



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PECE PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ

FURNACES FOR HEAT TREATMENT OF METALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Pražan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

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

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

Pece pro tepelné zpracování kovů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelné zpracování je základní technologickou operací při výrobě kovových materiálů, která zajišťuje vyráběným materiálům požadované technologické i mechanické vlastnosti. V závislosti na druhu základního kovu a struktuře materiálu jsou voleny různé teplotní režimy tepelného zpracování. Základním zařízením tepelného zpracování jsou žíhací pece, které zajišťují ekonomický ohřev vsazeného materiálu na požadovanou teplotu při dodržení technologických předpisů.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést literární rešerši zaměřenou na oblast žíhacích pecí pro tepelné zpracování kovů. V rámci práce bude provedeno rozdělení žíhacích pecí podle způsobu ohřevu vsázky, konstrukce pece a jejich použití.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

PRAŽAN, Jan: Pece pro tepelné zpracování kovů

Práce pojednává o konstrukci pecí pro tepelná zpracování kovů. Na základě literární studie bylo provedeno rozdělení a popis základních typů tepelného zpracování ocelí, litin, neželezných kovů a jejich slitin. Jsou uvedeny základní způsoby přenosu a tepla a způsoby řešení tepelných toků vedením, prouděním a sáláním. Bylo provedeno rozdělení pecí podle konstrukce, způsobu ohřevu a jejich použití. Hlavní pozornost byla soustředěna na konstrukce a použití komorových pecí. Dále je uveden postup výpočtu výkonu pecí, rozdělení a druhy izolací pecí a způsob ohřevu, distribuce tepla a možnosti měření a regulace teploty při tepelném zpracování. U typů izolací a vybraných druhů ohřevu (plamenného a odporového) bylo provedeno vyhodnocení jejich výhod a nevýhod.

Klíčová slova: žíhací pece, tepelná izolace, tepelné zpracování, plynové hořáky, odporový ohřev

ABSTRACT

PRAŽAN Jan: Furnaces for heat treatment of metals.

The bachelor thesis focuses on construction of furnaces for heat treatment of metal. The classification and description of heat treatment of steel, cast iron, non-iron metal and their alloys was based on literature review. The description of the key ways of temperature transfer is provided: by conduction, convection, and radiation. The furnace type's distinction was created according to the types of construction, heat treatment, and its purpose. The main focus was on chamber furnaces construction and their use. In addition the performance calculation, insulation types overview, ways of heating, temperature distribution, and also heat measurement, and regulation needed for treatment are presented. The thesis provides also assessment of advantages and disadvantages of insulation types and selected ways of heating (i.e. flame and resistance heat sources).

Keywords: annealing furnaces, heat insulation, heat treatment, gas burners, resistance heating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRAŽAN, J. *Pece pro tepelné zpracování kovů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24.05.2018

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D., za cenné připomínky, rady a trpělivost. Poděkování patří také pracovníkům firmy LAC, s.r.o., za předané informace, provedená měření a celkovou podporu a pomoc.

Rád bych rovněž poděkoval celé své rodině, partnerce, přátelům a spolužákům za vstřícnost, pomoc a podporu během celého mého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ A SLITIN	10
1.1 Tepelné zpracování slitin železa	10
1.1.1 Tepelného zpracování ocelí.....	11
1.1.2 Základní typy tepelného zpracování litin.....	14
1.1.3 Tepelné zpracování neželezných kovů a jejich slitin.....	15
1.2 Přenos tepla	16
1.2.1 Přenos tepla vedením.....	16
1.2.2 Přenos tepla prouděním.....	17
1.2.3 Přenos tepla zářením.....	18
1.3 Rozdělení pecí tepelného zpracování	20
2 KOMOROVÉ PECE PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	27
2.1 Výkon pece	28
2.2 Izolace	29
2.3 Způsob ohřevu	30
2.3.1 Plamenný ohřev.....	31
2.3.2 Odporový ohřev.....	33
2.4 Distribuce tepla	35
2.5 Plynotěsnost pecí	37
2.6 Kontrola a regulace teploty	37
2.6.1 Měření teploty.....	38
2.6.2 Analyzátory plynů a spalin.....	39
2.7 Způsob zakládání vsázky	39
3 ZÁVĚRY	45

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

Oceli, litiny, neželezné kovy a jejich slitiny jsou užívány v širokém spektru aplikací a každá tato aplikace od nich vyžaduje jiné mechanické, technologické i užité vlastnosti. V některých případech použití může být zvláštní požadavek na vysokou tvrdost, houževnatost, otěruvzdornost nebo např. na korozní odolnost. Těchto vlastností materiálu je zpravidla možné dosáhnout vhodnou výrobní technologií a velmi často je nezbytné i použít vhodné tepelné zpracování.

Tepelné zpracování je technologie, která neoddelitelně ovlivňuje lidský život na každém kroku. Příkladem může být obyčejné a stovky let praktikované pečení chleba. Jeho pečení v peci je totiž ve své podstatě stejný proces jako nejjednodušší ohřev průmyslového materiálu v pecích na tepelné zpracování. Skládá se z ohřevu na teplotu zpracování, výdrže na teplotě do dokončení potřebných strukturních změn a zakončené ochlazením. Významem tepelného zpracování je získat vlastnosti materiálu a výrobků, které mají významný dopad na jejich užívání. Například nezakalený nůž by ostrý dlouho nevydržel a díky tepelnému zpracování hliníkových rámu kol již nemusíme „okoušet dřinu“ na kolech ukrajina.

A právě pece na tepelná zpracování těchto změn pomáhají dosáhnout. Jejich konstrukcí a účelem je ve svém pracovním prostoru vytvářet takové podmínky, za kterých zpracovávaný materiál, označovaný také jako vsázka, mění svoji strukturu a v některých případech i chemické složení, čímž dosahuje požadovaných mechanických, technologických vlastností. Jak bylo naznačeno dříve, tepelných zpracování je mnoho; cílem této práce je popsat základní typy: žíhání, kalení, popouštění atd. a popsat typy a konstrukci pecí určené pro tato zpracování.

1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ A SLITIN [1], [2]

Procesy tepelného zpracování nám umožňují získat materiály a výrobky s lepšími mechanickými nebo technologickými vlastnostmi. Tepelným zpracováním lze dosáhnout vyšší pevnosti a tvrdosti, vyšší houževnatosti nebo tažnosti. Vyšší tvrdost materiálu nám např. umožní zvýšení otěruvzdornosti, čehož je využíváno u zařízení pracujících v abrazivním prostředí. Některé tepelné zpracování pomáhá zvýšit korozní vlastnosti materiálu nebo technologické vlastnosti, jako je tvaritelnost, svařitelnost apod. Tepelné zpracování tedy umožňuje dosažení optimálních mechanických, technologických i užitných vlastností materiálů a výrobků.

Principem tepelného zpracování je ohřev materiálu na zvolenou teplotu pro daný režim tepelného zpracování s výdrží na této teplotě a následným ochlazením požadovanou rychlostí. Tyto řízené změny teplot způsobí požadované přeměny fází a tím i změny struktury materiálu s odpovídajícími vlastnostmi. Průběh těchto fázových přeměn je určen průběhem difuze, která je ve slitinách o určitém chemickém složení silně závislá na rychlosti dosažení požadované teploty, době výdrže na teplotě a rychlosti ochlazování.

Pecí pro tepelné zpracování rozumíme zařízení, které umožňuje vytvořit ohraničené prostředí (pracovní prostor), v němž je možno opakovaně dosahovat stejných teplot a jejich rozložení v pracovním prostoru pece.

Konstrukce a tím i vlastnosti a schopnosti průmyslové pece by vždy měly odpovídat podmínkám daného tepelného zpracování, jimiž jsou obecně:

- schopnost dosáhnout požadované teploty s maximální přesností;
- minimální teplotní ztráty;
- schopnost udržení homogenního teplotního pole v celém pracovním prostoru;
- rychlost dosažení požadované teploty;
- schopnost vsázku ochlazovat stanovenou rychlostí;
- zajistit vakuum nebo plynotěsnost;
- ekonomický provoz

1.1 Tepelné zpracování slitin železa [1], [2], [3]

Slitiny železa patří mezi polymorfní slitiny, u nichž je možné vhodným tepelným zpracováním velmi výrazně měnit mechanické i technologické vlastnosti. Opakovanou překrytalizací dochází ke zjemnění struktury, které silně zvyšuje mez kluzu a pevnost oceli. Naopak žíháním naměkko lze snížit pevnost a mez kluzu, a tím i výrazně zlepšit obrobiteľnosť ocelí s vyšším obsahem uhlíku. Také u grafitických litin lze významně měnit vlastnosti v závislosti na použitém tepelném zpracování, ale dosažené vlastnosti jsou v důsledku vyloučeného grafitu nižší, a to zejména u litin s lupínkovým grafitem.

1.1.1 Tepelné zpracování ocelí

U běžných konstrukčních, nelegovaných ocelí s nízkým obsahem uhlíku a dalších legujících prvků se až na několik výjimek tepelné zpracování nevyužívá. Co se týče ocelí ušlechtilých, nelegovaných a nízkolegovaných, je jejich vhodnost pro tepelné zpracování ovlivněna procentuálním podílem uhlíku. Mezi základní dva typy tepelného zpracování ocelí patří žíhání a kalení.

- Žíhání

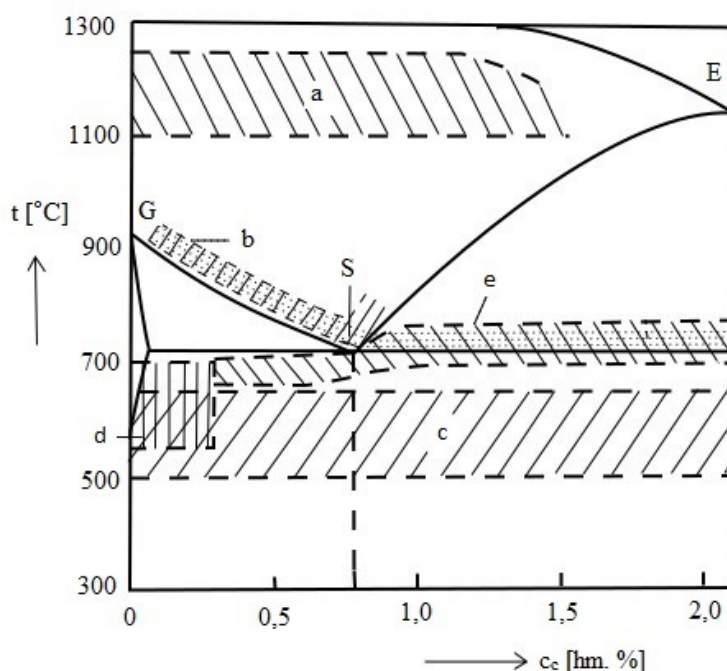
Podstatou žíhání je ohřev výrobků na požadovanou teplotu, výdrž na této teplotě a následné zpravidla pomalé ochlazování. Účelem žíhání často bývají snahy o vyrovnání rozdílů v chemickém složení, snížení tvrdosti, zotavení deformovaných zrn a odstranění nerovnoměrnosti struktury a její zjemnění.

Žíhání se v převážné většině případů využívá pro úpravu struktury a vlastností materiálů mezi výrobními procesy, jako například před třískovým obráběním funkčních ploch. Dle typu probíhající přeměny dělíme žíhání na:

- žíhání bez překrytalizace;
- žíhání s překrytalizací.

Na **obr. 1** jsou vyznačeny oblasti základních typů žíhání v diagramu Fe–FeC, z něhož je patrné, že až na normalizační a homogenizační žíhání se oblasti teplot pohybují přibližně pod 900 °C. Typy žíhání lze rozdělit na:

- a) homogenizační žíhání;
- b) normalizační žíhání;
- c) žíhání ke snížení pnutí;
- d) rekrystalizační žíhání;
- e) žíhání na měkko.



Obr. 1. Oblasti teplot pro žíhání v diagramu Fe-Fe₃C [3]

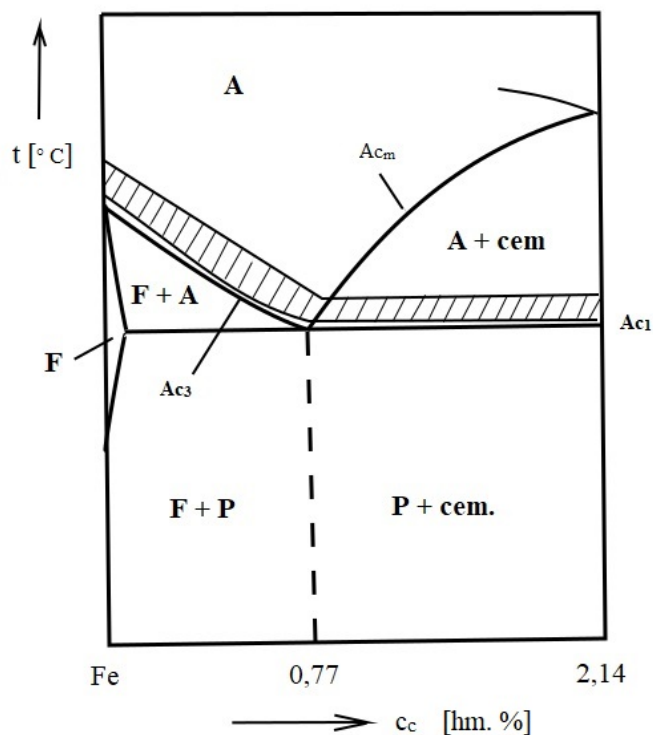
Jak vyplývá z **obr. 1**, žhání bez překrystalizace (žhání ke snížení pnutí, rekrystalizační žhání a žhání na měkko) vyžaduje ohřev a výdrž na teplotě do cca 750 °C, což z hlediska tepelného zpracování neklade nijak vysoké nároky na pece na tepelné zpracování. V některých případech (žhání ke snížení pnutí) je třeba pro tepelné zpracování volit pece, kde je možné plynule a dostatečně pomalu řídit režim ochlazování.

