1. ELEKTRICKÉ TEPLO ODPOROVÉ. PŘÍMÝ A NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV. ZÁKLADY VÝPOČTU ODPOROVÝCH ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ.

1.1. Přímý odporový ohřev.

V zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolytem obklopujícím vsázku. Teoretické základy přímého odporového ohřevu jsou jednoduché (Joulův zákon), ale výpočty a projektování těchto zařízení nejsou snadné. Zde se projevují obtíže související s nelineární závislostí fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě. Jde zejména o rezistivitu, měrnou tepelnou kapacitu a také o součinitel tepelné vodivosti. Tyto veličiny ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem

$$Q = Q_u + Q_z \qquad (1.1.)$$

kde Q - teplo vzniklé průchodem proudu,
Q_u - užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky,
Q_z - tepelné ztráty.

Uvedená tepelná bilance tvoří základ k určení potřebného výkonu

$$P \approx \frac{dQ}{dt}$$

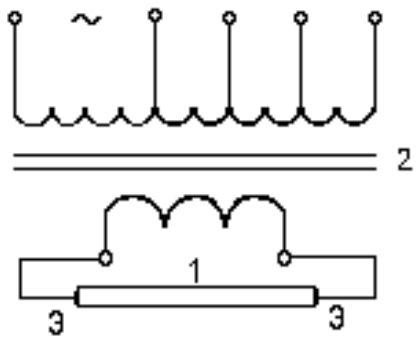
který závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky. Celkový odebíraný výkon P_c elektrotepelného zařízení se zvětšuje o tepelné ztráty způsobené vsázecím zařízením, o výkon potřebný pro pohon mechanismů a o ztráty příslušného transformátoru.

Podle vzniku tepla lze zařízení pro přímý odporový ohřev dělit na dva základní typy :

1. Zařízení pro ohřev pevné vsázky.
2. Zařízení pro ohřev tekuté vsázky.

1.1.1. Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.

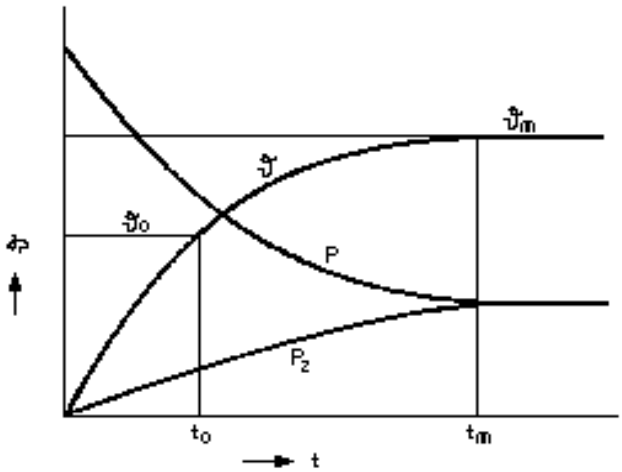
Princip ohřevu je schematicky znázorněn na obr.1.1. Délka ohřívané tyče musí být nejméně 10 krát delší než její průměr, aby byl ohřev dostatečně rovnoměrný po celé délce. Do tyče 1 konstantního průřezu je z regulačního transformátoru 2 zaváděn kontakty 3 velký proud. Ohřev je velmi rychlý a účinný.



Obr.1.1 Přímý odporový ohřev tyčí

Optimální poměry nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení. Tomu se blíží studená měděná tyč. Odpor oceli však stoupá až 7 krát při ohřátí z 20 °C na 1200 °C. Aby impedanční přizpůsobení bylo přijatelné, zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu přepínáním odboček na vstupním vinutí transformátoru. Konce tyčí musí být pokud možno čisté, kontakty bývají měděné, chlazené vodou a jsou k ohřívané tyči přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky.

Ohřev přímým průchodem proudu se výhodně aplikuje při výkonech do 100 kW a ve zvláště vhodných případech. U jednofázového zařízení nad 500 kW je nutno použít symetrizační zařízení.



Obr.1.2 Průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče

Průběhy příkonu.teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí jsou na obr.1.2. Příkon klesá podle růstu odporu tyče s teplotou, tepelné ztráty rostou. Rovná-li se příkon ztrátám, dosáhla teplota své mezní hodnoty. Teplota ohřevu musí být menší než mezní.

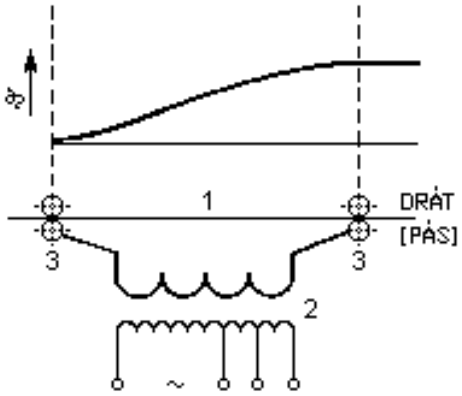
Při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí střídavým proudem se uplatňuje značně povrchový jev. Největší teplo (86,4 %) vzniká přibližně v tzv. hloubce vniku a. Lze ji určit podle vztahu

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot r}{w \cdot m_0 \cdot m_r}} \qquad (1.2.)$$

kde ρ - rezistivita tyče,
ω - úhlová rychlost,
μ_o - permeabilita vakua,
μ_r - relativní permeabilita.

Do teploty 768 °C (Curierův bod) – ztráta feromagnetismu je hloubka vniku a při frekvenci 50 Hz řádově v jednotkách mm.
Nad teplotu 768 °C je ρ asi 7 krát větší a hloubka vniku a je asi 70 mm.

Zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu je znázorněno schematicky na obr.1.3. Drát nebo pás 1 je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 připojen kladkami 3 (nebo grafitovými bloky).

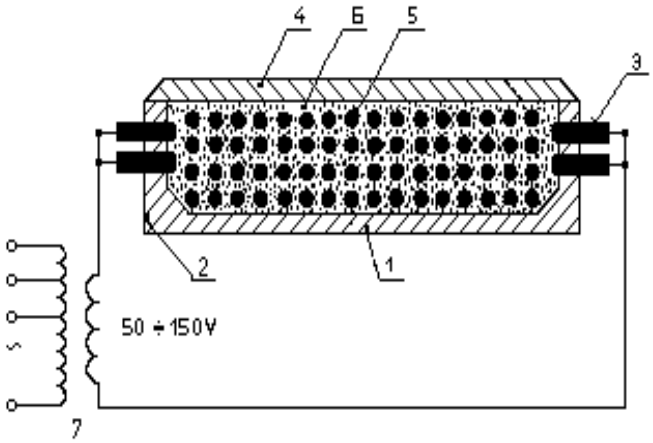


obr.1.3 Zařízení pro průběžný ohřev drátů (pásů)

Konečné teploty ohřevu lze docílit změnou napětí mezi kladkami, změnou jejich vzájemné vzdálenosti, změnou protahovací rychlosti drátu. Popsaný ohřev se používá např. pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm, pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu apod.

