, mediánu a směrodatné odchylky jsou uvedeny jednak číselně, tak i v intervalu hodnot s 95 % jistotou.



Obr. 18 Kolmogorov-Smironův test normality

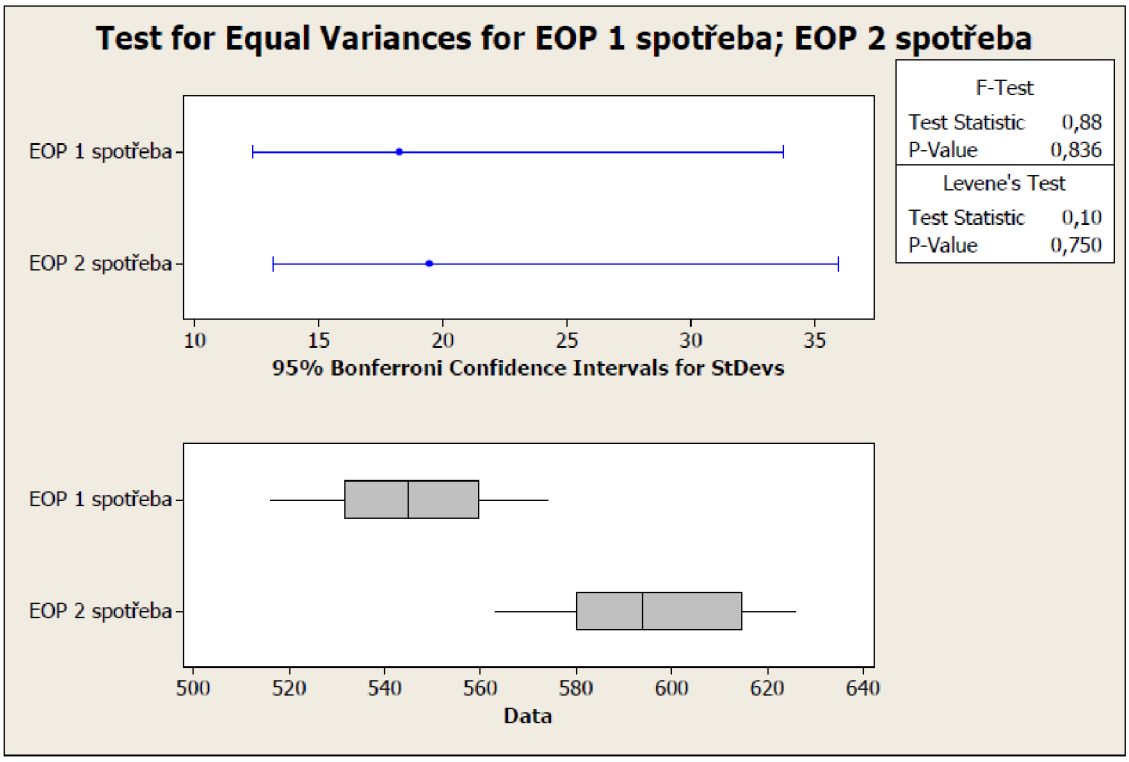
Stejně byly zpracovány i všechny ostatní naměřené hodnoty spotřeby elektrické energie, spotřeby grafitových elektrod a životnosti vyzdívek pece a jejího víka pro obě elektrické obloukové pece. Výsledné hodnoty jsou zapsány v **tab. 7**. Pro jednotlivé charakteristiky, tj. průměr, medián a směrodatnou odchylku jsou uvedeny intervalové odhady na hladině významnosti α = 0,05 tj. s přesností 95 %. To znamená, že např. průměrná hodnota základního souboru spotřeby elektrické energie na EOP 1 pro všechna měření se s 95 % spolehlivostí nachází v intervalu 534 až 557 kWh/t.