Normalizační žhání se na rozdíl od výše popsaných žhání vyznačuje relativně vysokou rychlostí ochlazování z normalizačních teplot. Po ohřevu a výdrži na teplotě se materiál vyjímá z pece a nechává se ochlazovat v proudícím vzduchu, případně i vodní mlze. Normalizační žhání lze obvykle provádět ve stejném typu pecí.

Homogenizační žhání má za cíl co nejvíce vyrovnat nestejně rozložené chemické složení oceli. Pro zaručení dostatečné difuzivity se teploty procesu pohybují mezi 1000 až 1250 °C s adekvátně dlouhou výdrží v rozmezí od 6 až do 15 h, následované pomalým ochlazováním. Takto vysoké teploty už často vyžadují použití pecí s jiným typem zdroje tepla a konstrukce pece.

- Kalení

Účelem kalení je zvýšení tvrdosti materiálu pomocí přetvoření původní struktury na strukturu částečně nebo úplně nerovnovážnou. Získáme ji ohřevem materiálu na teplotu 30 až 50 °C nad A_{c3} u podeutektoidních ocelí a těsně nad A_{c1} u ocelí nadeutektoidních; po ohřevu následuje výdrž a poté ochlazení rychlostí vyšší než kritickou. Převažující strukturou pak bývá struktura bainitická či martenzitická. Jako chladicí médium je používána voda, olej, vzduch a různé typy lázní (solné, polymery, atd.).



Obr. 2. Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [3]

Popouštění je tepelné zpracování, které se provádí téměř po každém kalení, jeho účelem je odstranění pnutí v materiálu, aniž by se snížila tvrdost součásti. Rozlišujeme dva typy popouštění, a to dle teploty, kterých se při popouštění dosahuje:

- popouštění za nízkých teplot – je ohraničeno maximální teplotou 350 °C, užívá se pro snížení vnitřního pnutí po kalení a zlepšení houževnatosti;
- popouštění za vyšších teplot – teploty 450–650 °C, díky tomuto procesu získáváme houževnatější struktury s vysokou mezí kluzu a únavy.

Teploty při popouštění jsou relativně nízké a jejich dosažení není u žíhacích pecí problém. Je však nutné zejména přesná regulace teploty především při popouštění za nízkých teplot. I malá změna žíhací teploty může vést k významným změnám pevnostních vlastností oceli. V tomto případě jsou často využívány pece s nucenou cirkulací vzduchu a v případě tepelného zpracování vysokolegovaných nástrojových ocelí i pece hlubinné, viz kap. 1.3.

Jednou ze specifických oblastí tepelného zpracování jsou chemicko-tepelná zpracování. Chemicko-tepelná zpracování využívají reakce mezi výrobkem a prostředím, ve kterém je zpracováván, a pomocí kombinace změn chemického složení a tepelných zpracování dosahujeme požadovaných vlastností výrobku.

Nejčastějšími vlastnostmi, kterých se chemicko-tepelným zpracováním dosahuje, jsou zvýšená tvrdost povrchu, odolnost proti opotřebení, odolnost proti cyklickému namáhání – to vše při zachování původních vlastností jádra (houževnatost).

• Cementace

Základním postupem chemicko-tepelného zpracování je cementace. Principem je sycení povrchu výrobku uhlíkem při teplotách okolo 900 °C obecně ve třech různých prostředích, sypaném zásypu, kapalném a plynném. Pro cementaci v pevném (sypaném) prostředí lze obecně použít obvyklé žíhací pece. Cementování v kapalném prostředí (solné lázně, kyanidy atp.) je výhodné pro drobné a středně velké výrobky, u nichž není vyžadována silná nauhličená vrstva. Cementování v plynném prostředí je vhodné i pro velké a tvarově složitější výrobky. Výrobky jsou umísťovány do pecí, kde se nachází plynná atmosféra, tvořená směsí plynů (CO, CO₂, C_nH_{2n+2}, H₂O, H₂, N₂). Cementační teplota při tomto procesu je závislá na druhu a chemickém složení cementované oceli, pohybuje se v rozpětí od 850 do 1050 °C, v ojedinělých případech do 1150 °C. Doba výdrže na cementační teplotě je odvozena od požadované nauhličené hloubky (0,5 až 1 mm). Doba výdrže potřebná pro nauhličení se dá výrazně zkrátit vakuovým cementováním při tlaku od 1 do 10 Pa. Tato metoda je velmi produktivní a dá se automatizovat, nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady.

K cementování jsou vhodné tvárné a houževnaté oceli s obsahem uhlíku od 0,1 do přibližně 0,3 %. Hloubka nauhličení se pohybuje v desetinách milimetru, optimálně kolem 0,8 mm. Výsledné povrchové tvrdosti se dosahuje až po zakalení a následném popouštění výrobku.

• Nitridace

Nitridace je proces, při němž se sytí povrch výrobku dusíkem. Účelem je tvorba vysoce disperzních nitridů, které jsou velmi tvrdé a odolné proti ořezu, a to i za vysokých teplot. Na rozdíl od cementace je požadovaných vlastností dosaženo samotnou nitridací, a tedy již není třeba následné zušlechťování. Výsledná tvrdost a pevnost nitridované vrstvy je nejen závislá

na teplotě nitridace, ale i na druhu zpracovávaného materiálu, tj. na koncentraci prvků, které mají k dusíku vysokou afinitu a snadno tvoří nitridy, podporují difuzi dusíku a jeho rozpustnost v materiálu.

Nitridace se provádí obdobně jako cementace, avšak nejvýznamnějším prostředím je plynné nebo v omezené míře kapalně prostředí. Pro dosažení optimálních výsledných vlastností se díly před nitrací zušlechťují.

Pro nitridaci v plynném prostředí se používají vzduchotěsné pece, kde je atmosféra tvořena vhaněným, technicky čistým čpavkem, nebo jeho směsí s dusíkem. Při nejběžnějším zpracování za použití čistého čpavku se teploty nitridace pohybují od 500 do 570 °C (volí se dle požadované tvrdosti povrchové vrstvy). Nitridace v plynném prostředí je velmi zdoluhavý proces, k dosažení vrstvy o tloušťce 0,4 mm je třeba výdrže na teplotě až 48 h, pro 0,6 mm až 72 h. Ochlazení probíhá v peci za stálého proplachu čpavkem, a to až do teploty 200 °C, výrobky se vytahují až kompletně zchladlé.

Při iontovém nitridování se k nauhličování povrchu využívá částečně ionizované plazma obsahující větší množství neutrálních částic. Proces se provádí ve vakuové nádobě, která je zapojena jako anoda, do ní vložený výrobek je zapojen jako katoda, atmosféra je vyplněna plyny potřebnými pro nitridaci. Pomocí regulace přiváděného stejnosměrného proudu, jeho napětí (400 až 1000 V) a tlaku v nádobě vznikne mezi nádobou a výrobkem doutnavý výboj. Ve vzniklém elektrickém poli dochází k urychlování a dopadu molekul plynu na povrch výrobku, kde dochází k jejich štěpení a ionizaci. Dopadající molekuly zahřívají povrch materiálu na potřebnou nitridační teplotu a umožňují difuzi dusíku. Dopadající molekuly zároveň vyražejí z povrchu výrobku atomy železa a další prvky, tento jev se nazývá odprašování či katodové odprašování. Tyto „odprašené“ atomy se váží s dusíkem a následně zpětně kondenzují na povrchu výrobku, čímž vytvářejí vrstvu vysoce nasycenou nitridy. Výhodou této metody je nenáročnost na údržbu a provoz, je tedy vhodná pro automatizaci a má také nižší spotřebu plynu než nitridace v plynném prostředí. Za její nevýhody se dají považovat náklady na vakuové zařízení, u komplikovanějších tvarů (závity) hrozí vznik slabě nitridované vrstvy a v místech vzniku svítivého výboje hrozí přehřátí povrchu výrobku.

1.1.2 Základní typy tepelného zpracování litin [4], [5], [7], [8], [10]

Tepelná zpracování litin jsou opět volena dle požadovaných vlastností výrobku a jsou značně ovlivněna chemickým složením litiny. Ve své podstatě jsou obdobná jako tepelná zpracování ocelí, avšak díky vyšším obsahům uhlíku se teploty těchto zpracování pohybují na vyšších hodnotách.

Běžné nelegované grafitické litiny se s ohledem na výrobní náklady obvykle tepelně nezpracovávají. Tvarově složité odlitky se mohou žíhat ke snížení vnitřního pnutí. Principem je pomalý ohřev na teplotu 650 °C s následnou výdrží po dobu 1 až 2 h a pomalým ochlazováním o teplotním spádu 20 až 80 °C/h. Důvodem pomalého ochlazování je zabránění opětovnému vzniku pnutí.

V případě výroby odlitků z litiny s feritickou strukturou se zejména u tenkostěnných odlitků v litém stavu nachází vyšší podíl perlitu. Pro odstranění perlitu je možné použít tzv. feritizační žíhání. Jedná se o žíhání, založené na ohřevu materiálu obvykle na teplotu mezi

700 až 750 °C a delší výdrž na teplotě (4–10 h) s následným pomalým ochlazením. Prodloužená výdrž umožní grafitizaci perlitického cementitu a vylučování většího podílu feritu v matici. V případě cementitu ledeburického je třeba ohřívat na vyšší teploty, jeho grafitizace probíhá mezi 850 až 950 °C, doba prodlevy je závislá na množství ledeburitu v matici a nebývá delší než pár hodin.

V případech, kdy je naopak ve struktuře dosaženo nižšího podílu perlitu (nižší pevnostní vlastnosti), je možné provést normalizační žíhání. Normalizací získáváme tvrdší a pevnější materiál s vyšší odolností proti opotřebení. Teploty zpracování jsou v rozmezí 850 až 900 °C, následuje krátká výdrž a ochlazení v klidném vzduchu. Pro normalizaci i feritizační zpracování je možné použít běžné pece pro tepelné zpracování.

Existují další typy litin, jako jsou např. temperované litiny, litina ADI, bílé litiny nebo legované a vysokolegované typy litin. Tyto materiály mají často specifické režimy tepelného zpracování, obecně lze však konstatovat, že nevyžadují speciální typy pecí a postačují pouze běžné pece pro tepelné zpracování. Ochranná atmosféra vakuových pecí se při výrobě litinových odlitků s ohledem na náklady na tepelné zpracování obvykle nevyužívá.

1.1.3 Tepelné zpracování neželezných kovů a jejich slitin [1], [2], [4]

Typ tepelného zpracování neželezných kovů je závislý na struktuře použitého materiálu. Všechny neželezné kovy se různými způsoby žíhají nebo žíhají a následně vytvrzují.

Základním způsobem tepelného zpracování neželezných kovů je proces zvaný vytvrzování, který se skládá z rozpouštěcího žíhání, ochlazení a stárnutí.

Rozpouštěcí žíhání má za účel homogenizovat slitinu. Pro dosažení optimálních vlastností je důležité dodržení určené teploty. Při překročení teploty zrna hrubne, při teplotě nižší proces homogenizace neproběhne úplně. Výdrž na teplotě musí odpovídat tloušťce zpracovávaného výrobku a vlastnostem struktury.

Rychlost ochlazování je vždy vlastní různému druhu slitiny, při jejím dodržení se získává tuhý za normální teploty přesycený roztok. Ten se vyznačuje nižší pevností, ale vyšší tažností a houževnatostí oproti rovnovážnému homogennímu stavu. Pece na rozpouštěcí žíhání musí umožnit rychlé přesunutí materiálu z pece do chladicího média (vody). Pece mohou být konstruovány s odklopným dnem, které umožní velmi rychlé ochlazení po vyjmutí z pece.

Proces vytvrzování – umělého stárnutí – probíhá obvykle za teplot 150–200 °C. Jedná se o difuzní proces rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Pece pro tento typ tepelného zpracování musí mít nucenou cirkulaci, aby byla po vytvrzení dosažena rovnoměrná struktura a vlastnosti v každém zpracovávaném výrobku.

Při zpracování hořčíkových nebo titanových slitin je nutné používat zvláštní přístup a speciální pece pro tepelné zpracování. Jedná se o silně reaktivní slitiny, které za zvýšených teplot silně reagují s kyslíkem. Pro zabránění oxidace je nezbytné využívat pece s ochrannou atmosférou nebo vakuové pece.

1.2 Přenos tepla [5], [6], [7]

Přenosem tepla se rozumí interakce systémů, které teplo buď odevzdávají, a tím se jejich teplota snižuje, nebo teplo získávají, a jejich teplota roste. Smyslem těchto interakcí (přenosů energie) je snaha systému dosáhnout energeticky nejméně nákladné polohy, tzv. termodynamické rovnováhy.

Základními mechanizmy přenosu tepla jsou:

- vedení (kondukce);
- proudění (konvekce);
- záření (radiace).

1.2.1 Přenos tepla vedením [5], [6], [7], [5]

Vedení tepla probíhá ve všech skupenstvích látek (plynném, kapalném, tuhém), nejvýznamněji pak v tuhých látkách. Principem je přenos energie z částic o vyšší energii na částice s energií nižší během jejich srážek. Schopnost látky vést teplo je reprezentována její specifickou tepelnou vodivostí λ . Jedná se o materiálovou vlastnost závislou na teplotě.