1.1.2. Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku.

Grafit a karbid křemíku (karborundum) se vyrábějí v Achesonových pecích obr.1.4. Grafit se vyrábí z uhlíku tzv.grafitací – chemickým procesem probíhajícím při teplotě kolem 2500 °C, při němž se amorfní uhlík strukturálně mění v grafit s vynikajícími fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi.



Obr. 1.4 Grafitační pec Achesonova
1 dno, 2 čelní stěny, 3 grafitové bloky, 4 víko, 5 vsázka, 6 zásypová směs, 7 transformátor

Pece mají délku až 20 m s hmotností vsázky 50 t i více. Příkon transformátorů až do 10 MVA. Napájecí napětí je regulováno v rozsahu 50 V až 150 V. Tyto pece mají malý cosφ (kolem 0,5) a zatěžují napájecí síť nerovnoměrně. Proto u pecí s velkými výkony se používá symetrizační zařízení. Při napájení stejnosměrným proudem odpadá kompenzace i symetrizace a regulace výkonu je snazší.

Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg grafitu se podle velikosti pece a druhu výrobků pohybuje od 4 kWh do 6 kWh, na 1kg karbidu křemíku asi 8 kWh. Ohřev trvá 2 až 4 dny, po vypnutí pec chladne 10 až 14 dnů, pak se vsázka z pece vyjme.

1.1.3. Termická elektrolýza.

Elektrolyt se zahřívá přímým průchodem stejnosměrného proudu za současně probíhající elektrolýzy nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolýzou je elektrolytická výroba hliníku, používá se také k výrobě sodíku a hořčíku.

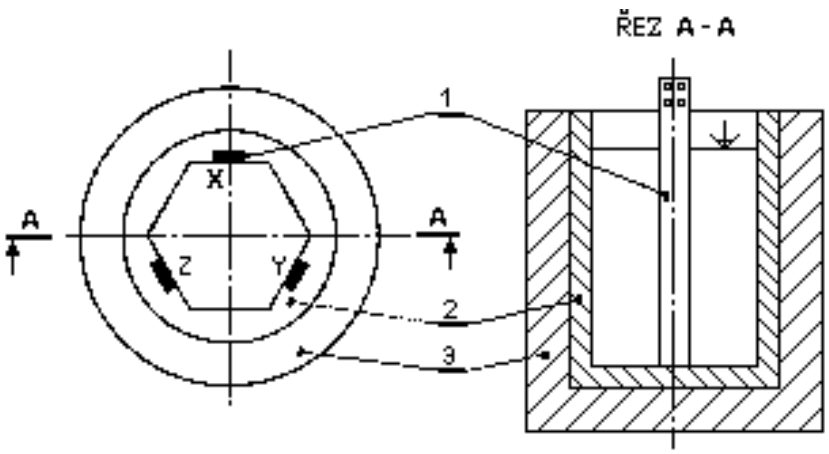
Hliník se vyrábí z bauxitu (Al_2O_3), který má tavící teplotu asi 2050 °C. Rozpuštěním bauxitu v roztaveném kryolitu (fluorid hlinito-sodný) lze však elektrolýzou již při 950 °C získávat hliník, což je technicky mnohem výhodnější.

Na výrobu 1 kg je spotřeba elektrické energie podle velikosti a technického stavu zařízení 16 kWh až 22 kWh.

1.1.4. Elektrodové solné lázně.

Solné lázně se používají zejména k ohřevu ocelových součástí ke kalení, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek. Používají se i pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1 400 °C. Dělí se na dva základní typy.

1. Proud prochází nejen elektrolytem, ale i vsázkou ponořenou v elektrolytu, příkon závisí na vsázce (obr.1.5.).
2. Vsázka se vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole a vsázkou proud neprochází, příkon na vsázce nezávisí.



Obr.1.5 Solná lázeň 1.typu
1 elektrody, 2 keramický kelímek, 3 tepelná izolace kelímku

Elektrody mají velké stykové plochy, aby se zabránilo nadměrnému místnímu přehřátí. Teplo vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou solí. Používané soli jsou v tuhém stavu nevodivé. Proto je nutno použít pomocnou elektrodu k vytáhnutí obloku, který roztaví tenkou vrstvu soli. Další ohřev nastává průchodem proudu touto vrstvou a pomocné elektrody se odpojí. Při ohřevu soli klesá její odpor, takže je potřebný k napájení transformátor s možností regulace sekundárního napětí v rozsahu 4 až 24 V.

Podle pracovní teploty solné lázně se volí směs soli, která nejlépe vyhovuje.

Tab.1. Chemické složení některých používaných solí a rozsah použití

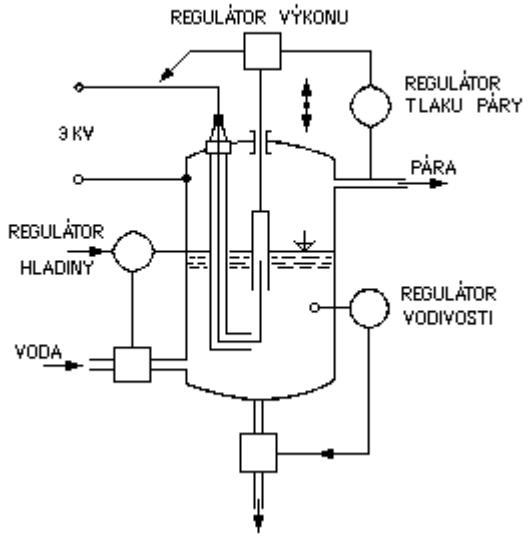
Složení směsi [%]	Pracovní teplota [°C]
55 KNO + 45 $NaNO_3$	230 – 480
28 NaCl + 72 CaCl	550 – 870
50 Na_2CO_3 + 50 KCl	600 – 820
65 Na_2CO_3 + 35 NaCl	650 – 880
20 KCl + 80 $BaCl_2$	850 – 1350

Hlavní výhodou solných lázní je rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev vsázky bez přístupu vzduchu. Rychlost ohřevu je dána velkou hodnotou součinitele přestupu tepla prouděním mezi elektrolytem a tuhou vsázkou.

