



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

IZOLAČNÍ MATERIÁLY VE SLÉVÁRENSTVÍ

INSULATING MATERIALS IN FOUNDRY TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kamil Slowiaczek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Myška

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Kamil Slowiaczek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Myška**
Akademický rok: 2021/22

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:

Izolační materiály ve slévárenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Izolační materiály jsou nedílnou součástí slévárenské výroby a hutního průmyslu, kde se pracuje s vysokými teplotami. Moderní izolační materiály umožňují větší úspory energií díky účinnější izolační schopnosti. Díky účinnějším izolacím je možno zmenšovat konstrukce tepelných zařízení pro úsporu místa na pracovišti nebo naopak zvětšovat kapacity zařízení při zachování stávající konstrukce.

Cíle bakalářské práce:

Student vypracuje literární rešerši na téma izolačních materiálů používaných ve slévárenské výrobě na izolaci pecí a pánví.

Seznam doporučené literatury:

ŠENBERGER, J. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - VUTIUM, c2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

VERT, T. Refractory material selection for steelmaking. Hoboken, New Jersey: The American Ceramic Society, Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-21986-6.

ŠŤASTNÍK, S., J. ZACH. Zkoušení izolačních materiálů. CERM, Brno, 2002. ISBN 80-214-2253-X.

STAROŇ, J., F. TOMŠŮ. Žiaruvzdorné materiály: Výroba, vlastnosti a použitie. Bánská Bystrica: MEDIA, 2000, 445 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá materiály, které zajišťují izolaci slévárenských pecí a pánví. V první části jsou rozebrány vlastnosti, které nejvíce ovlivňují izolační schopnost. Druhá kapitola je zaměřena na přehled a charakteristiku žáruvzdorných materiálů. V další části práce jsou jmenovány a přiblíženy nejpoužívanější izolační materiály. Na závěr se práce věnuje složení vyzdívky elektrické obloukové pece, lící pánve a výdusce indukční kelímkové pece.

Klíčová slova

izolační materiály, žáruvzdorné materiály, elektrické pece, lící pánve

ABSTRACT

The thesis deals with materials that ensure the insulation of foundry furnaces and ladles. The first part discusses the properties that most affect the insulation capacity. The second chapter focuses on the overview and characteristics of refractory materials. In the next part of the thesis, the most used insulation materials are named and approached. Finally, the thesis deals with the composition of the lining of the electric arc furnace, ladles and the rammed lining of the induction crucible furnace.

Key words

insulating materials, refractory materials, electric furnaces, ladles

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOWIACZEK, Kamil. *Izolační materiály ve slévárenství* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139905>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Myška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Izolační materiály ve slévárenství vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Kamil Slowiaczek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Martinu Myškovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mě během celého studia podporovali.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Vlastnosti žáruvzdorných a izolačních materiálů	10
1.1 Pórovitost a hustota	10
1.2 Měrná teplotní a tepelná vodivost	11
1.2.1 Statické metody	11
1.2.2 Dynamické metody	12
1.3 Speciální zkoušky vláknitých materiálů	13
2 Žáruvzdorné materiály a jejich dělení	14
2.1 Rozdělení podle chemického charakteru	14
2.2 Rozdělení podle tvaru	15
2.3 Rozdělení podle chemického složení	15
2.3.1 Šamotové	16
2.3.2 Dinasové	16
2.3.3 Hlinité	17
2.3.4 Magnezitové, magnezitchromové a chrommagnezitové	18
2.3.5 Uhlíkaté žáruvzdorné materiály	19
2.3.6 Zirkonové žáruvzdorné materiály	20
3 Izolační materiály	21
3.1 Hlinitokřemičité vláknité výrobky (keramická vlákna)	21
3.2 Vermikulit	23
3.3 Mikroporézní izolace	23
3.4 Aerogely	24
3.5 Uhlíkové vlákna	25
3.6 Minerální vlna	27
4 Izolace a vyzdívky elektrických pecí a pánví	28
4.1 Vyzdívka a izolace elektrická obloukové pece	28
4.2 Výdusky elektrické indukční kelímkové pece	30
4.3 Vyzdívky a izolace ocelářských pánví	31
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35

ÚVOD

V posledních letech důležitost izolace stále roste a je kladen důraz na vývoj nových, výkonnějších izolačních materiálů. Je to způsobeno hlavně stále rostoucími cenami energií. Například cena elektřiny se za poslední 2 roky zvedla více jak čtyřikrát, je proto důležité vygenerovanou tepelnou energii vyžít na maximum, toho se dá docílit zabráněním jejího úniku právě díky výkonné izolaci [1]. Práce je zaměřena na materiály, které se podílí na izolaci slévárenských pecí a pánví. Izolaci pece zajišťuje celá tloušťka její stěny, skládající se z vyzdívky (žáruvzdorných materiálů) a izolační vrstvy (izolačních materiálů).

Tepelně izolační schopnost materiálů ovlivňují některé jejich vlastnosti, mezi ně patří hlavně pórovitost, měrná tepelná a teplotní vodivost. Pórovitost vyjadřuje poměr objemu pórů ku objemu materiálu. S rostoucí pórovitostí roste i izolační schopnost, díky tomu, že vzduch zachycený v pórech je velmi dobrým izolantem. Měrná teplotní a tepelná vodivost vyjadřují rychlost šíření tepla materiálem, s jejich klesající hodnotou roste izolační schopnost.

Izolační schopnost žáruvzdorných materiálů je podstatně horší než těch izolačních. Je to způsobeno hlavně tím, že žáruvzdorné materiály nejsou primárně určeny k izolaci. Jejich hlavním úkolem je dobře odolávat tekutému kovu a zadržovat v sobě teplo (působí jako zásobník tepla v peci). Izolační materiály mají naopak velmi dobrou izolační schopnost, ale obvykle nejsou uzpůsobeny ke kontaktu s roztaveným kovem. Tyto materiály mají většinou nízkou hustotu a jsou vysoce porézní.

Vyzdívky a izolační vrstvy pecí a pánví mohou být tvořeny různými materiály odvíjejícími se od pracovních podmínek pece. V poslední kapitole je přiblížena izolace a vyzdívání elektrických obloukových a indukčních pecí a licích pánví.

1 VLASTNOSTI ŽÁROVZDORNÝCH A IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

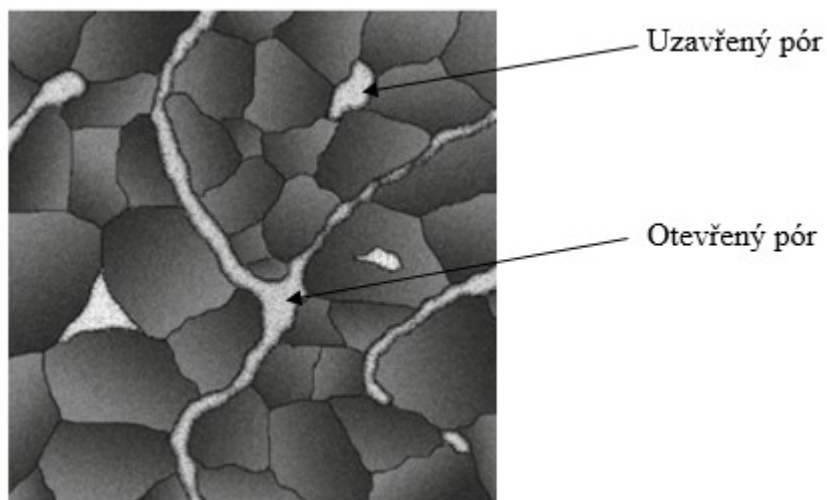
Požadavky na izolační a žárovzdorné materiály jsou rozdílné. Žárovzdorniny musí mít poměrně dobré mechanické vlastnosti a co nejlépe odolávat vysokým teplotám a chemickému působení roztaveného kovu. Od izolačních materiálu se očekává nízká hmotnost, malý objem a co možná nejlepší tepelně izolační schopnost. Tu nejvíce ovlivňuje jeho pórovitost, hustota, měrná tepelná a teplotní vodivost materiálu.

1.1 Pórovitost a hustota

Pórovitost a hustota jsou důležitou vlastností každého materiálu. Většina tepelných, mechanických a dalších charakteristik materiálu závisí právě na hustotě a pórovitosti. Póry zabírají od 1 do 99 % materiálu a mohou být buď otevřené, nebo uzavřené (obr. 1), od toho se odvíjí 3 hlavní druhy pórovitosti: [2]

- Otevřená (P_O) - póry jsou vzájemně propojeny a tvoří v materiálu kanálky. Objem otevřených pórů se zjišťuje pomocí absorpce vody. Existují 2 metody: [2]
 - Metoda varu - materiály se vysuší a poté po dobu dvou hodin vaří ve vodě a následně se ochladí na pokojovou teplotu. Před i po ponoření do vody se zváží a pomocí rozdílu hmotností se zjišťuje objem otevřených pórů. [2; 3]
 - Vakuová metoda - před ponořením do vody se materiál umístí do vakuové komory. Zváží se před a po ponoření a pomocí rozdílu hmotností se zjistí objem otevřených pórů. [2; 3]
- Uzavřená (P_U) - uzavřené póry mohou být buď na hranici zrn, nebo uvnitř zrn. Póry na hranicích tří až pěti zrn mají podstatně větší rozměry než póry uvnitř zrn. Hodnota uzavřené pórovitosti žárovzdorných materiálů moc velký význam v praxi nemá (otevřená je důležitější), ovšem pro izolační materiály je poměrně významná. [2]
- Celková (P_C) - je součtem otevřené a uzavřené: [2]

$$P_C = P_O + P_U \quad (1.1)$$



Obr. 1 Schématické znázornění typů pórů. [2]

U žárovzdorných cihel je požadována co nejmenší pórovitost, protože nízká pórovitost zlepšuje jak mechanickou pevnost, tak i ostatní vlastnosti materiálu. Kromě nízké poréznosti je třeba vzít v úvahu také velikost pórů. [4; 2]

Materiály s vysokou pórovitostí jsou lepším izolantem, a to hlavně díky objemu vzduchu v pórech (vzduch je velmi špatný vodič tepla). Poréznější žárovzdorné materiály se ovšem

nepoužívají při vyšších teplotách, protože se za působení vyšších teplot mohou smrštit. Při kontaktu s tekutou struskou jsou vysoce porézní žáruvzdorné materiály rovněž nevhodné, a to díky tomu, že by struska skrze ně mohla snadněji proniknout. Kvůli výše uvedeným vlastnostem vysoce porézních materiálů se ve slévárenských pecích k vyzdívání většinou používají materiály s nízkou pórovitostí. Naopak u izolačních materiálů je vysoká pórovitost žádoucí. S rostoucí pórovitostí roste tepelně izolační schopnost, protože vzduch (zachycený v pórech) je mnohem lepším izolantem než pevné látky. [2]

S pórovitostí úzce souvisí hustota. Skutečná hustota je poměr hmotnosti materiálu ku jeho skutečnému objemu (bez pórů). V praxi se ovšem skutečná hustota moc nevyužívá, místo toho se počítá zdánlivá hustota materiálu, jako poměr hmotnosti ku celkovému objemu (včetně pórů). [2]

1.2 Měrná teplotní a tepelná vodivost

Měrná teplotní vodivost udává rychlost šíření tepla v pevné látce za konstantního tlaku. Je možné ji buď měřit, nebo vypočítat podle vztahu: [5; 3]

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_v} \quad (1.2)$$

kde:

α – měrná teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

λ – měrná tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ρ_v – objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

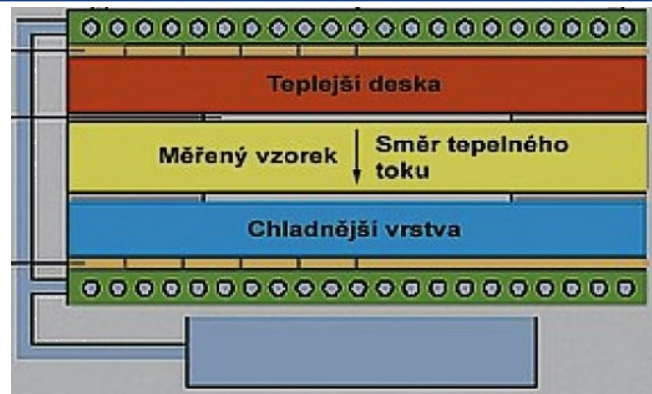
Ze vztahu je tedy patrné, že měrná teplotní vodivost je přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti a nepřímo úměrná měrné tepelné kapacitě a objemové hmotnosti. Pokud se hodnota měrné tepelné kapacity příliš nemění, rozhodující jsou hodnoty součinitele tepelné vodivosti a objemové hmotnosti. U tvarovaných materiálů s rostoucí měrnou tepelnou vodivostí roste i objemová hmotnost, u vláknitých materiálů je tomu naopak. V praxi se sleduje hlavně měrná tepelná vodivost, teplotní vodivost má význam při sledování rozložení teplot v materiálu. [5; 3]

Tepelná energie se v izolačních materiálech přenáší třemi způsoby: vedením, zářením a prouděním. Z hlediska praktického využití je nejdůležitější určit celkový přenos tepla vyjádřený pomocí měrné tepelné vodivosti. K jejímu určení se používá statických (při ustáleném tepelném toku) a dynamických (při neustáleném tepelném toku) metod. [5; 3]

1.2.1 Statické metody

Hlavní nevýhodou statických metod je, že ustálení tepelného toku, v závislosti na velikosti a tvaru vzorku, probíhá velmi pomalu. Statická metoda se dělí na absolutní (měří se množství tepla, které prošlo vzorkem) a relativní (porovnává se teplotní spád dvou vzorků, kdy hodnota měrné tepelné vodivosti u jednoho vzorku je známá). [5; 3]

Nejpoužívanějšími statickými metodami jsou deskové metody. Tepelný tok se měří buď z množství elektrické energie dodané teplé straně vzorku, nebo vodním kalorimetrem na opačné straně. K měření teplotního gradientu se používají termočlánky. Princip deskové metody je zobrazen na obrázku 2. [5; 3]