Tab. 1. Tepelná vodivost λ vybraných látek [8]

Látka	Měď	Hliník	Železo	Uhlíková ocel	Nerezová ocel	Voda	Olej	Vzduch
λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	386	200	80,2	50	15	0,6	0,13	0,025

Z **tab. 1** je patrné, že pro prohřátí výrobků z hliníku v celém objemu budou nutné kratší doby výdrže než u stejných výrobků z ocelí. Nízká hodnota tepelné vodivosti vzduchu naopak vysvětluje izolační vlastnosti klidného vzduchu.

Na **obr. 3** je znázorněn graf s různými charakteristikami změn tepelné vodivosti materiálů v závislosti na teplotě.

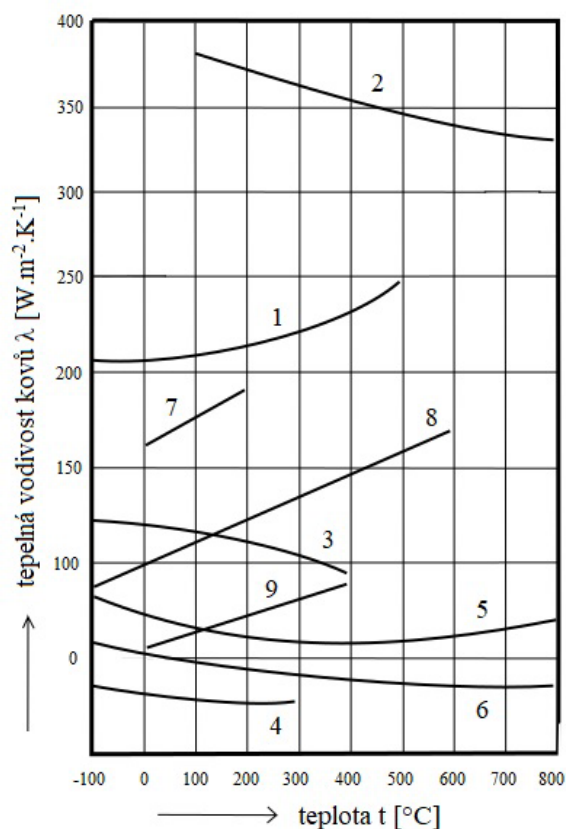
Hustota tepelného toku \dot{q}_v pro vedení tepla je v závislosti na teplotním gradientu a tepelné vodivosti vyjádřena Fourierovým zákonem pro vedení tepla, který lze zapsat ve tvaru:

$$\dot{q}_v = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

kde:

λ součinitel teplotní roztažnosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

T teplota [K]



Obr. 3 Graf změny tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [7]

1 - Al, 2 - Cu, 3 - Zn, 4 - Pb, 5 - Ni, 6 - ocel s nízkým obsahem Cu,
7 - dural, 8 - mosaz, 9 - bronz

Pro výpočet množství tepla, které projde za nezměněných podmínek přes jednu rovinnou stěnu, se využívá následující vzorec:

$$\dot{Q}_v = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

kde:

S plocha [m^2]

ΔT rozdíl teplot na stěnách [K]

d tloušťka stěny [m]

Ze vzorce vyplývá, že množství přeneseného tepla je přímo úměrné tepelné vodivosti materiálu stěny a nepřímo úměrné tloušťce stěny, kterou k vedení tepla dochází. K zamezení úniků tepla přes stěnu se volí buď větší tloušťka stěny, nebo materiál s nižším součinitelem tepelné vodivosti.

1.2.2 Přenos tepla prouděním [5], [6], [7]

Konvekce je přenos tepla, při kterém se uplatňují dva mechanismy:

- přenos hmoty či tekutiny o určité vnitřní energii;

- difuze.

Mechanismus difuze se uplatňuje v blízkosti povrchu obtékaného tělesa, kde vzniká mezní vrstva tekutiny s nízkou rychlostí pohybu. Přenos hmoty se projevuje strháváním tekutiny z volného proudu do mezní vrstvy, kde probíhá výměna tepla.

Pohyb tekutiny může být přirozený (vyrovnávání teplot) nebo nucený (cirkulace vzduchu pomocí ventilátorů).

Přenos tepla prouděním je popsán Newtonovým „ochlazovacím“ zákonem:

$$\dot{q}_p = \alpha_p \cdot \Delta T = \alpha_p \cdot (T_{st} - T_t) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

kde:

- \dot{q}_p hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- α_p součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
- T_{st} teplota obtékaného tělesa [$^{\circ}\text{C}$]
- T_t teplota tělesa [$^{\circ}\text{C}$]

Součinitel přestupu tepla α_p je závislý na:

- podmínkách okolního prostředí – tlak, teplota;
- fyzikálních vlastnostech tekutiny – hustota, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, viskozita;
- druhu proudění – laminární, turbulentní;
- vlastnostech obtékaného tělesa – tvar, rozměr, drsnost povrchu.

Vzorec pro výpočet tepelného toku má tvar:

$$\dot{Q}_p = \dot{q}_p \cdot \Delta T = \alpha_p \cdot S \cdot (T_{st} - T_t) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Množství předaného tepla tedy přímo závisí na součiniteli přestupu tepla na dané ploše, velikosti rozdílu teplot a čase, po který přenos probíhá. Z rozboru vyplývá, že pro zvýšení rychlosti ohřevu součástí v žhací peci je vhodné zvýšit součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí. Naopak pro snížení teplotních ztrát pece je vhodné konvekci snížit. Na velikost teplotních ztrát pece má vliv teplota pláště pece, která by měla být co nejnižší.

Tab. 2. Rozsah součinitele přestupu tepla vybraných médií [5]

	$\alpha_{pmin} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	$\alpha_{pmax} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
Klidný vzduch	12,5	125
Proudící vzduch	40	2100
Proudící kapalina	8400	21 000

V **tab. 2** jsou uvedeny rozsahy součinitelů přestupu tepla pro různé typy médií, hodnota se mění v závislosti na rychlosti proudění, teplotě, tvaru a drsnosti povrchu obtékaného tělesa.

1.2.3 Přenos tepla zářením [5], [6], [7]

Přenos tepla probíhá také pomocí elektromagnetických vln, není tedy závislé na prostředí a odehrává se i ve vakuu. Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K tyto vlny vyzařuje a zároveň pohlcuje; to, které více pohlcuje, se ohřívá, a to, které více vyzařuje, se ochlazuje.

Intenzita sálání (záření) absolutně černého tělesa E_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je popsána Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

kde:

σ Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

T teplota [K]

Hodnota Stefan-Boltzmannovy konstanty je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Co se týká reálných těles, tzv. šedých, je nutné počítat s jistou emisivitou ε , vzorec pak vypadá následovně:

$$\dot{q}_z = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6)$$

kde:

ε poměrná zářivost šedého tělesa (emisivita) [-]

Tab. 3. Hodnoty emisivity vybraných materiálů [5]

Materiál	ε [-]
absolutně černé těleso	1
saze, grafit	0,95
zoxidovaná ocel	0,85–0,95
cihla šamotová	0,8
zoxidovaný hliník	0,3
lesklý hliník	0,1
leštěná ocel	0,29

V **tabulce 3.** jsou uvedeny hodnoty emisivity pro vybrané materiály v různém stavu jejich povrchu, jež má na jejich emisivitu viditelný vliv.

Pro určení tepelného toku mezi vnitřním povrchem pece a vnějším povrchem vsázky se využívá vztah, který zohledňuje skutečnost, že výrazně větší vnitřní povrch pece obklopuje menší vnější povrch vsázky.

$$\dot{Q}_{z12} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W}] \quad (7)$$

kde:

ε_1 emisivita vsázky [-]

S_1 plocha vsázky [m^2]

T_1 teplota povrchu malého tělesa [$^{\circ}\text{C}$]

T_2 teplota povrchu velkého okolí [$^{\circ}\text{C}$]

Z definičního vzorce je patrné, že význam přenosu tepla záření roste se 4. mocninou teploty tělesa.

Pro konstrukci pece je zásadní určení teplotního rozsahu, při kterém bude pracovat. To určuje druh uplatněného přenosu tepla v peci. Při teplotách do 800 °C se jako hlavní druh přenosu tepla uplatňuje proudění, při teplotách nad 800 °C se uplatňuje záření a to až s 95% předaného tepla vsázce.

Dle uplatněného typu přenosu tepla se umisťují topné elementy pece, řeší se výměna tepla optimalizace výkonu, snížení teplotních ztrát.

1.3 Rozdělení pecí tepelného zpracování [3], [7], [9], [10], [11], [12]

Důvodem dělení pecí je jejich rozdílnost v účelu, technologickém určení, konstrukci a pořizovacích a provozních nákladech. Z ekonomického hlediska by nebylo výhodné konstruovat pec, která by pokryla všechna možná technologická určení a rozsahy teplot. Konstrukce, výroba a servis pece by byly složité a jejich pořizovací náklady by byly enormně vysoké. Proto se výrobci zaměřují na výrobu několika typů zařízení, která budou pokrývat určité oblasti tepelných zpracování (žíhání, kalení, popouštění, cementace, nitridace aj.).

Tato různorodost konstrukcí zaručuje nejen ekonomičtější pokrytí tepelných zpracování, ale i vhodnější a přesnější technologické požadavky zákazníků. Ty se mohou lišit v požadovaném objemu vsázky, a tedy velikosti pracovního prostoru, způsobu zakládání vsázky nebo v požadovaném zdroji energie (plynový nebo elektrický ohřev).

Zákazníci mohou mít i řadu dalších specifických požadavků v oblasti řízení režimu ohřevu a ochlazování, bezpečnosti pece či automatizace procesu.

Existuje několik dalších hledisek dělení pecí. Nejčastěji se používá dělení dle zdroje tepla a způsobu ohřevu a dle konstrukce pece.

Dle zdroje tepla

Mezi obvyklé druhy zdrojů tepla patří spalování plynu nebo elektrická energie. Každý zdroj tepla může mít jiný princip a způsob přenosu tepla.

- Plynové pece: jako palivo se nejčastěji používá tranzitní zemní plyn. V praxi se používají nejčastěji následující typy hořáků:
 - spalující topný plyn se vzduchem bez předchozího promísení, hořáky nejsou poměrově dostatečně samoregulovatelné. Pod pojmem samoregulovatelné hořáky jsou uvažovány hořáky, které na základě měření spalin regulují množství dmýchaného plynu a vzduchu do hořáku;
 - spalující plyn po předchozím promísení se vzduchem – pracují i s plyny s vysokým tlakem a jsou poměrově samoregulovatelné, hořáky nevyžadují ventilátor. Nevýhodou je obtížná regulovatelnost teploty;
 - hořáky zvláštní – dle způsobu hoření a přestupu tepla (impulzní atd.)
- Elektrické pece: nejčastěji se používá nepřímý odporový ohřev. Pod pojmem nepřímý odporový ohřev se uvažuje ohřev atmosféry od topného článku, která následně ohřívá vlastní vsázku. Při nízkých teplotách se teplo předává prouděním a při vysokých teplotách se realizuje přestup sáláním. Topné články kovové jsou používány do teplot 1350 °C, pro vyšší teploty pak články keramické nebo grafitové, blíže kapitola 2.3.

Dle způsobu ohřevu

- Odporové teplo: teplo je generováno průchodem elektrické energie odporovým materiálem. Blíže je problematika uvedena v kapitole 2.3.2.

- Obloukové teplo: vzniká při elektrických výbojích v plynech a může mít podobu doutnavého výboje, jiskrového výboje a obloukového výboje. Elektrický výboj obsahuje jádro o teplotě 4000–6000 K. Tento zdroj se využívá hlavně k tavení.
- Indukční teplo: tlumením elektromagnetického pole (vznikajícího v kovovém materiálu průchodem střídavým proudem) se energie indukovaných proudů přeměňuje na teplo. Dle frekvence se indukční ohřevy dělí na nízko, středně a vysoko frekvenční. Indukční ohřev s nízkou frekvencí se často uplatňuje pro ohřev při tváření a tepelná zpracování. Vyšší frekvence jsou používány při tavení materiálů.
- Dielektrické teplo: jedná se o ohřev nevodivých materiálů, na které působí elektrické pole, přičemž dochází k polarizaci nosičů nábojů. Používá se k sušení dřeva, svařování termoplastických materiálů, předehřívání a vytvrzování materiálů.
- Mikrovlnný ohřev: ohřev je zajišťován vlnami v rozmezí 0,3–300 GHz, což umožňuje provádět tepelné procesy s přesně definovaným množstvím tepla. Další výhodou je, že jej lze využít tam, kde není možný ohřev pomocí dielektrického tepla. Jeho využití je především v potravinářství, dřevařském a papírenském průmyslu, elektrotechnickém průmyslu, zemědělství a lékařství.
- Plazmový ohřev: k ohřevu jsou využívány vlastnosti plazmy, která dosahuje teplot 5000 – 15 000 K v případě, že je částečně ionizovaná, a až 100 000 K, pokud je plně ionizovaná. Nejběžnější plazmové generátory jsou s elektrodami se stabilním obloukem. Existují také generátory bez elektrod. Nejčastější využití je v nanášení kovů, svařování, řezání, tavení materiálů, chemických reakcích. Výhodou je použití libovolné atmosféry, provoz bez elektrod, dochází k menšímu vypařování kovů, vysoká a snadno regulovatelná teplota, rychlé tavení, vysoká koncentrace energie. Mezi nevýhody patří zejména nízká životnost plazmových hořáků a nebezpečí proniknutí chladicí vody do pece.
- Elektronový ohřev je postaven na principu emisí elektronů z rozžhavené katody, které jsou urychlovány elektrickým polem. Elektrony tvoří paprsky o vysoké energii. Proces vyžaduje pro vlastní provoz vysoký stupeň vakua v pracovním prostoru. Elektronový ohřev je využíván pro tavení nebo svařování.