1.1.5. Elektrodový ohřev vody.

Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vzniklého přímým průchodem proudu ohřívanou vodou. Proud se přivádí elektrodami grafitovými (pro malé příkony) nebo kovovými (pro příkony velké). Používá se střídavý proud pro zamezení vývinu výbušných plynů a koroze. Hustota proudu povrchem elektrody se volí do 1,5 $A.cm^{-2}$, většinou kolem 0,5 $A.cm^{-2}$. Elektrická vodivost vody závisí na jejím složení a zejména na její teplotě.

Používá se mnoho různých konstrukcí elektrodových kotlů. Konstruují se nejen pro napětí 231 V a 400 V, ale také pro napětí vysoká až do 30 kV. Průtokové kotle na ohřev vody se staví od výkonu několika kilowattů až do několika megawattů. Často se voda ohřívá nočním proudem jako akumulační médium pro vytápění i technologie v průmyslu papírenském, textilním, potravinářském apod. Například pro vaření se používají obvykle elektrodové kotle na výrobu páry (obr.1.6.), která se rozvádí do varných kotlů a vrací se zpět jako kondenzát. K průmyslové výrobě horké vody a páry se stavějí kotle s výkonem až 60 MW při provozním napětí 30 kV a přetlaku až 4 MPa.



Obr.1.6 Jednofázový elektrodový kotel

Výkon elektrodového zařízení při daném napětí lze regulovat těmito způsoby:

1. úpravou vodivosti vody,
2. plochou elektrod – zakrýváním izolačními návleky (porcelánové nebo křemenné trubky), zkracováním, prodlužováním,
3. přibližováním a oddalováním elektrod,
4. rozdělením elektrod na skupiny, které se různě spínají a přepojují,
5. mechanickým zanořováním a vynořováním elektrod z vody,
6. změnou výšky hladiny vody v kotli pomocí čerpadla při pevných elektrodách zavěšených shora,
7. změnou počtu trysek u tzv. tryskových elektrodových vysokonapěťových kotlů.

1.2. Nepřímý odporový ohřev.

V zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem vzniká teplo v topných článcích umístěných přímo v pecním prostoru. Do vsázky se pak teplo přenáší převážně sáláním topných článků a vyzdívky, prouděním atmosféry v pecním prostoru, popřípadě i vedením. Elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem, tzv. odporové pece, je možné dělit podle několika hledisek (např. podle ČSN 34 51 91).

Podle teploty na pece:

1. nízkoteplotní do 600 °C,
2. středoteplotní od 600 °C do 1100 °C,
3. vysokoteplotní nad 1100 °C.

Podle atmosféry v pecním prostoru na pece:

s normální atmosférou (vzduch),
s řízenou atmosférou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace),
pracující s vakuem – vakuové pece.

Podle použití v provozu na pece:

1. pro tepelné zpracování kovů,
2. pro tavení kovů,
3. pro tavení skla,
4. pro chlazení skla,
5. pro laboratoře, pro domácnosti,
6. s infračerveným ohřevem atd.

Podle toho, zda se vsázka při ohřevu nepohybuje nebo se pohybuje, na pece:

se stabilní – nepohybující se vsázkou, s provozem přerušovaným,

se vsázkou procházející pecí – pece průběžné, s pohyblivým dnem, s provozem nepřerušovaným.

Toto poslední kritérium je pro rozdělení pecí rozhodující, a proto se v dalším podle tohoto způsobu budeme řídit.

1.2.1. Odporové pece se stabilní vsázkou.

Nejběžnější pece, v nichž se vsázka během ohřevu nepohybuje, jsou pece: komorové, vozové, šachtové, poklopové (zvonové), elevátorové a kelímkové tavící.

Komorové pece

Patří k nejstarším typům elektrických odporových pecí. Jsou velmi univerzální, proto hojně používané. Topné články jsou umístěné obvykle na bocích, někdy v podlaze, v zadní stěně a ve dveřích, také na stropě.

Komorové pece se staví až do teplot 1100 °C s topnými články kovovými, do teplot 1400 °C s články z karbidu křemíku (SiC) nebo z jiných materiálů (tzv. cermetů).

Vozové (vozíkové) pece

Jsou to větší pece komorové, u nichž jsou stabilní boky se stropem a zadním čelem. Dno s předním čelem tvoří vůz, který vyjíždí z pece. Vsázka se naloží na vůz mimo pec a zajede se s ním do vytopené pece, kola vozu jsou přesně vedena.

Vozové pece jsou hospodárné jen pro vsázku velkých rozměrů s hmotností 100 t i více s výkonem 3 000 kW až 5 000 kW.

Šachtové (hlubinné) pece

Šachtové pece mají svislou osu a kruhový nebo čtvercový průřez. Pece jsou někdy 10 m až 20 m hluboké, nazývají se hlubinné a jsou obvykle zapuštěny pod podlahu. Pro dosažení větší rychlosti ohřevu a rovnoměrného rozložení teploty v peci se někdy do dna či víka instalují ventilátory pro oběh atmosféry v peci.

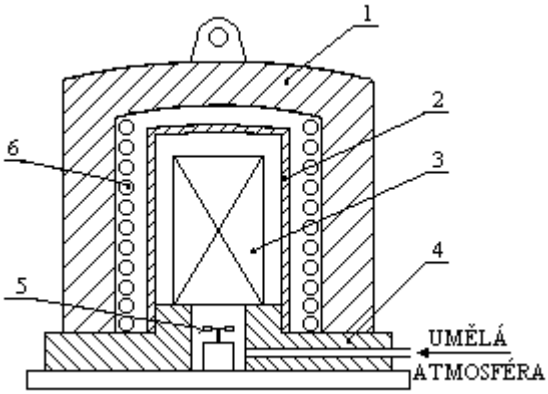
Šachtové pece nejsou tak univerzální jako pece komorové nebo vozové, ale snadno se utěsňují a izolují proti ztrátám tepla.

Poklopové (zvonové) pece

Poklopová pec (obr.1.7.) má dobře tepelně izolovaný topný poklop (zvon) kruhového nebo čtvercového průřezu a má na svém vnitřním povrchu topné vinutí. Poklop se nasazuje

jeřábem na pracovní plošinu, na kterou byla umístěná vsázka. Vsázka je krytá žáruvzdornou muflí (poklopem) proti přímému sálání topných článků, a tím i proti lokálním přehřátím. Pec má několik pracovních plošin a muflí.

Poklopové pece se staví do výkonů několika set kilowattů.



Obr.1.7 Poklopová pec
1 topný poklop, 2 mufle, 3 vsázka, 4 pracovní plošina, 5 ventilátor, 6 topení

Elevátorové pece

Elevátorové pece patří k největším odporovým pecím se stabilní vsázkou. Pece pracují s dobrou účinností, konstruují se pro teploty do 1000 °C až 1200 °C s výkony 500 kW až 2 000 kW. Elevátorové pece jsou vhodné pro vsázku velkých rozměrů a velké hmotnosti (desítky tun). Velkou jejich výhodou je, že mohou být vřazeny do průběžné výrobní linky, neboť vůz se vsázkou po ohřevu pokračuje dále ve směru příjezdu k peci.

