



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA OCELI NA ODLITKY V ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECI

PRODUCTION OF STEEL FOR CASTINGS IN AN ELECTRIC ARC FURNACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hejčl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Libor Čamek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Pavel Hejčl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Libor Čamek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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:

Výroba oceli na odlitky v elektrické obloukové peci

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se věnuje popisu základní konstrukce a významu jednotlivých částí elektrické obloukové pece ve slévárnách oceli na odlitky. Uvádí hlavní výrobní fáze výroby oceli na odlitky a jejich metalurgické možnosti pro zvýšení čistoty taveniny. V praktické části práce je provedeno zpracování výsledků skupiny taveb z elektrické obloukové pece KRÁLOVOPOLSKÉ SLÉVÁRNY, s.r.o.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést popis základní konstrukce a významu jednotlivých částí elektrické obloukové pece, hlavní výrobní fáze výroby oceli na odlitky a jejich metalurgické možnosti pro zvýšení čistoty taveniny. Na základě dosažených výsledků skupiny taveb oceli na odlitky z elektrické obloukové pece KRÁLOVOPOLSKÉ SLÉVÁRNY, s.r.o. provést vyhodnocení výsledků v souvislosti s dosaženými mechanickými hodnotami jednotlivých taveb.

Seznam doporučené literatury:

ŠENBERGER, J., K. STRÁNSKÝ, Z. BŮŽEK, A. ZÁDĚRA., V. KAFKA. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: VUT v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

FREMUNT, P., J. ŠIMON. Tavení oceli v elektrických pecích. SNTL Praha, 1984. 242 s.

LEVIČEK, P., K. STRÁNSKÝ. Metalurgické vady ocelových odlitků. SNTL Praha, 1984. 269 s.

FRUEHAN, R. et al. The Making, Shaping and Treating of Steel. Pittsburgh 1998. 767 p. ISBN 0-930767-02-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

HEJČL Pavel: Výroba oceli na odlitky v elektrické obloukové peci.

Práce pojednává o elektrických obloukových pecích, zejména o elektrických obloukových pecích slévárenského typu, které se používají k výrobě ocelí na odlitky. Teoretická část nejdříve zmiňuje varianty elektrických obloukových pecí podle jejich konstrukce a místa určení. Následně se zaměřuje pouze na pece slévárenského typu, u kterých popisuje konstrukci a hlavní výrobní fáze. Praktická část se zabývá vyhodnocením skupiny taveb nízkolegované chrom-molybdenové oceli na odlitky G17CrMo9-10 z elektrické obloukové pece OTO 5.

Klíčová slova: elektrická oblouková pec, výroba oceli, ocel na odlitky, obsah prvků, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

HEJČL Pavel: Production of steel for castings in an electric arc furnace.

The thesis deals with electric arc furnaces, especially electric arc furnaces of the foundry type which are used for production of steel for castings. The theoretical part first mentions variants of electric arc furnaces according to their construction and determined place. Then, it focuses only on foundry-type furnaces for which it describes construction and main production phases. The practical part deals with the evaluation of a group of melts of low-alloy chromium molybdenum steel for castings G17CrMo9-10 from the OTO 5 electric arc furnace.

Keywords: electric arc furnace, steel production, steel for castings, element content, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEJČL, Pavel. *Výroba oceli na odlitky v elektrické obloukové peci* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132587>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Čamek.

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 21.5.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Liboru Čamkovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost, cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji společnosti KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA, s.r.o. a Ing. Pavlu Vavřincovi za spolupráci a poskytnuté informace pro praktickou část bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přítelkyni za podporu při studiích.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 VARIANTY ELEKTRICKÝCH OBLOUKOVÝCH PECÍ	10
1.1 Oceli na odlitky z elektrických obloukových pecí	13
1.2 Vliv prvků na průběh tavy a vlastnosti odlitků	15
2 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC SLÉVÁRENSKÉHO TYPU	17
2.1 Konstrukce.....	17
2.2 Vyzdívky	20
2.3 Elektrický oblouk.....	21
2.4 Průběh tavy oceli na odlitky v zásadité EOP	22
2.4.1 Údobí opravy	22
2.4.2 Příprava a sázení vsázky do pece.....	23
2.4.3 Údobí tavení.....	24
2.4.4 Oxidační údobí.....	25
2.4.5 Redukční údobí.....	26
2.4.6 Odpich a odlévání oceli	28
3 PRAKTICKÁ ČÁST	29
3.1 Popis materiálu.....	29
3.2 Zhodnocení výsledků taveb	30
3.3 Analýzy prvků s dominantním vlivem na mechanické vlastnosti.....	34
3.3.1 Analýza z pohledu fosforu	35
3.3.2 Analýza z pohledu síry	37
4 ZÁVĚR	39

Seznam použitých zdrojů
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh

ÚVOD

Tavení materiálu pomocí elektrického oblouku představil Sir Humphry Davy experimentem tavby již roku 1810. V letech 1878-1879 si nechal britský vynálezce německého původu, Sir William Siemens, patentovat elektrickou obloukovou pec. Svůj vynález následně předvedl v Paříži roku 1879. První komerčně využívaná elektrická oblouková pec byla zřízena firmou Halcomb Steel Company ve Spojených státech amerických roku 1906. Napájení čtyřtunové pece zajišťoval stejnosměrný proud přiváděný na dvě elektrody. Za jejím vznikem stál francouzský vědec Paul Héroult [1], [2], [3].

Stejně jako další technické vynálezy z konce 19. století, ani elektrické obloukové pece neminul významný vývoj směřující k neustálému zdokonalování jakosti vyráběných ocelí a snižování výrobních nákladů. Jiný trend nelze očekávat ani v příštích desetiletích, kdy budou prezentována vylepšení vedoucí zejména k efektivnější a ekologičtější výrobě „uhlíkově neutrální“ oceli [4].

V dnešní době lze vidět díky vývoji rozličná konstrukční řešení elektrických obloukových pecí. Některá z těchto řešení jsou podrobněji popsána a rozebrána v samotné práci. K docílení přísných požadavků vyráběných ocelí jsou kromě samotných pecí důležité i technologické postupy tavby. Proto si v průběhu let prošly též mohutnou evolucí.

Elektrické obloukové pece jsou v současnosti důležitým producentem oceli. V rozmezí let 2002 až 2012 jejich produkce představovala 25 % světově vyráběné oceli. V roce 2012 však započal přesun výroby oceli do elektrických obloukových pecí, a proto v roce 2020 jejich produkce zahrnovala zhruba 30 % světově vyráběné oceli. V letech 2021 až 2024 se očekává další navýšení výrobnosti s meziročním růstem okolo 5,7 %, z čehož má 67 % připadnout na asijsko-pacifický region v čele s Čínou a Indií [4], [5].

Teoretická část práce je věnována základní konstrukci a jednotlivých částí elektrické obloukové pece používané v českých slévárnách, kde slouží k výrobě ocelí na odlitky. Dále se zaměřuje na popsání průběhu taveb ocelí na odlitky s uvedením možností vedoucích ke zvýšení kvality a snížení doby vyráběné oceli. Poznatky z teoretické části byly poté využity v části praktické, která se zabývá zpracováním výsledků nízkolegované oceli na odlitky G17CrMo9-10 vyráběné ve společnosti KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA, s.r.o. v elektrické obloukové peci OTO 5.

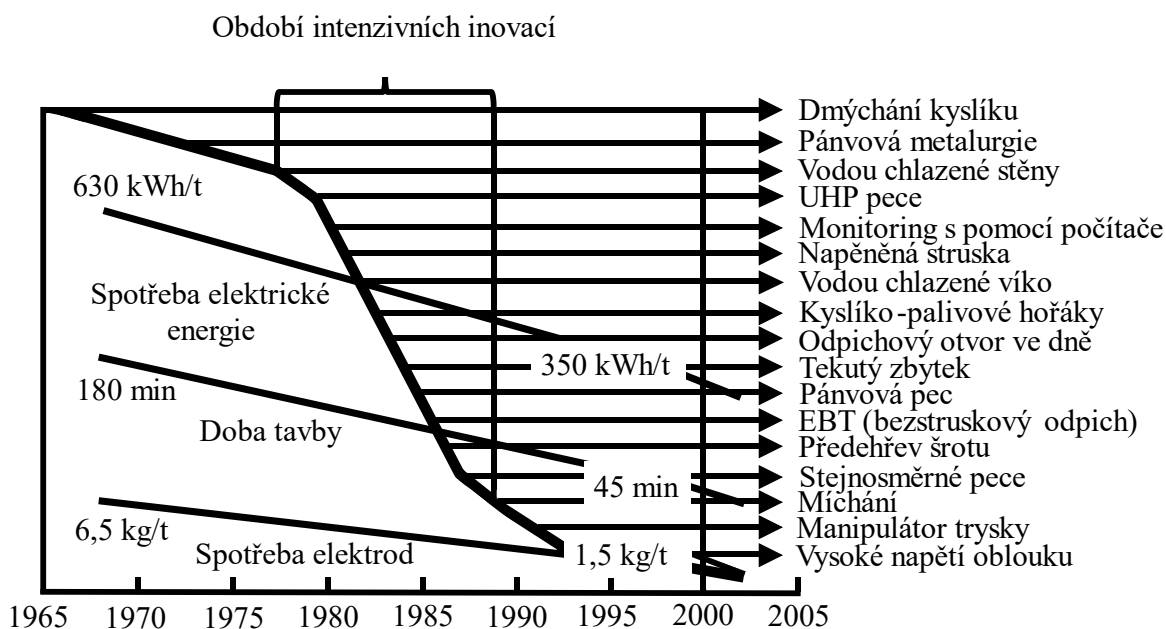
1 VARIANTY ELEKTRICKÝCH OBLOUKOVÝCH PECÍ

Elektrické obloukové pece (EOP) přeměňují elektrickou energii na tepelnou. Hlavním zdrojem tepla s podílem 70 % je elektrický oblouk, jehož teplota se udává mezi hodnotami 3 000 až 4 000 °C. Dalším zdrojem tepla jsou chemické reakce vznikající v peci [2], [6].

Elektrické obloukové pece podléhaly v minulosti vývoji, z tohoto důvodu vzniklo mnoho konstrukčních řešení a zlepšení technologických postupů výroby. Všechna prováděná řešení měla za cíl snížení nákladů a urychlení výroby při udržení požadované jakosti vyráběné oceli, protože není žádoucí vyrobit ocel vyšší jakosti, než požaduje zákazník. Výrobní náklady se musí počítat souhrnně, nemělo by totiž žádný efekt, kdyby se snížily náklady jedné fáze na úkor druhé. V současnosti do nákladů podstatně vstupuje i cena elektřiny, proto mnoho provozů s nekontinuální produkcí přistupuje k výrobě oceli v dobách s nízkými tarify [1], [6].

Největší změny prodělaly elektrické obloukové pece zavedením sekundární pánvové metalurgie, kdy jsou používány pouze jako tavící agregát k rychlému roztavení vsázky, odhličení a odfosfoření. Odsíření a dolegování již probíhá v lící pánvi. Odpich oceli z EOP do lící pánve nastává po dosažení odpichové teploty. Technologií odpichu neuklidněné oceli zbavené o oxidační strusku se docílí nízkého podílu vodíku v odpíchnuté oceli. Lící pánve se následně přemístí pod polohovatelné víko. Víkem prostupují tři elektrody napájené z třífázového zdroje, jež pomocí elektrického oblouku přehřívají ocel během tavby. Teplotní a chemickou homogenitu zajišťuje dmýchání argonu (nebo dusíku) porézni tvárnici ve dně pánve. Pánvové pece umožňují snížit síru pod hranici 0,003 % a velmi přesné dolegování. [1], [6].

Intenzifikační opatření pecí nejsou levnou záležitostí, proto jejich zavádění souvisí s finanční návratností. Finanční návratnost je dána zejména roční produkcí oceli konkrétních provozů. Roční produkce oceli ve slévárnách se nemůže rovnat produkci v hutních ocelárnách, kde dosahuje mnohdy více než milion tun. Proto intenzifikační opatření pecí slévárenského typu nedosahují možností intenzifikace pecí ocelárenského typu. Na **obr. 1** je znázorněno období, kdy došlo k masivnímu vývoji elektrických obloukových pecí. Díky těmto inovacím mohou dnešní intenzifikované agregáty EOP v hutních ocelárnách konkurovat kyslíkovým konvertorům [6].



Obr. 1 Intenzifikace EOP v průběhu let [6]

Pece slévárenského typu (**obr. 2**) podle literatury [6] většinou disponují hmotností tavby do 10 t. Kvůli výše zmíněným důvodům bývá míra intenzifikace u pecí v českých slévárnách nižší než u pecí ocelářského typu, a to zejména při porovnání se zahraničními ocelárnami, ale neznamená to, že by nebyly intenzifikovány vůbec. Nejčastější intenzifikací bývá použití výkonnějších pecních transformátorů, přehřev vsázky kyslíko-palivovými hořáky, dmýchání kyslíku, zabudování poréznic tvárníc ve dnech pecí k dmýchání inertních plynů (argon, dusík), napěnění strusky a zkrácení doby vyhodnocení analýz chemického složení. **Tab. 1** uvádí shrnutí vlivu míry intenzifikace, jež bylo vytvořeno na základě dat z vybraných českých sléváren [6].



Obr. 2 Pec slévárenského typu [7]

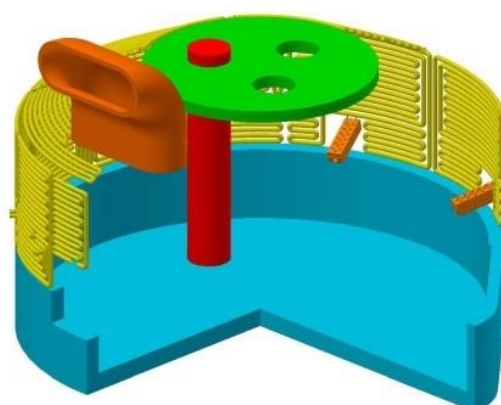
Tab. 1 Vliv intenzifikace pecí v českých slévárnách [6]

Stav intenzifikace	Doba tavby [min]	Spotřeba el. energie [kWh/t]	Spotřeba elektrod [kg/t]
Bez intenzifikace	160	590	4,0
Střední intenzifikace	135	550	3,5
Vysoká intenzifikace	110	500	3,0

Pece ocelářského typu se až do 60. let podobaly jak konstrukčně, tak i technologií výroby oceli pecím ve slévárnách. Na základě dobré finanční návratnosti však prošly všemi intenzifikačními opatřeními. Hmotnost jejich tavby dnes dosahuje nesrovnatelně vyšších parametrů než u pecí slévárenského typu. Na **obr. 3** je pec od společnosti Siemens VAI s hmotností tavby 315 t v turecké ocelárně Colakoglu Metalurji a.s. Tato pec patří k nejproduktivnějším na světě s výrobností okolo 2,5 milionu tun oceli ročně. Díky robustní konstrukci pecí ocelářského typu je možné implementovat mnohá opatření, která jsou u pecí slévárenského typu těžko uskutečnitelná, jako například využití tepla odcházejících spalin pro přehřev vsázky nebo chladících panelů místo stěn nad struskovou čarou, viz **obr. 4**. Panely se skládají z ocelových potrubních komponentů pokrytých z vnitřní části pece tenkou vrstvou nástřiku žáruvzdorného materiálu. Uvnitř potrubí proudí demineralizovaná voda. Celé řešení je umožněno pouze u výkonných pecí s velmi krátkou dobou tavby, protože dochází k vysokým tepelným ztrátám [6], [8], [9].

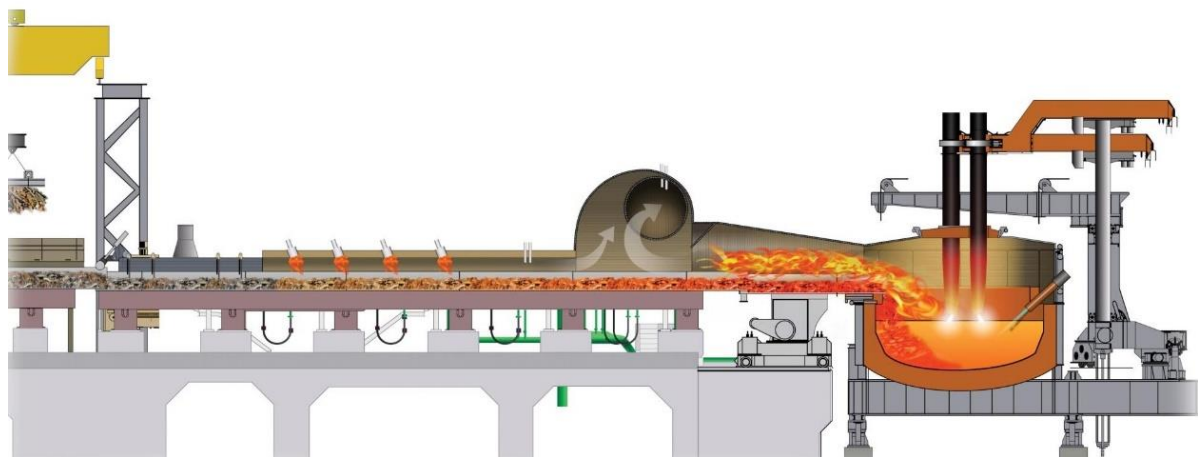


Obr. 3 Pec ocelářského typu [8]



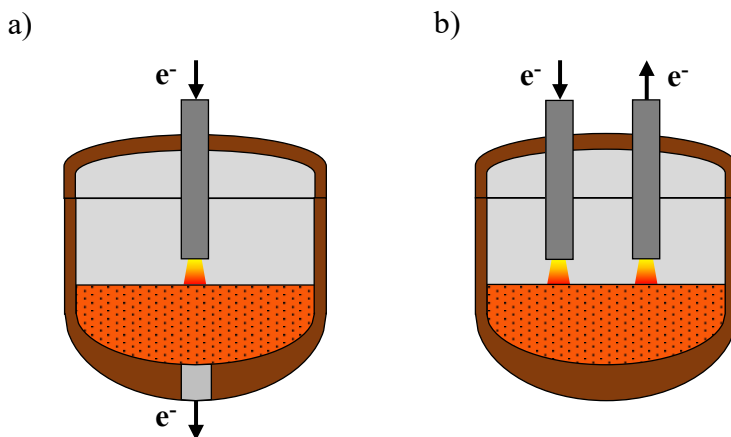
Obr. 4 Vodou chlazené panely EOP [10]

K současným trendům u ocelářských obloukových pecí patří zavádění nejmodernějších postupů sekundární metalurgie a vylepšování konstrukčních řešení pecí a jejich okolí. Jako například pochod Consteel, **obr. 5**, u kterého je vsázka pomocí dopravníku kontinuálně přiváděna do pece přes předehřívací tunel pecními spalinami a hořáky na zemní plyn. Právě kvůli nahrazování elektrické energie energií chemickou tyto pece dosahují optimálních hodnot ve spotřebě elektřiny, která činí pouze 315-390 kWh/t a spotřebě elektrod v rozmezí 1-1,85 kg/t [6].