Obr. 2 Princip deskové metody. [6]

Tepelná vodivost se měří také srovnávací metodou, kdy je se vzorek umístí do série se standartním vzorkem a vystaví se stejnému tepelnému toku. Teplotní vodivost srovnávaného vzorku se pak určuje výpočtem podle vztahu: [5; 3]

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{A_1 \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_1}{A_2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_2} \quad (1.3)$$

kde:

λ_2 – tepelná vodivost zkoumaného vzorku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ_1 – tepelná vodivost standartního vzorku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

A_1, A_2 – plochy vzorků jimiž prochází stejný tepelný tok [m^2]

$\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_1, \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_2$ – naměřené teplotní spády [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

Statické měření vychází z předpokladu, že homogenním tělesem při stejném teplotním rozdílu mezi horkou a studenou stranou protéká stejné množství tepla za stejný čas. Délka hrany zkoumaného vzorku se obvykle pohybuje mezi 40 a 100 mm a jeho tloušťka mezi 10 a 30 mm. [5; 3]

1.2.2 Dynamické metody

Dynamické metody jsou založené na proměnném tepleném toku. Měří se pouze změna teploty v závislosti na čase. Pomocí změny teploty se určí měrná teplotní vodivost α a podle vzorce (1.2) se dopočítá měrná tepelná vodivost λ . Nejčastější z dynamických metod je metoda topného drátu, viz obrázek 3. Lze jí použít i jako statickou, ovšem jako dynamická převládá díky úspoře času. Je založená na měření nárůstu teploty v určité vzdálenosti (r) od zdroje tepla, kterým je horký drát. Výhodou je, že se dá přímo určit hodnota λ a nevýhodou je experimentální náročnost. Pro dielektrika jsou dva způsoby uspořádání: [5; 3]

- Měřicí kříž – pro $\lambda \leq 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Paralelní způsob - pro $\lambda \leq 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Pro tepelně izolační materiály se tedy výhradně uplatňuje měřicí kříž. Tepelná vodivost se také dá určit podle vztahu: [5; 3]

$$\lambda = \frac{U \cdot I}{4\pi \cdot l} \cdot \frac{\ln(t)}{\Delta T} \quad (1.4)$$

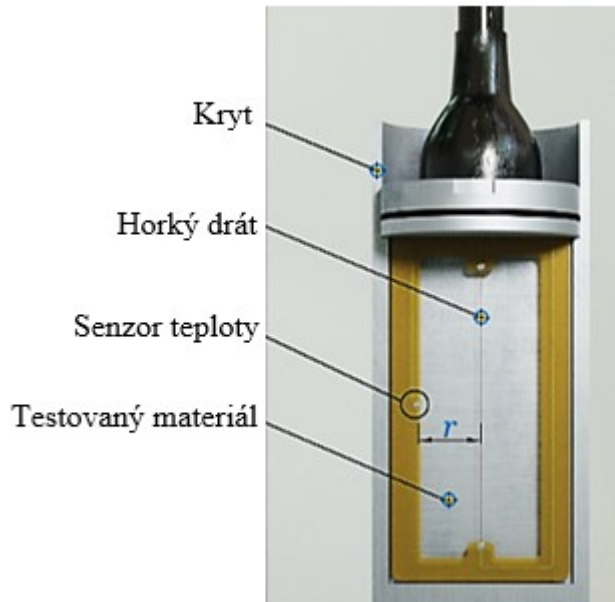
kde:

U – napětí na topném drátu mezi body ve vzdálenosti l [V]

I – procházející proud [A]

t – čas od zapnutí po vypnutí ohřevu drátu [s]

ΔT – rozdíl teplot před zapnutím a po vypnutí ohřevu drátu [K]



Obr. 3 Schéma metody topného drátu. [7]

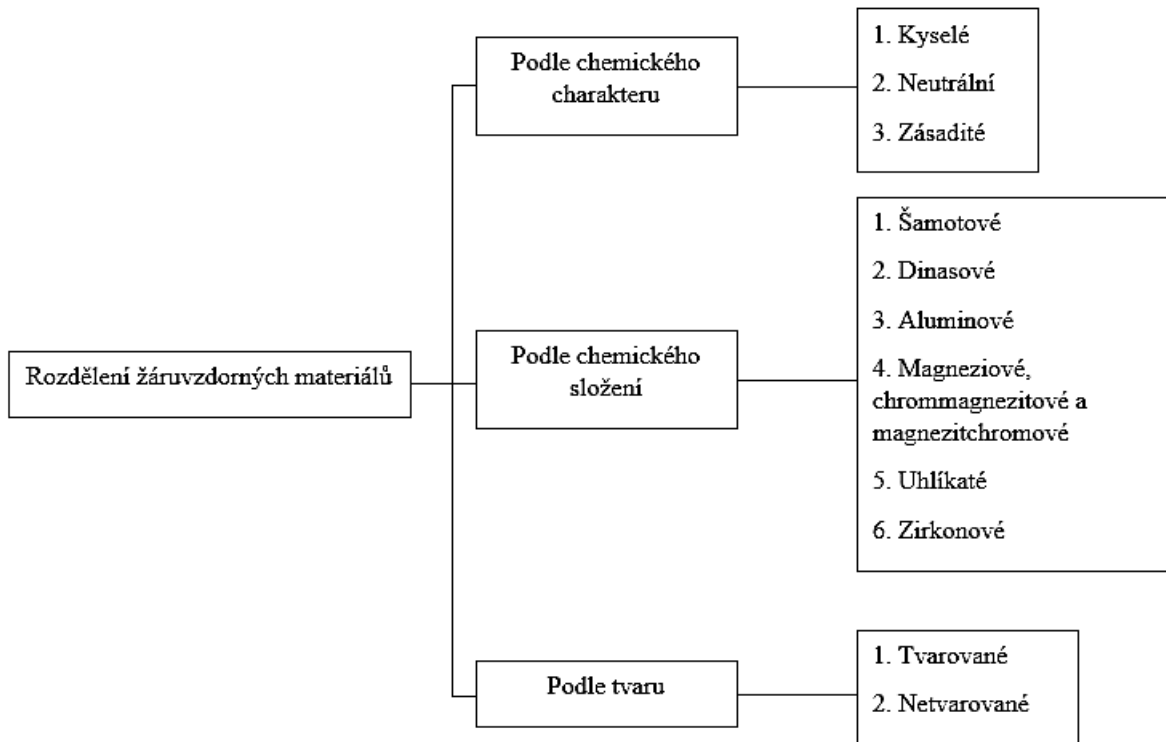
1.3 Speciální zkoušky vláknitých materiálů

Speciálně pro vláknité materiály bylo vyvinuto několik zkoušek:

- Stanovení středního průměru vláken – určuje se pomocí elektronového, optického, nebo rastrovacího mikroskopu. Průměr vláken se obvykle pohybuje mezi 2,5 a 5 μm . Využívá se permeabilních metod, jak propustnosti vzduchu, tak i kapalin. Pokud je známý počet a délka vláken, lze jejich průměr určit i vážením. [5]
- Stanovení délky vláken – u krátkých vláken se měří pomocí optického, nebo elektronového mikroskopu. Dlouhá vlákna se měří posuvným měřítkem. [5]
- Stanovení obsahu nevláknitých příměsí – množství i velikost nerozvlákněných částí (broků) negativně ovlivňuje tepelně izolační schopnost materiálů. Zjišťuje se přítomnost broků větších jak 75 μm . Zkoumaný vzorek se vyžihá při teplotě 1100 $^{\circ}\text{C}$ (aby se vlákna lépe drtily) a poté se přesune do mixéru, kde se drtí alespoň 5 minut při minimálních otáčkách 15000 min^{-1} . Potom se rozdrčená směs přeplaví přes síto s otvory o velikosti 75 μm . Vláknité materiály lehce projdou a na sítu zůstanou nerozvlákněné broky. [4; 5]
- Stanovení trvalých délkových změn – vzorek se zahřívá na určenou teplotu, na které se udržuje po dobu 24 hodin. Délkové změny se zjistí pomocí čtyř platinových drátků, které se před měřením zapíchnou do materiálů. V praxi se ukazuje, že délkové změny ve směru kolmo na orientaci vláken jsou podstatně větší než ve směru orientace vláken. [4]

2 ŽÁRUVZDORNÉ MATERIÁLY A JEJICH DĚLENÍ

Žárovzdorné materiály jsou anorganické, nekovové a heterogenní materiály složené z tepelně stabilních prvků. Od žárovzdorných materiálu se vyžaduje: dobrá odolnost vůči vysokým teplotám, zachycování tepla v peci, odolnost proti teplotním šokům, schopnost odolávat chemickému a abrazivnímu působení tekutého kovu a strusky, se kterými přicházejí do styku, dostatečná rozměrová stabilita za vysokých teplot a nízký koeficient tepelné roztažnosti. Žárovzdorné materiály do jisté míry působí i jako tepelná izolace, ovšem jejich tepelně izolační schopnost je horší než u izolačních materiálů. Žárovzdorné materiály se dají dělit podle různých hledisek, viz obrázek 4. [8]



Obr. 4 Rozdělení žárovzdorných materiálů. [8]

2.1 Rozdělení podle chemického charakteru

Podle chemického charakteru je možné rozlišovat:

- Kyselé - hlavní složkou kyselého žárovzdorného materiálu je oxid křemičitý. V prostředí s vysokou teplotou kyselý žárovzdorný materiál odolává erozi kyselé strusky, ale snadno eroduje při reakci s alkalickou struskou. Nejvíce se používá pro koksárenské pece, vypalovací pece a sklářské pece v metalurgickém průmyslu. Kyselé žárovzdorné materiály se dělí na silně kyselé (křemičité cihly), středně kyselé (hlinitokřemičitanové cihly), slabě kyselé (šamotové cihly) a speciální (zirkonové a z karbidu křemíku) žárovzdorné materiály. [8; 9; 10]
- Neutrální - neutrální materiály chemicky nereagují s kyselinami, ani zásadami. Používají se v oblastech, kde jsou struska i vsázka kyselé, nebo zásadité. Příklady neutrálních materiálů jsou uhlíkové, chromitové žárovzdorné materiály a žárovzdorné materiály na bázi oxidu hlinitého. [8; 9]
- Zásadité - zásadité žárovzdorné materiály obsahují oxid hořečnatý a oxid vápenatý. Jsou také typické svou vysokou žárovzdorností (i nad 2000 °C). Mezi zásadité žárovzdorné

materiály se řadí magneziové, chrommagnezitové, magnezitchromové a dolomitové cihly. Zásadité materiály mají za vysokých teplot velmi dobrou odolnost proti alkalické strusce, naopak při reakci s kyselou struskou erodují. Díky své vysoké odolnosti vůči zásadité strusce mají hlavní uplatnění jako vyzdívky pecí pro výrobu oceli (většinou jako vyzdívky dna a stěn) a také jako trvalá vyzdívka kyslíkového konvertoru. [8; 9; 11]

2.2 Rozdělení podle tvaru

Podle způsobu, jakým jsou materiály dodávány uživateli je lze rozdělit na:

- Tvarované - vyrábí se a dodávají uživateli v určitém tvaru, jsou taky známy jako žáruvzdorné cihly a tvárnice. Tvary cihel mohou být buďto standartní, nebo speciální. Standartní tvary jsou vhodné pro většinu pecí stejného typu. Speciální tvary jsou vyráběny pro jednu konkrétní pec. [8; 12; 13; 14]

Standartní tvarované materiály jsou většinou lisovány strojově, proto mají vysokou jednotnost vlastností. Speciální tvary se nejčastěji vyrábí ručně, takže se dají očekávat odchylky jak od vlastností, tak rozměrové. Před dodáním uživateli se tvarované žáruvzdorné materiály vždy vypalují. [8; 12; 13; 14]

- Netvarované materiály - nemají žádný tvar a jsou dodávány ve formě prášku. Jsou také známy jako monolitické. Svůj definitivní tvar získávají až při aplikaci. Jedná se o směs žáruvzdorného ostřiva a anorganického pojiva v takovém poměru, aby se dosáhlo požadované hutnosti. Pro aplikaci netvarovaných materiálů se nejčastěji uplatňuje pěchování, tryskání, stříkání, házení pískem atd. [8; 12; 13; 14]

Výhody oproti tvarovaným materiálům jsou: [8; 13]

- Menší množství slabých míst, jako jsou spáry, trhliny atd.,
- Větší objemová stabilita,
- Snadnější přeprava a manipulace,
- Rychlejší a ekonomicky méně náročná instalace.