Dle teploty ohřevu

Provozní teplota v peci je důležitým parametrem, který významně ovlivňuje konstrukci pece (typ izolace), instalovaný příkon i ekonomické parametry. Z hlediska teploty je možné pece dělit na:

- nízkoteplotní – do 600 °C (využívají se např. při tepelném zpracování neželezných kovů a slitin nebo např. k sušení dřeva atd.);
- středně teplotní – od 600 do 1100 °C (využívají se k tepelnému zpracování kovů – např. žíhání, kalení, popouštění);
- vysokoteplotní – nad 1100 °C (jsou využívány ke kalení speciálních ocelí, tavení kovů s nižším bodem tání, ve sklářství atd.).

Provozní teplota pece je určena použitým zdrojem tepla a u některých zdrojů tepla ji lze velmi dobře regulovat.

Jako nízkoteplotní pece jsou používány např. mikrovlnné nebo dielektrické pece (sušení dřeva). Celé spektrum provozních teplot pokrývá nepřímý odporový ohřev.

Do teploty 950 °C je nezbytné zajišťovat cirkulaci spalin/atmosféry v peci (např. ventilátory, nastavení trysek při spalování plynu), při vyšších teplotách již zajišťuje ohřev sálání v kombinaci s cirkulací.

Vysokoteplotní aplikace jsou např. obloukový nebo plazmový ohřev. Který se používá zejména při tavení kovů a slitin.

Dle atmosféry v pecním prostoru

Nejčastěji jsou používány pece s normální atmosférou (vzduch). Pro některé aplikace je nezbytné vytvářet řízenou atmosféru v pracovním prostoru pece (CO, CO₂, H₂ atd.). V některých případech je nutné používat vakuové pece.

- Pece s normální atmosférou (vzduch): jedná se o pece, v nichž není nutné měnit složení atmosféry. Příkladem mohou být např. běžné komorové a vozové pece.
- Pece s řízenou atmosférou: tyto pece jsou vybaveny vyvíječem ochranné atmosféry, která např. redukuje vznik okují, nebo je cílem vznik nových vlastností materiálu (např. cementování a nitrocementování, nebo proces nitridace ve čpavkové atmosféře). Ochranné nebo speciální atmosféry (např. pro cementování) bývají vyvíjeny v zařízení, které je buď integrováno do samotné pece (např. pomocí vytápění sálavými trubkami, vyvíjení cementační atmosféry rozkladem kapaliny v šachtové peci), nebo je externí a atmosféra je do pece přiváděna. Řízená atmosféra se používá především u pecí, které jsou zajištěny proti úniku atmosféry (např. šachtové pece určené pro cementaci, pokloповé/zvonové pece, víceúčelové a bubnové pece na drobné výrobky).
- Vakuové pece: jedná se o moderní pece s různým využitím. Vakuové pece jsou užívány např. na odstranění materiálového pnutí po tvářecích procesech, čištění povrchu dílců (odplynění), kapilární pájení apod. Jedním z důvodů pro využívání vakuových pecí je zamezení nežádoucích reakcí s atmosférou. Vzhledem k absenci atmosféry dochází k ohřevu zářením a zařízení je efektivní při vyšších teplotách (přibližně od 800 °C). Rozeznávají se jako teplostěnné, teplostěnné s vyrovnáním tlaku a se studenou stěnou. Podle určení se dělí na pece: bez kalicích lázní (především k žíhání) a s kalicí lázní (častější). Podle stupně vakua jsou využívány různé typy vývěv (od mechanických rotačních až po difuzní vývěvy).

Dle technologického určení

Pece mohou sloužit pouze k ohřevu, mohou mít řízenou rychlost ohřevu i ochlazování (tepelné zpracování) nebo mohou sloužit jako pece tavicí, atd.

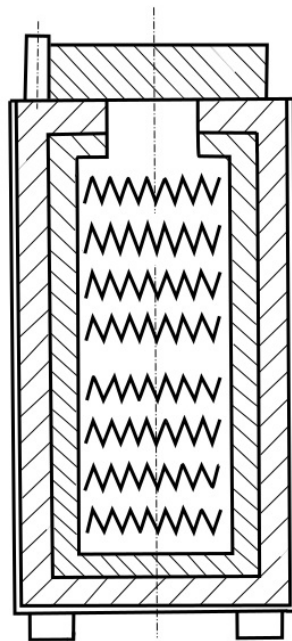
- Tavicí pece: jedná se o pece se zdrojem tepla umožňujícím dosahovat vysokých teplot (např. indukční a odporové pece). V této práci bude pozornost věnována především žíhacím pecím.
- Ohřívací pece: slouží k předehřívání nebo ohřívání materiálů pro sušení, tepelné zpracování, pro kování atd., které mohou být elektrické nebo plynové.
- Vypalovací pece: jedná se o zpracování materiálu pro získání nových vlastností, např. vypalování keramiky, získání tvrdosti žárobetonu vypálením. Využívají se pece s plynovým nebo elektrickým ohřevem. Odporový ohřev se s výhodou používá tam, kde je vyžadována přesná regulace teploty. Při vypalování je zpravidla vyžadováno postupné chladnutí materiálu a odvětrávání výparů. Např. pro vypalování keramiky je potřebná teplota spadající již do kategorie vysokoteplotní, tedy nad 1100 °C (požadovaná teplota závisí na typu keramiky).

- Sušící pece: tyto pece jsou užívány např. pro sušení forem a jader, umělé stárnutí (např. hliníkových profilů), předehřev (odliteků, forem, před kováním) a vytvrzování. Pracují obvykle jako nízkoteplotní (do 600 °C) a jako zdroj tepla je často využíváno odporové teplo.

Dle tvaru pracovního prostoru

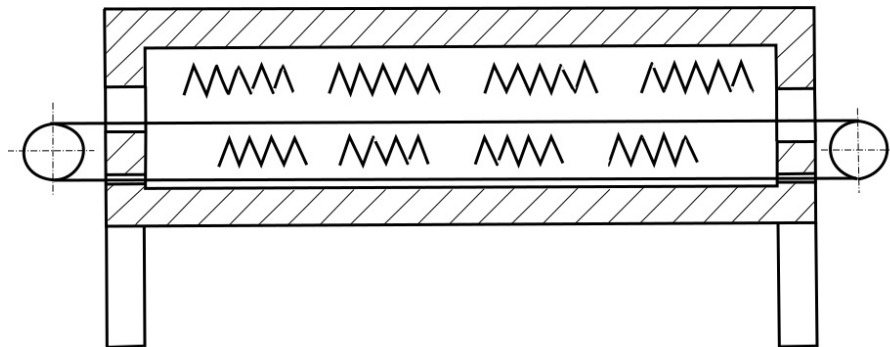
Tvar a velikost pracovního prostoru je dán velikostí zpracovávaných výrobků, ale také požadavky na homogenitu teplotního pole, na produktivitu a manipulaci s materiálem.

- Šachtové označované také jako hlubinné pece – jsou určeny pro ohřev ingotů před válcováním a jsou ohřívány např. plynem nebo pomocí odporového ohřevu. Jsou zde vysoké nároky na průběh ohřevu (rychlost) a velikosti vsázky, které ovlivňují rovnoměrnost ohřevu a vnitřní pnutí v materiálu. Používají se např. při tepelném zpracování nástrojových ocelí a mohou pracovat jako pece s řízenou atmosférou nebo jako pece vakuové.



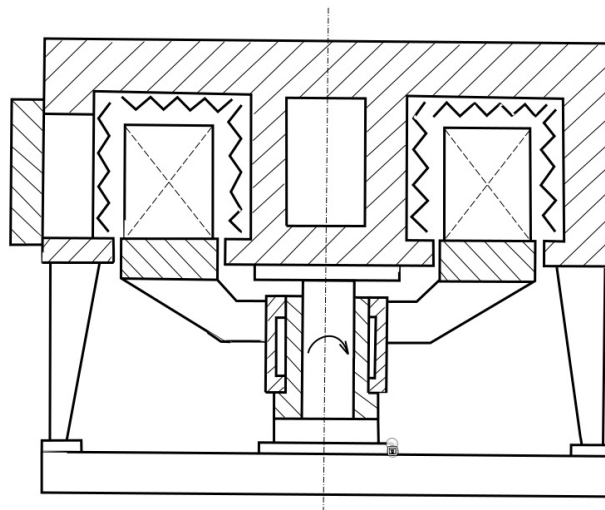
Obr. 4. Schéma šachtové pece [3]

- Průběžné pece: podstatou konstrukce pece je, že se během ohřevu vsázka pohybuje pecí. Dráha, kterou materiál v peci vykonává, může mít z hlediska teploty regulované zóny a různé typy pecí se přizpůsobují velikosti a typu vsázky a způsobu tepelného zpracování. Na konci pece je ohřátý nebo již ochlazený materiál odebírán na následné technologické operace. Příkladem mohou být pásové pece pro menší výrobky s pracovní teplotou do 900 °C, na které následně navazují další automatizované technologické fáze (např. chlazení, kalicí lázeň, sušení).



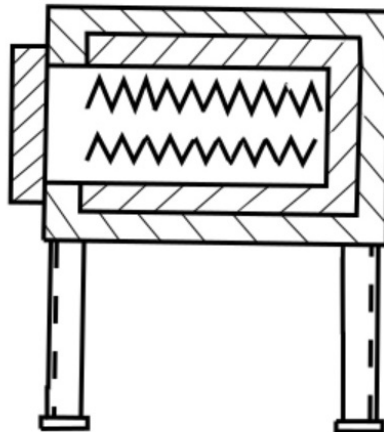
Obr. 5. Schéma průběžné pece [3]

- Karuselové pece: příkladem těchto pecí mohou být pece používané k ohřevu trubek. Trubky jsou pokládány na otočnou nístěj (na pojezdových kolech, které jedou po kolejnicích) a postupně prochází jednotlivými ohřívacími pásmy pece. Manipulace je prováděna automaticky, ohřev probíhá nerovnoměrně. Vytápění je zajišťováno plynem nebo kapalnými palivy. Výhodou je nepohyblivá vsázka a tím i nízký opal, přesná regulace tlaku v peci a nízké nároky na údržbu. Mezi nevýhody patří zejména konečná délka ohřivaných předvalků nebo potřeba většího prostoru pro vlastní pec. Nevýhodou může být také obtížnější manipulace s materiálem, kdy sázecí a výstupní dveře jsou v těsné blízkosti. Sázecí a vytahovací stroje pak představují dodatečné náklady.



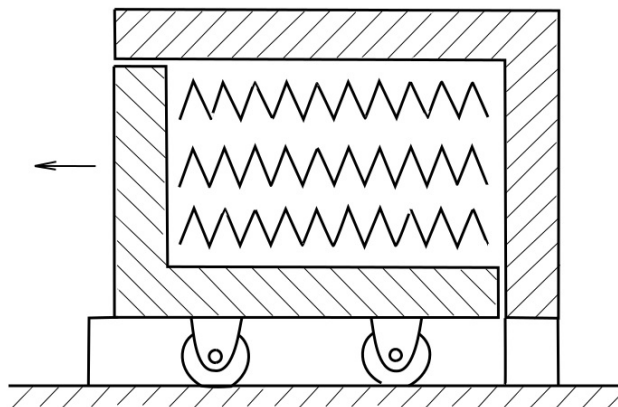
Obr. 6. Schéma karuselové pece [3]

- Komorové a vozokomorové pece: jejich konstrukce je uzpůsobena rozdílné velikosti a variabilitě tvaru vsázky (od několika desítek kg až po stovky t). Rozmanitost velikosti vsázky vedla ke konstrukci různých typů komorových pecí. Jsou konstruovány buď s pevnou, nebo pohyblivou nístějí (usnadňuje nakládání vsázky). Jsou používány pro tepelné zpracování materiálu v dávkách. Pohyblivá nístěj se používá tehdy, je-li nutné např. po zpracování materiál (součást) např. rychle ochladit (rozpouštěcí žíhání, tepelné zpracování hliníkových slitin).



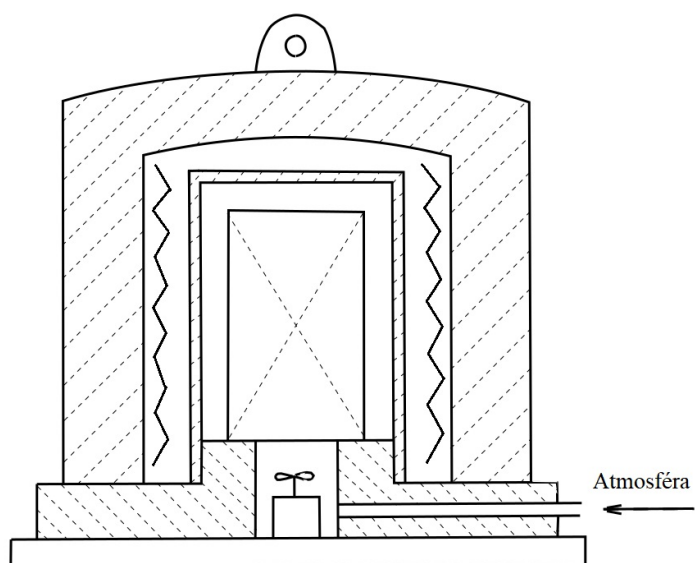
Obr. 7. Schéma komorové pece [3]

Vozokomorové pece jsou často využívány pro tepelné zpracování velkých a těžkých součástí, např. ocelových odlitků a ingotů, kde není možné manipulovat se samotnými výrobky za vysokých teplot.