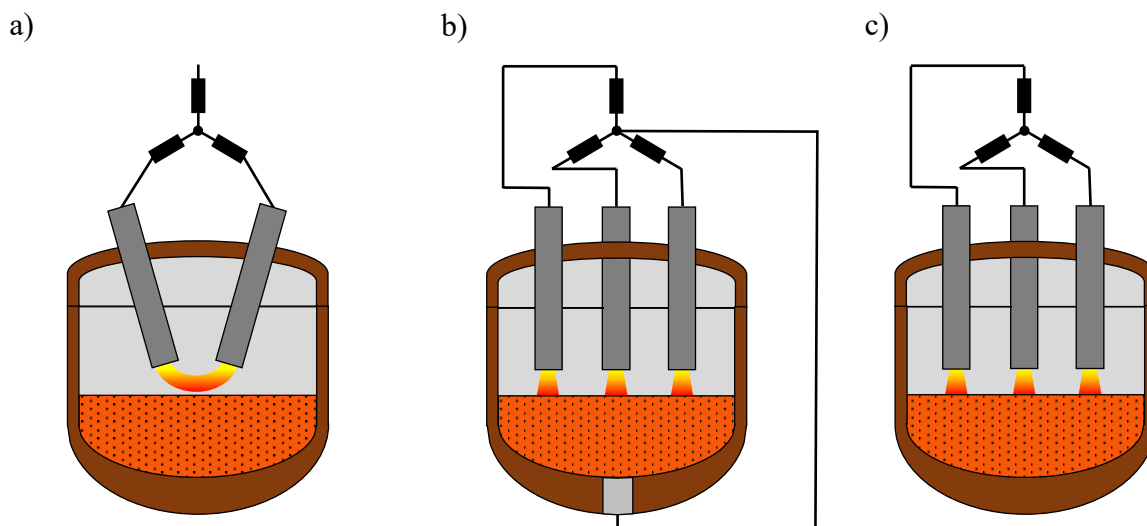
Obr. 5 Pochod Consteel [11]

Vlivem různých vývojových směrů se v dnešní době EOP mohou rozdělovat i podle typu napájení na pece napájené stejnosměrným proudem (DC) a střídavým proudem (AC). Pece napájené stejnosměrným proudem nejsou žádnou novinkou, první sestavené obloukové pece byly napájeny stejnosměrně, ale poté je vytlačily třífázové pece napájené střídavým proudem. Zařazení stejnosměrných EOP se obnovilo až v 80. letech. Stejnosměrné pece mohou mít dvě řešení. První řešení je možné vidět na **obr. 6a**. Jedna elektroda prochází víkem a funguje jako katoda. Anoda potřebná k vytvoření elektrického obvodu je zabudována ve dně, proto se označuje jako pec s vodivou nístějí. Druhé řešení využívá dvou elektrod procházejících víkem, přičemž jedna je katoda a druhá anoda, viz **obr. 6b**. Kvůli absenci elektrody ve dně se tyto pece nazývají jako pece s nevodivou nístějí. Z pohledu konstrukce i údržby jsou stejnosměrné pece jednodušší než pece napájené střídavým proudem. Výhodami jsou i nižší spotřeby elektrod, elektrické energie, žáruvzdorného materiálu a schopnost intenzivnějšího míchání lázně v nístěji pece [1], [6].



Obr. 6 Řešení stejnosměrných pecí [12]

Pece napájené střídavým proudem se dají dále rozdělit podle způsobu hoření oblouku na pece s přímo působícím obloukem a pece s nepřímo působícím obloukem. U pecí s nepřímo působícím obloukem, viz **obr. 7a**, se teplo z oblouku do vsázky přenáší pomocí sálání, zatímco u pecí s přímým působením oblouku hoří přímo mezi vsázkou (neboli mezi taveninou a elektrodami). Pece s přímým působením oblouku vyžadují tři elektrody, přičemž každá je připojená na jednu fázi. Podle vodivosti nístěje se rozlišují na pece s vodivou nístějí, viz **obr. 7b** a pece s nevodivou nístějí, viz **obr. 7c** [1], [6], [13].



Obr. 7 Řešení pecí napájených střídavým proudem [13]

1.1 Oceli na odlitky z elektrických obloukových pecí

Oceli jsou slitiny železa, uhlíku a dalších chemických prvků obsahující méně než 2,14 % uhlíku. Oceli je možno dělit na tvářené a oceli na odlitky. Oceli na odlitky mají obvykle obsah uhlíku nižší než 1,7 %. Pouze malá část produkce oceli jsou oceli na odlitky, podle literatury [2] tvoří pouze 1-2 %. Přitom většina typů tvářených ocelí má ekvivalentní typ v podobě ocelí na odlitky. Vlastnosti obou druhů ocelí jsou rozdílné i při stejném chemickém složení, protože u ocelí na odlitky velice záleží na rychlosti ochlazování a chemické heterogenitě z důvodu rozdílné schopnosti tuhnutí jednotlivých složek. V porovnání s tvářenými oceli vykazují mnoho výhod. Umožňují téměř nekonečnou variabilitu chemického složení a vynikající různorodost dosažených tvarů odlitků díky relativně dobré zabíhavosti. Proto se používají k výrobě převážně složitých součástí nebo součástí odolných proti opotřebení. Oceli na odlitky se běžně rozdělují podle množství legujících prvků na nelegované a legované. Hranice rozdělení se může lehce lišit podle použitých norem. V **tab. 2** je možné vidět rozdělení ocelí závisících na mezních obsazích legujících prvků dle normy ČSN EN 10020 v hmotnostních procentech. Norma ČSN EN 10293 označuje nelegované oceli jako uhlíkové [6], [14], [15].

Tab. 2 Rozdělení ocelí na legované a nelegované podle normy ČSN EN 10020 [6]

Prvek	Al	B	Bi	Co	Cr ¹⁾	Cu ¹⁾	La
Mezní obsah [%]	0,10	0,0008	0,10	0,10	0,30	0,40	0,05
Prvek	Mn ³⁾	Mo ¹⁾	Nb ²⁾	Ni ¹⁾	Pb	Se	Si
Mezní obsah [%]	1,65	0,08	0,06	0,30	0,40	0,10	0,50
Prvek	Te	Ti ²⁾	V ²⁾	W	Zr ²⁾	Ostatní ⁴⁾	
Mezní obsah [%]	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	
1), 2) Maximálně možný součet těchto prvků se rovná 70 % součtu jejich mezních obsahů.							
3) Při uvedení jen vyšší hodnoty obsahu Mn v oceli, se uvažuje mezní obsah 1,80 %.							
4) Vyjma C, P, S, N.							

K výrobě odlitků lze použít následující typy ocelí:

- Nelegované oceli – nesmějí přesáhnout u žádného prvku mezní hodnotu z **tab. 2**. Nejčastěji se jedná o oceli s obsahem uhlíku pouze 0,10-0,50 %. Nelegované oceli obsahující méně než 1,20 % manganu musejí splňovat pouze maximálně povolené obsahy fosforu a síry, další chemické prvky si slévárna udržuje v takových mírách, aby byly dodrženy předepsané mechanické hodnoty vyráběné oceli. Mezi nelegované oceli patří také oceli s obsahem manganu 1,60-1,80 %, které byly ve starých ČSN normách řazeny mezi nízkolegované. Odlitky z nelegované oceli bývají v současnosti často vytlačovány odlitky z litiny s kuličkovým grafitem, avšak ne všechny odlitky mohou být nahrazeny. Svoji pozici si proto nelegované oceli drží u odlitků s potřebou zaručitelnosti svařitelnosti nebo houževnatosti v záporných teplotách [6].
- Legované oceli – norma ČSN EN 10020 dále dělí na nízkolegované a vysokolegované. Nízkolegované oceli mají celkový součet legujících prvků nižší než 5 %, pokud je tato hranice přesažena, hovoří se o ocelích vysokolegovaných. Na základě legujících prvků se zavádí u nízkolegovaných ocelí označení, které pojmenovává oceli jako molybdenové, chrom-molybdenové a obsahující nikl. Dosažení stability karbidů u molybdenových a chrom-molybdenových ocelí se docílí přidáním vanadu v rozmezí 0,05 až 0,15 %. To ovlivní vlastnosti těchto ocelí zejména při vysokých teplotách. Na vysokolegované oceli jsou kladeny vysoké nároky v podobě korozivzdornosti, oxidační odolnosti, otěruvzdornosti, žáruvzdornosti, vysoké houževnatosti při nízkých teplotách aj. Těchto a jiných nároků na odlitky z legovaných ocelí se dosáhne známými kombinacemi legujících prvků, viz **tab. 3**. Narozdíl od nelegovaných ocelí, legované oceli nemají většinou rovnocennou náhradu [6], [15], [16].

Tab. 3 Vliv legujících prvků na vlastnosti odlitků [6], [15]

Legující prvky	Ovlivněné vlastnosti odlitků
Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W	zlepšení pevnosti a tvrdosti bez výrazného zhoršení houževnatost
Cr, Mn, Mo, V, Ni, B, W	zvýšení prokalitelnosti
Ti, Nb, Ta, V	dosažení jemnozrnné struktury a zmenšení sklonu k růstu zrna za vyšších teplot
Cr, Ni, Mo, W, Cu, Ti, Nb, N	korozivzdorné a žáruvzdorné oceli
Cr, Mo, V, W	žáropevné a otěruvzdorné oceli

Nejvyužívanější vysokolegované oceli jsou oceli korozivzdorné, jejichž použitím se sleduje zvýšení odolnosti proti korozi za běžných i zvýšených teplot. Tím zaručují i delší životnost a bezpečnost odlitku. Zvýšení korozivzdornosti je způsobené zejména pasivací povrchu při výskytu alespoň 11,5 % chromu v matici. Další prvky, které znatelně ovlivňují korozivzdornost, jsou uhlík, jehož obsah musí být u korozivzdorných ocelí nízký, nikl, molybden, mangan, případně i dusík a měď. Korozivzdorné oceli je možné dělit podle normy ČSN EN 10283 na austenitické, plně austenitické, martenzitické, feritické, a feriticko-austenitické. Austenitické a plně austenitické oceli se rozlišují podle obsahu niklu. Zatímco plně austenitické oceli obsahují od 24 do 30,5 % niklu, tak austenitické oceli pouze 8 až 12 % niklu, přičemž se ve struktuře oceli kromě austenitu může nacházet i fáze sigma. Oproti martenzitickým a feritickým ocelím disponují větší korozivzdorností. Austenitickým ocelím nevyhovuje prostředí, kde se vyskytují oxidy síry. Martenzitické oceli mají díky vysokému obsahu chromu (11,5 až 17 %) při malých rychlostech ochlazování tetragonálně prostorově středěnou mřížku. Nebezpečím při jejich použití je pokles houževnatosti, který vzniká při ohřevu na teploty od 400 do 550 °C. Martenzitické oceli se tepelně zpracovávají (normalizační žíhání, kalení, popouštění), přičemž poté dosahují vysokých pevností. Zároveň s tím poskytují dobrou svařitelnost. Proto se z nich často vyrábějí svařované součásti jako vodní turbíny. Feritické struktury u ocelí s obsahem uhlíku pod 0,08 % vznikají při obsahu chromu nad 17 %. Pokud by obsahovaly více uhlíku, byly by křehké. Tepelně se nezpracovávají, jejich pevnost je vyšší než u nelegovaných ocelí. Nemohou být použity v oblasti teplot od 400 do 600 °C, protože při teplotě 475 °C dochází ke křehnutí. Feriticko-austenitické oceli mají ve struktuře zhruba stejný podíl feritu, jako austenitu. Obsahují od 21 do 27 % chromu. Jejich korozní odolnost snižují anionty chloru, jodu a chromu. Při teplotách nad 300 °C klesá jejich strukturní stabilita, proto jsou vhodné na práci do 300 °C [6].

1.2 Vliv prvků na průběh tavby a vlastnosti odlitků

Jak již vyplývá z definice oceli, kromě uhlíku a železa obsahuje i další kovové či nekovové prvky. Ty mohou pocházet ze vsázky, přísad, vyzdívky nebo atmosféry. Do oceli přecházejí v průběhu tavby a ovlivňují vlastnosti vyrobeného odlitku. Pod pojmem vlastnosti oceli se myslí její materiálové charakteristiky, které se získávají pomocí nejrůznějších experimentálních zkoušek. Jejich výsledky jsou velmi důležité, protože zaručují chování zkoušené oceli a mohou doporučit nebo předurčit její použití. Slévárny si u standartních odlitků vystačí pouze se třemi zkouškami, a to se zkouškou rázem v ohybu, kterou se získá hodnota houževnatosti, zkouškou tahem, ze které se dostanou hodnoty smluvní meze pevnosti, meze kluzu, tažnost či zúžení, a zkouškou tvrdosti podle Brinella [15], [16], [17].

V následujících bodech budou uvedeny prvky s nejnápadnějšími vlivy:

- Uhlík – je obsažen ve všech ocelích. Má totiž významný vliv na vlastnosti železa, které je v podobě čistého kovu měkké s nízkou pevností. Přidáním jen malých koncentrací uhlíku do železa se dosáhne zlepšení materiálových vlastností meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti, kontrakce a tvrdosti. Jeho obsah v odlitku ovlivňuje také svařitelnost a obrobitelnost. Se zvyšujícím se obsahem roste pevnost odlitku, ale klesá jeho plasticita a houževnatost. Uhlík v odlitku pochází ze vsázky nebo nauhličovadel. Při výrobě v elektrických obloukových pecích se jako nauhličovadla používají zejména různé druhy koksu. Pokud je ve vsázce obsažen vysoký podíl uhlíku, dochází k menšímu propalu železa a nižší spotřebě elektřiny. Lepšímu průběhu tavby na druhou stranu svědčí nízký podíl uhlíku ve vsázce. Aby byl dosažen ideální kompromis, uvádí se nauhličovat vsázku okolo 1 %.

- Mangan – je součástí všech ocelí. V případě, že jeho hodnota v oceli nepřesahuje 1,65 hmot. %, viz **tab. 2**, tak se nepovažuje za legující prvek. Pokud tavenina po natavení obsahuje mnoho manganu, výrazně se zbrzdí její odfosfoření a uhlíkový var. U nelegovaných ocelí zvyšuje jak pevnost, tak houževnatost. Houževnatost ovlivňuje jeho schopnost vázat síru, což vede k lepšímu tvaru vměstků. Zdrojem manganu k dolegování nejčastěji bývá feromangan a silikomangan. Do výpočtu množství manganu jako legovacího prvku je nutné kromě propalu zahrnout i to, že ne všechny manganu skončí v lázni, ale i ve strusce.
- Křemík – se používá v legovaných ocelí na odlitky jako dezoxidační přísada. Zdrojem bývá přidání ferossilicia nebo silikokalcia. Křemík napomáhá i zlepšení žáruvzdornosti, proto se přidává do korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí jako legovací prvek.
- Fosfor – je rozpuštěn ve feritu a jeho vliv je spojen s obsahem uhlíku. Při obsahu uhlíku do 0,01 % se uvádí, že zvyšuje tažnost. Pokud je však obsah uhlíku větší, vyvolává popouštěcí křehkost, zhoršuje vrubovou houževnatost, sklon k lámavosti zastudena a tvařitelnost. U vysoce pevných ocelí má za následek snížení meze únavy a zvýšení sklonu ke vzniku trhlin, prasklin a křehkých lomů. Fosfor může pocházet jak ze vsázky, tak i z feroslitin, které se používají v zavádění prvků jako mangan, křemík, chrom aj.
- Síra – je v ocelích na odlitky nežádoucím prvkem. Její výskyt v EOP je především ze vsázky a z dalších přísad (legujících a struskotvorných). Síra má negativní vliv na vrubovou houževnatost, tvařitelnost za tepla, cementování, korozní odolnost, svařitelnost a na sklon ke vzniku trhlin.
- Chrom – je společně s manganem nejčastěji používaným legovacím prvkem. Jeho obsah ve vsázce komplikuje oxidaci a při vysokém obsahu dokonce zabraňuje odfosfoření. Proto se doporučuje maximální podíl chromu ve vsázce 0,50 %. Při legování chromem se používají ferochromy, jež se rozdělují podle obsaženého obsahu uhlíku. Před vhozením však musí být dobře dezoxidovaná lázeň i struska, z důvodu jinak velkého propalu.
- Dusík – bývá ve většině ocelí na odlitky nežádoucím prvkem, zejména v nelegovaných a nízkolegovaných ocelích. Pochází z pecní atmosféry a vyskytuje se ve formě nitridů. Způsobuje stárnutí oceli, popouštěcí křehkost a má negativní vliv na některé vlastnosti, nejvíce na tažnost a vrubovou houževnatost. U ocelí obsahující titan nebo hliník nedochází ke stárnutí, protože mají k dusíku vyšší afinitu než železo. Dusík je občas používán záměrně buď k dmýchání místo argonu, nebo u některých vysokolegovaných ocelí jako legující přísada nahrazující nikl.
- Kyslík – je prvek mající značnou důležitost při výrobě oceli. Jeho přivedením do taveniny v oxidačním údobí se odstraňují nežádoucí prvky. Po oxidaci je však nutné snížení kyslíku v oceli, jinak by při tuhnutí mohlo dojít k reakci s uhlíkem, jejímž produktem je oxid uhelnatý, který vytváří bubliny a bodliny. Ke snížení kyslíku v tavenině se používají dezoxidační prvky, které mají ke kyslíku vyšší afinitu než železo. Při dezoxidaci se vytváří nerozpustné oxidy, jež přecházejí do strusky. Pokud by oxidy setrvaly v tavenině, došlo by vytvoření vměstků v oceli, které při větších množstvích zhoršují zabíhavost, mechanické a korozní vlastnosti.
- Vodík – je v ocelích na odlitky nežádoucí. Zdroje vodíku mohou být různé, nejčastěji se však dostává do oceli při výrobě ze vsázky, vápna či z vodní páry v atmosféře pece. U odlitků zhoršuje houževnatost, bez zvýšení pevnosti, způsobuje vznik vnitřních trhlin a bublin [6], [15], [16], [18].