Netvarované materiály se dělí na:

- Žáromonolity - mezi žáromonolity se řadí hlavně dusací hmoty a žárobetony. Dusací hmoty se aplikují většinou za studena, aby bylo možno dosáhnout požadovaných tvarů s určitou přesností. Žárobetony jsou vyráběny z cementu a žáruvzdorného ostřiva. Při jejich aplikaci je třeba je smíchat s vodou. [8; 12; 13; 14]
- Spojovací hmoty - Mezi spojovací hmoty patří různé malty a tmely. Jsou používány ke spojování tvárnic a cihel. Aby se předešlo vzniku eutektik s nízkým bodem tavení musí mít malty a tmely určité chemické složení, nejlepší je, aby chemické složení tmelu, nebo malty bylo podobné chemickému složení cihly. Spáry mezi cihlami jsou nejslabším místem vyzdívky, proto je třeba je minimalizovat. [8; 12; 13; 14]

2.3 Rozdělení podle chemického složení

Nejčastěji se žáruvzdorné materiály vyrábí z oxidu křemičitého a oxidu hlinitého, těmto materiálům se pak říká hlinitokřemičité. Podle obsahu oxidu křemičitého a hlinitého se hlinitokřemičité rozlišují na šamot, dinas a hlinité materiály. Na obrázku 6 je zobrazen rovnovážný diagram hlinitokřemičitých materiálů. Kromě výše zmíněných dvou oxidů se žáruvzdorné materiály vyrábí ještě z oxidu hořečnatého (magneziové), kombinace oxidu

hořečnatého a chromitého (magnezitchromové, nebo chromamnezitové), oxidu zirkoničitého (zirkonové) a uhlíku (uhlíkaté). [8]

2.3.1 Šamotové

Šamotové žáruvzdorné materiály jsou v současnosti nejrozšířenější, jedná se v podstatě o vypálenou jílovou zeminu. Šamot obsahuje 50 až 80 % oxidu křemičitého a 20 až 44 % oxidu hlinitého. Šamotové žáruvzdorné materiály jsou velmi univerzální a taky nejméně nákladné vzhledem k ostatním žáruvzdorným materiálům. Pokud šamot obsahuje více oxidu křemičitého má spíše kyselý charakter, pokud obsahuje více oxidu hlinitého charakter je spíše zásaditý. Žáruvzdornost kyselých šamotů ovlivňuje nejvíc obsah oxidu hlinitého (s rostoucím obsahem žáruvzdornost roste), u zásaditých je to obsah oxidu křemičitého (s rostoucím obsahem žáruvzdornost klesá). [8; 12; 13]

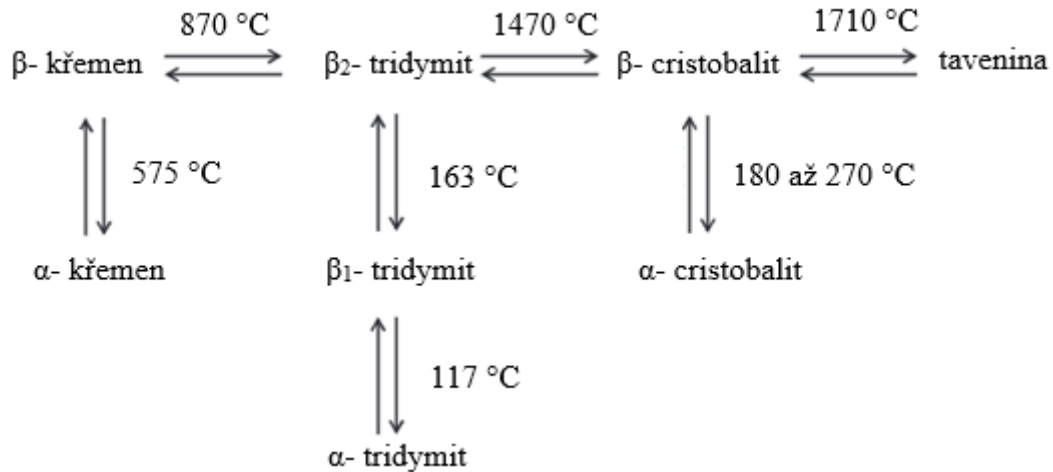
Šamoty se nesmí vyrábět jen z plastických surovin, protože by při sušení a pálení došlo ke smršťování a deformaci, proto se vyrábějí ze směsi plastických hmot a ostřiva. Ostřivo svůj tvar při pálení a sušení nemění, nebo mění jen minimálně, takže ostřivo vytváří pevnou kostru a zajišťuje požadovaný tvar cihly. Směs je míchána tak, aby měla cihla požadované vlastnosti a zároveň, aby se se směsí dobře pracovalo. Upravováním poměru mezi plastickou hmotou a ostřivem se získávají různé druhy šamotu. [4; 13]

Plastickou hmotou (kaolíny a žáruvzdorné jíly) jsou kaolinitové horniny, skládající se hlavně z křemičitanů, obecný vzorec těchto křemičitanů je $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$. Při vysokých teplotách se voda vytlačí. Kromě kaolínu a jílu jsou v hmotě i různé příměsi, hlavně oxidy draslíku, sodíku, vápníku, hořčíku a železa. Tyto příměsi snižují bod tání šamotu, jejich obsah by neměl překročit 6 %. Ostřivem jsou vypálené a rozemleté lupky, jíly, kaolíny a šamotový odpad. [4; 15]

Ještě před mícháním směsi a vypalováním se musí jednotlivé složky směsi připravit. Plastické pojivo se připravuje postupným drcením, sušením, mletím na jemno a přeséváním. Ostřivo se lisuje z vlhkých rozemletých jílu, které se vypálí až do spečení, po jejich vypálení se vzniklá hmota drtí, rozemele na jemno a prosévá. Upravené pojivo a ostřivo se smíchají v požadovaném poměru a navlhčí se. Množství vody může být různé a závisí na zhutňování. Po zhutnění ve formách se cihly předsuší, aby vlhkost byla maximálně 2 %. Po předsušení následuje sušení. Teplota při sušení se pohybuje mezi 100 a 150 °C. Po sušení se cihly vypalují, aby došlo ke spečení. Teplota výpalu závisí na druhu šamotu, ale běžně se pohybuje okolo 1250 až 1400 °C. Doba vypalování závisí na rozměrech cihly. [4; 15]

2.3.2 Dinasové

Dinasové žáruvzdorné materiály se vyrábějí z oxidu křemičitého, kterého obsahují alespoň 95 %. Při vypalování dinasové žáruvzdorné cihly dojde ke krystalické přeměně oxidu křemičitého a začnou se objevovat jeho modifikace (obr. 5). V přírodě se SiO_2 vyskytuje jako α křemen, který je stabilní do 575 °C. Při teplotě 575 °C se α křemen mění na β křemen, při 870 °C se β křemen mění na tridymit a při 1470 °C se tridymit mění na cristobalit. U teplot vyšších jak 1710 °C dochází k tavení SiO_2 . [4; 8; 12; 16; 17]



Obr. 5 Krystalické přeměny křemene. [16]

Směs, ze které se vypalují křemičité cihly je složena z křemičitého písku, vápenatého tavidla a vody. Ideální poměr je 97 % křemičitého písku, 2 % vápna a 1 % vody. Křemičitý písek se skládá z hrubých a jemných zrn. [4; 12; 16]

Před vypalováním se směs nejdříve suší při teplotách 120 až 200 °C. Dochází k tuhnutí směsi díky přeměně vápna na křemičitan vápenatý. Sušení trvá většinou 24 až 30 hodin. [4; 16]

Při vypalování křemičité cihly je třeba dbát na změnu objemu směsi. Vzhledem k rozdílným hustotám křemene a jeho modifikací (tab.1) dojde při vypalování k nárůstu objemu o 14 až 15 %. V důsledku růstu objemu je potřeba dbát na maximální rychlost ohřevu nepřesahující 5 °C za minutu. Konečná teplota je 1470 až 1500 °C, na této teplotě se cihly udržují po dobu 360 až 480 hodin, pak se začnou ochlazovat stejnou rychlostí jakou se ohřívaly. Pomalé ochlazování je důležité, aby v cihle nevznikalo vnitřní napětí, které by mohlo mít za následek vytvoření strukturální slabosti jako jsou lomové zóny a trhliny. [4; 12; 16]

Tabulka 1 Hustoty modifikací křemene. [17]

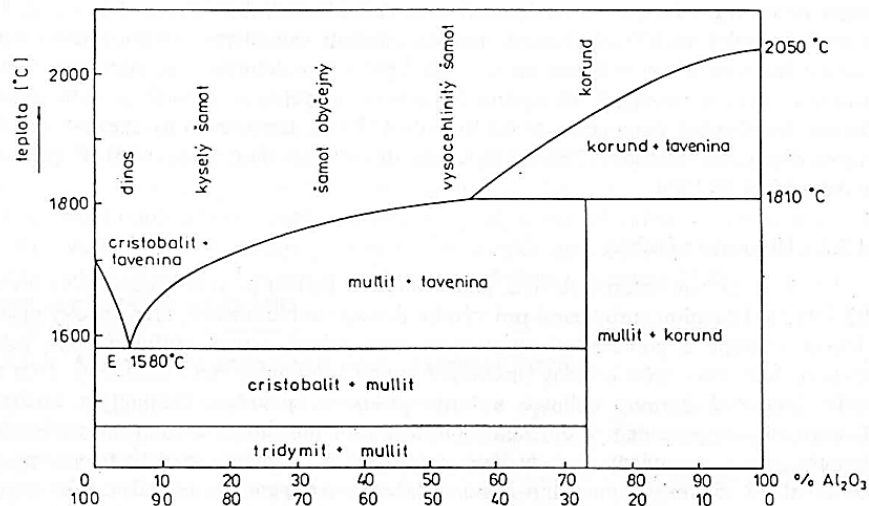
Křemen	Cristobalit	Tridymit	Křemenné sklo
2,65 g·cm ⁻²	2,31 g·cm ⁻²	2,27 g·cm ⁻²	2,20 g·cm ⁻²

Po vypálení v cihle zůstane stále kolem 6 % zbytkového křemene. Množství zbytkového křemene je ovlivněno rychlostí ohřívání a ochlazování, konečnou teplotou, a dobou strávenou v peci při nejvyšší teplotě. Hustota cihly je většinou 2,33 g·cm⁻² a její typické chemické složení je 6 % křemene, 36 % cristobalitu, 45 % tridymitu a 13 % matrice křemenného skla. [4; 12; 17]

2.3.3 Hlinité

Základními složkami hlinitých žáruvzdorných materiálů jsou oxid křemičitý a oxid hlinitý. Obsah oxidu hlinitého je alespoň 50 %. Z diagramu na obrázku 3 je patrné, že teplota tání roste s rostoucím obsahem Al₂O₃ až na teplotu 2050 °C, která je teplotou tání čistého korundu. [8; 12; 16]

K výrobě hlinitých žáruvzdorných materiálů se používají jak přírodní (bauxit, andalusit) tak syntetické materiály (tavený mullit, oxid hlinitý, tavený korund). [4; 16]


 Obr. 6 Rovnovázný diagram $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. [12]

Podle obsahu oxidu hlinitého je lze rozdělit:

- 50 až 70 % Al_2O_3 - při výrobě těchto materiálů se používají dvě základní minerální směsi. Výsledné fyzikální vlastnosti závisí na použité směsi. Nejjednodušší způsob je použití minerálu obsahující 50 až 60 % Al_2O_3 jako jsou bauxitový kaolín, nebo andaluzit. Druhou metodou je ředění bauxitu. Bauxit, který obsahuje 88 % oxidu hlinitého se ředí páleným šamotem s obsahem oxidu hlinitého kolem 40 % a hlinou tak, aby se dosáhlo požadovaného obsahu Al_2O_3 . Vlastnosti materiálu vyrobeného metodou ředění bauxitu jsou podstatně horší. [8; 18]
- 70 až 80 % Al_2O_3 - tyto materiály se vyrábí buď z bauxitových jíílů s obsahem Al_2O_3 aspoň 70 %, nebo opět ředěním bauxitu šamotem, tak aby se dosáhlo požadovaného obsahu oxidu hlinitého. Materiály z bauxitového jíilu mají vyšší roztažnost při opakovaném ohřevu, vyšší ztráty odlupováním a lepší odolnost proti erozi. [8; 18]
- 80 až 90 % Al_2O_3 - tyto materiály se nejčastěji používají v tavicích a udržovacích kelímcích hliníkových pecí. V železářském průmyslu se moc nevyužívají. Kvůli nepříznivé reakci bauxitu se struskou dochází k erozi cihly a vysokým ztrátám. [8; 18]
- 90 až 99 % Al_2O_3 - materiály s obsahem Al_2O_3 nad 90 % mají největší pevnost, odolnost proti erozi, a nejvyšší bod tání. Nejčastěji se vyrábí ze syntetických materiálů na bázi oxidu hlinitého. Praktický limit pro obsah Al_2O_3 v cihlách při nejvyšších teplotách je asi 96 %, po přesažení tohoto limitu nemají cihly po vypálení požadovanou hustotu a vlastnosti. Cihly přesahující 96 % oxidu hlinitého se používají hlavně po nízkoteplotní aplikaci. [8; 18]

2.3.4 Magnezitové, magnezitchromové a chrommagnezitové

K výrobě těchto materiálů se používá oxid hořečnatý, nebo kombinace oxidu hořečnatého a chromitého. Podle obsahu těchto oxidů se dělí na: [8]

- Magnezitové - magnezitové cihly mají dobrou odolnost vůči zásaditým struskám, oxidům železa a alkáliím. Nejčastěji se používají jako vyzdívkový materiál elektrické obloukové pece. Hlavní složkou je minerál periklas (MgO), který svými vlastnostmi nejvíce ovlivňuje vlastnosti magnezitové cihly. Žáruvzdornost magnezitové cihly závisí na její čistotě. V čisté formě má MgO bod tání na 2800 °C. [4; 12]

Oxid hořečnatý, který je základní surovinou, se získává z magnezitu. Magnezit se skládá z uhličitanu vápenatého (MgCO_3) a dalších sloučenin Ca, Fe a Si. Oxid hořečnatý (MgO) se z magnezitu získává jeho vypalováním, při němž se z magnezitu uvolňuje oxid uhličitý a tím vzniká MgO . Vypalování probíhá za teplot 1500 až 1600 °C. Vypálený oxid hořečnatý se drtí a mele na malé zrna. Směs na výrobu magnezitových cihel musí obsahovat aspoň 86 % MgO . Ke spojování směsi dochází dvěma způsoby, buď se vypaluje, nebo se spojí chemicky. [4; 12; 15]

Před vypalováním se vytvarované cihly nejdříve suší při teplotách 70 až 120 °C. Po sušení se cihly vypalují za teplot 1400 až 1700 °C po dobu asi 6 dní. Ochlazování musí probíhat pomalu, aby nedocházelo ke koncentraci vnitřního napětí a vzniku trhlinek. U chemického spojování se využívá tmel. Jako tmel se používá roztok chloridu hořečnatého (MgCl_2). Chemickým působením dochází ke zpevnění cihly bez nutnosti výpalu. Vytvarované cihly stačí pouze vysušit. [4; 12; 15]