Kelímkové pece tavící a tavící vany

Konstruují se pro tavení kovů nebo slitin s nižším bodem tání (Sn, Pb, Al, Zn atd.). Kolem kovového nebo keramického kelímku je topné vinutí. Vně topení je tepelná izolace a kostra pece. Obvykle jsou tyto pece sklopné, aby se dal roztavený kov vylít.

Tavící vany jsou různých konstrukcí, mají např. na vnější straně vany topné vinutí s tepelnou izolací, nejsou sklopné (pro pozinkování, pocínování, alitaci atd.). Po přetavování (egalizaci) hliníku mají topení ve stropě a při odlévání se naklápějí po otočných kladkách.

1.2.2. Odporové pece průběžné.

Používají se tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků. Průběžné pece, které jsou většinou dimenzovány na nižší teploty, se staví celá řada různých druhů. V těchto pecích lze podle technologického procesu provádět předepsaný ohřev, výdrž a ochlazování. Obecně mají pece více teplotních pásem, která jsou samostatně napájena a regulována. V případě pomalého ochlazování vsazených částí je k peci připojena ochlazovací komora, která podle požadované rychlosti ochlazování je vybavena buď tepelnou izolací nebo vodním chlazením.

Několik průběžných pecí může tvořit jeden zcela mechanizovaný a automatizovaný celek. Většinou se spojují kalící a popouštěcí pece s kalícími lázněmi, čistícími a sušícími zařízeními.

Pece jsou konstruované pro trvalý provoz. Podle druhu mechanismu k dopravě vsázky se nejčastěji používají pece: pásové a řetězové, válečkové, narážecí, střásací, krokové, protahovací, bubnové a karuselové.

Pásové pece

Vsázka se vkládá ručně nebo pomocí speciální automatiky na dopravní pás procházející pecí. Pás je pro lehké součásti zhotoven z kovového pletiva, pro těžké součásti z ražených desek, které jsou vzájemně propojeny pomocí čepů a spojek.

Topné články se umísťují většinou na stropě a dně, pod horní úrovní pásu. Pásové pece jsou určeny pro tepelné zpracování menších součástí do teploty 900 °C.

Válečkové pece

Staví se pro teploty do 900 °C. Válečková dráha prochází celou pecí a je složena ze žáruvzdorných válečků, s osou kolmou ke směru pohybu, s ložisky vně pece po obou stranách. Vsázka se klade přímo na válečky nebo na podložky tak, aby byla dobře unášena.

Při konstrukci se musí respektovat tepelná roztažnost válečků a vyzdívky pece.

Narážecí pece

Pracovní teplota této pece je do 1000 °C.

Střásací pece

Jsou určeny k ohřevu drobné kusové vsázky na teploty do 900 °C.

Krokové pece

Pece se staví pro ohřev velkých výkovků a odlitků na střední a vysoké teploty. Krokový mechanismus je mimo pracovní prostor pece. Při pohybu vpřed se vsázka pozdvihne a posune. Při pohybu vzad mechanismus klesne a připraví se na další krok vpřed, je poháněn hydraulicky nebo motorem.

Protahovací pece

Konstruují se pro ohřev drátů a pásů zejména z barevných kovů (i z oceli), které se pecí protahují. Dosahuje se rovnoměrného prohřátí. Pro velké výkony jsou pece se svislým pohybem drátů v několika smyčkách (výroba smaltovaných drátů).

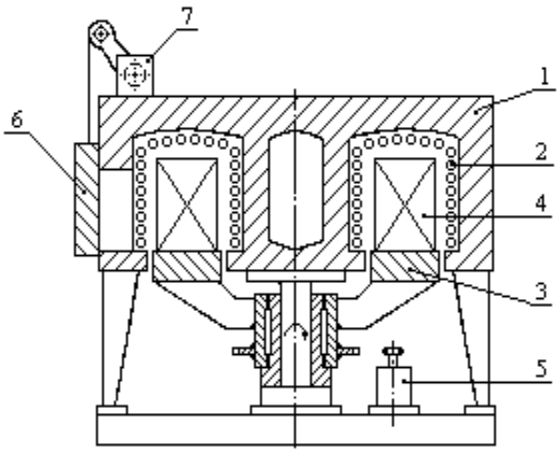
Bubnové pece

Buben se zhotovuje z drahého žáruvzdorného materiálu, je tepelně i mechanicky značně namáhán, má omezenou životnost. V peci se dosahuje přesné a rovnoměrné teploty.

Tyto pece se hodí k tepelnému zpracování (kalení, žíhání apod.) podložek, šroubů, menších ložiskových kroužků a kuliček, ale také ke štěpení slídy.

Karuselové (rotační) pece

Konstruují se pro nejvyšší teploty, protože mechanismy pece jsou zcela mimo prostor s pracovní teplotou. Řez pecí je na obr.1.8. Vlastní pecní těleso 1 je rotační, s topnými články 2. Podlaha pece 3 je otočná a klade se na ni vsázka 4.



Obr.1.8 Karuselová pec
1 pecní těleso, 2 topné články, 3 podlaha, 4 vsázka, 5 pohon, 6 dveře, 7 otev. a zav.dveří

Otáčení zajišťuje elektromotor 5. Vsázka se vkládá do pece otvorem s dveřmi 6 a po jedné otočce se z výstupního otvoru s dveřmi vedle vstupu vyjímá. Dveře se uzavírají zařízením 7. Doba ohřevu vsázky se mění v závislosti na změně rychlosti otáčení podlahy.

1.2.3. Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem.

Klasická odporová pec s nepřímým ohřevem je tvořena těmito základními částmi:

1. Žáruvzdorná vyzdívka.
2. Tepelná izolace.
3. Skříň pece.
4. Topné články.
5. Podávací mechanizmy a jejich pohony.

Kromě toho mohou být pece vybaveny zařízeními pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua. Všechny pece jsou vybaveny přístroji pro měření a regulaci teploty.

Žáruvzdorná vyzdívka ohraničuje uvnitř pece pracovní prostor. Musí při pracovní teplotě dostatečně odolávat žáru, musí být dostatečně pevná, chemicky stabilní. V odporových pecích užíváme nejčastěji šamotové díly, složené z 38 % až 44 % oxidu hlinitého Al_2O_3, zbytek je oxid křemičitý SiO_2.