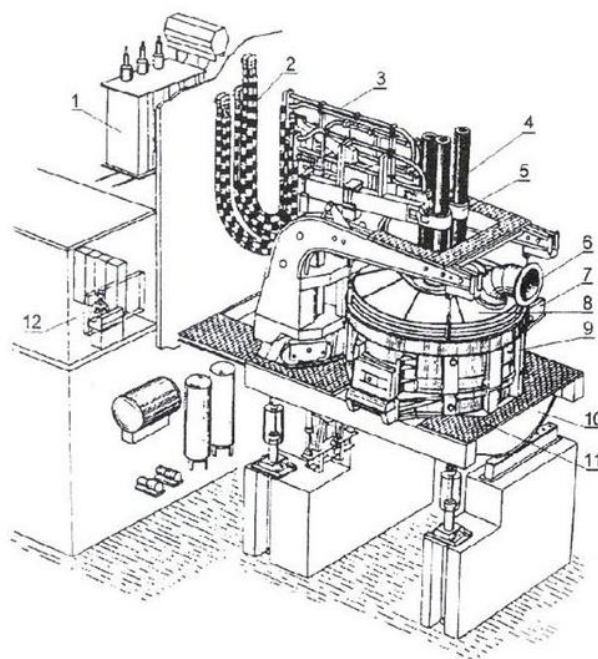
2 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC SLÉVÁRENSKÉHO TYPU

K výrobě ocelových odlitek se v České republice nejčastěji používají třífázové obloukové pece slévárenského typu se zásaditou vyzdívkou. Nejrozšířenějším typem jsou 5t EOP od již zaniklé společnosti ČKD Praha s označením OTO 5. Tyto pece nejsou mnohdy vůbec či jen částečně modernizovány a intenzifikovány, protože české slévárny se potýkají s omezenou návratností. Proto v mnoha menších slévárnách mají pece téměř shodnou podobu, jakou měly v době jejich zavedení do provozu [6].

2.1 Konstrukce

Elektrické obloukové pece jsou velmi sofistikovaná zařízení, která se skládají z mnoha částí.

Obr. 8 schematicky zobrazuje jejich základní části. Pec obvykle odebírá elektrickou energii ze sítě o napětí 22 kV, jež je vedené přes hlavní vypínač a tlumivku do pecního transformátoru (1). Transformované napětí je přiváděno krátkou sítí (2) a chladícím potrubím (3) k elektrodám (4). Elektrody jsou sevřeny přitlačným zařízením v držáku elektrod (5). Obloukové pece mají odsávání (6), které odvádí plyny vzniklé při tavbě. Pro zajištění pracovních úkonů je vlastní pec možno naklápět ve směru odpichového otvoru (7) nebo ve směru pracovních dvířek, kterými se stahuje struska a sázejí struskotvorné přísady a feroslitiny. Pracovní dvířka jsou umístěna na opačné straně pece. Víkem pece (8) procházejí elektrody do pecního prostoru (9). Naklápění je umožněno pomocí kolébky (10) připevněné ke dnu pece (11). Chod pece při tavbě je řízen z kontrolní kabiny počítačem s příslušným softwarem (12) [6], [20].



Obr. 8 Schéma elektrické obloukové pece [19]

Části sestávající elektrické obloukové pece lze rozdělit na elektrická a mechanická zařízení. Elektrická zařízení podléhají neustálému vývoji, jelikož mají přímý vliv na výrobnost, efektivitu a hospodárnost dané pece. K elektrickým zařízením patří:

- Hlavní vypínač – skládá se ze dvou přístrojů: z odpojovače a vysokonapětového vypínače. Odpojovač umožňuje úplné odpojení elektrického obvodu pece. Odpojovač se využívá jen zřídka, především při údržbě pece. Vysokonapětový vypínač umožňuje spuštění a vypnutí pece za provozu. Vzhledem k velikému namáhání přístroje se doporučuje vypínat pec pouze při minimálním příkonu. Z důvodu vzniku vysokých teplot musí být chlazen.
- Tlumivka – slouží k tlumení proudových nárazů vznikajících při natahování tuhé vsázky a ke stabilizaci hoření elektrického oblouku. Stabilizaci elektrického oblouku dosahuje zvýšením indukčního odporu, tím ale dochází ke značným elektrickým ztrátám. Proto se hned po natavení vypíná. Tlumivka může být i přímou součástí pecního transformátoru. Její výkon se odvíjí od výkonu samotné pece, může být chlazená olejem nebo vzduchem.

- Pecní transformátor – statický elektrický stroj, který převádí vysoké napětí, případně velmi vysoké napětí, které odebírá slévárna ze sítě, na napětí použitelné k samotnému tavení. Při navrhování pecního transformátoru jsou kladeny vysoké požadavky na mechanickou odolnost, jelikož je často vystavován zkratům a přetížením. Krátkodobě musí vydržet až 100% přetížení. Pecní transformátory mají dvě vinutí, primární a sekundární. Na primárním vinutí bývá velké množství odboček, které umožňují přepínáním regulovat sekundární napětí v nejméně čtyřech stupních. Rozpětí sekundárních napětí se pohybuje v rozmezí 95–260 V. Správný rozsah sekundárních napětí je důležitý, protože souvisí s délkou oblouku mezi elektrodou a vsázkou. Předností transformátorů jsou nízké provozní náklady a vysoká účinnost. K jejich chlazení se u starších typů používá vzduch, u novějších olejová lázeň.
- Krátká síť – tvoří spojovací článek soustavy. Skládá se z pružných měděných vodičů navazujících na sekundární vinutí pecního transformátoru, měděných pásnicových přívodů, držáku elektrod a chladících kroužků. Délka krátké sítě musí být co nejkratší, protože při přenosu velkého výkonu při nízkém napětí dochází ke značným ohmickým ztrátám. Držák elektrod má pevnou a pohyblivou část. Pro jejich výrobu se musí použít nemagnetické materiály. Držák je chlazen vodou, což umožňuje jeho delší životnost. Sevření elektrod mají za úkol hydraulické nebo pneumatické stahovače, které se ovládají na dálku. Chladící kroužky mohou být zapuštěny ve víku nebo umístěny na něm. Slouží jako těsnící prvek mezi elektrodami a víkem. Vzhledem k tomu, že uzavírají magnetický obvod, musejí být vyrobeny z nemagnetických materiálů. Z důvodu vysokých teplot jsou chlazeny vodou.
- Elektrody – bývají často považovány jako poslední část krátké sítě. V elektrickém obvodu mají důležitou roli, poněvadž přivádí elektrickou energii do prostoru pece. Tvar elektrod je válcový a jejich povrch je dokonale hladký, aby byl umožněn co nejlepší styk držáku s elektrodou. Jelikož v elektrodách a kontaktech se ztrácí okolo 10 % energie, tak je požadována vysoká elektrická vodivost elektrodového materiálu při pracovních teplotách, aby se zabránilo dalším ztrátám. Materiál elektrod musí mít také vysokou pevnost, a to jak při klidové, tak při pracovní teplotě, malou teplotní roztažnost a schopnost netavit se při pracovních teplotách, aby nedocházelo k znečištění lázně. Struktura elektrod nesmí být pórovitá kvůli případné oxidaci rozžhavených konců. Za provozu dochází ke zkracování elektrod v důsledku upalování. Aby nezůstávaly nevyužité zbytky, tak se pomocí šroubových spojů nastavují zbytky elektrod elektrodami novými, to je možné vidět na **obr. 9**. Spoje musí být pevné a dokonale obrobené, aby nedošlo k vůlím, jež by ovlivnily zvýšení odporu elektrody. Ideálním materiálem na výrobu elektrod, který splňuje všechny nároky, je uhlík. Uhlíkové elektrody se vyrábějí z antracitu (druh černého uhlí), elektrodové drti, grafitu a pojiva. Směs se vylisuje do požadovaného tvaru



Obr. 9 Grafitová elektroda [21]

a následně vypálí při teplotách kolem 1000 °C. Uhlíkové elektrody nacházejí uplatnění při výrobě uhlíkových ocelí. Elektrody grafitové jsou vyráběny stejným postupem jako uhlíkové, jen po vypálení se ještě grafitizují. Grafitizace probíhá při teplotě okolo 2700 °C v ochranné atmosféře, kdy dochází k přeměně amorfního uhlíku na grafit. Průměrná spotřeba elektrod na tunu vytavené oceli se pohybuje okolo 1,5 až 5 kg v závislosti na intenzifikaci elektrických obloukových pecí [1], [6], [20].

Na opačném pólu z hlediska vývoje stojí zařízení mechanická, která se v minulosti měnila jen minimálně. Jako mechanické zařízení se označují:

- Vana pece – bývá svařena z ocelového plechu. Vanu pece tvoří plášť a dno. Vnitřní oblast pece je vyzděna žáruvzdornými materiály. Vzhledem k vysoké hmotnosti vyzdívky a rozžhaveného kovu při tavně musí být celá konstrukce dimenzována a následně vyztužena žebry. Plášť v oblastech odpichového otvoru a pracovních dvířek se zesiluje navařováním plechů, protože zde dochází k velkým teplotním rozdílům. U odpichového otvoru navazuje na plášť odpichový žlab. Žlab by měl mít co nejkratší vzdálenost, aby nedocházelo k poklesu teploty taveniny a snížila se sekundární oxidace. Pracovní dvířka jsou ovládána hydraulicky nebo elektrohydraulicky a chlazena vodou. Ve dně většiny pecí jsou zabudovány dmyšny v podobě opláštěvaných pórovitých keramických tvárnic pro dmýchání inertních plynů, nejčastěji argonu nebo dusíku, které pomáhají udržovat tepelnou i chemickou homogenitu lázně. Díky lepšímu přenosu tepla se zkracuje i délka tavby a s tím související nižší spotřeba elektrod a menší opotřebení vyzdívky.
- Naklápěcí zařízení – mají instalované všechny moderní pece. Díky tomu je umožněno dvoustranné naklápění. Naklápěcí zařízení se zpravidla vyrábějí na principu dvou rozdílných mechanismů, po kterých se odvaluje kolébka připevněná na dně pece. Prvním mechanismem je odvalování po kolejnici a druhým odvalování po opěrných kladkách. Oba mechanismy se konstruují tak, aby je bylo možné naklopit o 35 až 40° na odpichové straně a o 15° na straně pracovních dvířek. Mechanismus pohání hydraulické zařízení, které je umístěno pod dnem pece. Aby se zabránilo jejich poškození při případném protavení dna pece nebo stříkající strusce či oceli, je nutné mít pohonné jednotky chráněny kryty.
- Víko pece – je svařeno ze silného ocelového plechu. Vytváří kruh dosedající na plášť pece. Kvůli správnému dosednutí víka na plášť je zkonstruován v plášti žlábek a na víku navařen nůž. Tato soustava představuje dokonale jednoduchý zámek. Vnitřní oblast je podobně jako vana pece vyzděna žáruvzdorným materiálem. U některých, zejména větších pecí, bývají některé části víka chlazeny vodou, což zvyšuje životnost vyzdívky.
- Technické okruhy umožňující chod pece – charakterizují chladicí, hydraulické a odsávací okruhy a okruhy technických plynů. Chladicí okruhy používají jako chladicí médium vzduch, vodu a olej. Často se využívá kombinace médií, protože každé má své přednosti a využití. K chlazení dvířek, rámu, držáků a kabelů se používá jako chladicí médium voda. Z důvodu odpařování vody je nutné doplňovat systém vodou novou, která musí splňovat maximální tvrdost do 7 °. Teplota vody v systému nesmí překročit 60 °C, jinak dochází k usazování vodního kamene, které může způsobit propálení chladicí armatury. Pece mají hydraulické naklápění a některé hydraulickou regulaci elektrod (může být i elektromechanická), tudíž zde musí být hydraulický rozvod. V hydraulických okruzích se používá olej, který je tlačěn čerpadly do tlakového rozvodu a z něho do všech požadovaných operací. Okruhy technických plynů zprostředkovávají rozvod stlačeného vzduchu, argonu a kyslíku. Vzhledem k velkému množství prachových částic, které se při tavení oceli uvolňují, bylo nutné najít efektivní

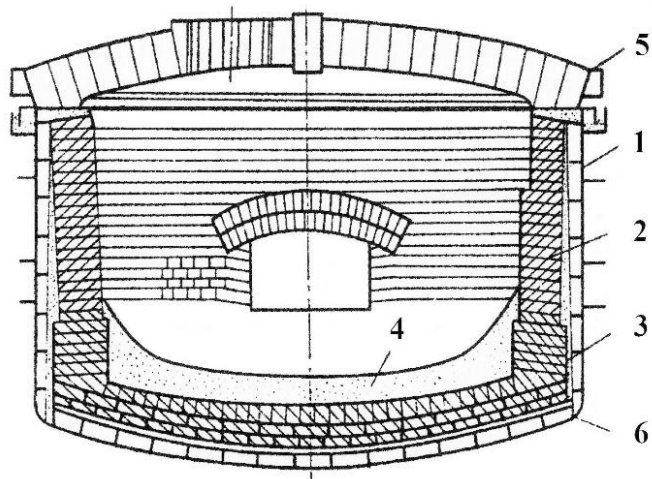
řešení jejich odsávání z prostoru elektrické obloukové pece. Proto se otvorem ve víku EOP připojeným na tahu-tlakový okruh zajišťovaný ventilátory odsává vzduch obsahující prachové částice. Ten je přiváděn přes chlazení do filtru. Chlazením se předchází možnému vzplanutí filtru vlivem vysokých teplot. Po zachycení prachových částic se vzduch většinou vypouští do ovzduší ve venkovních prostorách slévárny [6], [20].

2.2 Vyzdívky

Vyzdívky mají podstatný vliv na samotný průběh tavby, jejich kvalita souvisí s metalurgickými možnostmi elektrické obloukové pece. Stav vyzdívek je proto věnována značná pozornost vyžadující nemalé náklady. Materiály vyzdívek musejí splňovat kritéria zaručující nízkou tepelnou vodivost, odolnost vůči vysokým teplotám, relativně rychlým teplotním změnám, poškození a chemickému působení tavených prvků. Podle vnitřního prostoru pece mohou mít vyzdívky válcový nebo komolý kuželový tvar. V České republice se většinou objevují vyzdívky s komolým kuželovým tvarem, které mají šikmé stěny a poskytují snadnější opravitelnost. Vyzdívky tavícího agregátu tvoří půdu, stěny a víko a mohou být zásadité nebo kyselé [1], [6], [20], [22].

Zásadité obloukové pece jsou nejčastějším typem elektrických obloukových pecí. V českých slévárnách se jiné nepoužívají. Zásadité vyzdívky jsou na bázi magnezitu (MgO) nebo chrommagnezitu ($MgO \cdot Cr_2O_3$) a umožňují odfosfoření a odsíření. Na **obr. 10** je

schematicky znázorněna vyzdívka elektrické obloukové pece, jež je vyzděna po celém obvodu vany (6). Samotná vyzdívka je tvořena tepelnou izolací, vlastní vyzdívkou pece a pracovní vrstvou vyzdívky pudy pece. Tepelnou vrstvu (1), někdy nazývanou jako izolační, tvoří žárovzdorná folie, izolační desky na bázi Al_2O_3 nebo tvárnice z pěnového šamotu, které jsou nejčastější. Tloušťka tepelné vrstvy z pěnového šamotu je přibližně 70 mm. Pokud by se tloušťka vyrobila příliš silná, mohlo by docházet vlivem vysokých teplot k rychlému úbytku vyzdívky a zvyšování nákladů. Vlastní vyzdívka u zásaditých obloukových pecí je vyzděna z magnezitových tvárníc (2 a 3), jež mohou být tvořeny z různých typů magnezitů. Tvárnice jsou skládány formou pásmové vyzdívky, která zajistí vzájemné překrytí. Během skládání tvárníc je nutné mít na paměti tepelnou dilataci vyzdívky při tavbě, proto se mezi tvárnice vkládají dilatační pásy, které jsou nejčastěji na bázi dehtu. Magnezitové tvárnice jsou u pudy pece následně vydusány magnezitovým slínkem nebo přebraným zbytkovým drceným materiálem ze stěn vyzdívky (4). Dusání probíhá nasucho vibrátorem a optimální vrstva se pohybuje mezi 150 až 250 mm. K vyzdívání víka pece (5) se používají většinou chrommagnezitové tvárnice, ale čím dál častěji se aplikuje i provedení litých žárobetonů na bázi korundu. Ve víku se nacházejí tři otvory pro elektrody. Z důvodu delší životnosti víka se do otvorů instaluje chladič systém v podobě kroužků. V okolí pecních dvířek a odpichového otvoru se střídají teploty, proto jsou sloupky pecních dvířek a odpichového otvoru vyzděny chrommagnezitem, který lépe zvládá neustálé střídání teplot. Chrommagnezit



Obr. 10 Vyzdívka zásadité obloukové pece [6]

ve víku se nacházejí tři otvory pro elektrody. Z důvodu delší životnosti víka se do otvorů instaluje chladič systém v podobě kroužků. V okolí pecních dvířek a odpichového otvoru se střídají teploty, proto jsou sloupky pecních dvířek a odpichového otvoru vyzděny chrommagnezitem, který lépe zvládá neustálé střídání teplot. Chrommagnezit

však nesní přijít do styku s tekutým kovem, protože by mohlo dojít k vyredukování chromu do kovu [6], [22].

Kyselé obloukové pece mají vyzdívky na bázi SiO_2 . Proces vyzdívání kyselé pece se příliš neliší od procesu vyzdívání zásadité pece vysvětlené výše, proto tomu není nutné věnovat další pozornost. V České republice se v současnosti nepoužívá žádná EOP s kyselou vyzdívkou. Jiná situace může být ve slévárnách v Rusku a USA, kde využívají určitých výhod, které kyselé obloukové pece přinášejí. Jejich výhodou jsou nižší zpracovatelské náklady, jež mohou vést k poklesu celkových nákladů. Tavenina z kyselých obloukových pecí také obsahuje méně vodíku. Vhodnost těchto pecí je v přerušovaném provozu, protože zdivo na bázi SiO_2 je odolnější vůči kolísání teplot. Z hlediska mechanických vlastností vykazují oceli z kyselých pecí nižší houževnatost než ty vyrobené v zásaditých pecích, přestože mají stejné chemické složení a tepelné zpracování. Dalšími nevýhodami tohoto typu pecí je nemožnost odfosfoření a odsíření, kvůli čemuž je zapotřebí pracovat se známým chemickým složením vsázky, a neschopnost vyrábět vysokolegované chromové a manganové oceli [6].