- Magnezitchromové a chrommagnezitové - jejich hlavními složkami jsou oxid chromitý a oxid hořečnatý. Podle obsahu těchto oxidů se tyto materiály nazývají buď magnezitchromové, nebo chrommagnezitové. Chrommagnezitové většinou obsahují od 15 do 35 % oxidu chromitého a 42 až 50 % oxidu hořečnatého, u magnezitchromových je to od 8 do 18 % oxidu chromitého a minimálně 60 % oxidu hořečnatého. Chrommagnezitové žáruvzdorné materiály mají vysokou žáruvzdornost a dobře odolávají korozivním struskám, proto se používají při stavbě kritických částí pecí. Magnezitchromové žáruvzdorné materiály dobře odolávají vysokým teplotám a také základním struskám používaným při výrobě oceli. Magnezitchromové materiály mají lepší odolnost proti odlupování. [4; 8; 12; 16]

Vyrábějí se ze směsi vypáleného magnezitu a chromové rudy, která obsahuje kolem 80 % chromitu (60 % oxidu chromitého a příměsi v podobě oxidu hořečnatého a oxidu hlinitého). Jsou 2 způsoby výroby těchto cihel, vypalování a chemické spojení zrnité směsi. Pálené cihly se vyrábí z chromové rudy, před vypálením se směs míchá s vypáleným magnezitem, vlhčí vodou a poté se suší při teplotách 70 až 120 °C. Výpal probíhá za teplot 1500 až 1600 °C. [4; 12; 16]

2.3.5 Uhlíkaté žáruvzdorné materiály

Základem uhlíkatých žáruvzdorných materiálů je uhlík v různých podobách (tvarovaný, vyrobený, amorfni, vypálený, v grafitizované a semigrafítizované formě) a sloučeniny uhlíku. Uhlíkaté materiály se většinou používají v prostředí se zásaditou struskou, díky vysoké chemické odolnosti vůči ní. Tyto materiály mají vysokou žáruvzdornost, vysokou teplotu měknutí při zatížení, vysokou tepelnou stabilitu a taky dobře odolávají působení strusky. Mezi uhlíkové materiály patří: [4; 8]

- Tuhové výrobky - tuha je jedna z modifikací uhlíků. Mezi její nejdůležitější vlastnosti patří vysoká teplota tavení (až 3800 °C), velmi dobrá chemická odolnost a velká stálost při vysokých teplotách. Tuha měkne při 2500 °C. Vypalují se v šamotových pouzdrech, obsypané koksem za teploty 1000 °C. [4; 12; 15]
- Výrobky z karbidu křemíku - hlavní složkou je SiC (karbid křemíku), který se uměle vyrábí v elektrických pecích tavením křemenného písku a koksu. Zjednodušená chemická rovnice vzniku karbidu křemíku je: $\text{SiO}_2 + 3 \text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2 \text{CO}$. Tavení probíhá za teplot 1600 až 2000 °C. Výrobky z karbidu křemíku mají vysokou žáruvzdornost, jsou velmi tvrdé (asi 9,5 podle Mohsovy stupnice) a mají malou tepelnou roztažnost. [4; 8; 12]

Vyrábějí se dvěma způsoby. Při prvním způsobu se připraví směs z rozemletého karbidu křemíku a žáruvzdorného jílu, která se navlhčí, vysuší při teplotě 80 °C a poté vypálí za teplot 1400 až 1500 °C. U druhého způsobu se využívá rekrystalizace karbidu křemíku za teploty 2000 °C. [4]

- Uhlíkové výrobky - rozdělují se podle použitých materiálů, kterými jsou:
 - Termoantracit - vzniká jako produkt kalcinace antracitu za teplot 1250 až 1300 °C. Žíhaný (při teplotě kolem 2000 °C) se používá k výrobě elektrod elektrické obloukové pece. K žíhání dochází proto, aby se utvořila alespoň částečně uspořádaná grafitová struktura. [4]
 - Černouhelný koks - produktem karbonizace černého uhlí. Nejvhodnější se s pórovitostí do 45 %. [4]
 - Petrolkoks a smolný koks - jsou zbytky po tepelném zpracování ropy. [4]
 - Elektrografit - je získáván grafitizací uhlíkových těles. [4]
 - Přírodní grafit - forma uhlíku s dobrou krystalickou strukturou, vyskytující se v přírodě. [4]

Ostřivem používaným k výrobě uhlíkových tvarovek je jeden, nebo směs výše uvedených materiálů. Pojivem je obvykle dehet s vysokým uhlíkovým zbytkem. Obsah pojiva ve směsi závisí na pórovitosti ostřiva. Tvarovací směs se míchá ve vyhřívaných míchačích. Do tvarovacích směsí se mohou přidávat látky, které pak ovlivňují vlastnosti cihly (pevnost za vysokých teplot, velikost pórů, pórovitost a odolnost proti roztavenému kovu). Nejčastěji se používá křemík, karbid křemíku, titan a oxid titaničitý. [4]

Směs se tvaruje při tlaku 30 až 60 MN·m⁻². Po vytvarování se cihly vypalují při maximální teplotě 1500 °C. Během výpalu jsou cihly zasypány zrnitým koksem, antracitem, nebo jejich směsí s pískem, aby se zamezilo přístupu vzduchu. [4]

2.3.6 Zirkonové žáruvzdorné materiály

Mezi žáruvzdorné materiály obsahující ZrO₂ patří zirkonové materiály (na bázi křemičitanu zirkoničitého- minerál zirkon) a zirkoničité materiály (na bázi oxidu zirkoničitého – minerál baddeleyit). Oxid zirkoničitý se také v malém množství přidává do ostatních materiálů (například do magneziových) pro zlepšení jejich vlastností. [4; 8]

Oxid zirkoničitý se vyskytuje v různých modifikacích, při přeměnách mezi těmito modifikacemi dochází ke změně objemu až o 11 %. Před výrobou žáruvzdorných materiálů je třeba ZrO₂ stabilizovat. Stabilní oxid zirkoničitý má kubickou modifikaci. Křemičitan zirkoničitý (ZrSiO₄) je při nízkých teplotách velmi stály, při 1676 °C se začíná rozkládat na ZrO₂ + SiO₂. Přítomnost dalších oxidů snižuje teplotu rozkladu až na 1500 °C. [4]

K výrobě zirkonových cihel se používá jemnozrný zirkonový písek a jemně mletá zirkonová moučka. Směs, ze které se cihly tvarují obsahuje 60 až 70 % zirkonového písku a 30 až 40 % zirkonové moučky. Vypalování probíhá za teplot, při kterých ještě nedochází k rozkladu křemičitanu zirkoničitého na oxidy. Běžně se tvarovky vypalují za teplot okolo 1550 °C. [4]

Zirkonové žáruvzdorné materiály velmi dobře odolávají vysokým teplotám, proto se používají hlavně v místech pece, kde teplota přesahuje 1900 °C, jako jsou vtoky a kelímky. Oxid zirkoničitý je velmi dobrý izolační materiál s minimálními tepelnými ztrátami a taky téměř nereaguje s tekutým kovem. Díky těmto vlastnostem je používán hlavně pro výrobu žáruvzdorných kelímků a dalších nádob pro metalurgii. [4; 8]

3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY

Díky stále rostoucím cenám energií (obr. 7) důležitost izolace a vývoje lepších izolačních materiálů stále roste. Studie ukázaly, že až 50 % generovaného tepla se ztrácí v důsledku špatného tepelného managementu. V grafu na obrázku 7 osa x představuje čas (v letech) a osa y cenu 1 MWh elektřiny (v eurech). [19]



Obr. 7 Ceny elektřiny za poslední roky. [1]

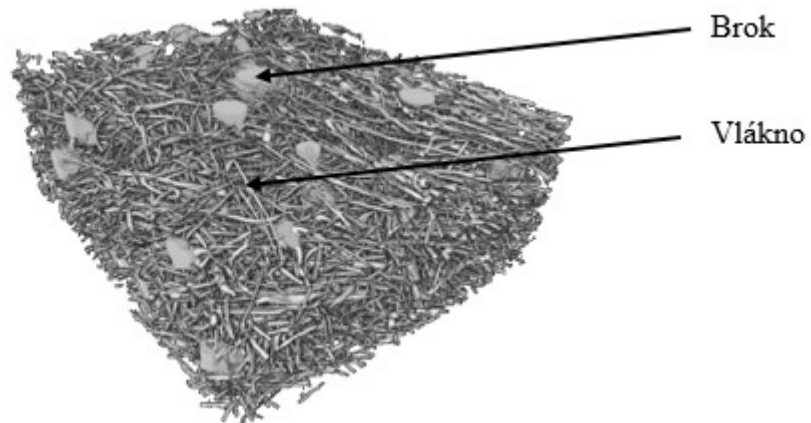
K přenosu tepelné energie dochází třemi způsoby: vedením, zářením a prouděním. Přenos vedením se uskutečňuje v homogenních tělesech, a to přímým přenosem mezi atomárními částicemi. Přenos tepla zářením je charakteristický tím, že se tělesa nedotýkají a k přeměně záření na tepelnou energii dochází až při absorpci záření. Při přenosu tepla prouděním se teplo přenáší díky pohybu a mísení plynů. Ideální izolační materiál je ten, který dobře odolává všem třem typům přenosu tepla. [3]

3.1 Hlinitokřemičité vláknité výrobky (keramická vlákna)

Podle fázového složení se rozdělují na:

- Amorfnní – obsahují oxid hlinitý a oxid křemičitý v různém poměru. [4]
- Polykrystalické – obsahují kolem 95 % oxidu hlinitého. [4]

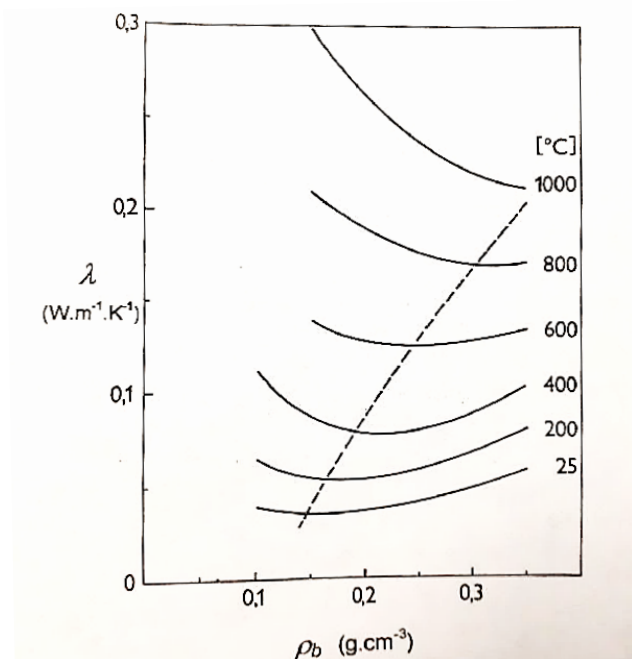
Nejčastěji se vyrábějí amorfnní vlákna s obsahem 45 až 55 % Al_2O_3 . Vyrábějí se z technického oxidu hlinitého a křemičitých písků. Jejich směs se taví v elektrických obloukových pecích při teplotě kolem $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Z taveniny o teplotě asi $1800\text{ }^\circ\text{C}$ vznikají vlákna buď na rozvláknovacích kotoučích, nebo rozfoukáváním parou. Každé vlákno má dvě části: brok (s průměrem od 25 do $300\text{ }\mu\text{m}$) a dlouhý konec (s průměrem okolo $3\text{ }\mu\text{m}$). Na obrázku 8 je zobrazena struktura keramického vlákna. Před zpracováváním vláken se z nich odstraňují broky, protože ty negativně ovlivňují tepelně izolační schopnost materiálů. Z vláken se vyrábějí přešívané rohože (objemová hmotnost $70\text{ až }130\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), skládané rohože (objemová hmotnost $100\text{ až }180\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), měkké, nebo tuhé desky (objemová hmotnost $160\text{ až }350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), nebo se tvarují vakuovým procesem (objemová hmotnost $250\text{ až }500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Desky a tvarovky mohou obsahovat buď organická, nebo anorganická pojiva. [4; 19]



Obr. 8 Struktura keramického vlákna. [19]

Polykrystalické vlákna nejčastěji obsahují 95 % oxidu hlinitého 4,8 % oxidu křemičitého a 0,2 % ostatních složek. Připravuje se suspenze obsahující kolem 90 % hlinitých solí (např. octan, dusičnan) a 10 % polymerizujících přísad (např. polyvinylalkohol). Ta je tepelně zpracovávána za teplot 1150 až 1200 °C a tvarována vstřikovací metodou. Podobně jako u amorfních se z polykrystalických vláken vyrábí rohože a desky. V některých výrobcích se kombinují amorfní a polykrystalická vlákna. [4]

Tepelně izolační schopnost hlinitokřemičitých vláknitých výrobků závisí hlavně na jejich objemové hmotnosti. S rostoucí teplotou klesá tepelná vodivost a objemová hmotnost roste (obr. 9) a tím se snižuje množství tepla přeneseného zářením. [4]



Obr. 9 Závislost tepelné vodivosti rohoží a desek. [4]

Hlinitokřemičité vláknité výrobky jsou velmi lehkým izolačním materiálem. Nezadržují v sobě teplo a mají nízkou tepelnou vodivost (0,13 až 0,15 W·m⁻¹·K⁻¹), díky čemuž jsou kvalitním izolačním materiálem. Rovněž mají taky dobrou odolnost proti teplotním šokům. Jsou dostupné v mnoha formách a hustotách, jak je uvedeno výše. Nejlépe izolují přenos tepla sáláním, díky čemuž jsou vhodné pro vysoké teploty, kdy nejvíce tepla uniká právě sáláním. [4; 19]