Materiály pro tepelnou izolaci mají přirozenou (azbest) nebo umělou poréznost (magnezit, struska, oxid hlinitý, skleněná vata).

Skříň a konstrukce se obvykle zhotovují z ocelového plechu a ocelových profilů. Některé součásti se vyrábějí z litiny a ocelolitiny. Tyto součásti pracují při normální teplotě a nejsou na ně kladeny žádné speciální požadavky.

Na materiály pro topné články jsou kladeny vysoké nároky, měly by mít tyto vlastnosti:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku,
- velkou mechanickou pevnost zatepla,
- odolnost proti chemickým vlivům atmosfér v pecích a keramiky, s níž se stýkají
- velkou rezistivitu pro možnost použití větších průřezů a přiměřených délek vodičů a pro umožnění přímého připojení k síti,
- malý teplotní součinitel odporu, který zajistí malý rozdíl mezi odporem článku zastudena a zatepla,
- stálost rezistivity po celou dobu životnosti článku,
- malou tepelnou roztažnost,
- dobrou zpracovatelnost do různých tvarů.

Uvedené požadavky jsou velmi náročné. V praxi se daří splnit současně jen některé, popř. pro dosažení maximální životnosti se volí kompromisní řešení.
Materiály pro topné články se dělí do dvou základních skupin:

1. materiály kovové,
2. materiály nekovové.

1.2.3.1. Materiály pro topné články kovové.

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny.

Austenitické slitiny

Jsou nemagnetické , tzv. chromniklové. Pro topné články se používá slitina Ni + Cr, a slitina Ni + Cr + Fe. Tyto slitiny jsou nejjakostnější, mají dobrou žárovzdornost, odolávají častým zapnutím a vypnutím. Dobře se svařují a tvarují. Mají velkou rezistivitu a malý teplotní součinitel odporu, nestárnou, jsou stálé.

Feritické slitiny

Jde o magnetické slitiny Cr + Al + Fe bez niklu, vysoce žárovzdorné s větší rezistivitou než skupina předešlá. Patří sem slitiny s obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Rezistivity drátů z těchto slitin jsou kolem 1,4 μΩ.m při 20 °C a mění se s teplotou velmi málo. Tyto materiály jsou použitelné pro pracovní teploty až do 1 375 °C.

Čisté kovy

Jsou to drahé, těžkotavitelné kovy: platina, wolfram a molybden. Používají se pro topné články laboratorních nebo jiných speciálních pecí, kde se požaduje značně vysoká teplota.

Platina neoxiduje, ale intenzívně se nauhličuje, nemůže se použít v redukční atmosféře. Protože se její odpor mění značně s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký proudový náraz.

Wolfram je velmi křehký. Topné články jsou obvykle ve tvaru trubky, jejíž vnitřní prostor je přímo pracovním prostorem. Přívody proudu se chladí vodou. Wolframové topné články pracují ve vakuu nebo v ochranné atmosféře až do 2 600 °C.

Molybden se používá pro teploty 1 400 °C až 2 000 °C. Vyžaduje ochrannou atmosféru (např. páry lihu nebo vodík), ve vakuu se při teplotě 1 650 °C rozprašuje.

Ocel a speciální odporové slitiny

Ocelový drát lze použít až do 900 °C, avšak jen ve vodíkové atmosféře. V normální atmosféře jen do 400 °C. Je levný, používá se v sušících pecích.

Konstantan (56% Cu + 44% Ni) a Nikelin (65% Cu + 34% Ni + 1% Fe) jsou speciální slitiny, jejichž odpor se téměř s teplotou nemění. Používají se hlavně v měřící a regulační technice. Dají se však také použít pro topné články do malých spotřebičů a pro nízké teploty.

1.2.3.2. Materiály pro topné články nekovové.

Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše 1 375 °C, proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších.

Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silit, Globar, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně větší než u kovových materiálů (0,6 až 3,0 mΩ.m), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou 1,2 až 5 cm, délky od 8 do 200 cm.

Použitelnost topných SiC článků je až do teploty 1 500 °C. Teplotní součinitel odporu je asi do 800 °C záporný, nad 800 °C kladný. Doba životnosti topných článků je od 3 000 do 10 000 pracovních hodin.

Cermetové články

Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základním materiálem je směs molybdenitu křemičitanů ($MoSiO_2$) s oxidem křemičitým (SiO_2). Články jsou nejčastěji ve tvaru U (vlásenky). Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek.

Pracovní teploty článků jsou 1 600 °C až 1 700 °C. Žáruvzdornost způsobuje ochranná vrstva SiO_2 vznikající na povrchu článku za provozu. Cermetové články jsou křehké, nesnášejí otřesy. Jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Škodí jim síra a chlor. Rezistivita se mění značně s teplotou (při 20 °C je ρ = 0,25 μΩ.m, při 1 600 °C je ρ = 3,5 μΩ.m), proto se připojují přes regulační transformátory.

Uhlíkové a grafitové topné články

Základní suroviny a výroba grafitu byly popsány v čl. 1.1.2. Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj.

Pracovní teploty jsou až do 2 000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabraňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při teplotě 1 400 °C asi na 67 % z plné hodnoty při 0 °C. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1 400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty.

1.3. Základní použití odporových pecí v průmyslu a ve strojírenství.

Základní oblasti použití elektrických odporových pecí v průmyslu je tepelné zpracování. Jde o procesy, při nichž jsou kovové předměty v tuhém stavu podrobeny určitým změnám teploty k dosažení požadovaných vlastností materiálu. Jde zejména o zvýšení hranice pevnosti a namáhání při zachování tvaru tepelně zpracovávaného předmětu. Je-li tento děj ovlivněn chemickým účinkem prostředí, jde o zpracování chemicko-tepelné.

V odporových pecích se pro tepelné zpracování, zejména strojírenských součástí ocelových, ale i z barevných kovů a jejich slitin, používají tyto procesy ČSN 42 0004:

1) Žíhání snižuje tvrdost, zlepšuje obrobitelnost, snižuje vnitřní pnutí a způsobuje dosažení žádoucí mikrostruktury. Ocelové součásti se ohřejí na teplotu 700 °C (u mosazi až 800 °C, niklu 960 °C až 1 200 °C), 2 hodiny setrvávají na této teplotě a potom pomalu chladnou. Druhy žíhání jsou např. lesklé, normalizační, izotermické, rekrystalizační atd.

2) Kalení zvyšuje tvrdost ocelových součástí, které se ohřejí nad překrystalizační teplotu a potom se rychle ochladí ponořením do vody nebo oleje. Mezi druhy kalení patří např. termální, izotermické, přerušované, povrchové atd.