2.3 Elektrický oblouk

Zdrojem tepla v elektrických obloukových pecích je zejména elektrický oblouk. Elektrický oblouk vzniká hořením mezi elektrodami a vsázkou, viz **obr. 11**. Jeho teplota dosahuje až $4000\text{ }^\circ\text{C}$. K zapálení oblouku dochází tehdy, když se elektrody dostanou do blízké vzdálenosti se vsázkou. Vlivem silného elektrického pole od elektrod se ionizují částice vzduchu, které vytvoří vodivé prostředí (tzv. „vodivá cesta“) k přeskočení oblouku mezi vsázkou a elektrodami. V průběhu tavby je nutné regulovat délku oblouku. Proto se

u obloukových pecí používá automatická regulace, která mění elektrický výkon, resp. sekundární napětí. Skládá se z pohonné jednotky korigující výšku elektrod od lázně a regulačního zařízení, které řídí průběh tavby podle nastaveného režimu pece. Pokud dojde ke kontaktu elektrod se vsázkou třeba vlivem jejího padání, tak nastane zkrat. Tehdy přichází na řadu regulace, která zvedne elektrody do požadované výšky a nastaví délku oblouku podle nastaveného režimu. Podle použité pohonné jednotky zdvihu elektrod se rozdělují automatické regulace na elektrohydraulické a elektromechanické.

Z důvodu působení elektrického oblouku pouze na hladinu lázně dochází v tavenině k teplotní heterogenitě. Aby se teplotní heterogenita v objemu taveniny

částečně vyrovnávala, je vhodné mít instalované dmýchání inertních plynů porézní tvárnici. Na hladině jinak nastává lokální přehřátí kovu, které může zapříčinit odpařování některých kovů či jejich oxidů. Během tavení se z elektrického oblouku odděluje vodík a dusík, oba prvky se rozpouští v tavenině. Jejich obsah se snižuje následným uhlíkovým varem. Při tavení elektrickým obloukem je potřeba brát v úvahu nauhličení taveniny, jelikož vlivem vysokých teplot oxidují zrníčka grafitu v elektrodách a ty posléze pronikají do lázně [6], [20].



Obr. 11 Tavení pomocí elektrického oblouku [23]

2.4 Průběh tavby oceli na odlitky v zásadité EOP

Samotný průběh tavby se může rozdělit na šest základních technologických údobí. Každé údobí je dáno souhrnem metalurgických postupů, energetických režimů a časového harmonogramu. Při sečtení časového úseku každého údobí se dostává celková doba tavby. Tavba se dá vést několika technologickými způsoby, z nichž nejznámější jsou:

- Jednostrusková technologie – vhodná k výrobě oceli zejména z legovaného materiálu. Při dosažení vsázky nelegovaným odpadem musí být obsah fosforu nižší než v legovaném materiálu. Ve vsázce nesmí být přítomny nekovové přísady, které by vedly k vytvoření většího množství strusky. Tavenina se nauhličuje o min. 0,30 % C nad horní hranici určené normou vyráběné oceli. Nejčastěji se k tomu používá koks. Nauhličení zaručí odplynění taveniny během uhlíkového varu. Oxidace se uskutečňuje dmýcháním kyslíku po dosažení teploty určené z obsahů chromu a uhlíku ve vsázce. Po jeho skončení se struska nestahuje. Odebere se vzorek na analýzu chemického složení. Pokud analýza vyhoví standardům, následuje dezoxidace strusky pomocí koksu, ferosilicia, silikochromu nebo silikomanganu. Jednostrusková technologie se používá zejména u moderních agregátů, ve slévárnách není tak častá. Její aplikací se dosahuje více než 90% zachování chromu ze vsázky.
- Dvoustrusková technologie – nejčastější způsob vedení výroby oceli na odlitky ve slévárnách, při kterém se pracuje s oxidační a redukční struskou. Oxidační struska se stahuje na konci oxidačního údobí, ve kterém se snižuje obsah uhlíku, fosforu a plynů v tavenině. Nahozením redukční strusky začíná údobí redukce, v němž se provádí dezoxidace oceli, odsíření a konečná úprava chemického složení a teploty. Níže popisovaná tavba je vedená dvoustruskovou technologií [6], [20].

2.4.1 Údobí opravy

Po každé tavbě je nutné zkontrolovat stav vyzdívky, případně rychle opravit její poškození. Vytavená poškození se jinak zvětšují a následná oprava může zapříčinit delší odstávku pece, což vede k finančnímu prodražení výroby. Opravy vyzdivek se podle náročnosti dělí na meztavbové, střední zednické a velké zednické [20].

Střední a velké zednické opravy se dělají na odstavené studené peci. Při velkých zednických opravách se vybourávají stěny, někdy i půda pece a dochází k vytvoření kompletně nové vyzdívky. Časový interval mezi velkými zednickými opravami se odvíjí dle náročnosti taveb, protože rozdílné tavby mají odlišný vliv na poškození vyzdívky. Meztavbové opravy probíhají během kampaně (na teplé peci) a měly by trvat co nejkratší čas, aby nedocházelo k vytrácení tepla z vyzdívky, které je nutné k připečení opravárenského žárovzdorného materiálu. Opravené oblasti jsou náchylnější k poškození, proto zejména při sázení je nutné klást velký důraz na to, aby se nepoškodily. Jako opravárenský materiál se používají magnetické hmoty o zrnitosti 0 až 6 mm [6], [20], [25].

Než začne samotná meztavbová oprava vyzdívky, je nutné z ní odstranit zbytky strusek a oceli z předchozích taveb. Tím se zaručí dostatečné připečení opravárenského materiálu. Odstranění zbytků se provádí ocelovou tyčí, kyslíkovým plamenem nebo trháním za pomoci licího jeřábu. Vrstva opravárenského materiálu by neměla přesáhnout tloušťku 20 mm. Připečení k vyzdívce trvá okolo 15 minut. V dnešní době se k opravám využívá metoda torkretace žárovzdorných materiálů [20].

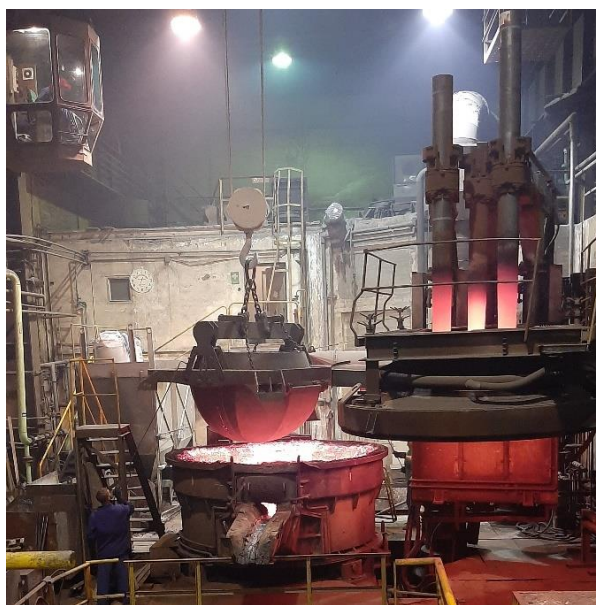
2.4.2 Příprava a sázení vsázky do pece

Při tavení ocelí na odlitky slouží jako vsázková surovina ocelový odpad, vratný materiál (tj. nálitky, vtoky a slévárenské zmetky) a výjimečně ocelářské surové železo. Druh a poměr vsázkového materiálu je volen dle druhu vyráběné oceli. Při tavně legované oceli je možné přidat do vsázky molybden a nikl. Největší část vsázky obvykle tvoří ocelový odpad, protože má přesně známé chemické složení. Ocelový odpad se dělí podle jakosti, od níž se odvíjí i nákupní cena. Dle značky vyráběné oceli se vybere typ ocelového odpadu, kterým se docílí nejlevnější výrobní ceny s požadovanými hodnotami. Z důvodů negativních vlivů při výrobě nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je potřeba věnovat zejména pozornost P, S, Cr, Ni, Cu, Sn, Sb, As, Pb a různým emulzím a olejům ve vsázce. Při překročení mezní koncentrace zmíněných prvků u daného typu oceli dochází ke zhoršení mechanických vlastností oceli. Další nežádoucí složkou vsázky mohou být oxidy, které přivádějí do taveniny zejména vodík a dusík. Do vsázky je vhodné přidat vápno kolem 2,5 % hmotnosti vsázky, tím se docílí převedení části odfosfoření z údobí oxidačního do údobí tavení. Vsázka, jakožto základní tavící surovina, má významný vliv na další průběh tavy [6], [20], [24], [25].

Vsázka je sázena do pece sázcím košem, což umožňuje odklopné víko pece viz **obr. 12** a **obr. 13**. Před samotným sázením je však potřeba ji upravit na vhodnou velikost. Kontrola vsázkového materiálu se provádí proto, aby neobsahovala součásti z neželezných kovů, případně jejich slitin, které mohou způsobit zhoršení kvality vyráběné oceli. Aby se mohlo zaručit správné proběhnutí uhlíkového varu po natavení, je třeba alespoň přibližně zajistit obsah uhlíku ve vsázce. Rozložení vsázky v koši nemůže být nahodilé, jelikož by mohlo dojít k sesuvu těžkých kusů z boku vany pece a zlomení elektrod. Z tohoto důvodu je snaha umístit těžké kusy do koše tak, aby se nacházely pod elektrodami ve spodní polovině pece. Kvůli ochraně dna pece se pod těžké kusy pokládá lehký šrot [6], [20], [25].



Obr. 12 Odklápění víka pece



Obr. 13 Sázcí koš se vsázkou

Správná a rychlá manipulace se šrotem hraje důležitou roli z pohledu nákladů tavy, protože může ušetřit teplo, urychlit tavení a zvýšit produktivitu pece. Proto by měla mít vsázka u menších pecí takovou objemovou hmotnost, aby ji bylo možno vsadit najednou [20].

2.4.3 Údobí tavení

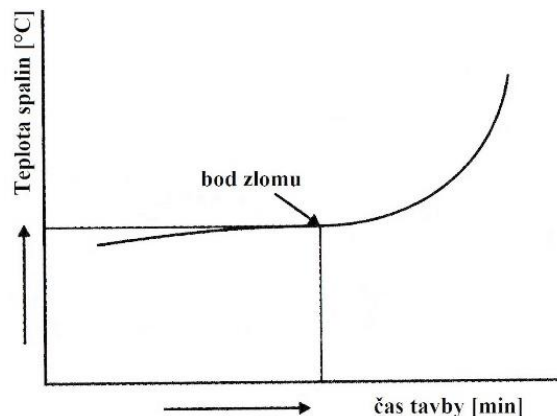
Údobí tavení je zjednodušeně doba počínající zapnutím pece a končící odesláním prvního vzorku na zkoušku chemického složení taveniny. Čas údobí by měl odpovídat co nejkratšímu možnému času, aby se docílilo co nejmenší spotřeby elektrické energie. Časový úsek tavení je přímo úměrný výkonu pecního transformátoru. Ten je využit na maximum, protože je nutno zajistit maximální sekundární napětí. To má za následek prodloužení délky oblouku a urychlení natavování [6], [20].

Tavení je energeticky nejnáročnější část tavby. Standartně se uvádí, že je až 80 % celkové elektrické energie spotřebováno v této části. Kromě elektrické energie je během natavování dalším významným prvkem ovlivňující náklady i spotřeba elektrod, které se postupně utavují, propal vsázky a opotřebování vyzdívky při nevhodném umístění vsázky [6], [20].

Cílem tohoto údobí je roztavit vsázku v co nejkratším čase. Proto bylo vyvinuto několik metod umožňujících intenzifikaci fáze tavení. Mezi nejvýznamnější metody patří přehřívání vsázky kyslíko-palivovými hořáky umístěných přímo v elektrické obloukové peci (**obr. 14**). Umístění hořáků záleží na velikosti pece. U menších pecí je umístěn ve dvířkách, u větších je rozmístěno několik hořáků podél stěny pece. U přehřevu hořákem je nutné mít na paměti, že se zvyšující se teplotou klesá účinnost. Na **obr. 15** je vidět bod zlomu, který určuje ekonomickou výhodnost přehřevu. Po zdolání tohoto bodu je přehřev hořáky ekonomicky nevýhodný [6], [20].



Obr. 14 Systém hořáku [26]



Obr. 15 Vliv doby ohřevu vsázky na teplotu spalin [6]

Protože některé metalurgické reakce probíhají již během tavení, zejména se oxidují prvky s vysokou afinitou ke kyslíku, je vhodné využít částečné oxidace už během tohoto údobí. Docílí se tím zkrácení následného oxidačního údobí, protože část škodlivých prvků, jako je např. fosfor, sníží svůj obsah v lázni. Částečné odfosfoření (i odsíření) umožňuje přidání vápna do vsázky. [6], [20], [25].

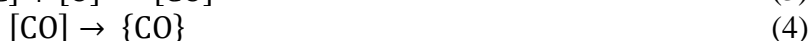
Na konci údobí tavení je nutné zajistit právě takové množství uhlíku v lázni, aby byl ve fázi oxidace zaručen dostatečný uhlíkový var. Obsah uhlíku je zjištěn chemickým rozborem vzorku odebraného z lázně. Pokud množství uhlíku neodpovídá, tzv. je nižší než předepisuje technologický předpis, musí být zajištěno nauhličení lázně. Po skončení údobí tavení se pecní transformátor přepne na nižší sekundární napětí a lázeň by měla být kryta tenkou vrstvou strusky [20].

2.4.4 Oxidační údobí

Po odebrání vzorku na konci natavovacího údobí začíná údobí oxidační. To končí stažením oxidační strusky a nahozením prvních dezoxidačních přísad. Účelem oxidačního údobí při tavení oceli v zásadité obloukové peci je zejména zajištění uhlíkového varu, kterým se sníží obsahy uhlíku a plynů (vodíku a dusíku). Dále se snižuje obsah fosforu a dosahuje odpichové teploty taveniny. Délka údobí má vliv na celkové náklady [6], [20], [24], [25].

Samotné údobí tedy začíná po vyhodnocení zkoušky na chemické složení, tehdy se do lázně vhazuje železná ruda nebo dmýchá plynný kyslík. Vhazovaná ruda musí obsahovat co největší podíl železa, nejčastěji používané hematity obsahují okolo 60 % Fe, a co nejnižší obsah dalších oxidů, například SiO_2 je vyloženě nežádoucí, protože snižuje zásaditost strusky. Počítá se 7 kg rudy na tunu oxidovaných 0,10 % C. Po ukončení oxidace se stahuje struska. Společně s ní se odstraní největší část fosforu z lázně [6], [20], [24], [25].

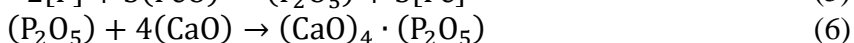
Pro zajištění dostatečného uhlíkového varu je nutné zvýšit obsah kyslíku v tavenině, což se docílí pomocí rudy nebo dmýcháním plynného kyslíku. Po vhození se ruda rozpouští ve vsázce (1). Tato reakce je endotermická. Zároveň s rozpouštěním vzrůstá aktivita FeO, protože kyslík ze strusky přechází do taveniny (2). Oxidace uhlíku probíhající na mezifázovém rozhraní struska-kov (3) a závisí na difuzi uhlíku a kyslíku a na teplotě taveniny a strusky. Se vzrůstající aktivitou kyslíku pod struskou se vytvářejí bubliny (4).



Vzniklé bubliny vyplouvají (uhlíkový var) a promíchávají strusku a taveninu, čímž urychlují intenzitu oduhličování. Pokud struska obsahuje přebytek FeO může dojít k tzv. bouřlivému varu, při kterém šlehají plameny [6].

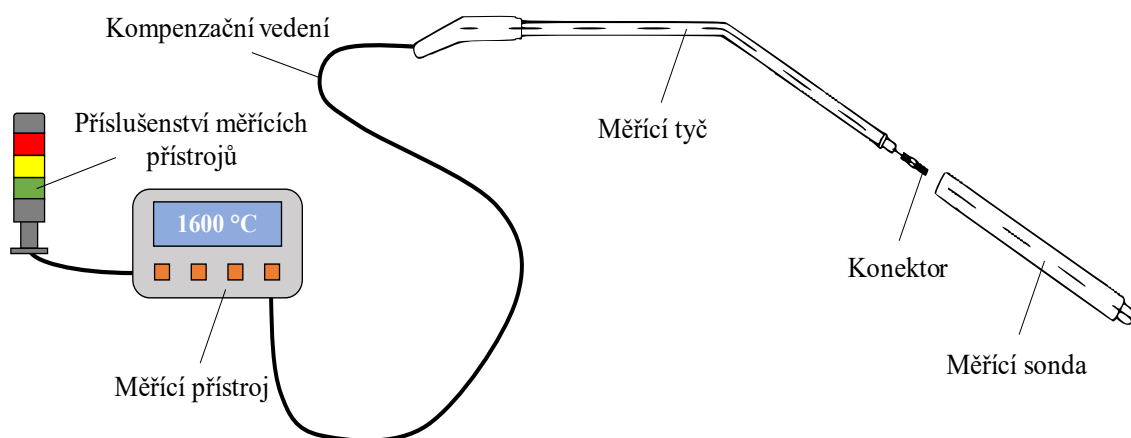
Při uhlíkovém varu klesají i obsahy vodíku a dusíku. Dostatečným snížením těchto plynů se docílí teplotní a chemické homogenity lázně. Vodík se do taveniny dostává zejména ze vsázky, kde je vázaný ve formě hydroxidu železa. Dalším zdrojem je vápno, které je hygroskopické, proto s každou výměnou strusky stoupá obsah vodíku v tavenině. Aby odstranění vodíku a dusíku z taveniny proběhlo správně, je nutné zoxidovat nejméně 0,35 % C, udržovat oduhličovací rychlost nad $0,4 \text{ [\% C]}\cdot\text{h}^{-1}$ a mít kvalitní vápno. Technicko-hospodářské normy stanovují maximální vlhkost 1,5 % [6], [24].

Nesprávný průběh oxidačního údobí má přímý vliv na vysoký obsah fosforu v oceli. Ten není možné snížit v žádném následujícím metalurgickém procesu až na speciální rafinační pochod v pánvi, což platí i pro dusík a vodík. A jelikož ocel s vysokým obsahem fosforu má sklon ke vzniku bublin a trhlin, je nutné docílit snížení fosforu v oxidačním údobí. Jeho snížení se dosáhne při dvoustruskovém pochodu, kdy se stáhne oxidační struska a s ní i většina fosforu z lázně. Odfosfoření se odehrává na mezifázovém rozhraní struska – kov. Po natavení je v lázni nejpravděpodobněji v atomární podobě. Snížení obsahu fosforu v lázni probíhá ve dvou stupních. V prvním stupni dochází k reakci fosforu v lázni (5). Poté se ve strusce váže na volný oxid vápenatý, s nímž vytváří tetrafosforečnan vápenatý (6) [6], [20].



Ke kvalitnímu odfosfoření je výhodné držet teplotu taveniny na relativně nízké hodnotě, protože ta podporuje průběh exotermických reakcí. K dosažení vyšší rychlosti odfosfoření je zapotřebí mít velké reakční plochy. Dále je nutné udržovat vysokou zásaditost strusky [6], [24].