Tab. 7 Vypočítané intervalové odhady pro EOP1 a EOP2

	Počet měření	Průměrná hodnota	Medián	Směrodatná odchylka	P-hodnota (norm. roz.)
EOP 1 Spotřeba [kWh/t]	12	534 - 557	531 - 559	12 - 30	0,956
EOP 1 Elektrody [kg/t]	12	5,13 - 5,42	5,05 - 5,041	0,16 - 0,38	0,084
EOP 1 Vyzdívka [/tavby]	9	265 - 283	266 - 286	7 - 22	0,408
EOP 1 Víko [/tavby]	10	266 - 338	252 - 350	34 - 91	0,131
EOP 2 Spotřeba [kWh/t]	12	583 - 608	580 - 614	13 - 33	0,901
EOP 2 Elektrody [kg/t]	11	4,79 - 5,37	4,76 - 5,44	0,30 - 0,75	0,925
EOP 1 Vyzdívka [/tavby]	10	187 - 220	188 - 218	15 - 41	0,376
EOP 2 Víko [/tavby]	10	152 - 183	149 - 183	15 - 40	0,700

Počet měření se u jednotlivých měřených veličin liší. To je způsobeno vyřazením některých hodnot, které byly označeny funkcí boxplot jako hrubá chyba. Podle P- hodnoty v **tab. 7** vykazují všechny měřené prvky normální rozdělení (P>0,05).

Následně byly sledované parametry (spotřeba el. energie, spotřeba elektrod, životnost vyzdívky a víka) pecí EOP 1 a EOP 2 mezi sebou porovnány. K porovnání se použila funkce EQUAL VARIANCES, kde byla ověřena rovnost jejich rozptylů (F- test, Levenův test). Následně byl proveden T- test, který ověřil rovnost nebo naopak různost střední hodnoty porovnávané veličiny. Výsledek porovnání spotřeby elektrické energie na EOP 1 a EOP 2 lze vidět na **obr. 19** a **obr. 20.**



Obr. 19 F- test, Levenův test

Two-Sample T-Test and CI: EOP 1 spotřeba; EOP 2 spotřeba

```
Two-sample T for EOP 1 spotřeba vs EOP 2 spotřeba

                 N   Mean  StDev  SE Mean
EOP 1 spotřeba  12  545,7   18,2      5,3
EOP 2 spotřeba  12  595,8   19,4      5,6


Difference = mu (EOP 1 spotřeba) - mu (EOP 2 spotřeba)


Estimate for difference:  -50,08
95% CI for difference:  (-66,04; -34,12)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -6,51  P-Value = 0,000  DF = 2
2
Both use Pooled StDev = 18,8498
```

Obr. 20 T- test

P- hodnota F- testu společně s Levenovým testem je větší než 0,05. Tím je potvrzena rovnost rozptylů porovnávaných hodnot spotřeby elektrické energie na EOP1 a EOP2. To lze interpretovat tak, že obě pece pracují se stejným rozptylem hodnot spotřeby el. energie. Naopak P- hodnota u T- testu vyšla menší než 0,05. To znamená, že jejich střední hodnota je různá, tedy jedna z pecí má se spolehlivostí 95 % nižší spotřebu elektrické energie než pec druhá. Tyto testy byly provedeny pro všechny porovnávané veličiny a jsou shrnuty v **tab. 8**.

Tab. 8 Porovnání EOP1 a EOP2

	P- hodnota			
	F- test	**Levenův test**	**T- test**	**Nižší**
Spotřeba	0,836	0,750	0,000	EOP 1
Elektrody	0,047	0,057	0,204	stejně
Vyzdívka	0,071	0,263	0,000	EOP 1
Víko	0,023	0,014	0,000	---

Podle naměřených a zpracovaných hodnot vykazuje se spolehlivostí 95 % elektrická oblouková pec označená jako EOP 1 nižší spotřebu elektrické energie a vyšší životnost vyzdívky pece než EOP 2. Spotřeba grafitových elektrod je s 95% spolehlivostí stejná. Životnost víka pecí nelze statisticky porovnat pomocí T- testu, protože mají rozdílný rozptyl hodnot. Pro posouzení by bylo nutné zvýšit rozsah souboru o další výsledky.

5.2 Porovnání výrobních nákladů na LF1 a LF2

Ocelárna disponuje dvěma pánvovými peci, označovanými jako LF 1 a LF 2. Hmotnost tavby obou zařízení se pohybuje v rozmezí 14 – 23 tun. Příkon transformátoru obou agregátů je 3.5 MVA a průměry elektrod jsou 250 mm. LF 2 je oproti LF 1 vybavena indukčním míchačem (EMS). Naměřená data byla zpracována stejně jako data pro obloukové pece a výsledky jsou uvedeny v **tab. 9** a **tab. 10**.