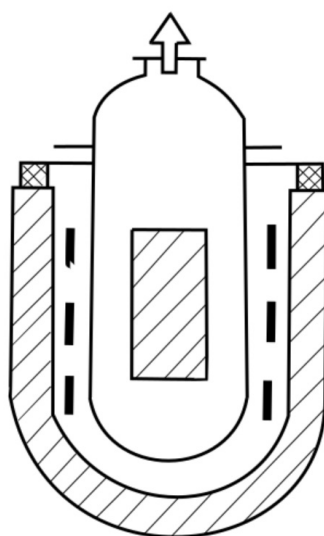
Obr. 8. Schéma vozokomorové pece [3]

- Pokloповé pece (zvonové): materiál je uložen na nepohyblivé nístěži a je přikryt poklopem ze žáruvzdorné oceli. Poklop (zvon) umožňuje použít řízenou atmosféru. Vytápěny jsou buď plynem, nebo odporovým teplem. Spaliny jsou rozváděny ventilátory a jejich odtah je prováděn ventilátorem. Hořáky jsou umístěny na obvodu zvonu, zatímco v případě odporového vytápění jsou na celé ploše zvonu. Výhodou elektrického vytápění je rychlost a rovnoměrnost ohřevu a přesná regulace teploty. Výhody pokloповých pecí ve srovnání s průběžnými: rovnoměrnost mechanických vlastností a struktury po délce i šířce výrobků, lepší kvalita povrchu a rovinatost pásů a vysoká výkonnost pecí.



Obr. 9. Schéma pokloповé pece [3]

- Vakuové pece lze podle konstrukce rozdělit na komorové, šachtové a víceúčelové a dle základní konstrukční koncepce na teplostěnné (komora zvenku ohřívána, obvykle do 850 °C), teplostěnné s vyrovnáním tlaku, se studenou stěnou (plášť vakuové komory je chráněn tepelně-izolačními štíty).



Obr. 10. Schéma vakuové pece [3]

V této práci bude pozornost zaměřena na konstrukci komorových pecí s pracovním rozsahem teplot od 450 do 900 °C.

2 KOMOROVÉ PECE PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ [3], [9], [10], [11], [12]

Komorové pece jsou konstrukčně nejjednodušším typem pecí a z hlediska užití jsou nejuniverzálnější. Jejich pracovním prostorem je obdélník ohraničený vnitřní izolací pece. Jak již bylo uvedeno výše, komorové pece se konstruují s pevnou nebo pohyblivou nístějí. Konstrukce vozokomorových pecí je taková, že boční stěny, zadní stěna i strop pece jsou pevné. Dno pece je tvořeno pánvovým vozem s koly (koleje), které umožňují ukládat vsázku na vůz mimo pec a následně s vozem zajet do pece na vlastní tepelné zpracování. Po zavezení vozu se pec uzavře dveřmi, které tvoří přední stěnu pece.

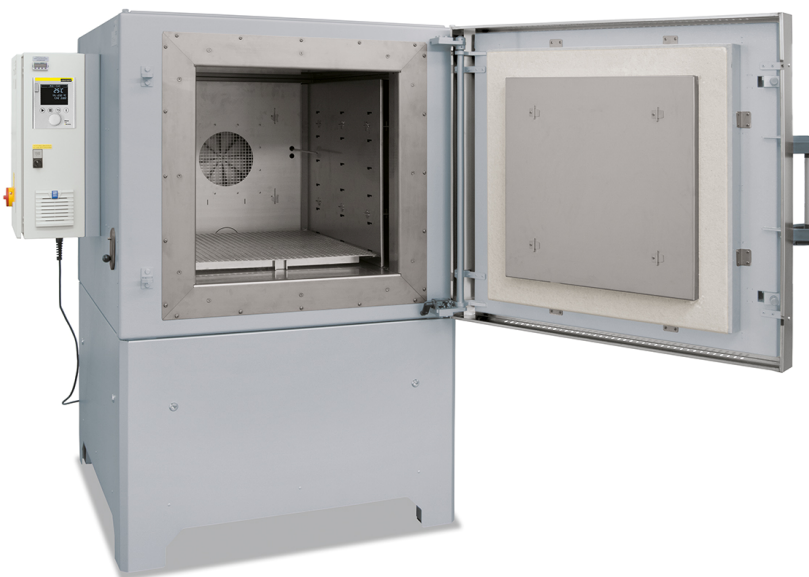
Komorové pece jsou vyhřívány elektrickým odporovým teplem nebo v menší míře spalováním topného plynu. Odporové články jsou dle uplatněného přenosu tepla umístěny buď do topných košů, nebo jsou jako ohýbané spirály zavěšeny na stěny pece.

Rozměry a tvar pracovního prostoru představují spolu s maximální dosažitelnou teplotou základní charakteristiky komorových pecí pro tepelné zpracování. Určují maximální rozměry vsázky, kterou je do pece možné umístit. Rozměr pracovního prostoru se uvádí v milimetrech ve formátu šířka (š) × výška (v) × hloubka (h), případně průměr (Ø) × hloubka (h) nebo ekvivalentním objemem v litrech. Každý typ pece pro tepelné zpracování je konstrukčně řešen v mnoha rozličných rozměrech (objemech). Specifické rozměry jsou dány výrobcem pecí, běžně se vyrábějí pece s rozměry od Ø 150 × 150 mm (2,5 l) až po 2500 × 2000 × 6000 mm (30 000 l), ale ve speciálních případech i větší. Celkové rozměry pece jsou odvozeny od rozměrů pracovního prostoru, navýšené o tloušťku izolace, rozměry vnějšího pláště a rámu.

Rámem a pláštěm pece rozumíme ocelovou konstrukci, jež se dá považovat za základní stavební prvek zachycující všechny síly a určující vzhled pece.

Dalším aspektem hodnocení průmyslových pecí je jejich bezpečnost. Pece by neměly na vnějším povrchu přesahovat teploty nebezpečné pro obsluhu, což platí hlavně pro manipulační prvky, jako jsou madla či upínky dveří. Maximální přípustná teplota pláště a manipulačních prvků nesmí přesáhnout teplotu 50 °C.

Nezbytným bezpečnostním požadavkem je uzemnění nebo elektrická izolace všech kovových prvků pece.



Obr. 11. Oběhová komorová pec NA 250/45 [10]

Na **Obr. 11** je zobrazen oběhová komorová pec firmy Nabertherm NA 250/45, jedná se o pec o objemu 250 l, s maximální pracovní teplotou 450°C.

2.1 Výkon pece [6], [8]

Důležitou součástí pro určení výkonu pece je celkové množství tepelné energie potřebné nejen pro ohřev vsázky, ale i ohřev všech konstrukčních prvků, které se buď v peci, nebo v okolí pracovního prostoru nacházejí (např. izolace). Zároveň je do tohoto celkového tepla nutné započítat tepelné ztráty stěnami pece.

Výkon pece je v praxi určen požadavkem na ohřátí daného množství vsázky za určený interval času. Udává, jaké množství tepelné energie pec dodává do pracovního prostoru za požadovanou dobu tak, aby bylo dosaženo homogenního teplotního pole.

- Výkon pece

$$P = \frac{Q_{\text{celk}}}{\tau_n} \quad [\text{W}] \quad (8)$$

kde:

Q_{celk} celkové teplo [J]

τ_n čas od počátku topení po dosažení teploty [s]

- Celkové teplo

$$Q_{\text{celk}} = Q_{\text{vs}} + Q_{\text{ma}} + Q_{\text{vvp}} + Q_{\text{iz}} + Q_{\text{ta}} + Q_{\text{zt}} \quad [\text{J}] \quad (9)$$

kde:

Q_{vs} teplo potřebné pro ohřev vsázky na danou teplotu [J]

Q_{ma} teplo potřebné pro ohřev manipulačních prostředků (koše, regálové vozíky) [J]

Q_{vvp} teplo potřebné pro ohřev vnitřního vybavení pece (oběhová vložka, police) [J]

Q_{iz} teplo potřebné pro ohřev izolace [J]

Q_{ta} teplo potřebné pro změnu skupenství (převážně při tavení) [J]

Q_{zt} teplo potřebné pro pokrytí tepelných ztrát stěnami pece [J]

- Vzorce pro výpočet Q_{vs} , Q_{ma} , Q_{vvp} , Q_{iz}

$$Q_{\text{vs}} = m_{\text{vs}} \cdot c_{\text{pvs}} \cdot \Delta T_z \quad [\text{J}] \quad (10)$$

$$Q_{\text{ma}} = m_{\text{ma}} \cdot c_{\text{pma}} \cdot \Delta T_z \quad [\text{J}] \quad (11)$$

$$Q_{\text{vvp}} = m_{\text{vvp}} \cdot c_{\text{pvvp}} \cdot \Delta T_z \quad [\text{J}] \quad (12)$$

$$Q_{\text{iz}} = m_{\text{iz}} \cdot c_{\text{piz}} \cdot \Delta T_z \quad [\text{J}] \quad (13)$$

kde:

m_{vs} hmotnost vsázky [kg]

m_{ma}	hmotnost manipulačních prostředků [kg]
m_{vvp}	hmotnost vnitřního vybavení pece [kg]
m_{iz}	hmotnost izolace [kg]
c_{pvs}	měrná tepelná kapacita vsázky [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pma}	měrná tepelná kapacita manipulačních prostředků [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pvvp}	měrná tepelná kapacita vnitřního vybavení pece [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{piz}	měrná tepelná kapacita izolace [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
ΔT_z	rozdíl teploty na počátku a konci tepelného zpracování [K]

- Vzorec pro výpočet tepla na fázové změny Q_{ta}

V některých aplikacích je nutné uvažovat i teplo potřebné pro tavení dané slitiny (pece mohou být použity pro tavení nízkotavitelných slitin, jako např. Sn, Pb atd.) nebo je nutné uvažovat výparné teplo. S vypařováním vody je nezbytné počítat např. při ohřevu součástí po kalení, kde může být v uzavřených prostorách velký objem kapaliny, která se bude muset odpařit.

$$Q_{ta} = m_{vs} \cdot \Delta h_t \quad [J] \quad (14)$$

kde:

Δh_t specifická tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

- Vzorec pro výpočet Q_{zt}

Ztráty pece jsou dány převážně vedením tepla ve stěně vlastní pece.

$$Q_{zt} = \dot{q}_{zt} \cdot S \cdot t = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot t \quad [J] \quad (15)$$

kde: q_{zt} specifické ztráty povrchem pece [$W \cdot m^{-2}$]

2.2 Izolace pece [5], [7], [8]

Pro zabránění úniku tepelné energie z pracovního prostoru pláštěm pece je důležité použít izolační materiály. Izolační schopnost materiálů je založena zejména na nízké tepelné vodivosti nebo vysoké pórovitosti, kde se využívají izolační vlastnosti vzduchu. Tepelně-izolační materiály se zpravidla vyznačují nízkou hustotou.

Výhodou některých materiálů je schopnost akumulovat teplo a následně jej vyzařovat do pracovního prostoru. Jiné materiály mají naopak schopnost akumulovat teplo velmi nízkou. To ovlivňuje instalovaný výkon pece, rychlost ohřevu pece i jejího ochlazování a tím i provozní náklady.

Dělení tepelně izolačních materiálů je možné provádět dle několika hledisek, nejčastěji se jedná o dělení podle:

- chemického a mineralogického složení;
- pórovitosti materiálu;

- formy izolace, ve které se používají
 - tvarové (izolační tvárnice, rohože, atd.);
 - zrnité (sypké, vláknité);
- způsobu výroby
 - lisované, formované;
 - z polosuchých nebo suchých hmot;
 - lité ze suspenzí;
- tepelného zpracování
 - pálené;
 - nepálené.

Tvarové žáruvzdorné materiály jsou vyráběny ve tvaru tvarovek – izolačních cihel, jež jsou vyráběny z řady žáruvzdorných oxidických materiálů, žárobetonů nebo uhlíkových látek. Volba použitého materiálu je dána především maximální a provozní teplotou pece, provozní atmosférou v peci a samozřejmě i provozními a pořizovacími náklady. Mezi tvarové žáruvzdorné materiály se řadí:

- křemičité materiály (na bázi SiO_2);
- hlinitokřemičité materiály (šamot);
- hořečnaté a hořečnatospinelové materiály (magnezit, spinel);
- uhlíkaté materiály;
- křemičítokarbidové materiály (SiC);
- speciální žáruvzdorné materiály (žárobetony).

Každý izolační materiál má vlastní mechanické, ale i fyzikální a chemické vlastnosti. Z hlediska izolačních vlastností je důležité jeho chemické složení, zdánlivá hustota, objemová hmotnost, měrná tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Z hlediska instalace i vlastního provozu izolace mají zásadní vliv vlastnosti, jako je teplotní délková roztažnost, trvalé změny v žáru, pevnost v tlaku/tahu/ohybu a odolnost proti deformaci v žáru při zatížení.

V současnosti jsou nejčastěji používaným materiálem pro tepelné izolace pecí vláknitá izolace z keramických materiálů. Používány jsou keramické rohože a vlákna pod obchodním názvem Sibral, jejichž výhodou je nízká hustota, snadná instalace, výborné tepelně-izolační vlastnosti a relativně nízká cena. V důsledku nízké tepelné kapacity a vodivosti mají pece nízké provozní náklady, rychlý náběh, ale i rychlý pokles teploty v pracovním prostoru. Z ekonomických důvodů se zcela odstoupilo od užívání těžkých šamotových materiálů, jejichž výhodou může být nízký pokles teploty v peci.