Stanovení a úprava lázně na odpichovou teplotu je nejpřesnější po uhlíkovém varu. Proto se do hloubky cca 100 mm ponoří měřící sonda, která se skládá z termočlánu a křemenné trubičky. Celý měřicí systém je na **obr. 16**. Teplota se poté již pouze kontroluje na konci dalších údobí. Následné měření v peci je nutné provádět ve stejném místě jako při oxidačním údobí, protože jinak by z důvodu heterogenity lázně nemusely být dodrženy výpovědní hodnoty měření [6], [25].



Obr. 16 Schéma zapojení pro měření teploty [27]

Na konci oxidačního údobí se požaduje obsah uhlíku nižší o 0,03 až 0,05 %, než je spodní hranice předepsaná normou. Pokud zkouška vzorku vyjde správně, může se začít stahovat oxidační struska. Stažení se provádí pomocí ocelového hřebel, v některých slévárnách se osvědčila hřebel chlazená vodou s delší životností [6], [20], [24], [25].

2.4.5 Redukční údobí

Redukce začíná vhozením první dezoxidační přísady do lázně a končí počátkem odpichu. Skládá se z dezoxidace, odsíření, konečné úpravy chemického složení a závěrečné úpravy odpichové teploty [6], [20], [24].

Po oxidačním údobí zůstane v tavenině velké množství aktivního kyslíku, které je nutné snížit na vyhovující hodnotu, aby bylo možné uskutečnit odsíření a dolegování. Snížení aktivity kyslíku se docílí dezoxidací lázně. Ta může probíhat třemi technologickými způsoby:

- Srážecí dezoxidace – nejvíce používaný způsob, který nahradil ve větší míře difúzní dezoxidaci. Tímto nahrazením se zásadně zkrátila doba dezoxidace. Ke snižování aktivity kyslíku dochází po přísadě prvků či feroslitin, které mají vyšší termodynamickou stabilitu s kyslíkem než oxid železnatý. Srážecí dezoxidace se nejčastěji zajišťuje hliníkem, možná je i jeho kombinace s dalšími prvky jako jsou křemík, titan a vápník, jež se přidávají z důvodu zlepšení průběhu dezoxidace.
- Difúzní dezoxidace – jako přísady do strusky se používají koks nebo ferosilicium. Z důvodu finanční výhodnosti se častěji používá koks, u kterého je ale zapotřebí počítat s nauhličením lázně. V případě ferosilicia zase může stoupat podíl křemíku. Barva difúzní strusky je bílá nebo tmavá. Bílá bývá pro silně zásadité strusky a nízkým obsahem železa, zatímco tmavá barva signalizuje vyšší obsah železa. Bílá struska je

vhodná pro získání nízkých obsahů síry i kyslíku. V dnešní době má význam pouze v udržení nízké aktivity FeO, díky čemuž je umožněno hluboké odsíření.

- Dezoxidace syntetickými struskami – se u EOP slévárenského typu využívá hlavně z důvodu vytvoření vhodné strusky pro odsíření oceli. Před samotnou dezoxidací syntetickými struskami však musí být lázeň dezoxidována hliníkem, jehož struska disponuje nízkou aktivitou FeO a umožňuje pokračování na základě difúzní dezoxidace [6], [20], [24].

Když se sníží aktivita kyslíku na požadovanou úroveň, následuje odsíření. Síra bývá považována u většiny ocelí za škodlivý prvek. Nízké podíly síry se požadují u žárovečných ocelí, ocelí o vysoké pevnosti a do nízkých teplot. V lázni se objevuje v podobě sulfidu železa a má vliv na houževnatost, vznik trhlin a nemožnost tváření. Aby se zabránilo tvorbě sulfidu železa, přidává se do lázně mangan. Ten disponuje vyšší afinitou k síře než železo a vytváří sulfid manganu. Molekulární teorie strusek popisuje odsíření jako difúzi na mezifázovém rozhraní struska-kov, kdy síra ve formě sulfidu železnatého postupně přechází do strusky dle rovnice (7).



Dostatečným množstvím vápna ve strusce se dosáhne dobrého stupně odsíření, protože tyto dva parametry spolu přímo korelují. Odsíření dále vzrůstá zvětšením mezifázového rozhraní pomocí dmýchání argonu. Zvětšením mezifázového rozhraní se urychlí přechod síry, který probíhá jinak velmi pomalu. Síru lze snížit i v oxidačním údobí, a to až o 20 %, pokud je struska silně zásaditá [6], [20], [24].

V závěru redukčního údobí se provede úprava chemického složení dolegování. Probíhá i při tavbě nelegovaných ocelí, protože přísady manganu a křemíku se řadí k legujícím prvkům. Množství jednotlivých přísad pro konkrétní ocel je dáno normami. Také dochází k propalu přísazovaných prvků, proto je nutné vypočítat množství přísad na dolegování. Ta určí hmotnost jednotlivých legujících prvků, kterou je potřeba přihodit do lázně. Při dolegování je nutné zajistit dostatečnou homogenitu lázně pomocí porézní tvárnice ve dně EOP. S dolegováním dochází i ke korekci uhlíku fero přísadami [6], [20], [24].

Na konci redukčního údobí je nutností zkontrolovat teplotu, případně ji upravit tak, aby se shodovala s předepsanou odpichovou teplotou, která zaručuje dobrý průběh odpichu. Teplota se musí kontrolovat, protože po vytvoření nové strusky teplota klesne, a tudíž se neshoduje s teplotou na konci oxidačního údobí. Posledním odebraným vzorkem se ověřuje celková chemická analýza tavby [6], [20], [24].

2.4.6 Odpich a odlévání oceli

Odpich se uskutečňuje otevřením odpichového otvoru a nakloněním pece. Tekutý kov proudí přes lící žlab do lící pánve viz **obr. 17**, která je zavěšená na lícím jeřábu. Před zahájením odpichu se většinou nahodí do lící pánve granulovaný hliník, aby nedošlo k sekundární oxidaci oceli a případně další legovací přísady v malém množství. Lící pánev by měla být maximálně přehřátá. Slévárny v České republice používají k přehřátí lící pánve hořáky spalující směs zemního plynu a vzduchu. Po ukončení odpichu se standardně provádí v lících pánvích dmýchání argonu, jež je většinou dostačující metodou mimopecního zpracování vedoucí k vysoké homogenitě roztavené oceli. Dmýchání argon je přiváděn pórovitou tvárnici umístěnou ve dvou třetinách poloměru dna pánve. Po ukončení odpichu se přemístí lící pánev jeřábem na lící pole. Zde se provede kontrola teploty, odběr vzorku a odlití oceli do připravené formy. Odlévání oceli se provádí spodem (**obr. 18**), protože na rozdíl od lití horem eliminuje vznik některých vad a umožňuje lepší kontrolu lící rychlosti. Slévači se snaží, aby odlití proběhlo v co nejkratším čase [6], [20], [24], [28].



Obr. 17 Odpich oceli



Obr. 18 Odlévání oceli do formy

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce obsahuje vyhodnocení výsledků skupiny taveb z elektrické obloukové pece společnosti KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA, s.r.o. K vyhodnocení byla vybrána ocel na odlitky G17CrMo9-10, kterou má společnost stabilně ve svém výrobním portfoliu. Společnost umožnila dne 20.10.2020 zhlédnout průběh celé tavby zmíněného typu oceli a následně poskytla všechna potřebná data k vyhotovení této práce. Poskytnutá data se vztahují na 21 taveb provedených v časovém horizontu od dubna do října roku 2020. Z dat bylo vytvořeno vyhodnocení taveb a analýzy dvou prvků ovlivňující mechanické vlastnosti. V následném možném vyhodnocení by mohlo být překážkou tepelné zpracování, kterému byly odlitky před zkouškami na mechanické vlastnosti podrobeny. Elektrická oblouková pec pracující v této společnosti je typu OTO 5 bez jakékoliv intenzifikace. Jediné intenzifikační opatření, kterým je slévárna při tavení v elektrické obloukové peci vybavena, je půdňí dmýchání argonu v lící pánvi, které umožňuje zachování teplotní a chemické homogenity lázně. Vlivem absence intenzifikačních opatření pece jsou spotřeby elektrické energie, spotřeby elektrod a délky taveb v porovnání s moderními ocelárenskými agregáty nesrovnatelně vyšší, což také bude rozebráno v zhodnocení taveb. Společnost provádí většinu taveb v elektrické obloukové peci v nočních hodinách z důvodu levnějších tarifů elektrické energie. Z oceli na odlitky G17CrMo9-10 vyrábí „královopolská slévárna“ součásti pro energetický průmysl, nejčastěji nosiče lopatek, viz **obr.19**.



Obr. 19 Odlitek vyrobený během jedné z hodnocených taveb

3.1 Popis materiálu

Ocel na odlitky G17CrMo9-10 podléhá normě EN 10213 Ocelové odlitky pro tlakové účely. Číselné označení této oceli je 1.7379 a řadí se do nízkolegovaných chrom-molybdenových ocelí na odlitky. Hlavní uplatnění nachází u parních kotlů, tlakových nádob a potrubí pracujících do teploty 600 °C. Ocel 1.7379 bývá zušlechťována, viz **tab. 5**. U všech poskytnutých taveb bylo provedeno tepelné zpracování právě v souladu s normou EN 10213+A1, tzv.: normalizační žihání + kalení do kapaliny (vody) + popouštění. Chemické složení a mechanické hodnoty oceli dle normy jsou uvedeno v **tab. 4** a **tab. 5** [6], [29].

Tab. 4 Chemické složení v hmotnostních % [30]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,13-0,20	max. 0,60	0,50-0,90	max. 0,025	max. 0,020	2,00-2,50	0,90-1,20

Tab. 5 Tepelné zpracování a mechanické hodnoty [6]

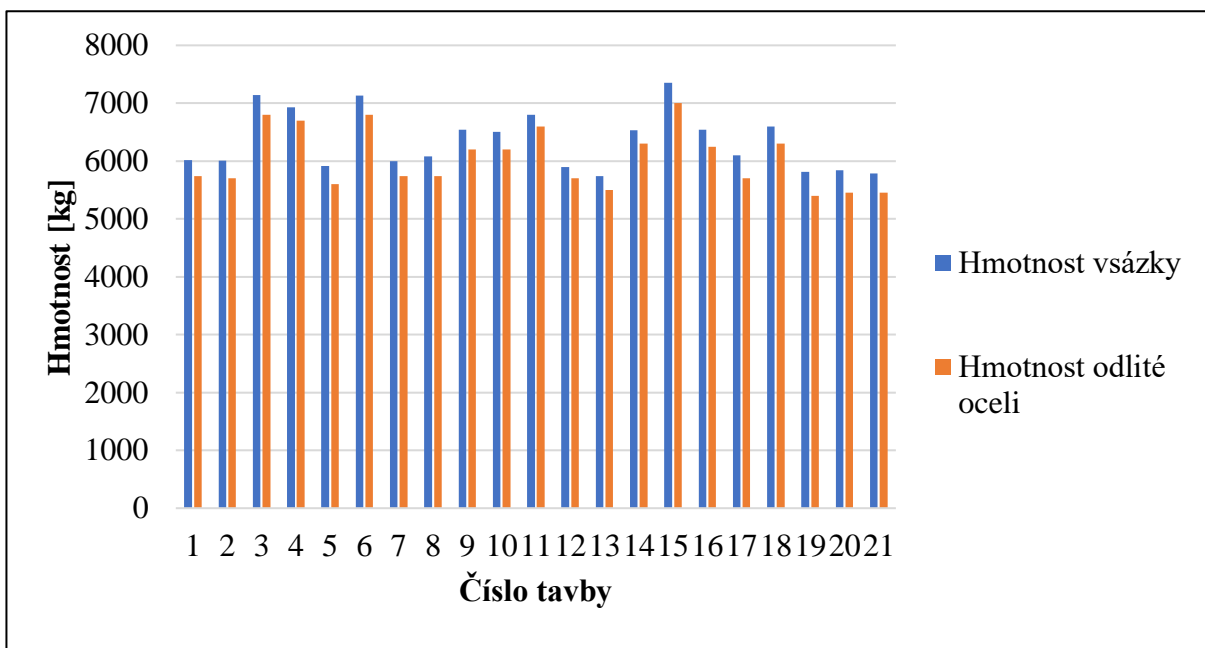
Tepelné zpracování		Tloušťka t [mm]	Mechanické vlastnosti				
Normalizace nebo kalení [°C]	Popouštění [°C]		Zkouška tahem za teploty okolí			Zkouška rázem v ohybu	
		Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	KV [J]	Teplota [°C]	
930-970	680-740	≤ 150	min. 400	590-740	min. 18	min. 40	RT

3.2 Zhodnocení výsledků taveb

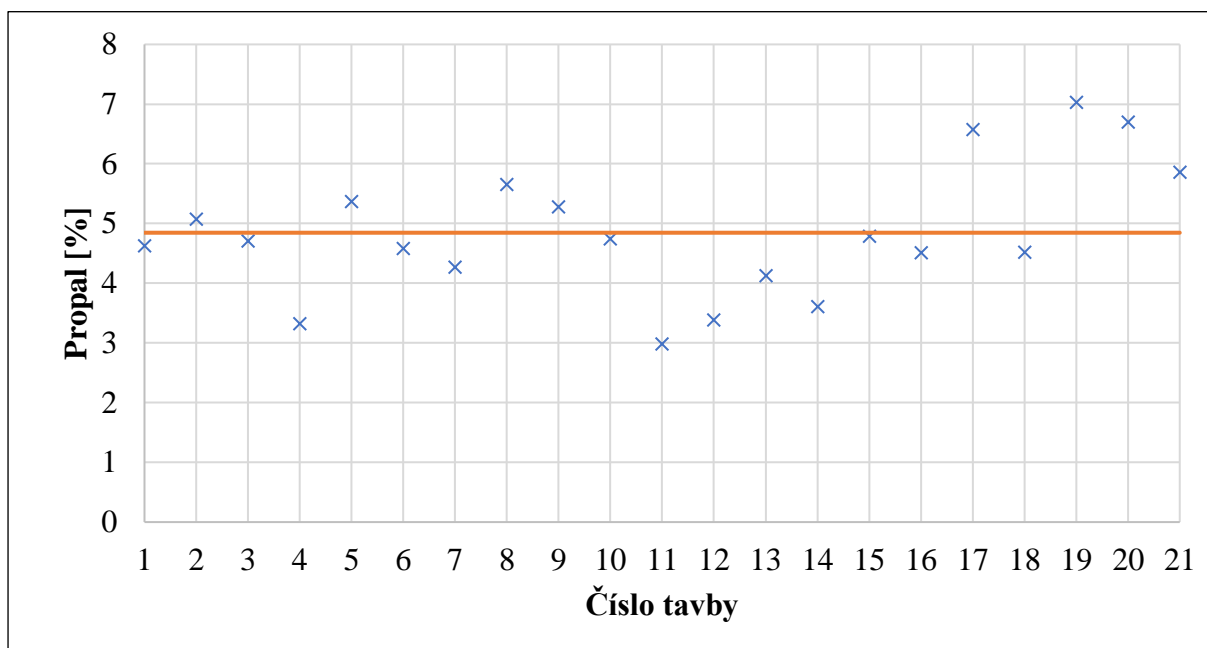
Výroba ocelí na odlitky G17CrMo9-10 byla prováděna ve slévárně v třífázové elektrické obloukové peci OTO 5 se zásaditou vyzdívkou. Jako základ vsázek byl používán kovový šrot, vlastní odpad slévárny a koks k jejímu nauhličení. Do vsázky byl též přidáván molybden ve formě FeMo, protože nedochází k jeho propalu během tavy. Slévárnou kupovaný šrot bývá vytríděný podle svého chemického složení a výrazně přispívá k lepšímu průběhu taveb. Podle výsledků chemických zkoušek bylo prováděno dolegování pomocí nízkouhlíkatého ferochromu FeCr s 0,25 % C obsahujícího 66 % chromu, FeMn, FeSi. U některých taveb byl k dolegování manganem místo FeMn použit mangan affine, který obsahuje menší množství uhlíku. Po odlití byl do lící pánve přisazen SiCa a Al kvůli modifikaci vměstků.

Všechny tavy byly vedeny dvoustruskovou technologií popsanou podrobně v teoretické části, kdy první struska byla stahována na konci oxidace a následně vytvořená struska druhá (redukční). K urychlení natavení strusky v redukčním údobí byl používán kazivec a ALCATEN. Kombinace obou ředidel musela být vyvážená, protože zatímco při používání kazivce dochází k výrazné erozi vyzdívky a uvolnění ekologicky závadných fluoridů, tak při používání ALCATENU dochází ke zvýšení obsahu vodíku v tavenině, protože obsahuje určité množství vody. V průběhu taveb byly odebírány čtyři analýzy na chemický rozbor, první na konci údobí tavení, druhá na konci údobí oxidačního, třetí ke konci údobí redukčního a poslední, čtvrtá, z lící pánve před začátkem lití. Chemická složení odebraná z lící pánve před vylitím stanovují konečné chemické složení taveb. Výsledky tavebních analýz jsou uvedeny v příloze 1.

Hmotnosti kovové vsázky a odlité oceli všech 21 hodnocených taveb lze vidět na **obr. 20**. Rozdíl mezi hodnotami je způsoben propalem kovové vsázky, který dosahoval průměrné hodnoty 4,85 %, viz **obr. 21**. Průměrné hodnoty propalu kovové vsázky ve slévárně se v elektrické obloukové peci pohybují v intervalu od 3 do 7 %, což bylo u všech taveb splněno. Rozdílný propal kovové vsázky u hodnocených taveb byl způsoben mnoha faktory, mezi ty nejzásadnější patřily rozdílné délky taveb, hmotnosti taveb a kusovitost vsázky.