3.2 Vermikulit

Vermikulit je minerál skládající se z křemíku, kyslíku, hliníku, vodíku, železa a hořčíku. Svým vzhledem je podobný slídku. Před použitím jako izolace prochází vermikulit procesem zvaným exfoliace - zahřívá se, což způsobuje přeměnu vlhkosti uvnitř na páru, která má za následek expanzi. Exfoliací vzniká expandovaný vermikulit, který je velmi lehký (hustota 80 až 200 kg·m⁻³), má nízkou tepelnou vodivost (0,07 W·m⁻¹·K⁻¹) a při vysokých teplotách téměř nemění rozměry. Díky expanzi vzniknou ve vermikulitu póry, ve kterých je vzduch, jenž je velmi dobrým izolantem. Limitní teploty pro použití vermikulitu jsou mezi 1000 až 1100 °C. [20; 21]

Expandovaný vermikulit smíchaný s polymerovým lepidlem lze tvarovat a lisovat za účelem výroby izolačních desek (obr. 10). Ty se pak mohou dále tvarovat podle potřeby při aplikaci. Kromě izolačních desek se z expandovaného vermikulitu vyrábějí různé monolitické izolační hmoty, například vermikulitový cement. [20; 21]



Obr. 10 Vermikulitová izolační deska. [21]

3.3 Mikroporézní izolace

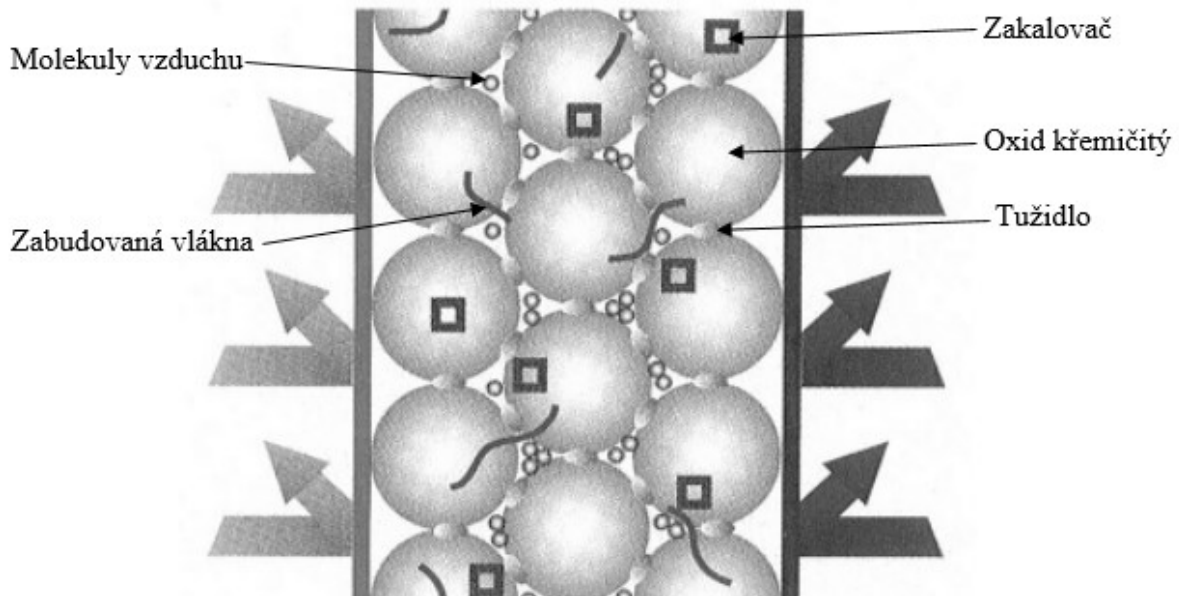
Mikroporézní izolace má ve srovnání s ostatními izolačními materiály jednu z nejnižších tepelných vodivostí. Nejúčinnější se skládají z anorganických oxidů, hlavně z pyrogenního oxidu křemičitého. Cena tohoto typu izolace je sice vyšší, ovšem vzhledem k její účinnosti, úspoře energie a prostoru je hojně využívána. Tloušťka izolační vrstvy z mikroporézních materiálů je třikrát až čtyřikrát menší než při použití běžných izolací, což má za následek zvyšování kapacity pecí. Při stejné tloušťce dochází k výraznému snížení studeného povrchu pece. [22; 23]

Dobře odolává všem třem typům přenosu tepla (při teplotách až 1200 °C). Proudění je minimalizováno díky mikroskopickým dutinám, tvořených keramickými částicemi a vlákny. Velikost těchto dutin je menší, než vzdálenost nutná pro efektivní přesun molekul vzduchu a z tohoto důvodu jim zamezují přenášet teplo. Vedení je omezeno díky mikroporéznímu přípravku, který reguluje kontakt částice s částicí. Ty jsou k sobě dost blízko, aby vytvořily dutinu omezující přenos prouděním, ale zároveň dost daleko, aby se omezil přenos vedením. Záření se minimalizuje výběrem speciálních částic nazývaných zakalovače (malé částice oxidů kovů), ty jsou navrženy tak, aby odrazily tepelnou energii zpět ke zdroji a bránili jí ve snadném pohybu izolací. [22; 23]

Pórovitost se pohybuje okolo 90 %. Díky velmi malým rozměrům dutin se dosáhne toho, že každá molekula vzduchu je uvězněna v jednotlivých pórech a není schopna integrovat s ostatními. Za těchto podmínek má vzduch v pórech nižší tepelnou vodivost než volný vzduch.

Toto je známo jako mikroporézní efekt a je to hlavní důvod proč mají mikroporézní izolace nižší tepelnou vodivost než volný vzduch. [23]

Na obrázku 11 je zobrazeno schéma mikroporézní izolace. Molekuly vzduchu zachycené mezi molekulami oxidu křemičitého zlepšují izolační schopnost, díky tomu, že vzduch je dobrým izolantem. Do struktury mikroporézní izolace jsou zakomponovaná keramická vlákna pro zajištění její flexibility. Tužidlo drží molekuly oxidu křemičitého při sobě. [22]



Obr. 11 Schéma mikroporézní izolace. [22]

Mikroporézní izolace z anorganických oxidů se vyznačují o 10 až 15 % nižší tepelnou vodivostí než její starší typy. Díky nižší tepelné vodivosti je možné snížit objem použité izolace při stejné izolační schopnosti a zvýšit tepelný výkon. Snížením objemu izolace se navyšuje kapacita pecí a pánví. V ocelářském průmyslu se používají hlavně k izolaci mezipánví a pánví. [22]

Mezipánev se používá jako zásobník oceli při kontinuálním lití. Jsou izolovány žáruvzdornými materiály, které jsou ještě obloženy izolačními materiály. Při použití mikroporézní izolace, oproti keramickým deskám, se tloušťka izolace může snížit až o 3 cm, to má za následek zvýšení využitelného objemu mezipánve. Kromě snížení tloušťky se také snižuje teplota studeného povrchu, a to až o 25 °C, díky čemuž se zlepšuje kvalita produktu a zároveň snižují provozní náklady. [22]

Teplota roztaveného kovu v ocelových pánvích se pohybuje okolo 1650 °C a je zapotřebí tuto teplotu udržet po delší dobu. Rovněž se požaduje, aby byla izolace co nejtenčí, kvůli zvýšení objemu pánve, při stejném tepelném výkonu. Při použití mikroporézní izolace dochází k navýšení objemu až o 10 % a energetická účinnost se zvedne až o 50 %. [22]

3.4 Aerogely

Aerogely jsou materiály s trojrozměrnou síťovou strukturou složenou z ultrajemných částic. Vykazují pevné skupenství, ovšem více než 90 % vnitřního prostoru molekul je vyplněno plynem. Jejich příprava probíhá ve dvou krocích: syntéza metodou sol-gel a poté sušení, tak aby nedošlo k poškození pevné sítě. Aerogely jsou vysoce porézní (až 99 %) nanostrukturální materiály s nízkou hustotou (0,01 až 0,5 g·cm⁻³) a nízkou tepelnou vodivostí (<0,025 W·m⁻¹·K⁻¹). Hlavní nevýhody aerogelů jsou nízká pevnost a houževnatost a nestabilní struktura. Ke zlepšení mechanických vlastností se užívá dvou technik: řízení

struktury sítě během přípravy a přidání vyztužující fáze. Aerogely se dají vyrábět z různých látek, například: [24; 25]

- SiO_2 - hustota aerogelu SiO_2 se pohybuje mezi $0,03$ a $0,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, tepelná vodivost je asi $0,005 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a pórovitost 80 až $99,8 \%$. S klesající hustotou a rostoucí pórovitostí roste tepelně izolační schopnost aerogelu (plyn obsažený v pórech je mnohem lepší izolant než pevné látky). Naopak snižování obsahu pevných složek vede ke zhoršování mechanických vlastností. Čistý aerogel SiO_2 , který má hustotu $0,13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-3}$ je poškozen už pod tlakem $0,31 \text{ MPa}$. Mechanické vlastnosti jsou zlepšovány přidáváním hlavně polymerů. [25]

Při vysokých teplotách amorfni oxid křemičitý krystalizuje, což vede ke strukturálnímu poškození a degradaci tepelně izolační schopnosti. Slinování čistého SiO_2 aerogelu při teplotách kolem $800 \text{ }^\circ\text{C}$ negativně ovlivňuje jeho tepelně izolační schopnost (dochází k zanikání pórů). Výzkum [25] se zabývá hlavně způsoby zlepšení mechanických vlastností, vysokoteplotní odolnosti a tepelné stability aerogelů. Například přidáním prášku oxidu hlinitého, titaničitého nebo zirkoničitého do SiO_2 aerogelů vznikne materiál s provozní teplotou zvýšenou na 1000 až $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. [25]

- Al_2O_3 – mají velmi dobré tepelně izolační vlastnosti i za teplot nad $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejčastěji jsou připravovány metodou sol-gel s použitím organických solí hliníku jako prekurzoru a poté superkritickým sušením. Takto připravené aerogely mají dobrý tepelný výkon, vysokou tepelnou odolnost a jsou dobře tvarovatelné. [26]

Aerogely vyrobené z různých látek se dají kombinovat, aby se dosáhlo lepších vlastností. Například kombinací dvou výše uvedených látek vznikne aerogel, který má nízkou tepelnou vodivost, vysokou tepelnou odolnost, dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost proti vlhkosti. [26]

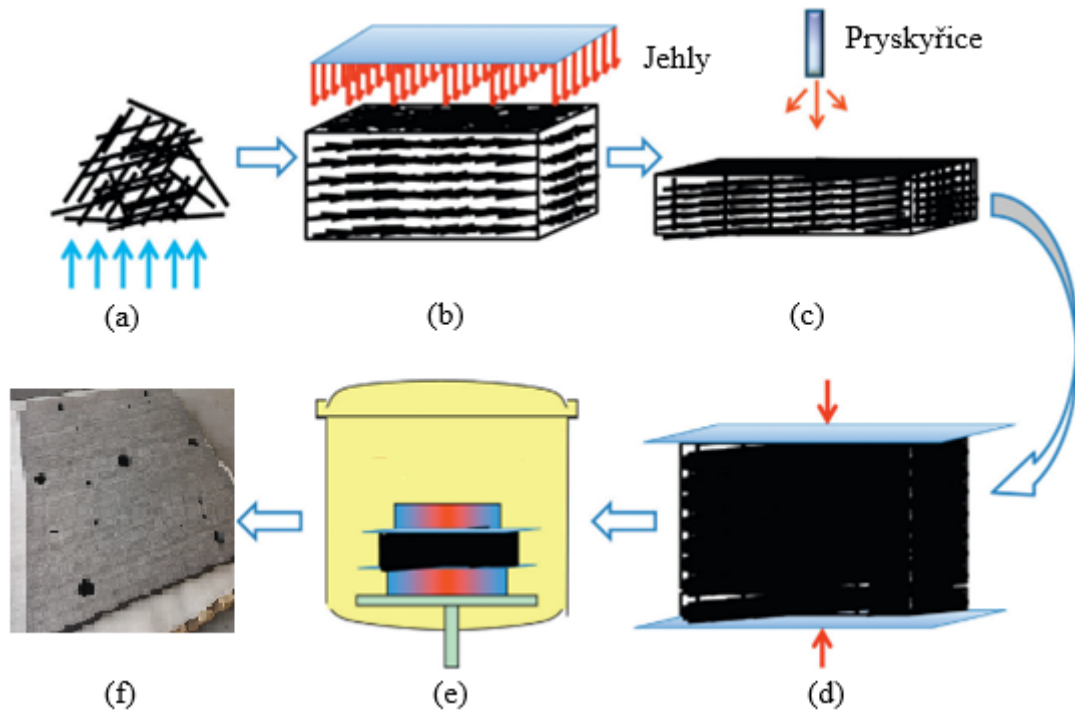
3.5 Uhlíkové vlákna

Základním materiálem pro výrobu uhlíkových vláken je mezifáze z tepelného zpracování ropné směly, nebo polyakrylonitril. Vlákna z polyakrylonitrilu se ještě před tepelným zpracováním natahují na 5 až 15 násobek jejich původní délky. Potom následuje karbonizace při teplotě kolem $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ a grafitizace při teplotě nad $2500 \text{ }^\circ\text{C}$. Hustota uhlíkových vláken se pohybuje mezi $0,02$ a $0,16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a tepelná vodivost mezi $0,076$ a $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Jejich průměr se pohybuje mezi 5 až $7 \text{ }\mu\text{m}$, čím je vlákno tenčí, tím lepší tepelně izolační schopnost. Uhlíkové vlákno se vyznačuje vysokou teplotní odolností, a to i vyšší než $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, vysokou tepelně izolační schopností i za vysokých teplot a vysokou pevností. [4; 27]

Uhlíkové vlákna se chrání proti oxidaci pomocí nepropustných povlaků, jejichž složení závisí na pracovní teplotě. Povlaky musí zabraňovat difuzi kyslíku, být kompatibilní s uhlíkem, nesmí podléhat karbotermické redukci a jejich koeficient teplotní roztažnosti musí být podobný jako koeficient teplotní roztažnosti uhlíkových vláken. Pro teploty do $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ se používají sloučeniny křemíku, například SiO_2 , SiC . Pro teploty nad $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou povlaky dvoj až čtyřvrstvé a jsou tvořeny oxidy a karbidy kovů, Ta, Ti, Zr.... [4]