Tab. 9 Vypočítané intervalové odhady pro LF1 a LF2

	Počet měření	Průměrná hodnota	Medián	Směrodatná odchylka	P-hodnota (norm. roz.)
LF 1 Spotřeba [kWh/t]	12	138 - 147	136 - 147	4,86 – 11,66	0,866
LF 1 Elektrody [kg/t]	12	2,07 – 2,53	2,10 – 2,48	0,25 - 0,61	0,247
LF 2 Spotřeba [kWh/t]	12	143 - 152	142 - 154	5 - 12	0,762
LF 2 Elektrody [kg/t]	10	1,79 – 1,99	1,81 – 1,99	0,09 – 0,25	0,719

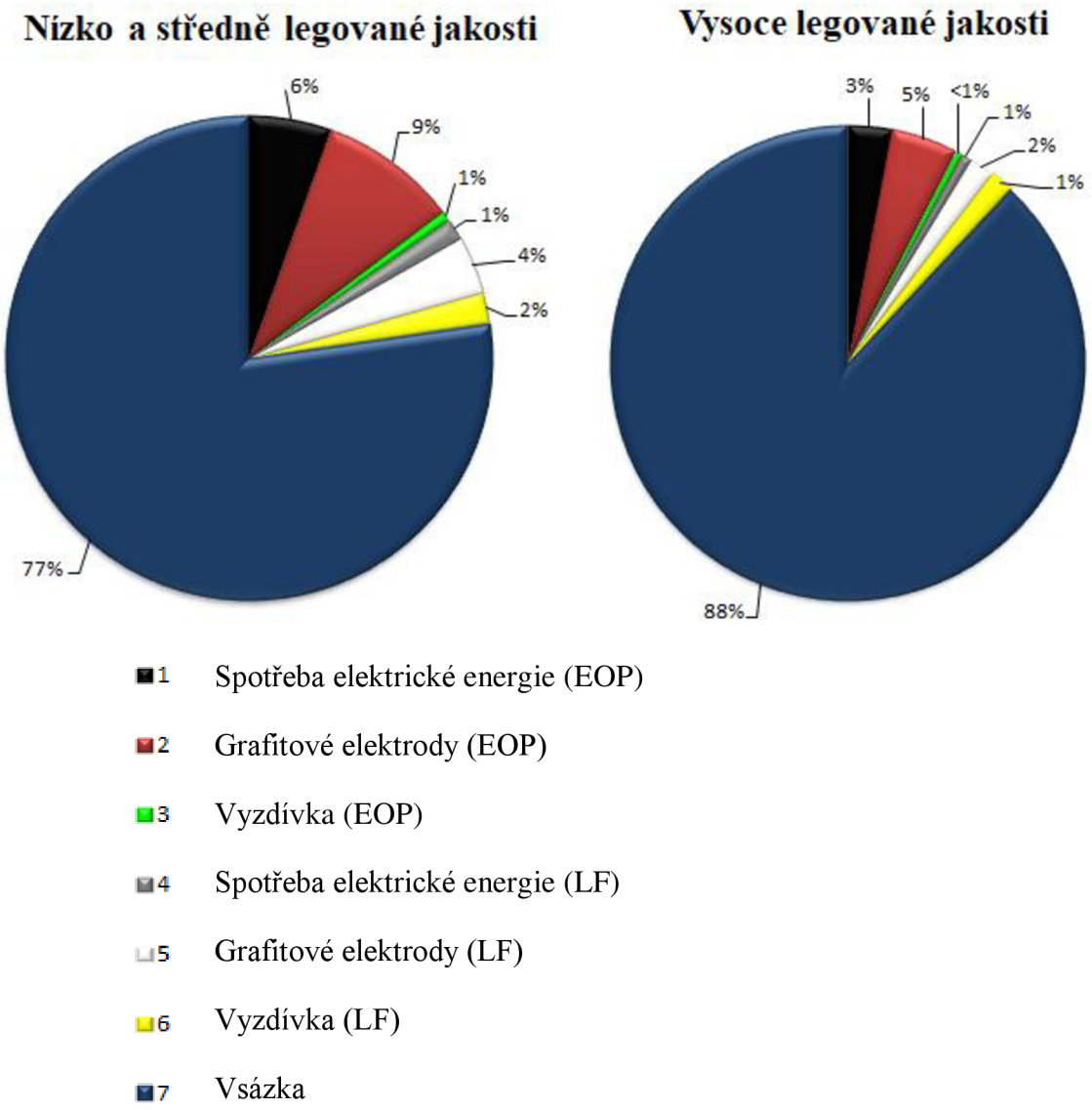
Tab. 10 Porovnání LF1 a LF2

	P- hodnota			
	F- test	Levenův test	T- test	Nižší
Spotřeba	0,890	0,625	0,072	stejně
Elektrody	0,009	0,103	0,003	---

Z vypočítaných hodnot vyplívá, že obě pánvové pece mají s 95% spolehlivostí stejnou spotřebu elektrické energie. Pánvová pec s indukčním míchačem LF 2 má jiný rozptyl hodnot spotřeby grafitových elektrod oproti LF 1. P- hodnota u T- testu ukazuje, že LF 1 a LF 2 mají s 95% spolehlivostí jinou spotřebu grafitových elektrod.

5.3 Porovnání nákladů na výrobu oceli různých jakostí

Na konci své práce se věnuji technicko- ekonomickému zhodnocení výrobních nákladů na výrobu oceli různých jakostí. Porovnávají se základní náklady na výrobu nízko a středně legovaných ocelí s náklady na výrobu vysoce legovaných ocelí. Výsledky jsou uvedeny ve dvou koláčových grafech (**obr. 21**). Výroba nízko a středně legovaných jakostí probíhá na elektrické obloukové peci (EOP1), následně na pánvové peci (LF1) a poté může ještě pokračovat na zařízení VD. Vysoce legované oceli jsou vyráběny na zařízeních EOP2, LF2 a vždy VD nebo VOD. Celkové náklady na výrobu vysoce legovaných jakostí oceli jsou přibližně dvakrát vyšší, než náklady na nízko a středně legované oceli.