2.3 Způsob ohřevu [3], [7]

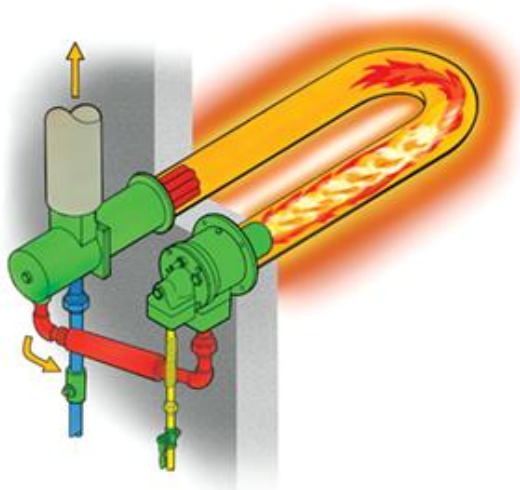
Způsob ohřevu je jedním ze zásadních aspektů ovlivňující konstrukci průmyslové pece, u pecí pro tepelné zpracování se rozlišují dva hlavní způsoby ohřevu, kterými jsou:

- plamenný ohřev;
- ohřev za využití elektrické energie (odporový).

2.3.1 Plamenný ohřev [4], [5], [7], [8], [10]

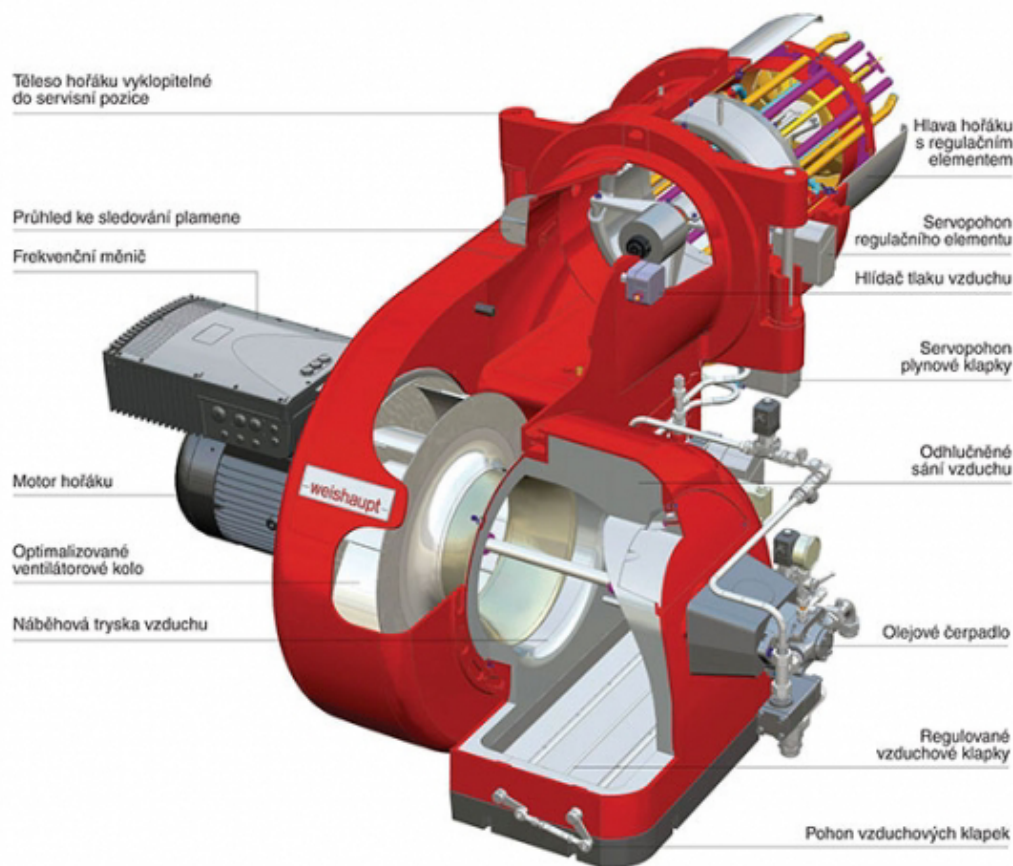
Spalováním paliva smíchaného se vzduchem získáváme potřebnou tepelnou energii pro ohřev vsázky. Nejběžnějšími palivy jsou různé typy zemního plynu (E, LL), zkapalněný propan-butan a topné oleje.

Hořáky musí být umístěny tak, aby zajišťovaly dobrou cirkulaci atmosféry v peci a tím i rovnoměrné prohřívání materiálu. Využívá se přímý ohřev, kde materiál přijímá teplo přímo od plamene hořáku. Nepřímý ohřev se vyznačuje tím, že plamen ohřívá vzduch nebo jiný materiál, který sálá, a tím ohřívá vlastní vsázku. Přímé hoření se vyznačuje vysokou účinností přenosu tepla, ale může vést k opalování materiálu. Řešením může být použití nepřímého ohřevu, tzv. mufle. Ta může být tvořena např. uzavřením plamene do sálavé trubky. Příklad takového hořáku je znázorněn na **obr. 12**, přičemž zobrazený hořák je osazen rekuperačním zařízením pro předehřev spalného vzduchu. Regulace je obvykle ruční a pro zvýšení tepelné účinnosti je využívána rekuperace, dokonalým spalovacím poměrem a nuceným oběhem atmosféry v peci.



Obr. 12. Hořák Eclipse TFB s uzavřeným plamenem v sálavé trubce [14]

Dle potřebného výkonu se volí typ hořáku s odpovídajícím výkonem. Na **obr. 13** je znázorněn řez hořákem firmy Weishaupt, model Monarch WM 50 o výkonu v rozpětí 800 – 11 000 kW. Patrné jsou funkční části hořáku, frekvenčně regulovaný motor pohánějící ventilátorové kolo nasává spalný vzduch a vhání jej do hlavy hořáku. Zde dochází k promíchávání s plynem a následně k jeho hoření. Vzduch je nasáván skrz regulované klapky, které usměrňují jeho objemový průtok. Všechny díly jsou usazeny v kompozitním těle, které je pomocí příruby upevněno na pec.



Obr. 13. Hořák Weishaupt Monarch® WM 50 [13]

Z hlediska rovnoměrného rozložení tepelného pole je však vhodnější místo jednoho vysoce výkonného hořáku použít více menších hořáků o odpovídajícím výkonu, které jsou rovnoměrně rozmístěny kolem pracovního prostoru.

Rovnoměrnost teplotního pole v pracovním prostoru se dá ovlivnit i v průběhu procesu, a to regulací výkonu jednotlivých hořáků za pomoci průběžného měření a ovládání jejich výkonu pomocí řídicího programu.

Pro snížení nákladů na vyhřívání, převážně velkých pecí pro tepelná zpracování, se využívají rekuperační zařízení. Principem je předehřev v hořáku spalovaného vzduchu pomocí spalin opouštějících pracovní prostor. V závislosti na typu pece a druhu tepelného zpracování lze za pomoci rekuperačního hořáku dosáhnout úspor energie až 25 %. Předehřev spalného vzduchu příznivě ovlivňuje spalnou teplotu, a tím zvyšuje výkon pece.

Tab. 4. Fyzikální a chemické vlastnosti plynných paliv [8]

Typ paliva		Tranzitní zemní plyn	Norský zemní plyn	Propan	Propan-butan
Spalné teplo	[kWh · m ⁻³]	10,48	11,54	26,65	31,46
	[MJ · m ⁻³]	37,72	41,54	95,96	13,27
Výhřevnost	[kWh · m ⁻³]	9,44	10,44	24,54	29,04
	[MJ · m ⁻³]	34,00	37,59	88,35	104,55
Stechiometrické objemy					
Kyslík	[m ³]	2,00	2,20	5,10	6,00
Vzduch	[m ³]	9,60	10,50	24,40	28,80
Zápalná teplota	[°C]	600	590	470	420

Z **tab. 4** je zřejmé, že nejvyšší výhřevnost a tím i efektivitu ohřevu má směs plynu propan-butan a čistý propan, přesto se k vytápění pecí pro tepelné zpracování nevyužívají. Nejpoužívanějším palivem je zemní plyn, jeho nespornou výhodou oproti propan-butanu a propanu je jeho nízká cena a snadná dostupnost.

Stechiometrický objem udává objem vzduchu potřebného pro spálení jednoho metru kubického paliva.

2.3.2 Odporový ohřev [7], [8], [15]

Odporové teplo je generováno průchodem elektrické energie odporovým materiálem, kdy dochází ke srážkám elektronů a atomů materiálu a předání kinetické energie, která se mění v teplo. Odpor může vznikat při průchodu elektrického proudu vlastní vsázkou (přímý odporový ohřev) nebo sáláním topných článků na ohřívanou součást.

Elektrický odpor je závislý na použitém druhu materiálu, tedy jeho čistotě, dokonalosti jeho krystalové mřížky a okolní teplotě. Čím je materiál čistší, tím je jeho měrný elektrický odpor nižší. Nejnižší hodnoty měrného odporu mají čisté kovy s pravidelnou krystalickou mřížkou. Pro získání vyšších hodnot měrného elektrického odporu se využívají různé legující prvky.

U průmyslových pecí pro tepelná zpracování se v převážné většině využívá nepřímý odporový ohřev. Mezi důvody patří snadnější regulovatelnost a dosahované menší rozdíly teplot v pracovním prostoru. Na rozdíl od přímého plamenného ohřevu nedochází k opalu vsázky, zdroj elektrické energie je snadno dostupný a naskýtá se také možnost pracovat s ochrannými atmosférami.

Pro ohřev pracovního prostoru se využívají odporové materiály ve formě topných těles nebo spirál z odporového drátu rozmístěné tak, aby optimálně vyhřívaly pracovní prostor.

Materiály užívané pro odporový ohřev charakterizujeme technickými a ekonomickými požadavky:

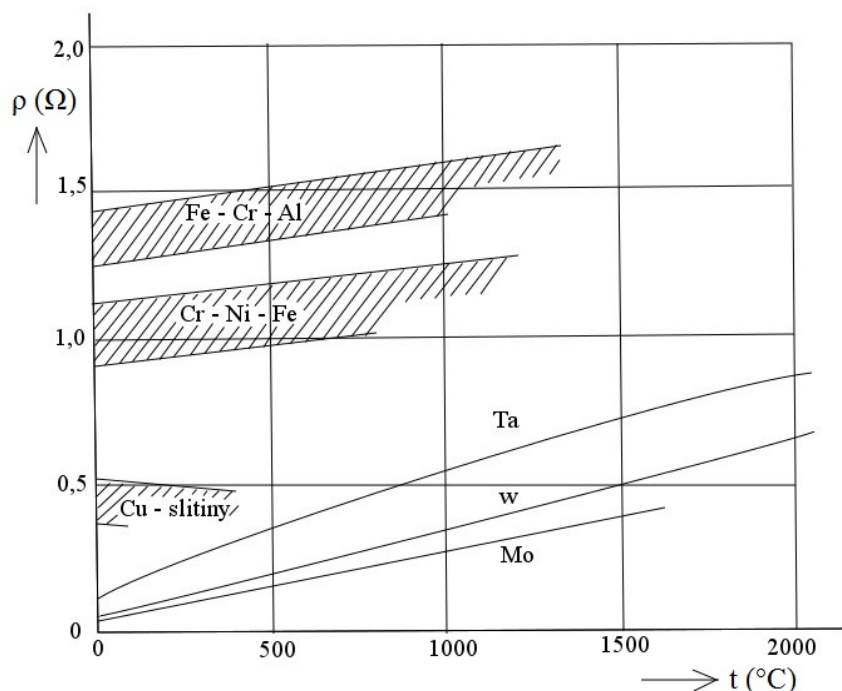
- vysoký měrný tepelný odpor – měrný odpor materiálu určuje míru, v jaké se elektrická energie mění v teplo, je principem odporového tepla;

- nízký teplotní součinitel odporu – s rostoucí teplotou elektrický odpor nadměrně nenarůstá;
- nízký součinitel teplotní roztažnosti – zaručuje nízké riziko poškození odporového materiálu deformací na teplotě (např. prověšení drátů);
- dobrá mechanická pevnost – při provozních teplotách snižuje riziko poškození odporového zdroje tepla v pracovním prostoru;
- ekonomická výhodnost – je dalším parametrem pro výběr odporového zdroje tepla s cílem nezvyšovat náklady na výrobu a provoz nad nezbytně nutnou míru (příkladem nákladného zdroje tepla je wolfram jako odporový materiál);
- odolnost proti chemickým účinkům prostředí – zajišťuje, aby zdroj tepla nebyl předčasně poškozen chemickými reakcemi v atmosféře pece, např. korozí.

Používané odporové materiály se dělí na několik skupin:

- Podle druhu použitého materiálu či slitiny:
 - odporové slitiny: Cr-Fe-Ni (Nikrothal), Fe-Cr-Al (Kanthal) – široce využívané materiály do provozní teploty 1200 °C (při vyšší teplotě se kovy stávají nestabilní);
 - vysokotavitelné čisté kovy: W, Mo, Ta, Pt (překážkou bývá vysoká cena materiálu, případně specifické podmínky využití, např. W vyžaduje vakuum nebo ochrannou atmosféru);
 - kovo-keramické články na bázi práškové metalurgie: $\text{MoSi}_2 + \text{SiO}_2$, zejména pro vyšší teploty, v nichž jsou slitiny kovů již nestabilní;
 - nekovové materiály: C, SiC – zejména pro vyšší teploty, v nichž jsou slitiny kovů již nestabilní.
- Podle měrného odporu:
 - nízký měrný odpor s provozní teplotou do 500 °C (Cu slitiny + FeCr);
 - vysoký měrný odpor s provozní teplotou do 1200 °C (Cr-Fe-Ni);
 - zvlášť vysoký měrný odpor s provozní teplotou 1000– 1375 °C (Fe-Cr-Al).

Na **obr. 14** je znázorněn měrný elektrický odpor v závislosti na teplotě pro různé odporové materiály.