Příprava tepelně izolačního kompozitu uhlíku a uhlíkových vláken probíhá v několika etapách (obrázek 12). Nejdříve se z dlouhých uhlíkových vláken (100 až 150 mm) pomocí proudění vzduchu vytvoří zárodek sítě kompozitu (obr.12a). Vlákna se vyfukují, ukládají na sebe a tím vzniká vrstvená plst'. K propojování vrstev dochází pomocí vpichovací metody, díky níž se zvyšují vazebné síly mezi vrstvami (obr.12b). Plst' má tloušťku asi 10 mm a šířku větší jak 1500 mm . Plst' se pak impregnuje pryskyřicí (obr.12.c). Poměr hmotnosti plsti ku hmotnosti pryskyřice je asi $1:1$. Následuje vytvrzování lisováním (obr.12.d), to probíhá mezi pokojovou teplotou a $175 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 3 až 6 hodin, silou 300 kN . Nakonec probíhá karbonizace

a grafitizace (při 2400 °C) ve vysokoteplotní peci (obr. 12.e), za účelem odstranění pryskyřice, ta se při karbonizaci rozkládá na uhlík a dochází ke smršťování kompozitu. Tloušťka připraveného kompozitu (obr.12f) je ovlivněna formou, nejčastější je 40, 45 a 50 mm. [27]



Obr. 12 Schéma přípravy kompozitu z uhlíkových vláken. [27]

Kompozit z uhlíkových vláken se podle délky dají dělit na:

- S krátkými – délka vláken se pohybuje v řádech milimetrů, obvykle kolem 3 až 5 mm. Připravují se impregnací pryskyřice krátkým vláknem, tvarováním ve formě, lisováním a následnou grafitizací při vysoké teplotě. Výhodou těchto výrobků jsou nízké náklady na výrobu a relativně krátký čas přípravy. Naopak mezi nevýhody patří horší izolační schopnost než u dlouhých vláken a díky tomu, že je vlákno krátké, tak snadno odpadá. [27]
- S dlouhými – vlákna jsou dlouhá několik centimetrů, běžně je to 10 až 15 cm. Připravují se impregnací plstí s dlouhými vlákny, jejich vytvrzováním a grafitizací při vysoké teplotě. Náklady na výroby jsou vyšší než u výrobků s krátkými vlákny, mají ovšem lepší tepelně izolační schopnost. [27]

Na obrázku 13 je zobrazen řez izolačním kompozitem z uhlíku a uhlíkových vláken. Vodorovné rýhy znázorňují jednotlivé vrstvy z vláken, svislé rýhy jsou vlákna, která vznikla vpichováním, zajišťující větší vazebné síly mezi vrstvy vlákeny. [27]



Obr. 13 Řez izolačním materiálem z uhlíkových vláken. [27]

3.6 Minerální vlna

Jedná se o vláknitý anorganický materiál, který je vhodný do 650 °C. Vyrábí se z čedičové horniny, nebo ocelové strusky. Běžnější jsou kamenné vlny, které se vyrábějí z čediče, typické složení tohoto typu vlny je 98 % čediče a zbylé 2 % organického pojiva, kterým je obvykle pryskyřice. Čedič se taví v peci při teplotě 1500 až 1600 °C, poté jsou z něho za pomoci vysokorychlostních spřádacích kol vytvořeny vlákna o průměru 6 až 10 μm . Pojivo se přidává ke zvýšení pevnosti materiálu tvořeného z těchto vláken. [28]

Hustota minerální vlny se pohybuje okolo 120 až 140 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a její tepelná vodivost je 0,03 až 0,04 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Největší vliv na tepelnou vodivost mají teplota a hustota. S rostoucí teplotou a hustotou minerální vlny klesá její tepelně izolační schopnost. [29]

Princip izolace minerální vlny spočívá v zachycování a zadržování vzduchu. Přenos tepla prouděním je omezen především díky zachycení vzduchu uvnitř materiálu a omezení jeho konvekce. Přenos vedením je snížen kvůli malému podílu pevného materiálu a uvnitř zachycený statický vzduch má nízkou tepelnou vodivost. Přenos zářením je snížen, protože materiál působí i jako fyzická bariéra. [30]

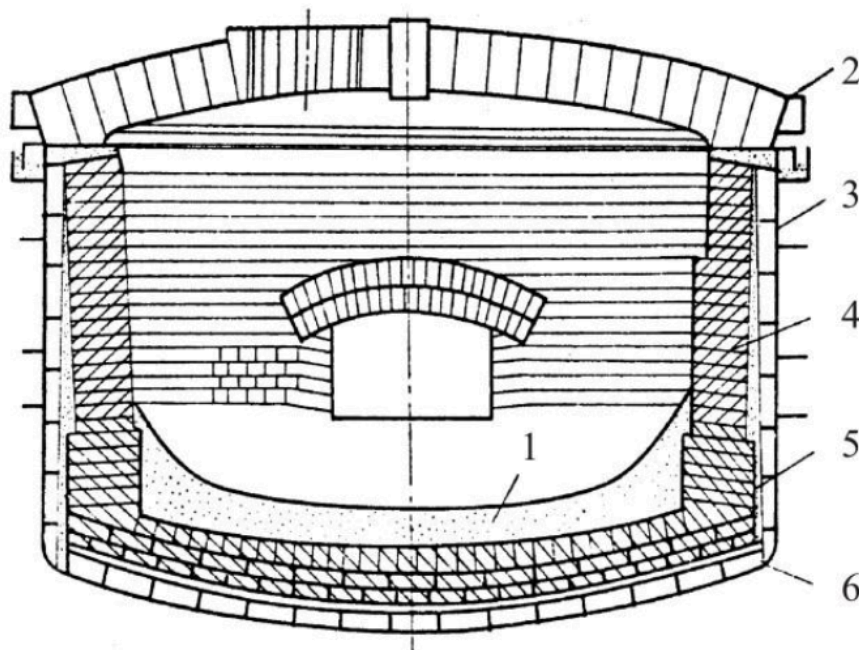
4 IZOLACE A VYZDÍVKY ELEKTRICKÝCH PECÍ A PÁNVÍ

Na izolaci pecí a pánví se podílí vyzdívka a izolační vrstva. Dále budou rozebrány vyzdívky a izolace elektrické obloukové pece (EOP), elektrické indukční kelímkové pece (EIP) a ocelářské licí pánve. Jejich izolační vrstva se moc neliší, většinou je složena z mikroporézní izolace, která se někdy kombinuje s jiným izolačním materiálem. Jejich vyzdívky jsou ovšem rozdílné. Každá část vyzdívky EOP (dno, stěny, víko, odpichový otvor) se vyzdívá jiným zdivem, to je způsobeno tím, že každá z jednotlivých částí je při provozu jinak namáhaná. Vyzdívka EOP může být buď kyselá, nebo zásaditá, přičemž zásadité převládají. Výdusky EIP se dusají z kyselých, zásaditých a neutrálních hmot. Kyselé jsou nejlevnější a také nejpoužívanější, ale nedají se v nich tavit některé typy ocelí. Výhodou neutrálních a zásaditých výdusek je jejich dobrá životnost. Licí pánve se vyzdívá zónově (dno, stěny strusková zóna, oblast mezi stěnou a struskovou zónou). Každá zóna je opět jinak namáhaná, proto se používají jiné cihly. [31]

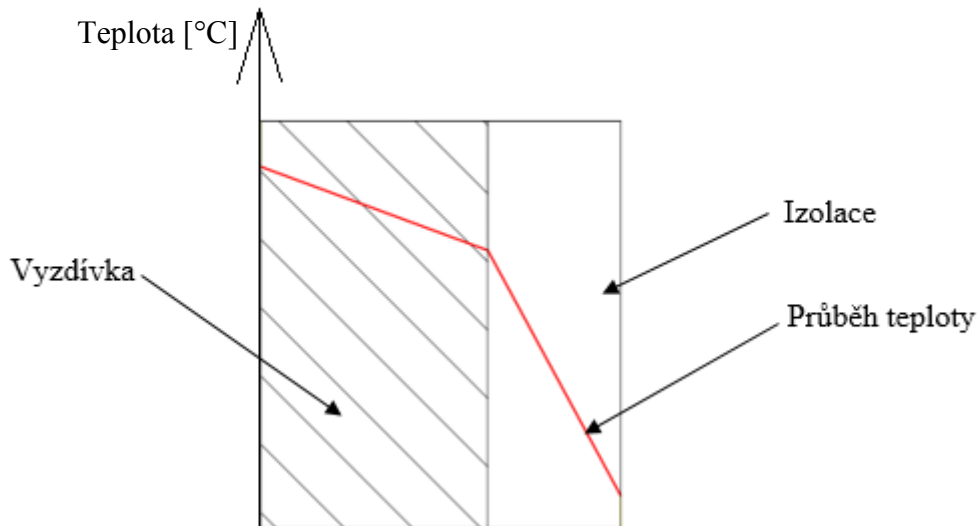
4.1 Vyzdívka a izolace elektrická obloukové pece

V minulých letech se způsoby izolace podstatně změnily. Dříve se elektrické obloukové pece buď neizolovaly vůbec, nebo se k izolaci používal azbest, případně lehčený šamot. Tloušťka izolační vrstvy z lehčeného šamotu se pohybovala okolo 70 mm. Postupně se přecházelo k materiálům z keramického vlákna a v současnosti se používají mikroporézní materiály s velmi nízkou tepelnou vodivostí. Díky nízké tepelné vodivosti je možné snížit tloušťku izolační vrstvy. [4; 31; 32; 33]

Na obrázku 14 je zobrazeno schéma EOP: 1 - dno pece, 2 – víko, 3 – izolace, 4 a 5 – vlastní vyzdívka, 6 – ocelový plášť. Na obrázku 15 je detail stěny pece se schematicky vyjádřeným teplotním průběhem skrze vlastní vyzdívku a izolaci. Z něj je patrné, že izolační vrstva izoluje mnohem lépe než vyzdívka. Je to způsobeno hlavně tím, že magnezitové tvárnice používané k vyzdívání stěn mají mnohem vyšší tepelnou vodivost než izolační vrstva obvykle z mikroporézních materiálů. Tepelná vodivost magnezitu je $2,6$ až $2,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, zatímco u mikroporézní izolace to je kolem $0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [31; 34; 35; 33]



Obr. 14 Schéma EOP. [33]



Obr. 15 Schéma průběhu teploty přes stěnu pece.

Vlastní vyzdívka může být buď kyselá, nebo zásaditá. Kyselé vyzdívky jsou méně časté i přes to, že jsou ekonomicky výhodnější (levnější materiál, vyšší výkonost pece, nižší spotřeba el. energie). EOP s kyselou vyzdívkou mají hlavní uplatnění v provozech, kde pracuje více EOP se zásaditou vyzdívkou, protože v nich lze zpracovávat vratný materiál. V EOP s kyselou vyzdívkou nelze tavit vysokolegované manganové a chromové oceli. V ocelárnách se tedy častěji uplatňují EOP se zásaditou vyzdívkou, kterou lze rozdělit na: [4; 31; 33]

- Vyzdívka dna - na podkladu ze šamotových cihel jsou uloženy magnezitové tvárnice (dříve se používal dolomit). Při vyzdívání je třeba dbát na to, aby následující vrstvy cihel překryly mezery té předchozí. Na magnezitové cihly se buď pokládají další zásadité tvárnice, nebo dno může být monolitické. Směs z páleného magnezitu obsahující 86 % MgO a 6 až 8 % Fe₂O₃, nebo směs z magnezitu s obsahem 92 až 95 % MgO se nasucho dusá, nebo vibruje. Tloušťka dusané vrstvy se pohybuje kolem 150 až 200 mm. Nejdůležitějším ukazatelem pro posouzení kvality a životnosti dna pece je obsah MgO. [4; 31; 32; 33]
- Vyzdívka stěn - většinou se vyzdívají magnezitovými tvarovkami. Používají se také magnezitchromové cihly, které jsou ale postupně nahrazovány magnezit-spinelovými tvarovkami, které mají vlastnosti přizpůsobené k lepšímu odolávání strusce při provozu. Možné jsou i kombinace magnezitových a korundových cihel. Nejvíce namáhaná místa se vyzdívají magnezitovými tvárnicemi s obsahem 99 % MgO, velmi hutnými chrommagnezitovými (s pórovitostí do 13 %) a magnezit-uhlíkovými cihlami s obsahem uhlíku 10 až 30 %. [4; 31; 32; 33]

Negativní vliv na životnost má přerušovaný chod pece. Naopak zamezení úplnému vychladnutí pece a otevírání jen na nezbytně nutnou dobu životnost vyzdívky zvyšuje. K největšímu opotřebení vyzdívky stěn pece dochází ve struskové čáře. Oxidy železa, křemíku, ale i jiné, které jsou běžně obsaženy ve vsázce snižují žáruvzdornost magnezitu. Při reakci magnezitu s těmito oxidy dojde ke snížení jeho teploty tavení. Toto opotřebení lze regulovat složením strusky. Struska obsahující 7 až 10 % MgO s vyzdívkou nereaguje. Kromě obsahu MgO ve strusce je třeba dbát také na to, aby žádný z oxidů (FeO, SiO₂, MnO, Al₂O₃) nebyl ve strusce dominantní. Zdivo vystavené častému střídání teplot se místo magnezitem vyzdívá chrommagnezitem, nebo magnezitchromem, které lépe odolávají střídání teplot. Chrommagnezit je možno použít pouze nad struskovou čarou z důvodu, že by při reakci s tekutým kovem mohlo dojít k redukci chromu do taveniny. [4; 31; 33]