3) Popouštění následuje obvykle po kalení. Zakalené ocelové předměty jsou sice velmi tvrdé, ale zároveň i velmi křehké, proto se dále tepelně zpracují popouštěním. Ohřejí se na teploty od 150 °C do 600 °C, po prodlevě na popouštěcí teplotě pomalu chladnou.

4) Cementování způsobuje velkou tvrdost povrchové vrstvy ocelových součástí při zachování houževnatosti jádra. Cementování je nasycování povrchu ocelového předmětu uhlíkem v tuhém, kapalném a především plynném prostředí při teplotě asi 900 °C.

5) Nitridování zvyšuje odolnost povrchové vrstvy ocelových součástí proti otěru. Nitridování je nasycování povrchu ocelových součástí dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí při teplotách 470 °C až 580 °C.

6) Zušlechťování ocelových výrobků. Zušlechťováním se dosahuje velké pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Před posledním mechanickým opracováním se provede žíhání, následuje zakalení do oleje nebo vody a potom popouštění s prodlevou a následným řízeným ochlazováním.

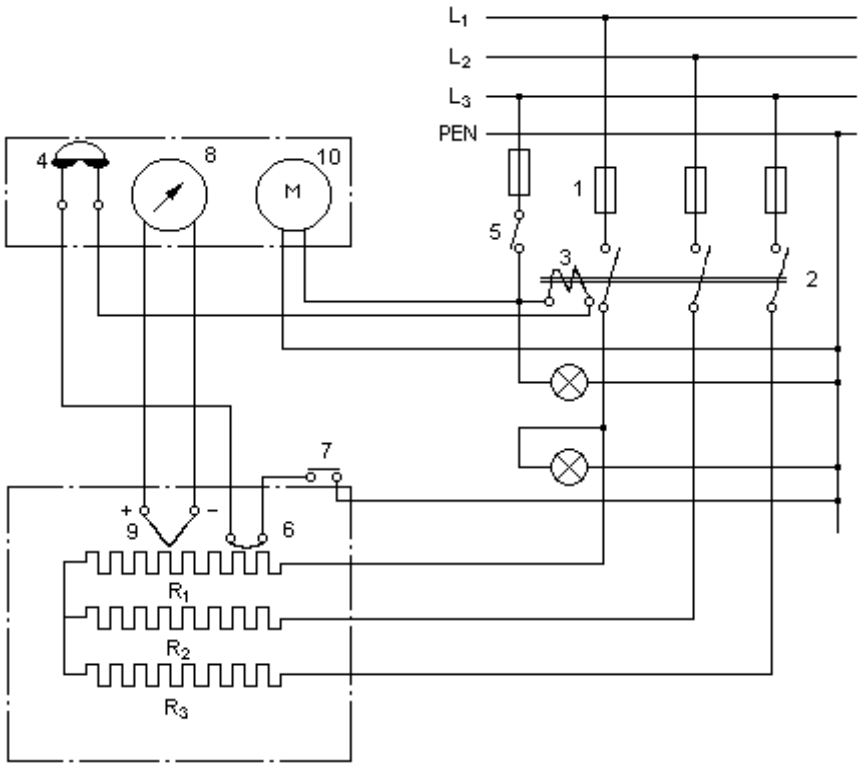
Elektrické odporové pece mají použití při tepelném zpracování výrobků ze skla.

Automatické linky tepelného zpracování polotovarů a výrobků se rozšiřují do nejrůznějších oblastí výroby včetně průmyslu textilního, potravinářského atd.

1.4. Zapojení a regulace elektrických odporových pecí.

1.4.1. Základní schéma zapojení odporové pece.

Nejběžnější způsob elektrického zapojení odporové pece je uveden na obr.1.9.



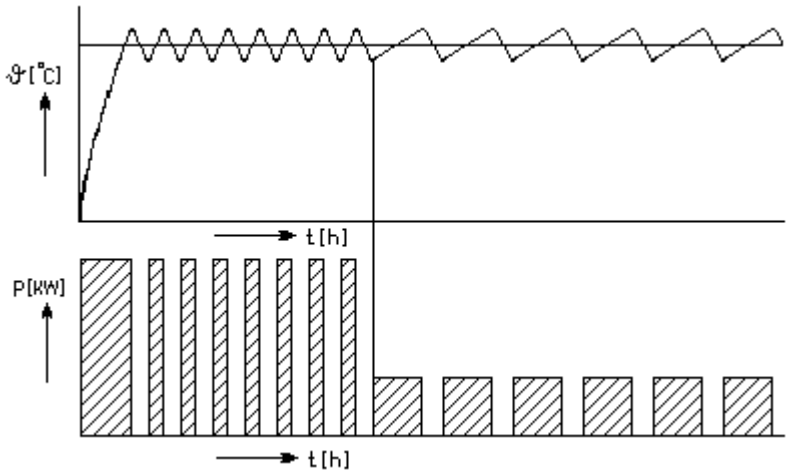
Obr.1.9 Zapojení odporové pece

Elektrická odporová pec, zapojená podle obr.1.9. je připojena k trojfázové síti s nulovým vodičem prostřednictvím stykače 2. Jištění je provedeno pojistkami 1. Topná vinutí pece představují odpory o stejné hodnotě R_1, R_2, R_3. Pec zapneme vypínačem 5. Sepnutím tohoto vypínače uzavřeme pomocný spínací obvod, složený z těchto prvků: cívka stykače 3, rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4, pojistkový topný drátek v peci 6, dveřní kontakt 7. Chod pece je signalizován rozsvícením červeného světla. Současně také startuje motorek automatického regulátoru teploty 10. Po nabuzení spínací cívky 3 sepne stykač 2 a připojí topné články k síti. Termočlánek 9 dodává napětí pro přístroj ukazující teplotu v peci. Při dosažení požadované teploty se překlopí rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4, v ovládacím obvodě je přerušen proud a stykač 2 odepne topné články od sítě. Ve schématu obr.1.9. je možná regulace teploty v peci pouze vypínáním a zapínáním celého příkonu.

1.4.2. Automatická regulace teploty v odporových pecích.

Úkolem regulace teploty elektrické pece je trvale a přesně udržovat požadovanou teplotu pracovního prostoru, nebo reagovat na změny podle předem stanoveného programu. V průmyslu se užívá regulace skoková nebo plynulá.