Obr. 14. Graf měrného elektrického odporu v závislosti na teplotě pro odporové slitiny a některé čisté kovy [7]

Z grafu na **obr. 14** je patrné, že měrný elektrický odpor odporových slitin má vyšší hodnoty než u čistých kovů, z čehož vyplývá, že v případě jejich použití dosahují pece požadované teploty rychleji. Čisté kovy jsou tak používány pouze pro speciální ohřevy na vysoké teploty, v běžných provozech jsou pak v naprosté většině případů používány odporové slitiny (např. Kanthal).

2.4 Distribuce tepla [5], [7], [8]

Způsoby přenosu tepla jsou uvedeny v kapitole 1.2.

Pracovní prostor pece se dá považovat za uzavřený systém, který obecně tvoří čtyři tělesa, která se účastní výměny tepla sáláním (radiací) a prouděním (konvekcí).

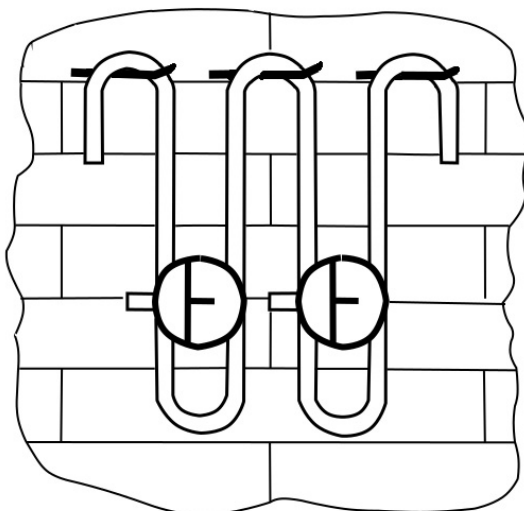
Těmito tělesy jsou:

- vsázka;
- stěny pece společně s případným vybavením pece (police, závěsné komponenty ad.);
- spaliny (atmosféra v peci);
- plamen nebo elektrický oblouk.

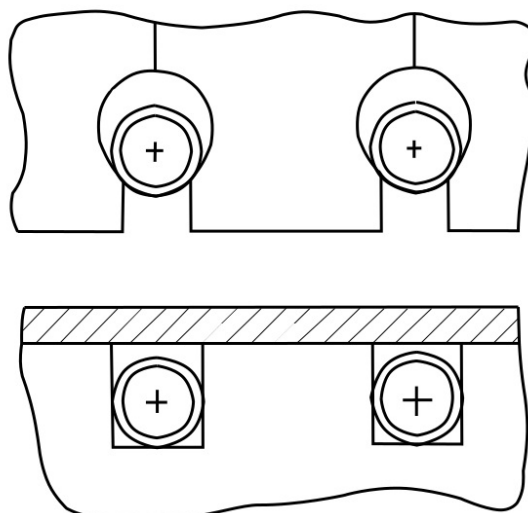
Konstrukce elektrických pecí, které uplatňují především přenos tepla prouděním, musí toto proudění zajišťovat nucenou cirkulací atmosféry pece. Nucené cirkulace se dosahuje pomocí ventilátorů, které nasávají atmosféru z pracovního prostoru a rozvádí ji kolem žhavých odporových drátů zpět k ohřívané vsázce. Odporové dráty jsou buď zavěšeny na stěny pece, nebo jsou umístěny v topných koších a od pracovního prostoru jsou odděleny muflí. Tato mufla má v sobě vhodně uspořádaný systém otvorů, které rozvádějí cirkulující atmosféru rovnoměrně do pracovního prostoru, a tím vytváří v peci homogenní teplotní pole.

Pro různé aplikace je vhodné zajistit cirkulaci horizontální (vsázka umístěna v policích) nebo vertikální (pece se vsázkou v koších). Pece s elektrickým ohřevem jsou opatřeny regulovatelným sacím a odtahovým komínkem pro řízení průtoku atmosféry v peci.

Elektrické odporové pece, kde se teplo přenáší zářením, mají odporové dráty zavěšeny na stěnách uvnitř pece tak, aby záření přecházelo přímo na vsázku (**obr. 15**) nebo jsou umístěny v šachtách ve vyzdívce stěn, dna a případně stropu pece (**obr. 16**), kdy tuto vyzdívku dráty nahřejí a ta pak vlastním vyzařováním přenáší teplo na povrch vsázky.



Obr. 15 Odporové dráty uchycené na stěně pece [5]



Obr. 16 Umístění odporových spirál ve dně a stropě [5]

V případě plynových pecí se přenos tepla zajišťuje samotným proudem spalin z hořáků, které proudí a sálají na vsázku. Rovnoměrného rozložení teplot se dosahuje optimálním umístěním hořáků, a tedy i prouděním spalin pracovním prostorem. U větších pecí lze komíny pro odtah spalin upravit pro předehřev spalného vzduchu rekuperačních hořáků, a tím dosáhnout úspor energie.

2.5 Plynotěsnost pecí [3], [7]

Řízené ochranné atmosféry mají za účel zabraňovat oxidaci a změnám chemického složení na povrchu výrobků. Plynotěsnost pece zabraňuje úniku těchto atmosfér a tepla z pracovního prostoru.

Pecní atmosféry se dle obsahu prvků dělí na:

- neutrální – prvky v ní obsažené nereagují s povrchem vsázky;
- oxidační – obsahují volný kyslík nebo velké množství vodních par, na povrchu vsázky vznikají oxidy, označované jako okuje. Rychlost jejich vzniku roste s teplotou;
- redukční – obsahuje oxid uhelnatý, vodík nebo uhlovodíky.

Jako řízená ochranná atmosféra se nejčastěji používá čistý dusík nebo směs dusíku a vodíku. Tyto plyny jsou do pracovního prostoru přiváděny potrubím ze zásobníků plynu. Cílem je vytvořit v pracovním prostoru přetlak, který zabraňuje vnikání okolního vzduchu.

Další metodou, jak zabránit vzniku oxidace na povrchu materiálu, je vytvoření vakua v plynotěsné nádobě (retota), vakuum je také jedním ze základních prostředí pro chemicko-tepelné zpracování. Tato oblast tepelného zpracování není předmětem předložené práce.

2.6 Kontrola a regulace teploty [7], [16], [17], [18]

Pro zaručení potřebných podmínek tepelného zpracování je nezbytné získávat informace o průběhu dějů a odpovídajícím způsobem na ně reagovat. Nejzásadnější charakteristikou tepelného zpracování je teplota v pracovním prostoru. Teplota je nejčastěji řízena pomocí regulátorů teploty. Funkcí regulátoru je porovnávat změřenou teplotu s teplotou zadanou do programu a v závislosti na nastaveném programu usměrňovat výkon zdrojů tepla tak, aby teplota splňovala parametry tepelného zpracování (rychlost ohřevu, doba výdrže a rychlost ochlazování).

Na **obr. 17** je snímek programovatelného regulátoru HtIndustry firmy HTH8 s.r.o. Do paměti regulátoru lze uložit 30 programů o max. 15 krocích. Horní displej zobrazuje aktuální měřenou teplotu, spodní displej pak teplotu požadovanou.



Obr. 17. Regulátor HtIndustry [17]

2.6.1 Měření teploty [7], [16], [18]

Význam měřené teploty je pro tepelná zpracování opravdu vysoký, proto jsou na prvky, které teplotu měří, kladeny vysoké nároky.

První a nejčastěji užívanou skupinou jsou termočlánky fungující na principu termoelektrického jevu a skládající se ze dvou vodičů z odlišného druhu kovu a dvou konců (teplého a studeného). Při zahřátí teplého konce na teplotu vyšší, než má konec studený, vzniká elektromotorická síla. Termoelektrické napětí se následně převádí na příslušnou teplotu.

- Termočlánky Fe-konstantan – kladná větev je čisté železo, záporná konstantan. Tento typ termočlánku je vhodný pro teploty do 600 °C. Nevýhodou je koroze ve vlhkém prostředí.
- Termočlánky Cu-konstantan – kladná větev je z čisté mědi, záporná konstantan. Jsou vhodné pro měření teplot v rozpětí od -200 °C do 300 °C. Výhodou je odolnost proti korozi.
- Termočlánky NiCr-Ni – kladná větev je slitina NiCr, záporná z čistého Ni. Tyto termočlánky spolehlivě měří do 1000 °C. V atmosférách s nízkým obsahem kyslíku dochází k tzv. zelenému moru a snižuje se přesnost.
- Termočlánky NiCr-konstantan – kladná větev je slitina NiCr, záporná konstantan. Využitelné jsou do teploty 700 °C. Výhodou je nižší cena než u termočlánků NiCr-Ni.
- Termočlánky PtRh-Pt – kladná větev je slitinou Pt a Rh o různých množstvích Rh, záporná větev je z čisté platiny. Tyto termočlánky dokáží spolehlivě měřit do 1300 °C a při vhodném zapojení až do 1600 °C. Ušlechtilé kovy jsou odolné proti příznivým vlivům okolní atmosféry. Jejich velkou nevýhodou je vysoká cena.

Druhou skupinou jsou termočlánky, jejichž funkce využívá změny ohmického odporu vodiče při změně jeho teploty. Pro vysoké teploty se jako materiál nejběžněji používá platina, pro nižší teploty je vhodnější nikl.

Oba tyto materiály splňují nároky kladené na materiály pro odporové termočlánky:

- fyzikální a chemická stálost v rozsahu měřených teplot;
- vysoký teplotní součinitel teplotního odporu;
- dobré tváření při tažení za studena;
- snadná zaměnitelnost v případě potřeby výměny poškozeného čidla.

2.6.2 Měření plynů a spalin [7], [8]

Účelem tohoto měření je kontrola druhu a množství plynů, spalin a výparů v pracovním prostoru pece. Toto měření je významné pro zpracování, kdy je nutné hlídat složení atmosféry v peci vyplývající z požadavku daného tepelného zpracování. Další oblastí bývá průmysl, kde během tepelného zpracování dochází k tvorbě plynných směsí, jež mohou při určité koncentraci vytvářet výbušnou atmosféru (např. gumárenství).

- Analyzátoři založené na základě tepelné vodivosti plynů – principem je porovnávání tepelné vodivosti měřeného plynu s plynem porovnávacím, převážně pro měření obsahu H_2 , CO_2 a SO_2 .
- Analýza založená na spalném teple – analyzuje se spalné teplo, které je odlišné pro každý druh plynu (Metrex – katalytické spalování plynů).
- Infračervené analyzátoři plynů – založeno na pohlcování infračerveného záření molekulami plynů, jako např. CO , CO_2 , CH_4 a dalších. Molekuly složené ze stejných atomů plynů však infračervené záření nepohlcují, proto tuto metoda nelze uplatnit na měření kyslíku, vodíku, dusíku atd.

2.7 Způsob ukládání vsázky [3], [9], [10]

Ukládání vsázky do pece je dáno vlastní konstrukcí pece, tvarovou složitostí a velikostí výrobků a teplotou v peci. Uložení součásti musí zabránit deformacím a praskání součásti během ohřevu a ochlazování.

Ukládání vsázky do komorových pecí s pevnou nístějí se provádí v horizontálním směru skrz otvor dveří. Dle velikosti, tvaru, hmotnosti a množství zpracovávaných dílů se vsázka ukládá:

- jednotlivě ručně přímo na dno pece, u velkých a těžkých dílů pomocí vysokozdvíhových vozíků;
- pro vyšší efektivitu do regálů, kde jsou jednotlivé díly ručně nebo pomocí robota vyskládány do polic; regály se pak zavážejí do pece pomocí vysokozdvíhových vozíků nebo na vlastních kolečkách; regály s policemi jsou vhodné pro rovnoměrnou horizontální cirkulaci atmosféry v peci (**obr. 18**);
- do různých košů nebo beden, v nichž se zpravidla zpracovává velké množství drobné vsázky; u tohoto způsobu je důležitá doba výdrže na teplotě, tak aby se prohrály všechny výrobky.



Obr. 18. Komorová pec N2380/55 HAS [10]

Nevýhodou těchto pecí je, že pokud proces vyžaduje vyjmutí výrobků z pece bez předešlého ochlazení, vystavuje se obsluha zvýšenému nebezpečí kontaktu s ohřátými plochami či horkou atmosférou, která z pece vychází, a může dojít ke zranění. Toto riziko je podstatně sníženo u pecí vozokomorových.

Vozokomorové pece svojí konstrukcí, kde dno pece osazené koly vyjíždí do dostatečné vzdálenosti před pec, nejen snižují riziko kontaktu s horkými plochami a atmosférou, ale výrazně usnadňují manipulaci a ukládání rozměrných a těžkých výrobků nebo většího počtu regálů, košů nebo beden. Ukládání je realizováno vysokozdvíhými vozíky nebo jeřáby.

Vozy těchto pecí mohou být:

- ruční (nepoháněné) – vhodné pro menší a lehčí vsázku, obsluha pomocí manipulačního madla vozy vysouvá a zasouvá ručně;
- motorové (poháněné) – vhodné pro vsázky větších objemů a hmotností, osa kol vozíku je osazena motorem, který ji pohání a zajišťuje pohyb dle signálu programu.

V automatizovaných provozech je možné zajistit výjezd vozu z pece na vedlejší kolej a okamžité zavezení druhého vozu s další vsázkou.



Obr. 19. Oběhová vozová pec W 5290/85AS [10]

Nedílnou součástí zakládání vsázky je mechanismus uložení a ovládní dveří. Dveře u komorových pecí bývají nejčastěji upevněny pomocí pantů, jak je zřejmé z **obr. 20**, nebo u menších pecí se uplatní systém ramene s pružinou (**obr. 21**).