- Vyzdívka víka - dříve se používaly hlavně dinasové tvárnice, ty jsou dnes postupně nahrazovány korundovými, nebo hlinitými s obsahem oxidu hlinitého 80 až 90 %. Ve víku jsou otvory pro elektrody, které jsou izolovány monolitickou směsí z oxidu hlinitého. Víko může být vyzděno také z litých žárobetonů s obsahem 85 až 90 % Al_2O_3 . Jeho použitím se dosáhne vyšší životnosti při přerušovaném provozu. Tyto žárobetony jsou ovšem finančně náročnější a také mají vyšší hustotu (tím pádem i vyšší hmotnost a ztěžuje se odklápění víka). [4; 31; 32; 33]

Životnost víka výrazně zvyšuje použití chladících kroužků kolem otvorů pro elektrody. U menších pecí (cca 5 až 15 t) s chladícími kroužky se životnost pohybuje kolem 100 až 150 tavení. Závisí také na druhu vyráběného materiálu, struskovém režimu a řízení energetického režimu během tavby. [31; 33]

- Odpichový otvor - je důležitou součástí EOP, pomocí něhož se provádí odpich tekutého kovu. Během tavení je otvor utěsněn žáruvzdorným materiálem. Vyzdívka může být ze šamotových tvárníc, nebo monolitická. [32; 33]

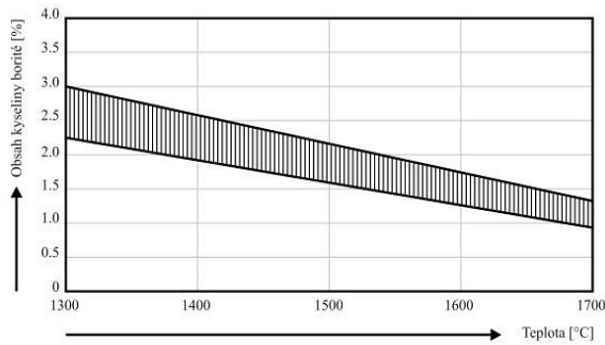
4.2 Východy elektrické indukční kelímkové pece

Kelímky se dusají z kyselých, zásaditých, nebo neutrálních hmot. Po udusání je třeba důkladně zkontrolovat, jestli východka neobsahuje trhliny. Jestliže východka obsahuje trhliny, může do ní pronikat tekutý kov a může dojít k havárii, někdy i k výbuchu kelímku. Stav východky se kontroluje po každém tavení. Zjistí-li se přítomnost trhlín, nebo velké opotřebení východky, pec se odstavuje a opravuje. [31; 33]

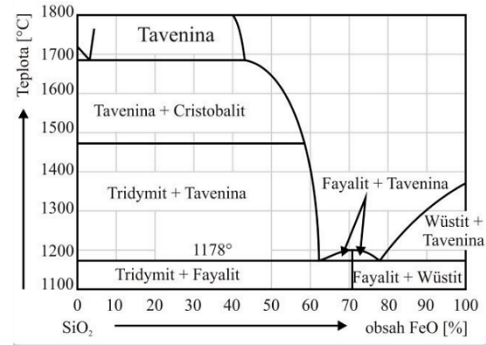
Kyselé východky jsou ve slévárnách používány nejčastěji. Jejich životnost se pohybuje okolo 20 až 50 taveb, při zvyšování obsahu uhlíku vyráběné oceli se jejich životnost ovšem zvyšuje. Výhodou kelímků s kyselou východkou je, že v něm lze vyrábět všechny běžné typy korozivzdorných ocelí. Výjimkou jsou austenitické otěruvzdorné oceli s vysokým obsahem manganu. Jejich základem jsou křemencové drtě (tridymit a cristobalit) a jejich žáruvzdornost je ovlivňována čistotou křemencových drtí. Na snižování žáruvzdornosti se nejvíce podílí oxid hlinitý a oxid železnatý. Vliv obsah oxidu hlinitého je patrný z rovnovážného diagramu na obrázku 6 (oblast dinasu) a vliv oxidu železnatého na obrázku 17. [31; 33]

Kvůli sintraci se do dusací hmoty přidává kyselina boritá, nebo oxid boritý. Jejich obsah závisí na velikosti pece, pracovní teplotě a síle izolace východky, na obrázku 16 je zobrazen doporučený obsah kyseliny borité v kyselé východce v závislosti na teplotě. Vytváří se 20 až 40 milimetrová vrstva zpevněné východky, za kterou je sypká vrstva, která je důležitá pro bezpečný provoz. Tloušťka sypké vrstvy se s každým tavením snižuje. Východky je třeba měnit dřív, než dojde k úplnému vymizení sypké vrstvy. [31; 33]

Základem zásaditých dusacích hmot je oxid hořečnatý. Východky z čistého oxidu hořečnatého nejsou vhodné, z důvodu tepelné dilatace při provozu snadno praskají a praskliny se snadno šíří. Z tohoto důvodu se do magnezitových východsek přidává korund, který sice snižuje teplotu tavení, ale zvyšuje odolnost východky proti praskání. Běžně se obsah korundu v magnezitových východkách pohybuje mezi 10 až 25 %. Vysocehlinitanové (korundové) východky jsou na bázi korundu a obsahují 20 až 50 % oxidu hořečnatého. Teplotu tavení mají nižší než magnezitové východky, ale mají vyšší odolnost proti praskání. Chování korundových a magnezitových východsek při tavení je odlišné. Tloušťka stěny magnezitové východky se během tavení zvětšuje, u korundových východsek je tomu naopak a tloušťka stěny klesá. Stejně jako u kyselých, tak se i u zásaditých východsek jako sintrační přísada používá oxid boritý, nebo kyselina boritá. Její obsah ve východce opět závisí na velikosti pece, provozní teplotě a síle izolace východky. Zásadité východky se obvykle neopravují, ale při závadě se vybourají a udusají se nové. [31; 33]



Obr. 16 Doporučený obsah kyseliny borité. [33]


 Obr. 17 Rovnovážný diagram SiO₂-FeO. [33]

Neutrální výdusky se skládají převážně z oxidu hlinitého (Al₂O₃) s přidávkou oxidu hořečnatého (MgO) v matrici, což má za následek tvorbu spinelu (MgO·Al₂O₃), při tavení oceli. Při tvorbě spinelu dochází k expanzi a vzniká pevná slinutá struktura, která je přímo v kontaktu s roztaveným kovem a poskytuje velmi dobrou odolnost proti opotřebení a chemickému působení tekutého kovu. Za slinutou vrstvou zůstane neutrální vyzdívka v práškové formě. Pokud dojde k erozi zpevněné vrstvy, bude sytká vrstva vystavena větším teplotám a začne docházet k jejímu slinování, tím se zajistí zachování nepropustnosti výdusky i v případě jejího opotřebení. Neutrální výdusky mají velmi dobrou odolnost proti korozi, jsou chemicky stabilní v kyselém i zásaditém prostředí, nepraskají a mají vysokou životnost. Jejich hlavní nevýhodou oproti kyselým výduskám, které jsou ve slévárnách nejpoužívanější, je jejich poměrně vysoká cena (tři až čtyřikrát dražší), naopak jejich velkou výhodou je, že se v nich dají tavit skoro všechny typy ocelí. [36; 37]

4.3 Vyzdívky a izolace ocelářských pánví

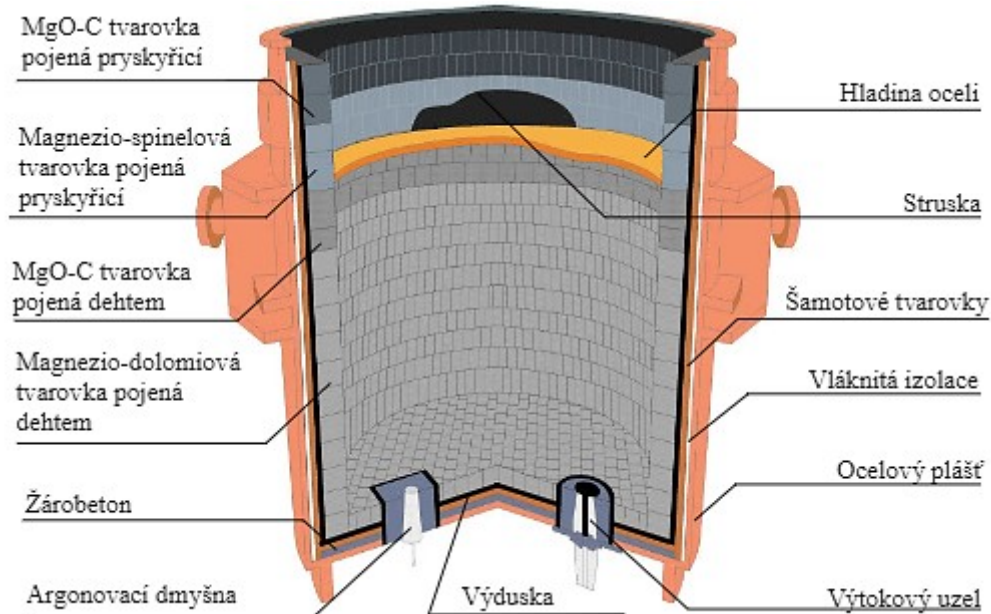
Ocelářské pánve se používají k dopravování oceli z kyslíkových konvertorů, nebo elektrických pecí. Jsou vystaveny působení vysokých teplot (okolo 1600 °C), působení strusky, erozi a také teplotním šokům při nalévání oceli a jejím chladnutí. Vyzdívka je nejčastěji dvouvrstvá, první vrstva je pracovní vyzdívka, která je přímo v kontaktu s ocelí a druhou vrstvou je izolace. [4; 32]

Vyzdívky licích pánví mohou být celozděné, nebo kombinované (použití tvarovek společně s monolity). Jako zdivo se nejčastěji používají šamotové a magnezitchromové cihly. Kromě cihel se mohou použít monolitické směsi z křemičitých písků a obsahem oxidu hlinitého menším jak 15 %. Při instalaci monolitů se využívá torketování (často plně robotizované), u vícevrstvé vyzdívky se první vyzdívka odlévá do formy kvůli zajištění přesné tloušťky, ostatní vrstvy se nanosou torketováním. [4; 32]

V současné době, kdy se prodlužuje doba oceli v pánvi a teplota oceli v ní se zvyšuje dochází k většímu namáhání vyzdívky. Křemičité monolity se nahrazují zirkonovými, nebo na bázi andalusitu s obsahem oxidu hlinitého aspoň 60 %. Zkoušena byla také vyzdívka na bázi dolomitu, ta se ale neosvědčila z důvodu vysokého obsahu volného CaO. Na obrázku 18 je zobrazena licí pánve používaná v ocelárně ArcelorMittal Ostrava i s její pospanou vyzdívkou. Pánve jsou vyzdívané zónovými vyzdívkami. Pracovní vyzdívku lze rozdělit na následující zóny: [4; 32]

- Strusková zóna - v oblasti struskové čáry, kde jsou materiály dlouhodobě vystaveny působení strusky je hlavní požadavek vysoká odolnost proti strusce, tomuto nejvíce vyhovují zásadité žáruvzdorné materiály, nejčastěji to jsou magnezitové materiály. [32]

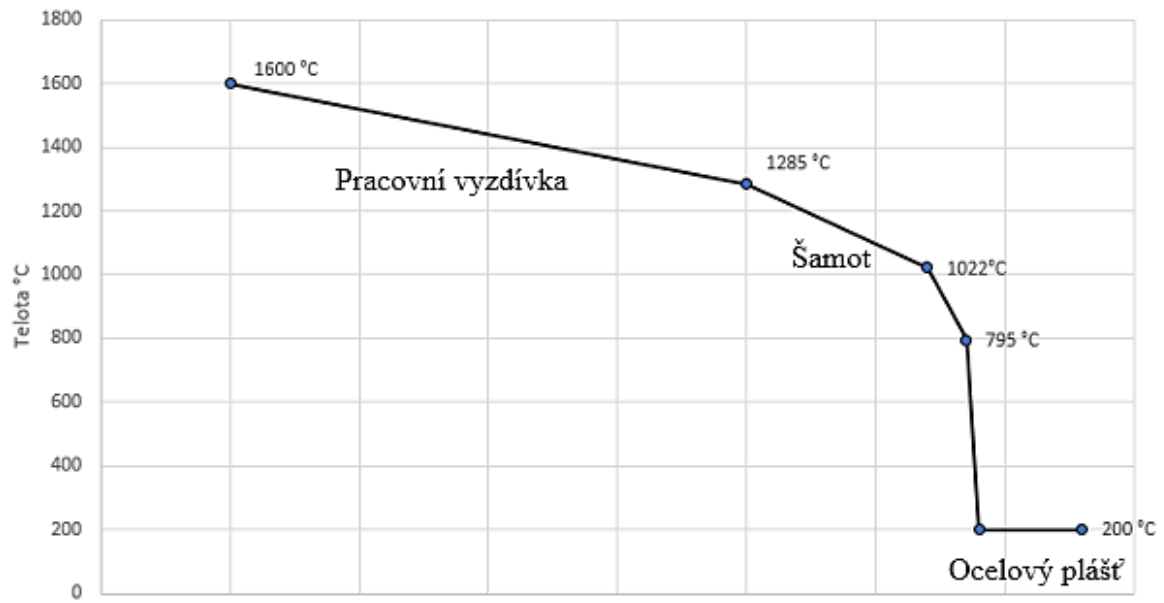
- Stěny pánve - hlavní opotřebení nastává v důsledku tvorby trhlin a praskání. Jsou používány vysocehlinité materiály s obsahem oxidu hlinitého 60 až 80 %. Při výrobě speciálních ocelí mohou být použity magnezitchromové, nebo dolomitové žáruvzdorné materiály. [32]
- Oblast mezi struskovou zónou a stěnou pece - vyzdívá se materiály na bázi oxidu hlinitého. Hlavním cílem je vytvořit přechod mezi bazickým materiálem ve struskové zóně a nebazickým materiálem ve vyzdívce stěny pece. [32]
- Dno pánve - nejvíc je vystaveno teplotním šokům a abrazivnímu působení. Použité materiály musí mít dobrou odolnost proti teplotním šokům a také dobré mechanické vlastnosti. Nejlépe vyhovují materiály s obsahem uhlíku, nebo taky korundové. [32]