Obr. 20 Graf znázorňující hmotnosti kovové vsázky a odlité oceli



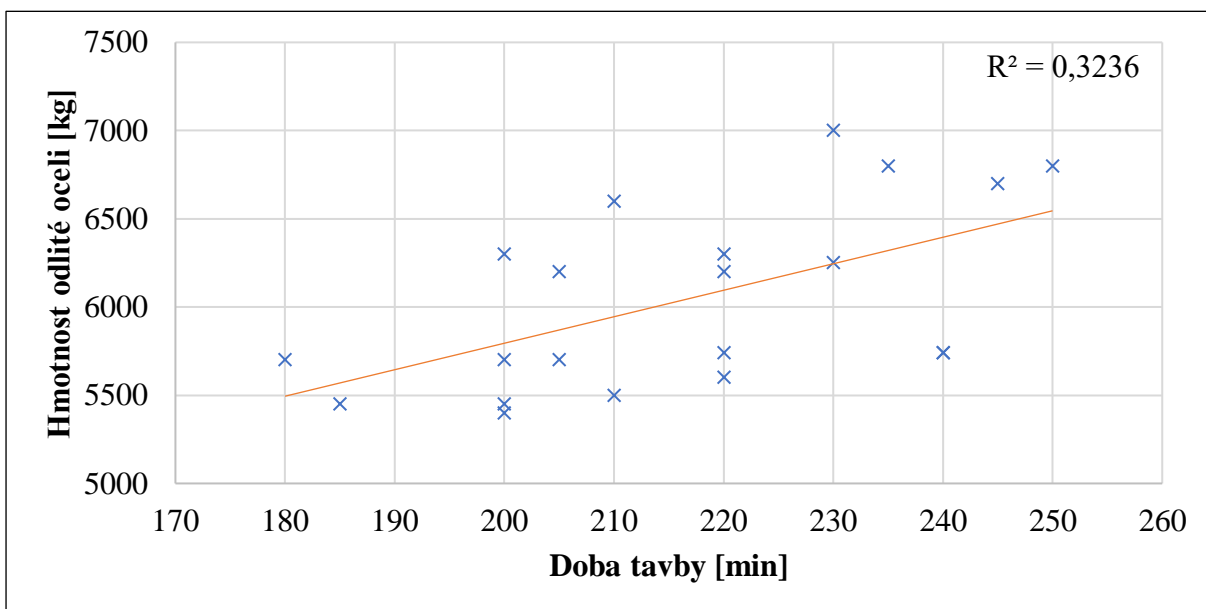
Obr. 21 Graf propalu kovové vsázky

Celková doba taveb od sázení po odlití je zachycená v **tab. 6**. Nejdelším údobím bylo tavení, které zastává přibližně 62% podíl na celkovém čase. Tavení je přímo úměrné výkonu pecního transformátoru, který má u elektrické obloukové pece OTO 5 ve slévárně výkon 2,5 MVA. Kromě transformátoru je také významná teplota vyzdívky pece a hmotnost tavby. Jelikož mnoho taveb bylo zahájeno na studené peci, byla poté prodloužena jejich celková doba. Vliv hmotnosti tavby na celkové době se dá ověřit na **obr. 22**, který tuto závislost zobrazuje. Spojnice zachycuje rostoucí trend celkové doby tavby při zvyšující se hmotnosti vylité oceli. Vylitou ocelí se myslí hmotnost oceli, která byla vylita z pece do lící pánve. Vzájemná korelace obou veličin dosahuje hodnoty 0,5689 a koeficient spolehlivosti R^2 0,3236. Z toho se dá usoudit, že hmotnost vylité oceli má relativně velký vliv na dobu tavby, ale není jediným ovlivňujícím faktorem. Dalšími faktory mohly být kvalita a kusovitost vsázky a vedení taveb na studené peci.

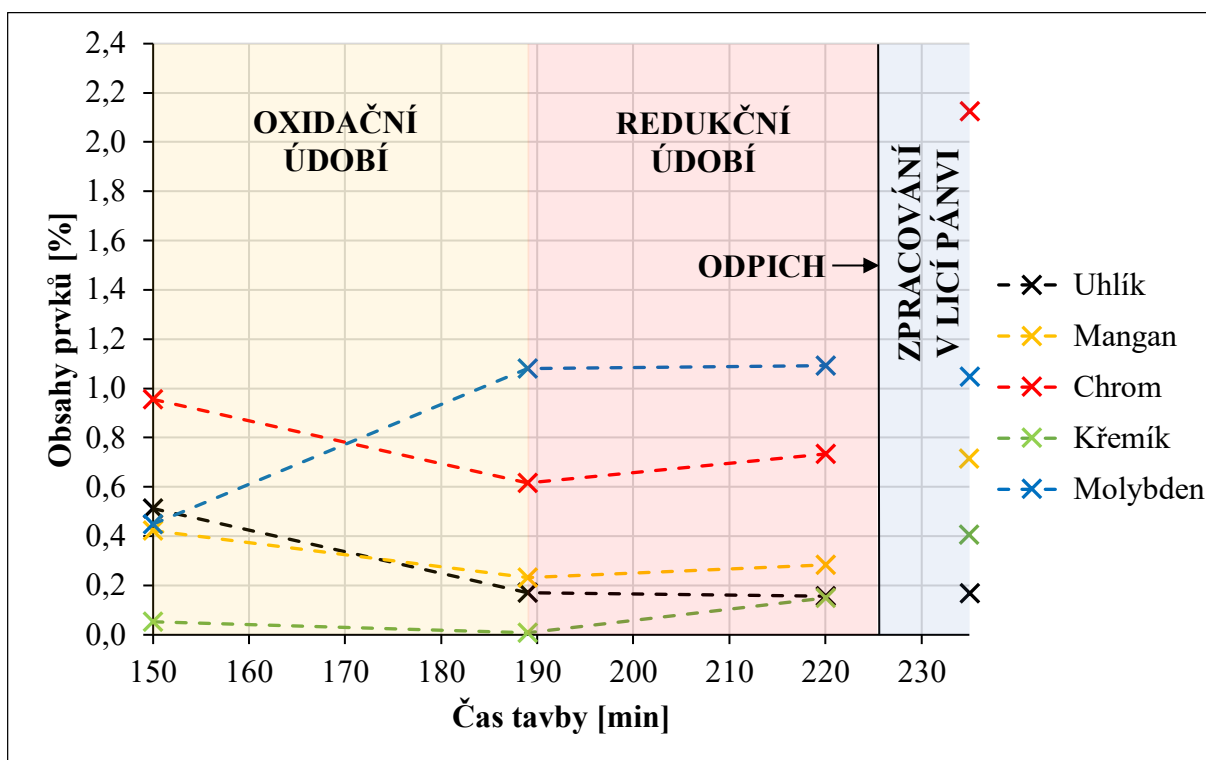
Z průměrné časové doby jednotlivých údobí (**tab. 6**) a průměrných obsahů jednotlivých prvků vzatých z chemických analýz (**příloha 1**) hodnocených taveb byla vytvořena závislost na **obr. 23**. Závislost nezaznamenává síru ani fosfor kvůli jejich nízkým obsahům. I přes nízké obsahy v oceli však mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti, zejména na vrubovou houževnatost, a proto jim je dále v práci věnována pozornost. Při pohledu na závislost je vidět vzrůstající obsah molybdenu mezi první a druhou chemickou analýzou způsobenou tím, že na konci údobí tavení ještě nebyl zcela rozpuštěn a také faktem, že na rozdíl od ostatních prvků nedochází k jeho propalu během oxidace. Mezi třetí a čtvrtou chemickou analýzou vzrůstají obsahy zejména chromu, manganu a křemíku, jež jsou do pece přiváděny ke konci redukčního údobí v podobě legujících přísad.

Tab. 6 Celková doba taveb

Tavba č.	Fáze tavby [min]					Celkem
	Sázení	Tavení	Oxidace	Redukce	Odpich	
1	10	165	45	30	3	253
2	10	125	35	40	3	213
3	10	175	35	40	3	263
4	10	160	50	35	3	258
5	10	140	50	30	3	233
6	10	150	50	35	3	248
7	10	140	35	45	3	233
8	10	170	35	35	3	253
9	10	140	30	35	3	218
10	10	150	30	40	3	233
11	10	120	50	40	3	223
12	10	110	30	40	3	193
13	10	140	35	35	3	223
14	10	130	35	35	3	213
15	10	150	40	40	3	243
16	10	155	35	40	3	243
17	10	130	35	40	3	218
18	10	135	45	40	3	233
19	10	120	40	40	3	213
20	10	120	30	35	3	198
21	10	135	35	30	3	213
Průměrná doba [min]	10	141	38	37	3	229



Obr. 22 Závislost doby tavby (od začátku tavení po odpich) na hmotnosti odlité oceli



Obr. 23 Grafická závislost průměrné časové doby jednotlivých údobí na průměrných obsazích jednotlivých prvků

Teploty taveniny byly v průběhu jednotlivých taveb kontrolovány měřicími sondami. Po natavení se pohybovaly v intervalu od 1540 do 1560 °C, před zahájením dmýchání plynného kyslíku od 1590 do 1610 °C, po skončení oxidace od 1620 do 1640 °C, během redukce v rozmezí teplot 1620 až 1640 °C a po dolegování se pohybovaly od 1610 do 1620 °C. Lící pánev byla u všech taveb přehřívána pomocí hořáků spalující směs zemního plynu a vzduchu. Tavenina se do pískových forem odlévala z lící pánve spodem, viz **obr. 18**. Průměrná spotřeba elektrické energie během taveb 825 kWh na tunu vytavené oceli, viz **tab. 7**. Poměrně vysoká hodnota je způsobena zejména technickým stavem elektrické obloukové pece a absencí intenzifikačních opatření.

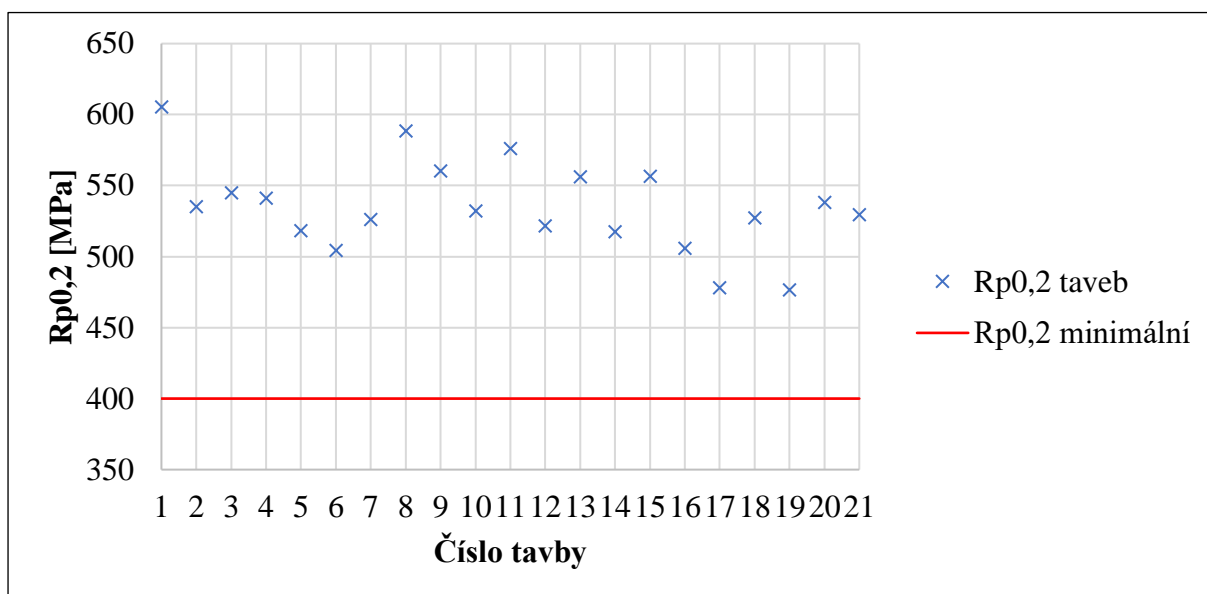
Tab. 7 Spotřeba elektrické energie během hodnocených taveb

Tavba č.	Spotřeba el. energie na tunu vytavené oceli [kWh/t]	Tavba č.	Spotřeba el. energie na tunu vytavené oceli [kWh/t]	Tavba č.	Spotřeba el. energie na tunu vytavené oceli [kWh/t]
1	951,9	8	967,6	15	805,4
2	730,4	9	762,1	16	809,6
3	874,4	10	854,8	17	871,6
4	772,2	11	745,2	18	756,7
5	852,7	12	727,5	19	876,7
6	749,1	13	900,7	20	820,0
7	842,0	14	749,8	21	904,4
Průměrná spotřeba elektrické energie na tunu vytavené oceli [kWh/h]					825,0

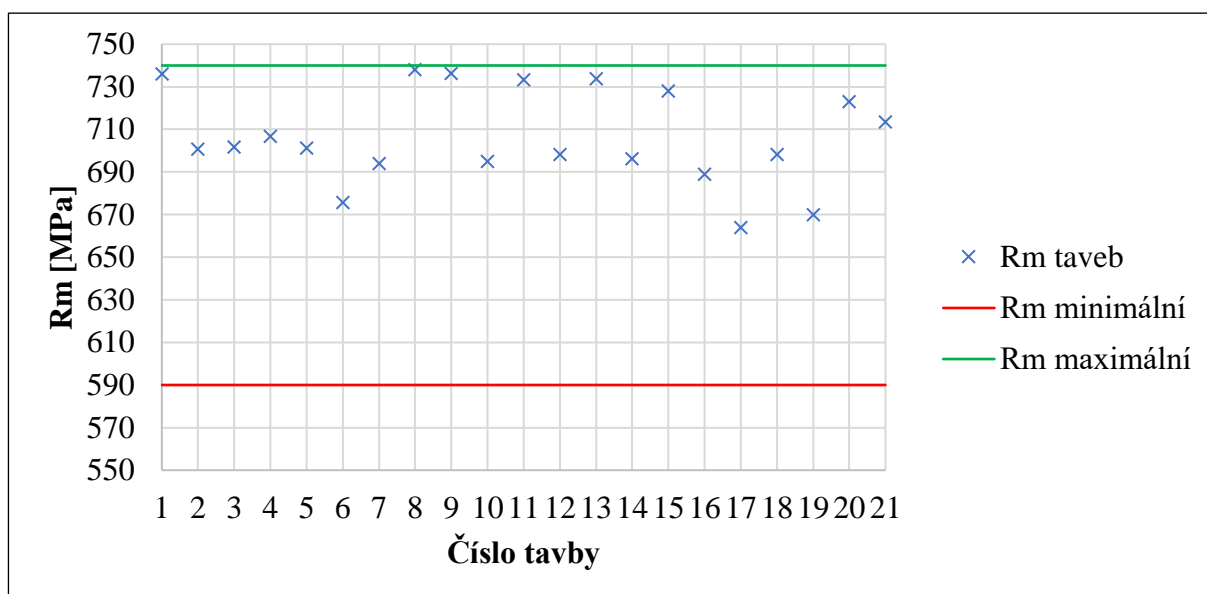
K odlitkům byly integrálně přility zkušební bloky o tloušťce 100 mm. Ty byly po tepelném zpracování odřezány. Následně jsou z těchto bloků vytvořena zkušební tělesa na zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu a zkoušky tvrdosti HB, které probíhaly za teploty okolí. Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny pro vrub tvaru V. Výsledky provedených zkoušek na mechanické vlastnosti jsou v **příloze 2**.

3.3 Analýzy prvků s dominantním vlivem na mechanické vlastnosti

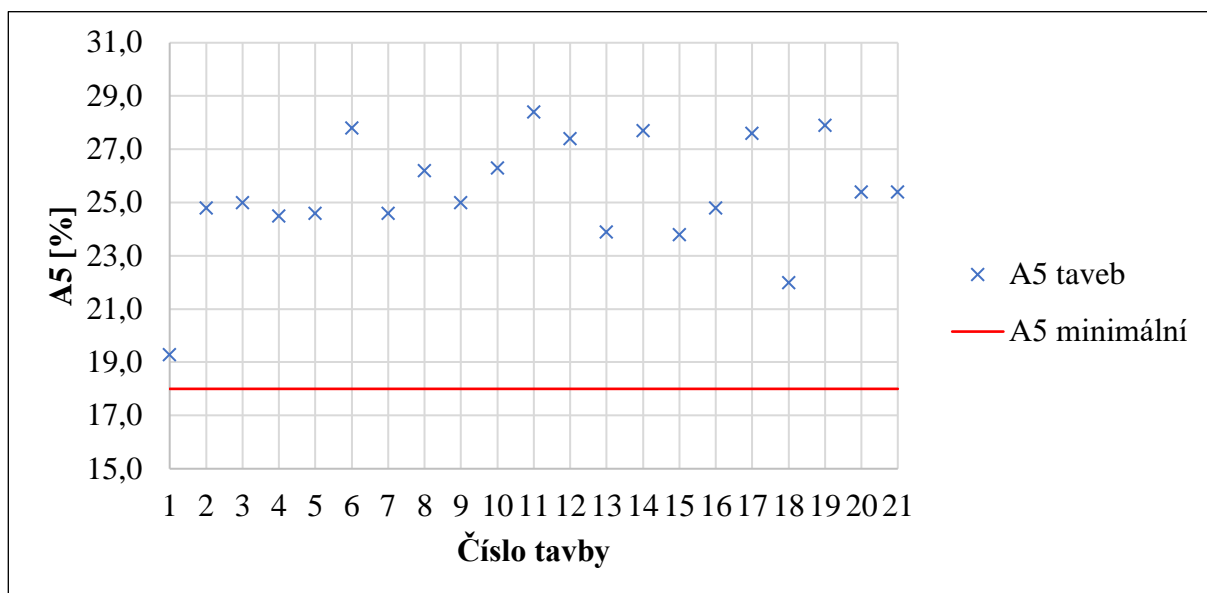
Z pohledů na **obr. 24-27** vyplývá, že všechny zkoumané tavby vyhověly požadavkům normy ohledně mechanických vlastností, většina odlitků dokonce výrazně překročila požadovaná minima. Proto nebyl proveden další rozbor věnující se přímo mechanickým vlastnostem. V rámci analýz jsou popisovány průběhy taveb z pohledu dvou prvků se zásadními vlivy na mechanické hodnoty vyrobených odlitků. Mezi analyzované prvky patří již zmíněná síra a fosfor.