Obr. 20. Komorová sušící pec KTR 22500/S se zavěšením dveří pomocí pantů [10]



Obr. 21. Komorová pec PKE 10 firmy LAC [9]

Vozokomorové pece jsou nejčastěji osazovány třemi základními mechanizmy ovládní dveří: ruční dveře v závěsích, dveře ovládané elektricky pomocí řetězu a dveře ovládané pomocí hydraulických nebo pneumatických pístů.

- a) Ručně otevírané dveře dveře jsou zavěšeny pomocí „C“ rámu, který dveře otevírá do strany. Jak je patrné z **obr. 22**, „C“ rám je upevněn k rámu pece a jeho rotace je zajištěna axiálním ložiskem. Těsnost dveří je zabezpečena dosedáním těsnění dveří na rám pece a utažením pomocí upínek na každé z bočních stran dveří. Tento systém je konstrukčně velmi jednoduchý, snadno seřiditelný, při výpadku proudu je možné dveře otevřít a manipulovat se vsázkou, tyto dveře vyžadují minimální údržbu. Jako nevýhodu je nutno uvést skutečnost, že pec nelze provozovat v automatizovaném provozu.
- b) Elektricky ovládané dveře zavěšené na řetězech – principem jsou dveře usazené v drážkách veden pomocí rolen a zavěšené na řetězech. Pohyb dveří je vertikálně nahoru, přičemž při zavření dveře utěsní pec vlastní hmotností. K ovládní dveří slouží monoblok motoru a převodovky napojený na hřídel s ozubenými koly, které jsou opásány řetězy. Konstrukce využívá protizávaží dveří, díky němuž je možné použít převodovky o menších krouticích momentech. Konstrukce tohoto mechanismu je komplikovanější a jsou zde kladeny nároky na odpovídající naddimenzování rozměru řetězu a krouticího momentu převodovky. Výhodou je velký rozsah zdvihů a napájení snadno dostupnou elektrickou energií.



**Obr. 22. Vozokomorová pec VKT 3000/850
s dveřmi zavěšenými v „C“ rámu [9]**



**Obr. 23. Vozokomorová pec SVK 14000/45
s dveřmi ovládanými elektricky [9]**

- c) Dveře ovládané hydraulickými nebo pneumatickými písty
- Hydraulické písty – základní princip je obdobný jako u zvedání dveří pomocí řetězů, dveře jsou vedeny drážkami vedení ve vertikálním směru nahoru. Rozdílem je, že pohyb dveří je řízen hydraulickými písty, které jsou upevněny k překladu pomocí kyvné příruby. Pracovní kapalinou bývají minerální oleje

kolující v uzavřeném okruhu potrubí, hadic a v nádrži hydroagregátu. Potřebný tlak v tomto systému zajišťuje zubový hydroagregát. Výhodou jsou velké zdvihové síly pístů, díky čemuž mohou písty o malých průměrech manipulovat dveřmi o vysoké hmotnosti (někdy i přes 400 kg). Mezi nevýhody se počítá omezený zdvih, dále možnost úniku kapaliny a tím znečištění okolí a případný pád dveří po ztrátě tlaku.



Obr. 24. Vozokomorová pec VKNC 9500/850 s dveřmi ovládanými hydraulickými písty [9]

- Pneumatické písty – mechanismus ovládní dveří je stejný jako u hydraulických pístů, jen s tím rozdílem, že hydraulický píst je nahrazen pístem pneumatickým. Pracovním médiem je v tomto případě tlakový vzduch, ten je však nutné čistit a obohatit o olejovou mlhu pro mazání pístů v úpravách vzduchu. Oproti hydraulickým mají tlakové písty menší zdvihovou sílu, na druhou stranu jsou rychlejší. Výhodou je, že v případě poškození systému potrubí a hadic nehrozí znečištění.

Komorové pece jsou i přes stále se rozvíjející trend chemicko-tepelného zpracování nedílnou součástí průmyslové výroby. Společnosti věnující se výrobě s využitím tepelných zpracování již delší dobu upouštějí od starších typů pecí s vyzdívkou ze šamotových cihel. Jejich zájem je teď směřován na specializovanější a flexibilnější pece s vláknitou izolací. Podstatou je zkracování dob předehřevu, schopnost rychleji reagovat na změnu nastavené teploty pro dané tepelné zpracování. Vlákenná izolace má mnoho mechanických výhod, např. není náchylná na praskání při teplotním šoku, proto je možné vsázku ochlazovat přímo v pecích. Další velkou výhodou je rozdíl v hmotnosti obou zařízení.

3 ZÁVĚR

Bakalářská práce pojednává o konstrukci pecí pro tepelná zpracování kovů. V první části práce jsou uvedeny a vysvětleny procesy základních typů tepelných zpracování ocelí, litin, neželezných kovů a jejich slitin. V diagramech Fe-Fe₃C jsou vyznačeny oblasti jednotlivých typů žíhání a pásmo kalicích teplot. Součástí této kapitoly je rozbor chemicko-tepelných zpracování, cementace a nitridace.

Práce dále pojednává o základních způsobech přenosu tepla mezi látkami, jimiž jsou: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). U každé metody jsou uvedeny vzorce pro výpočet toku tepla. Jsou vysvětleny veličiny a principy, které mají významný vliv na výsledné množství předaného tepla a tím i na konstrukci a provoz žíhací pece. Rozdělení pecí pro tepelné zpracování má mnoho kritérií, práce se zabývá rozbohem základních způsobů dělení. Příkladem uvedených způsobů dělení jsou: dle způsobu ohřevu, dle teploty ohřevu, dle technologického určení a tvaru pracovního prostoru.

Následující část práce popisuje konstrukci komorových pecí pro základní typy tepelného zpracování v rozmezí teplot 450 až 900 °C. Jsou popsány jejich funkční části v závislosti na požadavcích, které jsou na komorové pece pro tepelné zpracování kladeny. Zmíněno je rovněž jejich značení dle rozměrů pracovního prostoru a maximální pracovní teploty. Základem je popis postupu výpočtu výkonu pece, který je potřebný pro ohřátí vsázky na požadovanou teplotu za určený čas. Následuje rozbor typů izolace spolu s jejich vlastnostmi a významem. V kapitole pojednávající o způsobu ohřevu byly vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o nejběžnější metody ohřevu komorových pecí, popsány rozdíly mezi plamenným a odporovým ohřevem. Dle uplatněného způsobu přenosu tepla jsou v práci uvedeny metody rozmístění topných elementů. Jako důležitý prvek jsou zmíněny metody měření teploty spolu s její regulací. Závěr práce je věnován popisu ukládání vsázky do komorové a vozokomorové pece, včetně jejich rozdílů.

Práce shrnuje základní problematiku a konstrukční řešení pecí pro tepelné zpracování kovů a slitin. Práce může sloužit pro rychlou orientaci v dané problematice a může být využita i jako podklad pro odborná školení v oboru konstrukce a použití pecí pro tepelná zpracování. Některé informace použité v bakalářské práci pocházejí z osobních zkušeností autora, který pracuje jako konstruktér u renomovaného výrobce pecí pro tepelná zpracování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [19]

1. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
3. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-582-0.
4. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:6902f640-c7b4-11e4-b84b-005056827e52>
5. HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
6. PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4300-6.
7. MACHÁČKOVÁ, Adéla a Lenka MRŇKOVÁ. *Průmyslové pece: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3589-1.
8. NÁZLER, P., JONÁŠ, R. Osobní sdělení, LAC s.r.o., Hrušovany u Brna, 04.04.2018.
9. LAC, s.r.o. *Průmyslové pece a sušárny*. Hrušovany u Brna: LAC, s.r.o., 2017.
10. Nabertherm GmbH. *Termoprocesní technika*. Lilienthal (Germany): Nabertherm GmbH, 2017.
11. TEPLOTECHNA PRŮMYSLOVÉ PECE, s.r.o. *TPP-heat-treatment-of-metals*. Olomouc: TEPLOTECHNA PRŮMYSLOVÉ PECE, s.r.o., 2017.
12. REALISTIC, a.s. *Tepelné zpracování oceli*. Karlovy Vary: REALISTIC, a.s., 2017.
13. Max Weishaupt GmbH. *Hořáky monarch[®] WM 50 (800 - 11 000 kW)*. Schwendi (Germany): Max Weishaupt GmbH, 2017.
15. KNTL, a.s. *Elektrické vlastnosti drátu a Mechanické a fyzikální vlastnosti drátu*. Praha 9: KNTL, 2017.
14. HONEYWELL ECLIPSE [online], Honeywell-Eclipse, Inc. © 2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.eclipsenet.com/>.
16. RADA, J A KOL. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL/ALFA, 1985, 352 stran.
17. HTH8 [online]. Polička: HTH8 s.r.o. © 2011 - 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.hth8.cz/>.
18. NOVÁ, I. a J. EXNER, Měření teploty termoelektrickými články. *Slévárenská ročenka ..* Brno: Česká slévárenská společnost, 1982. ISSN 0231-7087. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:c9967f00-df2a-11e2-9923-005056827e52>
19. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
c_{piz}	měrná tepelná kapacita izolace	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{pma}	měrná tepelná kapacita manipulačních prostředků	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{pvs}	měrná tepelná kapacita vsázky	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{pvvp}	měrná tepelná kapacita vnitřního vybavení pece	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
d	tloušťka stěny	[m]
E_0	Intenzita sálání (záření) absolutně černého tělesa	$[W \cdot m^{-2}]$
h	hloubka	[mm]
m_{iz}	hmotnost izolace	[kg]
m_{ma}	hmotnost manipulačních prostředků	[kg]
m_{vs}	hmotnost vsázky	[kg]
m_{vvp}	hmotnost vnitřního vybavení pece	[kg]
P	výkon pece	[W]
Q_{celk}	celkové teplo	[J]
Q_{iz}	teplo potřebné pro ohřev izolace	[J]
Q_{ma}	teplo potřebné pro ohřev manipulačních prostředků	[J]
Q_{ta}	teplo potřebné pro změnu skupenství	[J]
Q_{vs}	teplo potřebné pro ohřev vsázky na danou teplotu	[J]
Q_{vvp}	teplo potřebné pro ohřev vnitřního vybavení pece	[J]
Q_{zt}	teplo potřebné pro pokrytí tepelných ztrát stěnami pece	[J]
\dot{Q}_{z12}	tepelný tok	[W]
\dot{q}_p	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
\dot{q}_{zt}	specifické ztráty povrchem pece	$[W \cdot m^{-2}]$
S	plocha	$[m^2]$
S_1	plocha vsázky	$[m^2]$
\check{s}	šířka	[mm]
T	teplota	[K]
T_1	teplota povrchu malého tělesa	$[^{\circ}C]$
T_2	teplota povrchu velkého okolí	$[^{\circ}C]$
T_{st}	teplota obtékaného tělesa	$[^{\circ}C]$
T_t	teplota tělesa	$[^{\circ}C]$
v	výška	[mm]
α_p	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Δh_t	specifická tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
ΔT	rozdíl teplot na stěnách	[K]
ΔT_z	rozdíl teploty na počátku a konci tepelného zpracování	[K]
ε	poměrná zářivost šedého tělesa (emisivita)	[-]
ε_1	emisivita vsázky	[-]
λ	součinitel teplotní roztažnosti	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
τ_n	čas od počátku topení po dosažení teploty	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Oblasti teplot pro žhánív diagramu Fe - Fe ₃ C [3]	11
Obr. 2. Pásmo kalících teplot v diagramu Fe - Fe ₃ C [3].....	12
Obr. 3. Graf změny tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [7]	17
Obr. 4. Schéma šachtové pece [3].....	23
Obr. 5. Schéma průběžné pece [3].....	24
Obr. 6. Schéma karuselové pece [3]	24
Obr. 7. Schéma komorové pece [3]	25
Obr. 8. Schéma vozokomorové pece [3].....	25
Obr. 9. Schéma poklopové pece [3].....	26
Obr. 10. Schéma teplostěnné vakuové pece [3].....	26
Obr. 11. Oběhová komorová pec NA 250/45 [10]	27
Obr. 12. Hořák Eclipse TFB s uzavřeným plamenem v sálavé trubce [14]	31
Obr. 13. Hořák Weishaupt monarch [®] WM 50 [13]	32
Obr. 14. Graf měrného elektrického odporu v závislosti na teplotě pro odporové slitiny a některé čisté kovy [7]	35
Obr. 15. Odporové dráty uchycené na stěně pece [5].....	36
Obr. 16. Umístění odporových spirál ve dně a stropě [5].....	36
Obr. 17. Regulátor HtIndustry [17]	38
Obr. 18. Komorová pec N2380/55 HAS [10].....	40
Obr. 19. Oběhová vozová pec W 5290/85AS [10].....	41
Obr. 20. Komorový sušící pec KTR 22500/S se zavěšením dveří pomocí pantů [10].....	41
Obr. 21. Komorová pec PKE 10 [9]	42
Obr. 22. Vozokomorová pec VKT 3000/850 s dveřmi zavěšenými v "C" rámu [9].....	43
Obr. 23. Vozokomorová pec SVK 14000/45 s dveřmi ovládanými elektricky [9]	43
Obr. 24. Vozokomorová pec VKNC 9500/850 s dveřmi ovládanými hydraulickými písty [9].	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Tepelná vodivost λ vybraných látek [8]	16
Tab. 2. Rozsah součinitele přestupu tepla vybraných médií [5].....	18
Tab. 3. Hodnoty emisivity vybraných materiálů [5].....	19
Tab. 4. Fyzikální a chemické vlastnosti plyných paliv [8]	33

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1. Plynový hořák Monarch WM 50 [13]
- Příloha 2 . Plynový hořák Eclipse TFB [14]
- Příloha 3 . LAC - Průmyslové pece a sušárny [9]
- Příloha 4 . Nabertherm - Termoprocenší technika [10]
- Příloha 5 . KNTL - Elektrické vlastnosti drátu [15]