Obr. 18 Schéma vyzdívky licí pánve. [38]

K izolaci se využívá mikroporézních materiálů. Někdy se mohou mezi mikroporézní izolaci a vyzdívku vkládat další vrstvy izolace (například z hlinitokřemičitých vláken), protože mikroporézní izolace nemusí dobře snášet relativně vysoké teploty na povrchu vyzdívky (přes 1000 °C). Obě vrstvy izolace jsou umístěny ve stěnách i na dně pánve. Při instalaci izolace se mikroporézní vrstva lepí speciálním lepidlem přímo na ocelový plášť pece, který se předtím očistí. Vrstva z hlinitokřemičitých vláken se namáčí vodou, aby při ohýbání nedošlo k jejímu zlomení. [32; 38]

Obrázek 19 zobrazuje průběh teploty přes vyzdívku pánve (zobrazenou na obrázku 18) za použití kombinace mikroporézní izolace a izolace z hlinitokřemičitých vláken. Skrze pracovní vyzdívku o tloušťce 200 mm klesne teplota z 1600 °C (teplota oceli) na 1258 °C. Dále přes trvalou vyzdívku o tloušťce 80 mm (ze šamotových cihel) klesne teplota na 1022 °C. Teplota ocelového pláště pece je 200 °C. Mezi ním a trvalou vyzdívkou jsou umístěny obě vrstvy izolace (mikroporézní o tloušťce 5 mm a z hlinitokřemičitých vláken s tloušťkou 10 mm). Z grafu na obrázku 19 je vidět velký rozdíl v izolační schopnosti žáruvzdorných (pracovní a trvalá vyzdívka) a izolačních materiálů. [38]



Obr. 19 Průběh teploty přes stěnu pánve. [38]

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vypracovat rešerši materiálů podílejících se na izolaci slévárenských pecí a pánví. V první kapitole byly rozebrány vlastnosti, které izolační schopnost ovlivňují nejvíce. Mezi ně patří pórovitost, hustota a měrná tepelná a teplotní vodivost. S rostoucí pórovitostí roste i izolační schopnost, proto se u izolačních materiálů požaduje vysoká pórovitost. Naopak u žárovzdornin není vysoká pórovitost žádoucí, protože snižuje mechanické vlastnosti materiálů a zároveň by skrz póry mohl pronikat tekutý kov. Měrná tepelná a teplotní vodivost vyjadřují rychlost šíření tepla materiálem. Pokud tedy jejich hodnoty porostou, teplo se bude šířit rychleji a materiál bude horší izolant. Měrná teplotní vodivost se v praxi moc nevyužívá, naopak hodnota měrné tepelné vodivosti je důležitá.

Druhá kapitola se zabývala žárovzdornými materiály. Ty byly rozděleny podle několika hledisek: podle tvaru, chemického charakteru a chemického složení. Podle chemického charakteru byly přiblíženy kyselé, zásadité a neutrální. Kyselé materiály při vysokých teplotách téměř nereagují s kyselou struskou, naopak při reakci se zásaditou velmi snadno erodují. U zásaditých je tomu naopak, se zásaditou struskou téměř nereagují, ale snadno erodují při reakci s kyselou. Neutrální materiály odolávají zásaditým i kyselým struskám. Podle tvaru byly rozděleny na tvarované, netvarované. Tvarované se uživateli dodávají ve své konečné podobě (cihly, nebo jiné tvarové prvky), ty netvarované svůj konečný tvar získávají až při aplikaci. Další rozdělení vychází z jejich chemického složení. Mohou to být hlinitokřemičité materiály jejichž základem jsou oxid hlinitý a křemičitý (šamot, dinas, hlinité), magnezitové (z oxidu hořečnatého), magnezitchromové a chrommagnezitové (kombinace oxidu chromitého a hořečnatého), uhlíkaté (uhlík v různých podobách) a zirkonové (oxid a křemičitan zirkoničitý).

V třetí kapitole byly rozebrány izolační materiály. Kvůli stále rostoucím cenám energií důležitost izolačních materiálů roste. Jejich hlavním úkolem je zabránit úniku tepla z pece. Obecně se jedná o lehké materiály s velmi nízkým koeficientem tepelné vodivosti. V práci byly uvedeny hlinitokřemičitanové vlákna, vermikulit, mikroporézní izolace, aerogely, uhlíková vlákna a minerální vlna. Jako nejlepší izolant se jeví mikroporézní izolace. Ta je ovšem celkem nákladná a taky účinná jen do určité teploty, proto se někdy dělá vícevrstvá izolace jako kombinace mikroporézní s jiným izolačním materiálem.

Poslední kapitola se zabývala vyzdívkou a izolací elektrické obloukové pece, výduskami elektrické indukční kelímkové pece a vyzdívkou a izolací ocelářských pánví. Vyzdívka EOP se dá rozdělit na několik částí (dno, stěny, víko, odpichový otvor) z nichž se každá vyzdívá jiným typem cihly. Vyzdívky EOP mohou být buď kyselé, nebo zásadité. I když jsou ty kyselé levnější jsou méně časté. Dále se kapitola zabývala výduskami EIP. Elektrické indukční pece se dusají buď z kyselých, zásaditých, nebo neutrálních hmot. Kyselé jsou nejčastější, protože jsou ekonomicky nejvýhodnější varianta (neutrální a zásadité jsou několikrát dražší), ale nedají se v nich tavit všechny typy ocelí. Výhodou zásaditých a neutrálních výdusek je jejich dobrá životnost. Nakonec kapitoly byla rozebrána vyzdívka licí pánve. Licí pánve jsou vyzdívané zónovou vyzdívkou (dno, stěny, strusková zóna a oblast mezi struskovou zónou a stěnou). Každá zóna je vyzdívaná jiným materiálem podle pracovních podmínek. K izolaci pecí a pánví se v současnosti nejvíce využívá mikroporézní izolace, která se případně může kombinovat s jiným izolačním materiálem.

Z práce je patrné, že na izolaci se nejvíce podílejí izolační materiály. Žárovzdorniny nejsou primárně uzpůsobeny k izolaci, nýbrž jejich hlavním úkolem je dobře odolávat mechanickému, teplotnímu i chemickému působení tekutého kovu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Elektřina - ceny a grafy elektřiny, vývoj ceny elektřiny 1 MWh - 1 rok - měna EUR. *Kurzycz* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.kurzycz/komodity/cena-elektřiny-graf-vyvoje-ceny/>
2. YURKOV, Andrey. *Refractories for Aluminum* [online]. 2nd ed. 2017. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2022-05-18]. ISBN 9783319535883. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-53589-0
3. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. Praha: SNTL, 1981, 317 s.
4. STAROŇ, Jozef a František TOMŠŮ. *Žiaruvzdorné materiály: výroba, vlastnosti a použitie*. Banská Bystrica: MEDIA, 2000.
5. KUTZENDOERFER, Jaroslav a Zdeněk MÁŠA. *Žárovzdorné tepelně izolační materiály*. Praha: Informatorium, 1991, 268 s. ISBN 80-85427-02-8.
6. Měření součinitele tepelné vodivosti pomocí měřicího zařízení HFM 436/3/1E Lambda. *Stavebnictvi3000.cz* [online]. 15.12.2008 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/mereni-soucinitele-tepelne-vodivosti-pomoci-merici>
7. Transient-Hot-Wire method method for determining thermal conductivity (THW). *Tecscience* [online]. 2.10.2020 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/thermodynamics/heat/transient-hot-wire-method-method-for-determining-thermal-conductivity-thw/>
8. Refractories and Classification of Refractories. *IspatGuru* [online]. 30.04.2017 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/refractories-and-classification-of-refractories/>
9. GUPTA, K.M. *Engineering Materials* [online]. London: CRC Press, 2015 [cit. 2022-05-18]. ISBN 1482257971. Dostupné z: doi:10.1201/b17693
10. Acidic Refractory. *RS Refractory Materials* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://refractoriesmaterials.com/acidic-refractory/>
11. Basic Refractory. *RS Refractory Materials* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://refractoriesmaterials.com/basic-refractory/>
12. NETOPILOVÁ, Miroslava. *Materiály: Stavební materiály* [online]. Ostrava: Netopilová, 2004 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/StavebniMaterialy.pdf>
13. TOMS, Petr. Žárovzdorné materiály v ateliérové keramice. *Keramikum, z. s.* [online]. 18.09.2020 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://keramikum.cz/clanek/zarovzdorne-materialy-v-atelierove-keramice-i>
14. WEINSTEIN, Jerry. An overview of insulating firebricks. *Thermal procesing* [online]. 15.04.2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://thermalprocessing.com/an-overview-of-insulating-firebricks/>
15. KUNA, Ľubomír. *Žiaruvzdorné vymurovky priemyselných pecí*. Edícia hutníckej literatúry. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967.
16. SARKAR, Debasish. *Ceramic Processing* [online]. 1. Milton: CRC Press, 2020 [cit. 2022-05-18]. ISBN 9781138504080. Dostupné z: doi:10.1201/9781315145808

17. EDWARDS, Howell G.M. *Porcelain to Silica Bricks: The Extreme Ceramics of William Weston Young (1776-1847)* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019 [cit. 2022-05-18]. ISBN 9783030105723. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-10573-0
18. SARNA, Satyendra Kumar. *Alumina and Alumina Refractories* [online]. 2015 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/alumina-and-alumina-refractories/>
19. CURRAN, David a Jason M. PORTER. A tomography-based effective thermal conductivity model for ceramic fiber insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, **160**(volume 160), 120224. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120224>
20. HAIMEI, Zhang. *Building Materials in Civil Engineering* [online]. Woodhead Publishing, 2011 [cit. 2022-05-14]. ISBN 978-1-84-569956-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpBMCE0001/toc>
21. Vermiculite board & cement. *Vitcas* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.vitcas.com/prd/cty/vermiculite-board-cement>
22. OLCHAWSKI, James. Saving energy with microporous insulation. *Ceramic Industry* [online]. 2003, (vol 153(10), 29-31 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/198578358?pq-origsite=primo>
23. FLYNN, Alyssia. Microporous Insulation - A Little Goes a Long Way. *Industrial Heating* [online]. 2006, (vol 73 (11), 63-64, 66-67 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/217280804/51C572C4E11F412BPQ/2?accountid=17115>
24. LIU, Yang, Zhaofeng CHEN, Junxiong ZHANG a Hao TANG. Ultralight and thermal insulation carbon foam/SiO₂ aerogel composites. *Journal of Porous Materials* [online]. 2019, (26), 1305-1312 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10934-019-00732-y#citeas>
25. YANG, Haixia a Feng YE. Microtexture, microstructure evolution, and thermal insulation properties of Si₃N₄/silica aerogel composites at high temperatures. *RSC Advances*. The Royal Society of Chemistry, 2022, **12**(19), 12226-12234. Dostupné z: doi:10.1039/D2RA01336C
26. WEN, Shangyan, Hongbo REN, Jiayi ZHU, Yutie BI a Lin ZHANG. Fabrication of Al₂O₃ aerogel-SiO₂ fiber composite with enhanced thermal insulation and high heat resistance. *Journal of Porous Materials* [online]. 2019, (26), 1027-1034 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10934-018-0700-6#citeas>
27. TANG, Bo, Ying WANG, Jinhong YU, et al. Fabrication and Study on Thermal Conductivity, Electrical Properties, and Mechanical Properties of the Lightweight Carbon/Carbon Fiber Composite. *Journal of Chemistry* [online]. 2020, **2020**, 1-15 [cit. 2022-05-04]. ISSN 2090-9063. Dostupné z: doi:10.1155/2020/3208791
28. BOZSAKY, Dávid. The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture* [online]. 2010, **41**(2) [cit. 2022-05-06]. ISSN 0324-590X. Dostupné z: doi:10.3311/pp.ar.2010-2.02
29. BAI, Qiang a Yong BAI. *17 - Pipe-in-Pipe and Bundle Systems*. Boston: Gulf Professional Publishing, 2014, s. 405-433. ISBN 978-0-12-386888-6. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386888-6.00017-1>
30. What is Mineral Wool?. *MIMA* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <http://mima.info/about-mineral-wool/what-is-mineral-wool/>

31. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
32. *XXV. Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a litiny s kuličkovým grafitem*. Žďár nad Sázavou: Česká slévárenská společnost, 2021. ISBN 978-80-02-02946-5.
33. ČAMEK, Libor. *SLÉVÁRENSTVÍ OCELOVÝCH ODLITKŮ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-80-248-3358-3. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/10_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku/Camek_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku.pdf
34. Technické vlastnosti žáruvzdorných kamen. *Techno expertepro* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://techno.expertepro.com/cs/stroitelnye-materialy/263-pechnoj-ogneupornyj-kirpich-harakteristiki.html>
35. Mikroporézní izolace. *Propec* [online]. Úvaly [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.propec.cz/mikroporezni-izolace>
36. Foundry Solutions: Neutral Ramming Mass Vs. Silica Linings. *Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories* [online]. 26.10.2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/news-articles/foundry-solutions-neutral-ramming-mass-vs-silica-linings>
37. Introduction of neutral ramming mass for induction furnace. *Henan Changxing Refractory Material Co.,Ltd* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://www.cxfirebrick.com/index.php/en/new/neutral-ramming-mass-induction-furnace-introduction.html>
38. JANČAR, Dalibor, Petr TVARDEK a Pavel HAŠEK. *LICÍ PÁNVE V OCELÁRNĚ ARCELORMITTAL OSTRAVA – POUŽITÍ NOVÉ IZOLAČNÍ VRSTVY* [online]. 2008 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14674571-Lici-panve-v-ocelarne-arcelormittal-ostrava-pouziti-nove-izolacni-vrstvy.html>