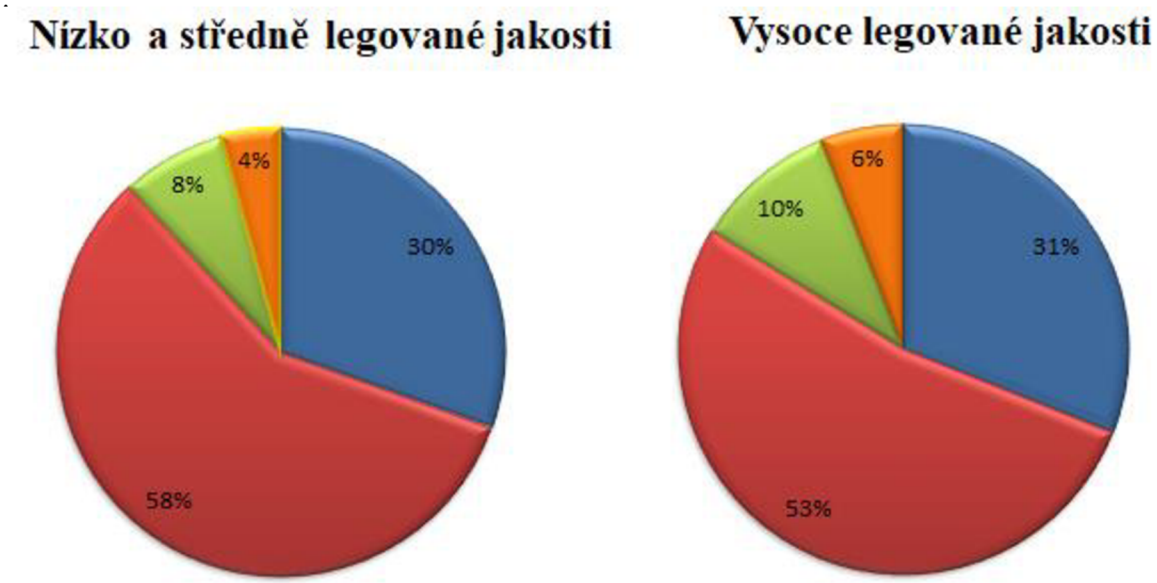


Obr. 21 Grafy rozložení celkových výrobních nákladů

Z obou grafů lze pozorovat, že nejvyšší část nákladů na výrobu oceli tvoří náklady na vsázku. U nízko a středně legovaných jakostí je to 77 % z celkových nákladů. U vysoce legovaných jakostí dokonce 88 %. Jako druhé nejvyšší jsou náklady na grafitové elektrody. V grafu jsou náklady na grafitové elektrody rozděleny do dvou položek, a to náklady na elektrody na EOP a LF. Dohromady tvoří 13 % z celkových nákladů u nízko legovaných jakostí a 7 % u vysoce legovaných jakostí. Elektrická energie resp. náklady tvoří 7 % pro nízko legované jakosti a 4 % pro vysoce legované jakosti (EOP + LF). Součet dalších nákladů (víko a vyzdívka) tvoří velmi malou část z celkových nákladů, asi 3 % u obou jakostí oceli. V grafech si také můžeme všimnout značného rozdílu spotřeby elektrické energie mezi EOP a LF. Elektrická oblouková pec slouží k tavení, zatímco pánvová pec k příhřevu. Z toho vyplývá zásadní rozdíl. S tím jsou spojeny i náklady na grafitové elektrody.

Náklady byly spočítány vzhledem k dnešním cenám jednotlivých položek, které se oproti cenám v minulém roce poměrně liší. Nejznatelnější rozdíl je v ceně grafitových elektrod, jejichž cena je dnes téměř šestkrát vyšší než v roce minulém. V minulých letech tvořili náklady na grafitové elektrody pouze 2 % z celkových nákladů oproti nynějším 9 % u nízko legovaných jakostí. U vysoce legovaných jakostí to bylo 1 % oproti dnešním 5 %. Vzrostla také cena magnezitových staviv, které jsou dnes dvakrát dražší než v minulém roce. Procentuální nárůst nákladů na magnezitová staviva je však vzhledem k ostatním položkám podstatně nižší.

Z předchozích výpočtů je zřejmé, že při snižování celkových nákladů je nejefektivnější snížit náklady na vsázku, které tvoří většinový procentuální podíl celkových nákladů. Ty jsou ale závislé zejména na cenách kovového šrotu a mnohdy zde není prostor ke snížení nákladů. Pak přicházejí na řadu ostatní položky, jako jsou spotřeba elektrické energie, spotřeba grafitových elektrod a vyzdívka pece a víka. Procentuální zastoupení nákladů na tyto položky (bez nákladů na vsázku) je zobrazeno v koláčových grafech **na obr. 22**. Podle obou grafů tvoří největší část nákladů spotřebované grafitové elektrody (EOP+LF), a to 58 % u nízko legovaných jakostí a 53 % u vysoko legovaných jakostí. Druhou nejvyšší položkou jsou náklady na elektrickou energii, tvořící 30 % celkových nákladů. Náklady na magnezitová staviva jsou mezi 8 a 10 %. Nejnižší položkou nákladů je žárobeton s 4 a 6 %.



1 Spotřeba elektrické energie (EOP+LF)

2 Grafitové elektrody (EOP+LF)

3 Vyzdívka – magnezitová staviva (EOP+LF)

4 Vyzdívka – žárobeton (EOP+LF)

Obr. 22 Grafy rozložení výrobních nákladů (bez vsázky)

6 ZÁVĚRY

V teoretické části práce bylo provedeno základní rozdělení a stručný popis postupů sekundární metalurgie. Poté byla práce zaměřena zejména na konstrukční řešení tří zařízení používaných pro výrobu oceli. Jednalo se o elektrickou obloukovou pec, pánvovou pec a zařízeni VD/VOD. Byly zde rozebrány základní prvky těchto zařízení, jejich princip, funkčnost, možnosti výroby a vývojové trendy. Tyto zařízení byly i předmětem praktické části této práce.