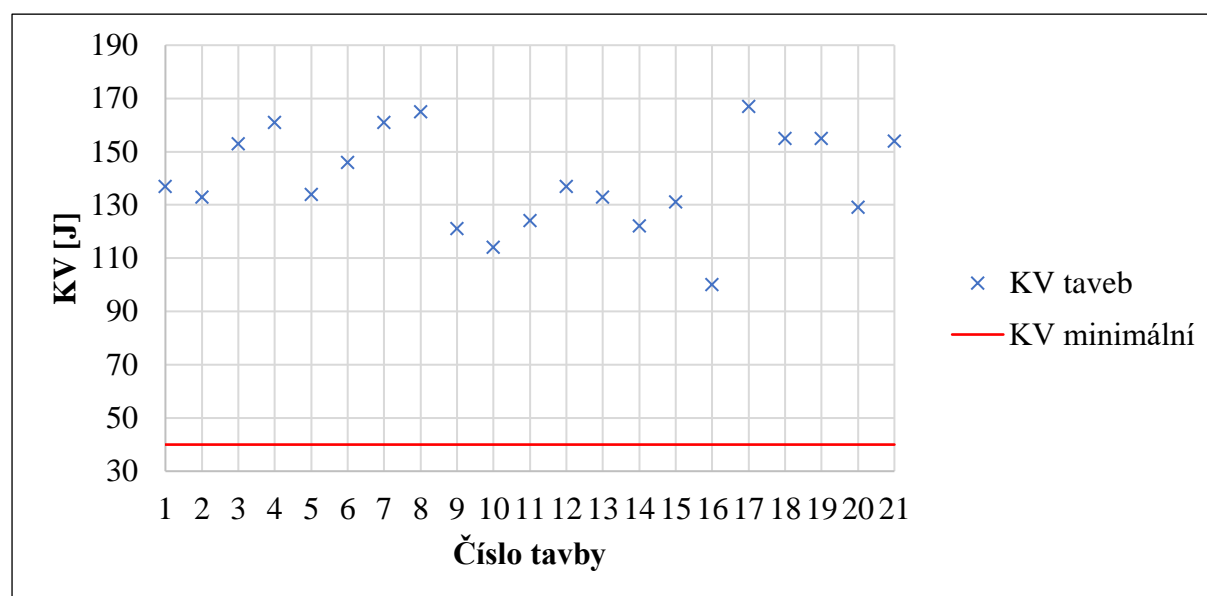
Obr. 24 Graf zobrazující mez kluzu jednotlivých taveb



Obr. 25 Graf zobrazující mez pevnosti jednotlivých taveb



Obr. 26 Graf zobrazující tažnost jednotlivých taveb

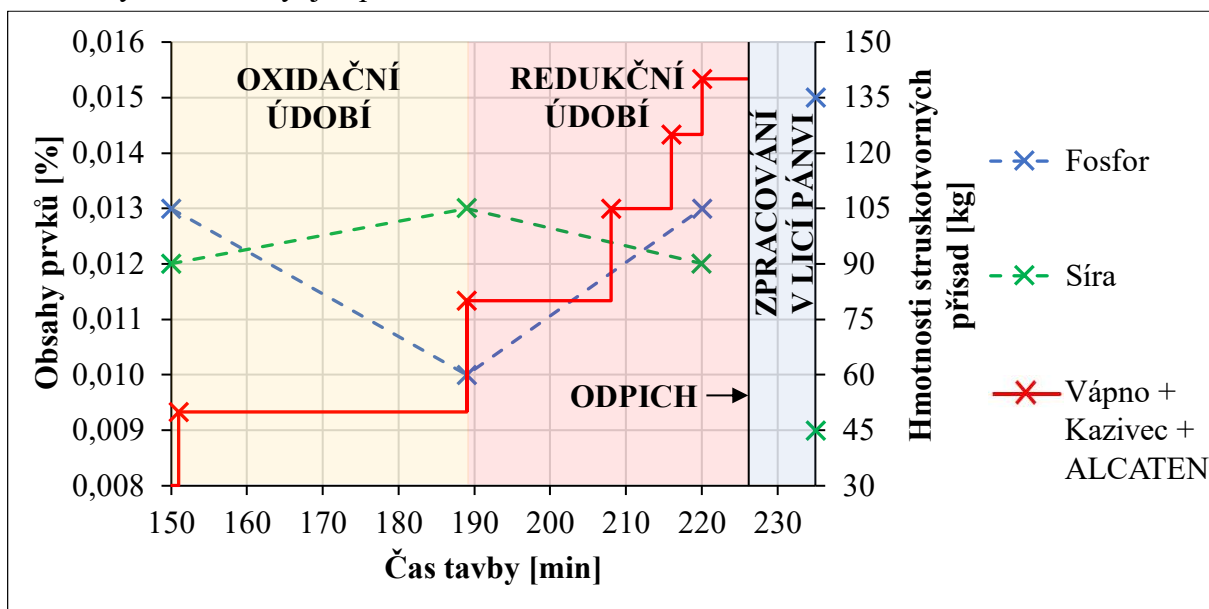


Obr. 27 Graf zobrazující nárazovou práci jednotlivých taveb

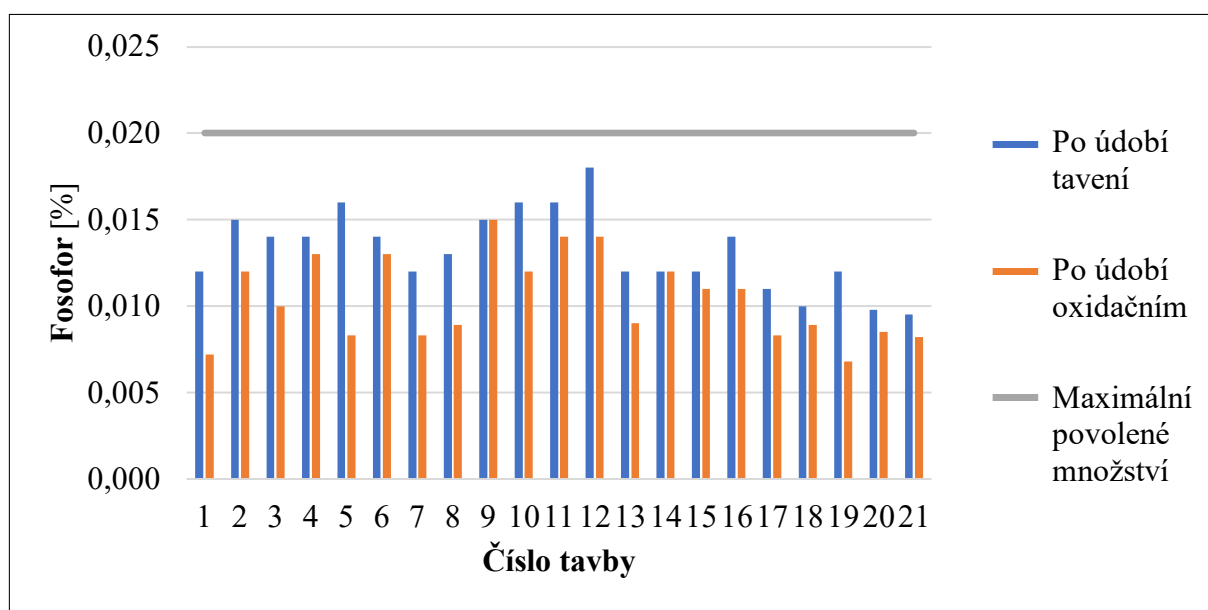
3.3.1 Analýza z pohledu fosforu

Fosfor je při výrobě oceli na odlitky G17CrMo9-10 nežádoucím prvkem. Snížení jeho obsahu v tavenině se docílilo procesem odfosfoření, který probíhal během oxidačního údobí. Ke kvalitnímu odfosfoření také bylo zapotřebí relativně nízkých teplot, zhruba pod hodnotou 1560 °C, což všechny hodnocené tavby splnily. Bylo také nutné zaručit dostatek FeO ve strusce a její přijatelnou tekutost. K tomu byl používán kazivec, naředěním strusky se zlepšila rozpustnost vápna. Během odfosfoření se udržoval poměr mezi CaO a FeO ve strusce okolo 3, což vedlo vzhledem k zásaditosti strusky k nejlepším výsledkům. Na **obr. 28** je graficky zobrazená závislost průměrného obsahu fosforu a průměrné spotřeby struskotvorných přísad na průměrné časové době taveb. Struskotvornými přísadami je myšlen součet vápna, kazivce a ALCATENU. K součtu těchto hodnot vedlo nejasné zapisování ředidel strusky během redukčního údobí v tavebních listech hodnocených taveb. Z obrázku je vidět, že množství

fosforu po roztavení průměrně u taveb dosahovalo pouze 0,013 %, což ukazuje, že vsázka, kterou slévárna používá, dosahuje vysoké kvality. Zaznamenaný pokles obsahu až na 0,010 % dokládá odstranění fosforu stažením oxidační strusky. Oxidační struska byla tvořena zejména vápnem. Zvyšující se obsah fosforu po konci oxidačního údobí měly za následek feroslitiny určené k dolegování oceli a vyzdívka pece, jež během předchozích taveb absorbovala fosfor a při redukčním údobí jej zpětně vyredukovala do lázně. **Obr. 29** potvrzuje kvalitu vsázky, protože u žádné z 21 hodnocených taveb nepřesáhl obsah fosforu ani po natažení maximální povolené množství. Nízký obsah fosforu po natažení způsobilo i přidání zhruba 30 kg vápna do vsázky každé tavby, jež převedlo část odfosfoření do údobí tavení.



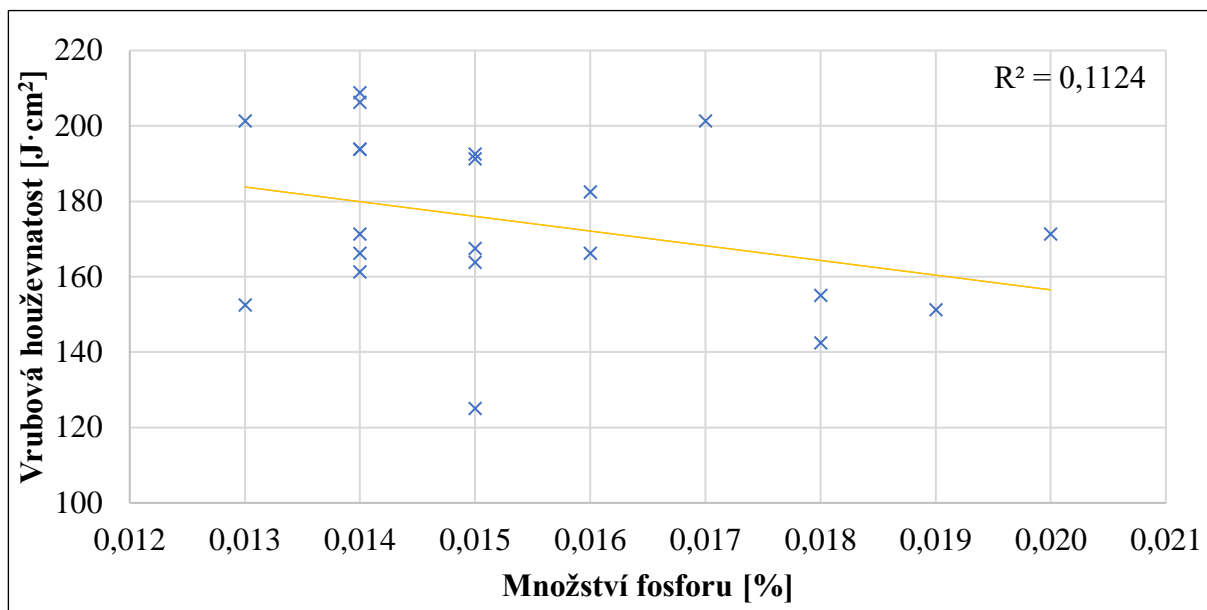
Obr. 28 Průměrný obsah prvků a hmotnosti struskotvorných přísad v průběhu taveb



Obr. 29 Vstupní a výstupní obsah fosforu v oxidačním údobí u jednotlivých taveb

Fosfor by měl mít se zvyšujícím se množstvím negativní vliv na vrubovou houževnatost, proto byla vytvořena závislost zachycující tuto skutečnost u zkoumaných taveb, viz **obr. 30**. Pomocí spojnice trendu je vidět s rostoucím obsahem fosforu klesající vrubovou houževnatost.

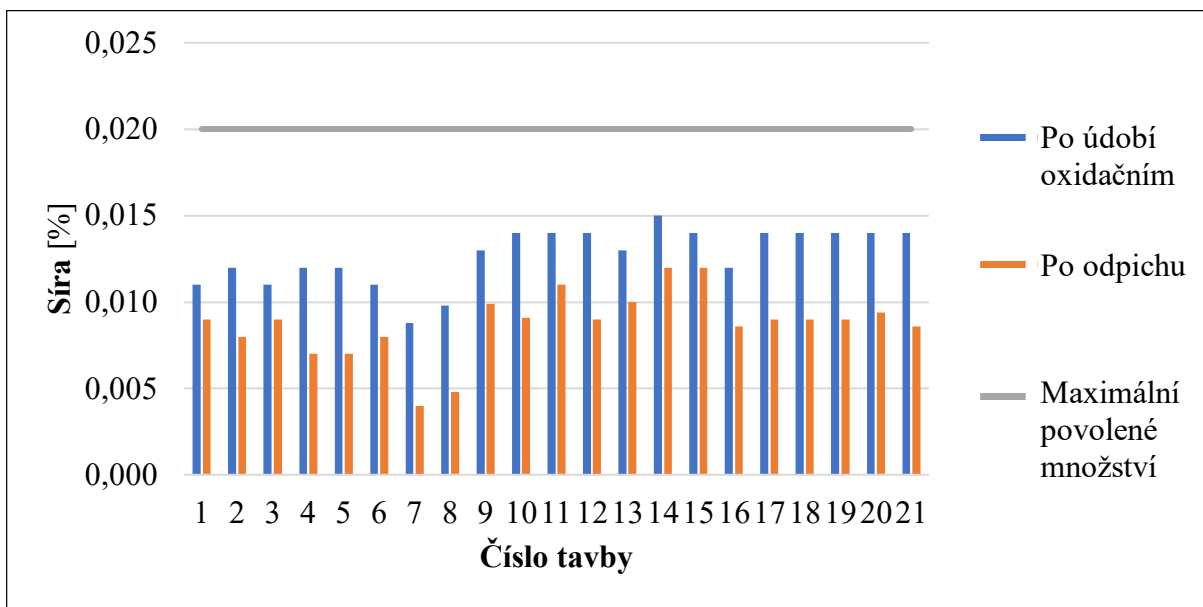
Koeficient spolehlivosti R^2 vyšel 0,1124. Vzájemná korelace obou veličin vychází -0,3353. Z dosaženého výsledku se dá s vysokou pravděpodobností usuzovat, že tepelné zpracování odlitků před provedením mechanických zkoušek mělo do značné míry pozitivní vliv na mechanické vlastnosti odlitků.



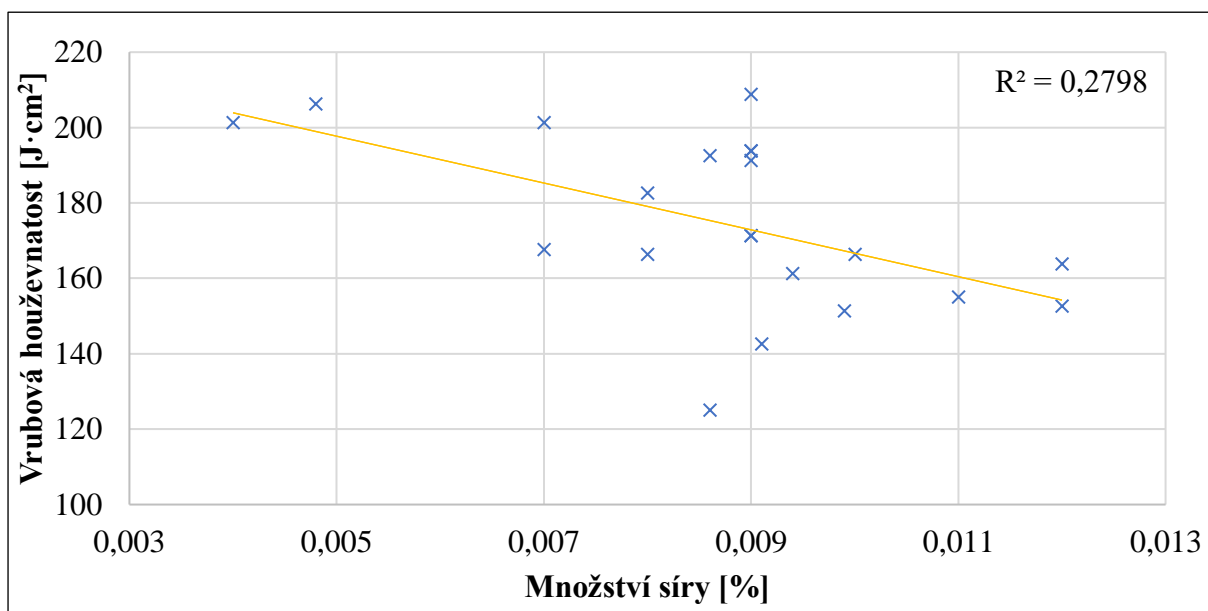
Obr. 30 Graf závislosti fosforu na vrubové houževnatosti

3.3.2 Analýza z pohledu síry

Síra je při výrobě oceli na odlitky G17CrMo9-10 stejně jako fosfor nežádoucím prvkem. Snížení jejího obsahu v tavenině se docílilo během redukčního údobí tzv. odsířením. Odsíření nastalo po důkladné dezoxidaci taveniny, kdy se obsluha pece snažila snížit obsah FeO pod hodnotu 1,5 %. Z důvodu urychlení rozpuštění vápna byla přidávána ředidla v podobě kazivce a ALCATENU. Teplotní zkoušky vykazovaly hodnoty od 1620 do 1640 °C. Při tomto intervalu teplot došlo ke snížení viskozity strusky a zvýšení její reaktivnosti. **Obr. 28** vyobrazuje závislost průměrného obsahu síry a průměrné spotřeby struskotvorných přísad na průměrné době taveb. Ze závislosti lze vyzorovat, že se vzrůstajícím množstvím vápna klesá množství síry v tavenině. Pokles obsahu síry probíhal dle závislosti i po odpichu, což bylo pravděpodobně dosaženo dodatečnou dezoxidací hliníkem a přidáním SiCa do licí pánve. V průběhu taveb se však množství síry pohybovalo na velmi nízkých hodnotách, což dokazuje **obr. 31**, kde je za pomoci sloupcového grafu vidět množství síry po konci oxidačního údobí. Jelikož ani u jedné tavby na konci oxidačního údobí nebyla překročena maximální povolená hodnota určená normou, dá se usoudit, že kvalita vsázky byla vysoká. Stejně jako fosfor, i síra by měla mít se zvyšujícím se množstvím negativní vliv na vrubovou houževnatost, proto byla vytvořena závislost zachycující tuto skutečnost u vyhodnocovaných taveb (**obr. 32**). Pomocí spojnice trendu lze vidět, že s rostoucím obsahem síry klesá vrubová houževnatost. Koeficient spolehlivosti R^2 vyšel 0,2798, při vzájemné korelaci obou veličin -0,5261. Nízké hodnoty jsou znovu přisuzovány podstatnému vlivu tepelného zpracování odlitků před mechanickými zkouškami, jež výrazně zlepšily mechanické vlastnosti odlitků.



Obr. 31 Obsah síry na začátku redukčního údobí a po odpichu u jednotlivých taveb



Obr. 32 Graf závislosti síry na vrbové houževnatosti

4 ZÁVĚR

Práce se zabývá v prvním oddílu teoretické části rozdělením a vývojem elektrických obloukových pecí. Dále se zabývá sortimentem ocelí na odlitky vyráběných v elektrických obloukových pecích, vlivu jednotlivých prvků z pohledu výroby a vlastností výsledných odlitků. V podkapitole týkající se sortimentu ocelí z EOP byl vysvětlen rozdíl mezi nelegovanými a legovanými oceli. Detailnější pohled byl přitom věnován ocelím korozivzdorným, jež jsou důležitou a nenahraditelnou součástí v mnoha provozech, například v petrochemickém průmyslu. Z pohledu prvků byly zmíněny pouze prvky základní, kam patří uhlík, mangan, křemík, fosfor, síra, chrom, dusík, kyslík a vodík.