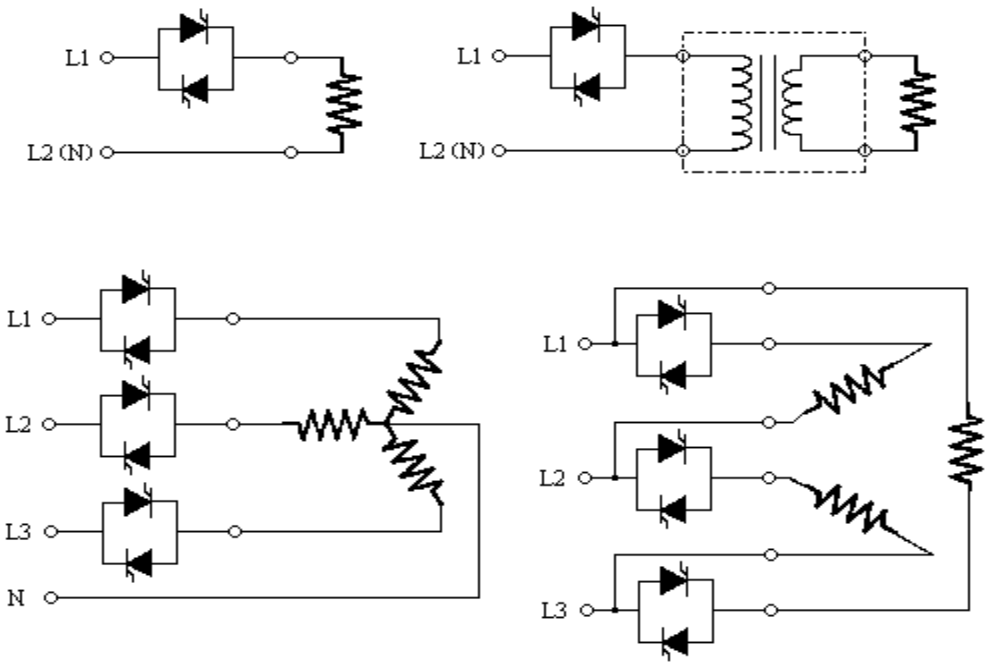
Skoková regulace se dosáhne nejjednodušeji vypínáním a zapínáním celého příkonu pece. Dále můžeme využít přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník, nebo přepínání skupin odporových článků. Průběh teploty a příkonu u odporové pece při jednopólové a dvoupólové skokové regulaci je zobrazen na obr.1.10.



Obr.1.10 Skoková regulace odporové pece

V první části obr.1.10. je znázorněna jednopólová regulace zapnuto, vypnuto. V druhé části obrázku je uvedena dvoupólová regulace teploty a příkonu při použití přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník.

Pro plynulou regulaci příkonu elektrické odporové pece používáme polovodičových prvků, zapojených v přívodu k peci (obr.1.11.). Zde se uplatňuje řízení pomocí akčního členu s řiditelným výstupním střídavým napětím a konstantním kmitočtem. Základním členem je antiparalelní zapojení tyristorů. Výstupní napětí tyristorových měničů je možné řídit zapalovacím úhlem tyristorů. K tomu je třeba přivádět na řídící elektrodu řídící signály vhodných vlastností ve vhodném okamžiku. Tuto funkci zajišťují obvody, které podle účelu rozdělujeme na obvody zapínací a obvody řídící. Zapínací obvody zajišťují pouze zapnutí tyristorů vždy na začátku kladné půlvlny napětí. Řídící obvody zajišťují navíc plynulé řízení okamžiku zapnutí tyristorem během kladné půlvlny napětí.

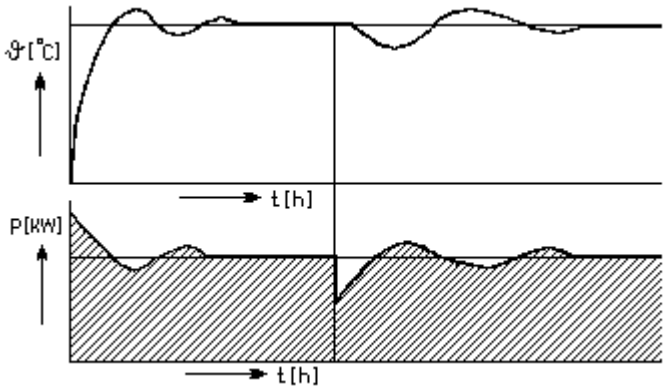


Obr.1.11 Jednofázové a třífázové zapojení odporové pece.

Souhrn požadavků na řízení je možno shrnout do těchto bodů:

1. Řídícím signálem nesmí být přetěžována řídící elektroda tyristoru, aby nedošlo ke ztrátě blokovací a závěrné schopnosti tyristoru.
2. Řídící signál musí mít potřebnou šířku. Jeho hodnotu ovlivňuje zejména druh zátěže. Kratší impulsy musí mít větší amplitudu.
3. Řídící signál musí mít potřebnou strmost nárůstu, protože malá strmost snižuje i strmost nárůstu proudu.

Využitím této plynulé regulace dochází u odporové pece k výraznému zrovnoměrnění teplotního průběhu, jak je zobrazeno na obr.1.12.



Obr.1.12 Plynulá regulace odporové pece.

U většiny odporových pecí se dosahuje maximální rovnoměrnosti ve vnitřním prostoru ± 5 °C. Některé procesy, které vyžadují vyšší přesnost a rovnoměrnost ohřevu se vybavují topnými pásy, které se regulují samostatně.

V podstatě pro dosažení vyšší rovnoměrnosti teploty se u pecí provádějí tato základní opatření:

- zlepšení tepelné izolace celé pece proti tepelným ztrátám, zejména utěsnění dveří apod.,
- účelnější rozmístění topných odporových článků v pecích,
- dokonalejší a citlivější regulace skupin topných článků,
- cirkulace vnitřní atmosféry u šachtových a tunelových pecí,
- umístění oběhových vložek nebo nastavitelných klapek pro usměrnění toku atmosféry odporové pece,
- u odporových pecí se středními teplotami se provádí tzv., kaloriferové topení (oběh atmosféry přes topné články).

2. VÝPOČTY ODPOROVÝCH ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ PRO NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV.

2.1. Základy návrhu a výpočtu odporových pecí.

Pro správné stanovení druhu pece pro požadovaný způsob tepelného zpracování vsázky jsou rozhodující zejména tato hlediska:

- technologické požadavky na tepelné zpracování vsázky,
- druh vsázky a její velikost,
- hmotnost vsázky ke zpracování za jednotku času,
- průběh teplotního režimu, maximální teplota (rychlost ohřevu, konečná teplota, doba výdrže na určité teplotě, rychlost ochlazování apod.),
- rovnoměrnost a přesnost dodržení teploty,
- přirozená či řízená atmosféra v peci,
- přetržitý nebo nepřetržitý provoz,
- prostor, který je k dispozici,
- cena pece.

Pro výrobu kusovou nebo malosériovou zvolíme pec nebo skupinu pecí se stabilní vsázkou, pro výrobu hromadnou jsou výhodnější pece průběžné nebo celé automatické průběžné pecní linky (viz čl.1.2.1. a 1.2.2.).