Výsledkem praktické části bylo technicko- ekonomické zhodnocení a porovnání nákladů na výrobu nízko a středně legovaných ocelí s náklady na výrobu ocelí vysoce legovaných ve firmě ŽĎAS a.s.. Byly porovnány náklady na vsázku, spotřebu elektrické energie, spotřebu grafitových elektrod, životnost vyzdívky pece a životnost vyzdívky víka. Celkové náklady na výrobu vysoce legovaných ocelí byly přibližně dvakrát vyšší než náklady na výrobu nízko a středně legovaných ocelí. Nejvyšší část z celkových nákladů tvořily náklady na vsázku. U nízko a středně legovaných ocelí to je 77 %. U vysoce legovaných dokonce až 88 %. Jako druhé nejvyšší byly náklady na grafitové elektrody s 13 % u nízko a středně legovaných jakostí a 7 % u vysoce logovaných jakostí. To je způsobeno nárůstem ceny elektrod, která je oproti minulému roku šestkrát vyšší. Před rokem náklady na grafitové elektrody tvořily pouze 2 % z celkových nákladů. Na třetím místě pak byly náklady na elektrické energie, které tvořily 6 a 3 %. Náklady na vyzdívku víka a pece společně zaujímaly pouze 3 % z celkových nákladů.

Pokud tedy chceme snížit celkové náklady na výrobu oceli, nejefektivnějším prvkem bude snížení nákladů na vsázku. To však není vždy možné. Pokud tedy uvažujeme pouze ostatní náklady bez započítání vsázky, největší podíl z nich tvořily náklady na grafitové elektrody, a to 58 % u nízko a středně legovaných jakostí a 53 % u vysoce legovaných jakostí. Na druhém místě byly náklady na spotřebu elektrické energie, které tvořily 30 % pro obě jakosti. Zbylá procenta byla rozdělena v nákladech na magnezitová staviva a žárobeton.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠENBERG, J., Z., BŮŽEK, A., ZÁDĚRA, K., STRÁNSKÝ a V., KAFKA, Cover & typography, Jan Janák. Metalurgie oceli na odlitky. 2008. vyd. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214- 3632-9, s. 210-234.
2. MARTÍNEK, L., J., ŠENBERGER, aj. Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárenství. 2006, roč. 54, č. 6, s. 218–221. ISSN 0037-6825
3. SIMMONS, J., Secondary Refining [online].[cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.steel.org/~/media/Files/AISI/Making%20Steel/Article%20Files/learning_2ndrefining.pdf
4. ŠENBERGER, J. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli. *VUT v Brně* [online]. [cit.2018-05-04].Dostupné z: www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_10.doc
5. ADOLF, Z. Slévárenství ocelových odlitků [online]. [cit. 2018-14-04]. Dostupné z:http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/10_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku/Camek_Slevarenstvi_ocelovych_odliltku.pdf
6. KYNCL,J., Obloukové pece [online]. [cit. 2018-12-5]. Dostupné z: www.powerwiki.cz/attach/ET2/OBLOUKOVE_PECE--final.ppt
7. *Brochure Simetal Ultimate* [online]. Willstätt-Legelshurst, Germany: Siemens, 2011 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/industry/metals-technologies/2012-03-steel/simetal-ultimate-en.pdf
8. Electric Arc Furnace. *Industrial Efficiency Technology Database* [online]. The Institute for Industrial Productivity, 2010 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace
9. KOPELIOVICH, D. *Ladle refining: Ladle furnace*[online]. Substech, 2012, 31. 5. 2012 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ladle_refining#ladle_furnace_lf
10. *Brochure Secondary metallurgy: Complete Solutions for Quality Steel* [online]. Techint group [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.tenova.com/fileadmin/user_upload/brochure_Secondary_metallurgy.pdf
11. ADOLF, Z. Sekundární metalurgie [online]. [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmmi/cs/okruhy/urcenopro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/618-Adolf-sekundarni_metalurgie.pdf