Druhý oddíl teoretické části je zaměřen pouze na pece slévárenského typu, které mají v českých podmínkách zásaditou vyzdívkou a využívají se k výrobě ocelí na odlitky. Nejdříve byla popsána jejich konstrukce, princip vzniku elektrického oblouku a nakonec vlastní průběh tavby. V konstrukci byly jednotlivé části rozděleny na elektrická a mechanická zařízení a podrobně vysvětlen jejich význam. Průběh tavby uvádí šest základních výrobních fází v podobě údobí opravy, přípravy a sázení vsázky do pece, tavení, oxidace, redukce a odpichu a odlévání oceli. Všechny fáze jsou popsány jak z pohledu technologického, tak z pohledu metalurgických možností umožňujících zvýšení čistoty taveniny.

V praktické části se bakalářská práce věnuje vyhodnocení skupiny 21 taveb nízkolegované chrom-molybdenové oceli na odlitky G17CrMo9-10 provedené ve firmě KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA s.r.o. Z informací v tavebních listech byly vytvořeny hodnocení v oblastech chemického složení, mechanických vlastností a efektivity elektrické obloukové pece. Z pohledu chemického složení nebyly nalezeny výraznější technologické nedostatky, všechny tavby byly v souladu s chemickým složením předepsaným technicko-hospodářskou normou slévárny. Chemické složení jednotlivých taveb bylo významně ovlivněno použitím velmi kvalitní externí vsázky s minimem nežádoucích prvků jako například fosforu a síry. Mechanické vlastnosti byly stejně jako chemické složení v souladu s předepsanou technicko-hospodářskou normou slévárny. Při vyhodnocování mechanických vlastností bylo překážkou tepelné zpracování, které pozitivně ovlivnilo jejich hodnoty, čímž došlo k minimální korelaci prvků a vlastností, jež by měly ovlivňovat. Z pohledu celkových nákladů elektrické obloukové pece slévárny vyplynula během vyhodnocování skupiny taveb řešení, která lze považovat jako doporučení vedoucí k jejím snížením. Řešení, která se naskýtají jsou modernizace elektrické obloukové pece s implementací intenzifikačních opatření nebo eliminace vedení taveb na studené peci, která má za výsledek vysokou spotřebu elektrické energie.

K lepšímu porozumění problematiky tavení ocelí na odlitky v elektrické obloukové peci pomohlo zhlédnutí jedné z vyhodnocovaných taveb naživo v provozu KRÁLOVOPOLSKÉ SLÉVÁRNY s.r.o. Zhlédnutí tavby poskytlo přínos jak do praktické, tak i do teoretické části, což umožnilo lepší představu při popisování jednotlivých výrobních fází.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [31]

- [1] FRUEHAN, Richard J. et al. *The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume*. 11th ed. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. ISBN 0-930767-02-0.
- [2] HORIA Andrei, Costin CEPISCA a Sorin GRIGORECU. *Power Quality and Electrical Arc Furnaces* [online]. Londýn: IntechOpen Limited, 2011 [cit. 2021-02-09]. ISBN 978-953-307-180-0. Dostupné z: <https://cdn.intechweb.org/pdfs/14961.pdf>
- [3] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Electric furnace. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica, Inc, c2021, 1. července 2008 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/electric-furnace#ref3131>
- [4] HITES, Becky E. The growth of EAF steelmaking. In: *Recycling today* [online]. Valley View: GIE Media, c2021, 30. dubna 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking/>
- [5] Technavio. New Electric Arc Furnaces Market Research 2020-2024. In: *Business Wire* [online]. New York: Business Wire, Inc, c2021, 29. prosince 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20201228005334/en/New-Electric-Arc-Furnaces-Market-Research-2020-2024-To-Show-Inferior-Growth-due-to-COVID-19-Spread-Technavio>
- [6] ŠENBERGER, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK, Antonín ZÁDĚRA, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [7] ZÁDĚRA, Antonín. Metalurgie (CME). In: *Slideplayer* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2667182/>
- [8] Siemens AG. Siemens increases productivity of electric arc furnace of Çolakođlu by twelve percent. In: *Innovations-report* [online]. Mnichov: Innovations-report, c2021, 19. října 2011 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.innovations-report.com/corporate-news/siemens-increases-productivity-electric-arc-furnace-184108/>
- [9] Water Cooled Panels. *Istanbul Machine* [online]. Istanbul: Istanbul Machine, c2015 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.istanbulmachine.com.tr/water-cooled-panels.html>
- [10] Electric Arc Furnace Water Cooled Panels. In: *ScienceDirect* [online]. 15. září 2017 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0196890417305071-gr2a.jpg>
- [11] Conceptual configuration of the Consteel® Evolution™ EAF. In: *Industrial Heating* [online]. Troy: BNP Media, 2012 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/ext/resources/IH/Home/Images/ih0812-mfj-fig1-lg.jpg>
- [12] ČAMEK, Libor. *Prezentace EOP* [e-mailová komunikace]. 3. března 2021 12:02 [cit. 2021-05-21].
- [13] STOKLASA, František. ELEKTRICKÝ OBLOUK JEHO VYUŽITÍ. In: *Slideplayer* [online]. 2011 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/amp/11147031/>
- [14] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. 6. doplněné vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016. ISBN-978-80-7204-921-9.

- [15] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [16] PLUHAŘ, Jaroslav a kolektiv. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 04-205-89.
- [17] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2. opravené a rozšířené vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [18] Tumlikovo. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí. In: *Tumlikovo* [online]. c2021, 7. února 2011 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>
- [19] GITANO, Markey. OBLOUKOVÉ PECE. In: *Slideserve* [online]. 19. září 2014 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/gitano/obloukov-pece>
- [20] FREMUNT, Přemysl a Jaroslav ŠIMON. *Tavení oceli v elektrických pecích*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-418-84.
- [21] Graphite Electrodes. In: *Vet China* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://cdn.goodao.net/vet-china/815235e5.jpg>
- [22] Vyzdívký elektrických obloukových pecí. *Ústav strojírenské technologie: Slévárenství* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_5_3.html
- [23] Electric Arc Furnace. In: *Navigate Commodities* [online]. 14. srpna 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://cdn.navigatecommodities.com/wp-content/uploads/2020/08/04165408/Electric-Arc-Furnace-for-Electrodes-What-is-it-and-how-does-it-work.jpg>
- [24] LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. *Metalurgické vady ocelových odlitků: Příčiny a odstraňování*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-415-84.
- [25] SETNIČKA, Rudolf. *Metalurgie oceli: Návody do cvičení*. 3. přepracované vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1991. ISBN 80-214-0112-5.
- [26] Burner System For Electric Arc Furnace, In: *Indiamart* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/burner-system-for-electric-arc-furnace-16712020088.html>
- [27] Schéma zapojení pro měření v hutních a slévárenských provozech. In: *Termosondy* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: http://www.termosondy.cz/index_soubory/Page362.htm
- [28] MICHÁLEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽANT. *Rafinace a odlévání oceli: Studijní opory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-80-248-3581-5. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/rafinace-a-odlevani-oceli/Michalek_Socha_Rafinace-a-odlevani-oceli.pdf
- [29] ČSN EN 10213 +A1. *Ocelové odlitky pro tlakové účely*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [30] BRESLAVSKY, Dmitry. G17CrMo9-10 (1.7379). *European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. Kharkov: Dmitry Breslavsky, c2011-2021. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=375
- [31] CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/vut>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Intenzifikace EOP v průběhu let [6]	10
Obr. 2 Pec slévárenského typu [7]	11
Obr. 3 Pec ocelárenského typu [8]	11
Obr. 4 Vodou chlazené panely EOP [10]	11
Obr. 5 Pochod Consteel [11]	12
Obr. 6 Řešení stejnosměrných pecí [12]	12
Obr. 7 Řešení pecí napájených střídavým proudem [13]	13
Obr. 8 Schéma elektrické obloukové pece [19]	17
Obr. 9 Grafitová elektroda [21]	18
Obr. 10 Vyzdívka zásadité obloukové pece [6]	20
Obr. 11 Tavení pomocí elektrického oblouku [23]	21
Obr. 12 Odklápění víka pece	23
Obr. 13 Sázecí koš se vsázkou	23
Obr. 14 Systém hořáku [26]	24
Obr. 15 Vliv doby ohřevu vsázky na teplotu spalin [6]	24
Obr. 16 Schéma zapojení pro měření teploty [27]	26
Obr. 17 Odpich oceli	28
Obr. 18 Odlévání oceli do formy	28
Obr. 19 Odlitek vyrobený během jedné z hodnocených taveb	29
Obr. 20 Graf znázorňující hmotnosti kovové vsázky a odlité oceli	30
Obr. 21 Graf propalu kovové vsázky	31
Obr. 22 Závislost doby tavy (od začátku tavení po odpich) na hmotnosti odlité oceli	32
Obr. 23 Grafická závislost průměrné časové doby jednotlivých údobí na průměrných obsazích jednotlivých prvků	33
Obr. 24 Graf zobrazující mez kluzu jednotlivých taveb	34
Obr. 25 Graf zobrazující mez pevnosti jednotlivých taveb	34
Obr. 26 Graf zobrazující tažnost jednotlivých taveb	35
Obr. 27 Graf zobrazující nárazovou práci jednotlivých taveb	35
Obr. 28 Průměrný obsah prvků a hmotnosti struskotvorných přísad v průběhu taveb	36
Obr. 29 Vstupní a výstupní obsah fosforu v oxidačním údobí u jednotlivých taveb	36
Obr. 30 Graf závislosti fosforu na vrubové houževnatosti	37
Obr. 31 Obsah síry na začátku redukčního údobí a po odpichu u jednotlivých taveb	38
Obr. 32 Graf závislosti síry na vrubové houževnatosti	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vliv intenzifikace pecí v českých slévárnách [6]	11
Tab. 2 Rozdělení ocelí na legované a nelegované podle normy ČSN EN 10020 [6]	14
Tab. 3 Vliv legujících prvků na vlastnosti odlitků [6], [15]	14
Tab. 4 Chemické složení v hmotnostních % [30]	29
Tab. 5 Tepelné zpracování a mechanické hodnoty [6]	29
Tab. 6 Celková doba taveb	32
Tab. 7 Spotřeba elektrické energie během hodnocených taveb	33

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Chemické analýzy jednotlivých taveb

Příloha 2 Mechanické vlastnosti jednotlivých taveb

Příloha 1 Chemické analýzy jednotlivých taveb

Tavba č.	Zkouška č.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	1	0,510	0,014	0,305	0,012	0,010	0,711	0,047
	2	0,158	0,008	0,015	0,007	0,011	0,332	1,085
	3	0,143	0,112	0,165	0,010	0,012	0,460	1,071
	4	0,154	0,312	0,674	0,014	0,009	2,153	1,028
2	1	0,611	0,048	0,404	0,015	0,013	1,008	0,532
	2	0,180	0,002	0,271	0,012	0,012	0,628	1,002
	3	0,132	0,124	0,260	0,013	0,010	0,762	1,001
	4	0,161	0,307	0,772	0,016	0,008	2,241	0,957
3	1	0,495	0,040	0,376	0,014	0,011	0,935	0,473
	2	0,194	0,012	0,205	0,010	0,011	0,547	1,015
	3	0,123	0,143	0,228	0,013	0,012	0,685	1,142
	4	0,157	0,261	0,676	0,015	0,009	2,119	1,102
4	1	0,601	0,082	0,518	0,014	0,011	1,102	0,537
	2	0,133	0,017	0,270	0,013	0,012	0,667	1,148
	3	0,153	0,131	0,334	0,015	0,011	0,848	1,138
	4	0,162	0,383	0,746	0,017	0,007	2,109	1,111
5	1	0,529	0,018	0,284	0,016	0,018	0,702	0,479
	2	0,166	0,013	0,163	0,008	0,012	0,378	1,112
	3	0,171	0,135	0,229	0,012	0,011	0,506	1,113
	4	0,183	0,363	0,750	0,015	0,007	2,219	1,078
6	1	0,510	0,089	0,537	0,014	0,009	1,023	0,430
	2	0,140	0,014	0,271	0,013	0,011	0,628	1,172
	3	0,159	0,189	0,359	0,014	0,009	0,806	1,157
	4	0,163	0,303	0,695	0,016	0,008	2,159	1,126
7	1	0,530	0,031	0,464	0,012	0,008	0,899	0,488
	2	0,159	0,007	0,308	0,008	0,009	0,593	1,070
	3	0,161	0,153	0,346	0,011	0,008	0,710	1,043
	4	0,166	0,319	0,704	0,013	0,004	2,118	0,997
8	1	0,535	0,042	0,398	0,013	0,009	0,887	0,476
	2	0,128	0,007	0,235	0,009	0,010	0,544	1,058
	3	0,133	0,202	0,317	0,012	0,009	0,683	1,049
	4	0,154	0,369	0,621	0,014	0,005	2,037	1,005
9	1	0,473	0,095	0,645	0,015	0,012	0,988	0,301
	2	0,243	0,002	0,375	0,015	0,013	0,671	1,357
	3	0,172	0,129	0,400	0,016	0,013	0,758	1,382
	4	0,179	0,448	0,822	0,019	0,010	2,106	1,193
10	1	0,458	0,036	0,335	0,016	0,015	0,857	0,439
	2	0,177	0,002	0,228	0,012	0,014	0,597	1,071
	3	0,147	0,142	0,269	0,016	0,014	0,710	1,065
	4	0,162	0,407	0,798	0,018	0,009	2,127	1,019
11	1	0,571	0,128	0,368	0,016	0,014	1,142	0,551
	2	0,154	0,002	0,195	0,014	0,014	0,723	1,103
	3	0,160	0,136	0,225	0,015	0,012	0,877	1,123
	4	0,172	0,341	0,706	0,018	0,011	2,125	1,074
12	1	0,530	0,098	0,381	0,018	0,013	1,021	0,498
	2	0,186	0,002	0,226	0,014	0,014	0,706	1,049
	3	0,135	0,131	0,264	0,016	0,012	0,774	1,050
	4	0,149	0,444	0,724	0,020	0,009	2,074	1,015
13	1	0,451	0,024	0,526	0,012	0,013	1,211	0,585
	2	0,167	0,002	0,324	0,009	0,013	0,842	1,066
	3	0,174	0,136	0,385	0,012	0,014	0,986	1,075
	4	0,192	0,480	0,747	0,014	0,010	2,120	1,063

14	1	0,510	0,052	0,479	0,012	0,014	0,921	0,450
	2	0,200	0,034	0,303	0,012	0,015	0,682	1,055
	3	0,178	0,247	0,368	0,013	0,014	0,766	1,063
	4	0,180	0,408	0,646	0,013	0,012	2,089	1,018
15	1	0,457	0,073	0,441	0,012	0,014	1,284	0,605
	2	0,220	0,043	0,242	0,011	0,014	0,903	1,075
	3	0,194	0,169	0,253	0,013	0,015	0,995	1,091
	4	0,196	0,464	0,732	0,015	0,012	2,160	1,070
16	1	0,522	0,105	0,555	0,014	0,010	1,414	0,754
	2	0,215	0,002	0,314	0,011	0,012	1,013	0,992
	3	0,175	0,113	0,336	0,013	0,010	1,075	1,043
	4	0,188	0,464	0,750	0,015	0,009	2,062	1,021
17	1	0,456	0,037	0,390	0,011	0,012	0,857	0,425
	2	0,206	0,002	0,219	0,008	0,014	0,603	1,027
	3	0,144	0,162	0,264	0,012	0,013	0,696	1,030
	4	0,149	0,415	0,731	0,014	0,009	2,092	0,977
18	1	0,520	0,003	0,327	0,010	0,012	0,825	0,329
	2	0,146	0,002	0,156	0,009	0,014	0,502	1,090
	3	0,136	0,138	0,236	0,012	0,012	0,656	1,077
	4	0,156	0,480	0,633	0,014	0,009	2,030	1,042
19	1	0,499	0,030	0,346	0,012	0,013	0,809	0,341
	2	0,151	0,002	0,139	0,007	0,014	0,414	1,098
	3	0,153	0,097	0,178	0,010	0,014	0,510	1,086
	4	0,164	0,532	0,704	0,014	0,009	2,182	1,047
20	1	0,506	0,058	0,433	0,010	0,013	0,559	0,213
	2	0,163	0,002	0,203	0,009	0,014	0,364	1,000
	3	0,163	0,153	0,244	0,011	0,014	0,416	1,065
	4	0,183	0,580	0,699	0,014	0,009	2,137	1,023
21	1	0,502	0,002	0,366	0,010	0,013	0,899	0,443
	2	0,104	0,002	0,202	0,008	0,014	0,585	1,053
	3	0,166	0,167	0,280	0,012	0,013	0,717	1,070
	4	0,184	0,426	0,676	0,015	0,009	2,147	1,015

Příloha 2 Mechanické vlastnosti jednotlivých taveb

Tavba č.	Zkouška tahem				Zkouška tvrdosti	Zkouška rázem v ohybu			
	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]	HB [-]	KV-1 [J]	KV-2 [J]	KV-3 [J]	KV [J]
1	605,3	735,9	19,3	38,9	191	136	135	139	137
2	535,2	700,5	24,8	67,7	196	134	131	134	133
3	544,9	701,5	25,0	67,3	178	155	146	157	153
4	541,3	706,7	24,5	70,6	180	158	163	161	161
5	518,1	701,2	24,6	59,3	182	134	130	137	134
6	504,3	675,6	27,8	68,6	179	148	147	144	146
7	526,1	693,8	24,6	70,0	189	167	162	155	161
8	588,5	737,8	26,2	71,2	194	164	167	164	165
9	560,5	736,1	25,0	62,4	204	123	117	122	121
10	532,2	694,9	26,3	66,1	184	111	114	117	114
11	576,1	733,1	28,4	65,9	191	119	125	127	124
12	521,6	698,2	27,4	68,4	191	139	144	127	137
13	556,3	733,7	23,9	68,8	192	137	136	126	133
14	517,6	696,0	27,7	65,5	182	123	121	123	122
15	556,7	727,9	23,8	62,9	193	125	136	132	131
16	505,9	688,9	24,8	65,4	179	102	98	101	100
17	478,0	663,7	27,6	70,6	183	163	168	171	167
18	527,2	698,0	22,0	71,3	188	153	155	158	155
19	476,5	669,7	27,9	70,2	184	152	158	154	155
20	538,0	723,0	25,4	66,5	192	122	131	135	129
21	529,4	713,3	25,4	68,1	191	158	160	145	154