Návrh pece vyžaduje mnoho technických kompromisů, zkušeností i ekonomických úvah. Obvykle se pro daný účel podle zkušeností nebo orientačním výpočtem určí předběžné základní parametry pece (velikost, mechanizace, příkon, a další). Potom se pec přibližně navrhne konstrukčně včetně volby tepelných izolací, jejich tlouštěk atd. Tento první přibližný návrh se kontroluje již výpočty podrobnějšími. Provedou se v něm příslušné korekce, nakreslí se návrh další, zpřesněný. Tento druhý návrh se opět výpočtově, daleko podrobněji kontroluje. Kontrolují se zejména základní rozměry pece z hlediska dané výrobní technologie, pro kterou je pec určena, tepelná izolace a tepelné ztráty, příkon, účinnost, průběhy teplot, výrobnost a další.

2.1.1. Výpočet celkového příkonu pece.

Pro zpracovaný základní konstrukční návrh pece při známé teplotě nebo rozdělení teplot v peci vypočítáme ztrátový výkon P_z pece v ustáleném stavu.

Ztrátový výkon je určen ztrátami:
1. jednotlivými stěnami pece,
2. netěsnostmi (např. dveří a vozu u pecí s nepohyblivou vsázkou),
3. na vstupu a výstupu u průběžných pecí,
4. při otevírání a zavírání dveří,
5. vynášením tepla dopravními mechanismy u průběžných pecí (pásy, řetězy aj.),
6. pro ohřev muflí, palet, podložek apod.

Ztrátový výkon je možné rozdělit na ztrátový výkon naprázdno P_{z0} (nezávisí na chodu pece se vsázkou) a na ztráty P_{zv} související s chodem pece se vsázkou. Platí

$$P_z = P_{z0} + P_{zv} \qquad (2.1.)$$

P_{z0} souvisí s výše uvedenými body 1, 2, 3. P_{zv} s body 4, 5, 6. Výpočet P_{z0} a P_{zv} provádíme podle obecných zákonitostí šíření tepla v ustáleném stavu a podle měrné tepelné kapacity, teploty a hmotnosti u ztrát paletami, muflemi, podložkami apod.

Užitečný výkon

K ohřátí vsázky s hmotností m, měrnou kapacitou c, z teploty J_0 na teplotu J_k je zapotřebí energie

$$W_u = \int_{J_0}^{J_k} c \cdot m \cdot dJ \qquad (2.2.)$$

Zavedeme-li střední měrnou tepelnou kapacitu c_{av}, zjednoduší se vztah (2.2.) na tvar

$$W_u = c_{av} \cdot m \cdot (J_k - J_0) \qquad (2.3.)$$

Pokud je v zadání uvedena doba ohřevu $t_{ohř}$, vyšel by užitečný příkon

$$P_u = \frac{W_u}{t_{ohř}} \qquad (2.4.)$$

a teoretický potřebný příkon pece by byl dán vztahem

$P'_p = P_z + P_u$

Protože musíme počítat s určitou nepřesností výpočtu, s rezervou na pokles napětí v síti, se stárnutím topných článků, se vzrůstem ztrát pece apod., volíme určitý bezpečnostní činitel k_b = 1,2 až 1,7. Pak příkon pece

$$P_p = k_b.(P_z + P_u) \qquad (2.5.)$$

V praxi však většinou ohřívací dobu vsázky neznáme a musíme ji vypočítat. Pro výpočet známe dobře vsázku, pec a její pracovní teplotu.

2.1.2. Výpočet doby ohřevu vsázky.

Teplo se přenáší do vsázky hlavně sáláním a prouděním. Přenos pomocí vedení tepla obvykle zanedbáváne, což představuje určitou rezervu.

Pro přenos tepla prouděním platí podle Newtonova zákona vztah

$$P_u = \alpha.A.(J - J') \qquad (2.6.)$$

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k \qquad (2.7.)$$

kde P_u je užitečný výkon přenášený do vsázky povrchem A,
α výsledný součinitel přestupu tepla z pece do vsázky,
α_s součinitel přestupu tepla sáláním,
α_k součinitel přestupu tepla prouděním (konvekcí),
J teplota pece,
J' teplota vsázky.

Pro náhradní součinitel přestupu tepla sáláním v určitém menším rozsahu teplot J (Θ) a J ´(Θ´) byl v literatuře [1], kapitole A.3, rovnice (21) odvozen vztah

$$a_s = \frac{s_č \cdot e \cdot \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta'}{J'} \right)^4 \right]}{J - J'} \qquad (2.8.)$$

kde ε je stupeň černosti povrchu vsázky,

$\sigma_č$ součinitel sálání absolutně černého tělesa [5,674 $W.m^{-2}.(K/100)^{-4}$].

Pec má vnitřní povrch mnohonásobně větší, než je povrch vsázky, stupeň černosti vnitřního povrchu pece ε = 0,8 až 0,9.

Střední hodnota součinitele α_k je u pecí bez nuceného oběhu atmosféry přibližně 15 $W.m^{-2}.K^{-1}$. Pak je

$$\alpha = \alpha_s + 15 \qquad (2.9.)$$

Povrchem A přijímá vsázka teplo. Tento povrch tvoří podle umístění v peci a podle vzájemného „stínění“ kusů vsázky jen část celkového povrchu A_v vsázky

$$A = k_v.A_v \qquad (2.10.)$$

kde k_v je redukční činitel; $k_v < 1$; určuje se obvykle podle praktických zkušeností.

Při výpočtu dále předpokládáme, že vsázka je tzv. tepelně tenká. U takové vsázky teplota vnitřku vsázky sleduje teplotu jejího povrchu téměř bez časového zpoždění. V každém časovém okamžiku lze vsázku posuzovat jako rovnoměrně prohřátou. Pro tepelně tenkou vsázku platí Bi < 0,25.

$$Bi = \frac{a \cdot s}{2 \cdot l} \qquad (2.11.)$$

kde Bi je Biotovo podobnostní kritérium,

s reprezentativní tloušťka stěny vsázky, určující její „masívnost”.

Pro Bi > 0,5 je vsázka již tzv. tepelně masívní. Vnitřek vsázky je v daném okamžiku ohřevu chladnější než její povrch.

U průběžných pecí při ohřevu drobnějších součástí pro hromadnou výrobu (např. výkovky a odlitky pro osobní automobily), bývá podmínka Bi < 0,25 většinou splněna. V pecích se stabilní vsázkou se ohřívá obvykle tepelně masívní vsázka (Bi > 0,5). Doba ohřevu se počítá jako ohřev tlusté desky, válce atd.