12. Electromagnrtic induction stirring of molten metal. *Stinchcombe technology* [online]. Stinchcombe, 2016, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.stinchcombe.eu/products/electromagnetic-induction-stirring-of-molten-metal
13. KÖCHNER, H., J. KRUCK, A. ARTEAGA a G. KLÖSCH. *Enhanced reliability in ladle refining processes (VD, VOD and LF) by improved online process monitoring and control (LAREFMON)*. Lucemursko: Publications Office of the European Union, 2013. ISBN 978-92-79-29710-6.
14. Ladle Refining Furnace. *Cimm: Ferrous metallurgy* [online]. Dalian, Liaoning province, China, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.cimmuk.com/invest/show.php?itemid=61
15. DE SOUSA, B.B., W.V. BIELEFELDT a S.R. BRAGANÇA. Corrosion of refractory alumina plates used in the sliding gate system of steelmaking ladle: Chemical experiment. *Ceramics International* [online]. 2017, **43**(3), 3298-3305 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.11.166. ISSN 02728842. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216321794
16. ŠENBERGER, J., MARTÍNEK, L. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárenství. 1999, roč. XLVII, č. 6-7, s. 372-378. ISSN 0037-6825.
17. VD/VOD Vacuum Ladle Refining Furnace. *Southern Africa analysis & smelting*[online]. 2009 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://southernas.com/indexec31.html?ac=article&at=list&tid=45
18. KAY, D., D. HERRING a H. TRING. *Vacuum Degassing of Steel* [online]. Canada: VAC AERO International, 5. 12. 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/101401-vacuum-degassing-steel.html
19. Vacuum degassing processes for liquid steel. *Ispatguru* [online]. Satyendra, 12. 7. 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://ispatguru.com/vacuum-degassing-processes-for-liquid-steel/
20. LG series screw vacuum pump. *China-vacuumpump* [online]. Shang Town, Zhang Dian: Shandong Bozhong Vacuum Equipment Co, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.china-vacuumpump.com/products_list/pmcId=49.html
21. ZEMČÍK, L. Vakuová technika v metalurgii. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1991, s. 4-22. ISBN 80-214-0248-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
AOD	Sekundární metalurgie	[-]
AP	Argon pouring	[-]
DH	Dortmund horder	[-]
EOP	Elektrická oblouková pec	[-]
EMC	Electromagnetic stirring	[-]
LF	Ladle furnace	[-]
RH	Rührstahl heraus	[-]
SL	Scandinavian lancers	[-]
SM	Sekundární metalurgie	[-]
TN	Thüsen niederhein	[-]
VAD	Vacuum arc degassing	[-]
VD	Vacuum degassing	[-]
VOD	Vacuum oxygen decarburisation	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vývoj pochodů sekundární metalurgie [1] 12
Obr. 2 Schéma elektrické obloukové pece [8] 15
Obr. 3 Zavádění grafitových elektrod do EOP [10] 16
Obr. 4 Schéma vyzdívky zásadité obloukové pece[1] 17
Obr. 5 Schéma pánvové pece [9] 19
Obr. 6 Způsoby dmýchání argonu [1] 21
Obr. 7 Uložení porézní tvárnice [11] 21
Obr. 8 Tvary porézních tvárnic [11] 22
Obr. 9 Míchání lázně v pánvi [12] 23
Obr. 10 Šoupátkový uzávěr pánve [15] 24
Obr. 11 Zařízení pro pochod VOD [10] 26
Obr. 12 Schéma parního ejektoru [18] 28
Obr. 13 Řez čerpadla s vodními kroužky [18] 28
Obr. 14 Schéma zapojení parních vývěv s kruhovým čerpadlem [18] 29
Obr. 15 Suhé šroubové čerpadlo [20] 30
Obr. 16 Boxplot spotřeby grafitových elektrod na EOP2 32
Obr. 17 Summary spotřeby elektrické energie 32
Obr. 18 Kolmogorov- Smironův test normality 33
Obr. 19 F-test, Levenův test 35
Obr. 20 T- test 35
Obr. 21 Grafy rozložení celkových výrobních nákladů 38
Obr. 22 Grafy rozložení výrobních nákladů (bez vsázky) 40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Popis metod SM, jejich přínos a stručný opis [1] 11
Tab. 2 Metalurgické možnosti některých postupů Sm [1]..... 13
Tab. 3 Příklady EOP od firmy SIEMENS [7] 14
Tab. 4 Porovnání pecí s intenzifikací a bez intenzifikace [1]..... 18
Tab. 5 Typy LF od firmy CIMMUK [14] 24
Tab. 6 Základní parametry EOP1 a EOP2..... 31
Tab. 7 Vypočítané intervalové odhady pro EOP1 a EOP2..... 34
Tab. 8 Porovnání EOP1 a EOP2 36
Tab. 9 Vypočítané intervalové odhady pro LF1 a LF2 37
Tab. 10 Porovnání LF1 a LF2..... 37