ELEKTRICKÉ TEPLO INDUKČNÍ

1. PRINCIP VZNIKU TEPLA V INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍCH

1.1 Úvod

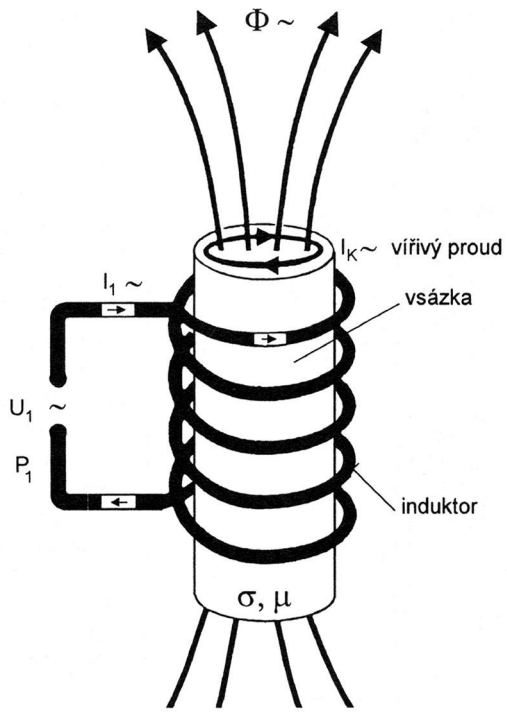
Indukční ohřev je možný jen u materiálů elektricky vodivých. V předmětu z vodivého materiálu, který je vložen do střídavého magnetického pole se indukují vířivé proudy, které předmět zahřívají. Často se zjednodušeně přirovnává indukční ohřev k transformátoru, kde výstupní vinutí představuje vsázka a je spojeno nakrátko. Doprava tepla do vsázky se tedy neděje tepelným spádem jako například u zařízení odporových (s nepřímým ohřevem). Teplo se dopravuje střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce. Vsázka je nejteplejším objektem celé soustavy, přičemž vše ostatní může být chladné. Vznik tepla přímo ve vsázce, která není mechanicky s ničím vázána, patří k největším výhodám indukčního ohřevu.

Indukční ohřev umožňuje nezvykle vysoké měrné příkony do vsázky. Volbou frekvence proudu, který napájí ohřívací vinutí (induktor) a v jehož magnetickém poli je vsázka, můžeme vhodně ovlivnit i rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce.

1.2 Princip vzniku tepla

Každé indukční zařízení sestává vždy z cívky, kterou prochází střídavý proud, ze zdroje a ze vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou.
Je to v podstatě vzduchový transformátor, kde cívka je stranou primární a vsázka stranou sekundární, spojenou nakrátko. Průchodem proudu rovinným zářičem vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné.

Průchodem proudu válcovým zářičem vzniká v okolí tohoto zářiče elektromagnetické vlnění válcové. Válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění (obr. 1.1.)



Obr. 1.1 Princip vzniku indukčního tepla

Umístíme-li souose v cívce válcovou elektricky vodivou vsázku, pak dopadající elektromagnetické vlnění vstupuje do vsázky povrchem a vyvolává indukované proudy, jejichž účinkem se vsázka zahřívá. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Hloubka vniku záření závisí na kmitočtu :

$$d = \sqrt{\frac{2}{w \cdot m \cdot s}} = \sqrt{\frac{2}{2p \cdot f \cdot m \cdot s}} \quad \text{(m)} \qquad (1.1)$$

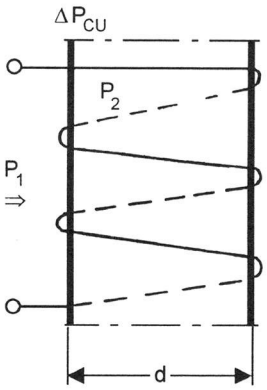
Ve vztahu (1.1) je:

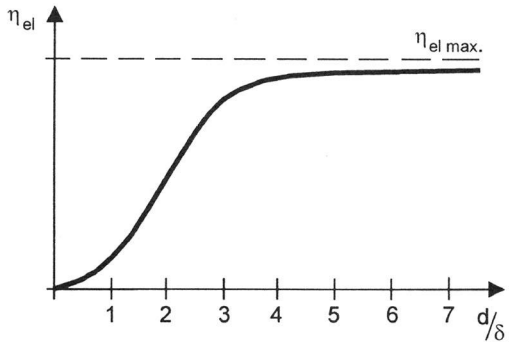
f ..... frekvence (Hz)

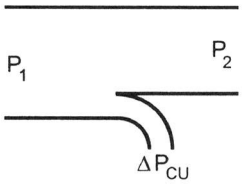
m ..... permeabilita (VS/Am)

s ..... konduktivita (A/Vm)

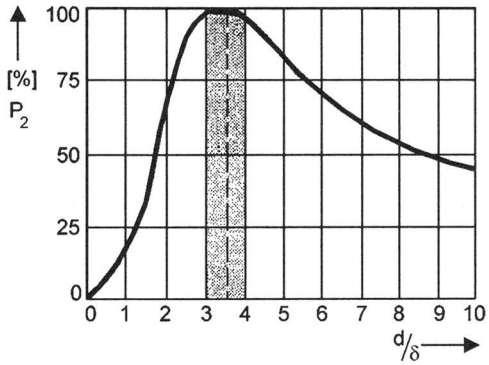
Elektrická účinnost indukčního ohřevu je závislá na poměru d/d, tedy velikosti průměru, tloušťky vsázky ku hloubce vniku podle obr. 1.2. Také materiál ohřívaného předmětu a jeho teplota ovlivňuje výslednou účinnost indukčního ohřevu.







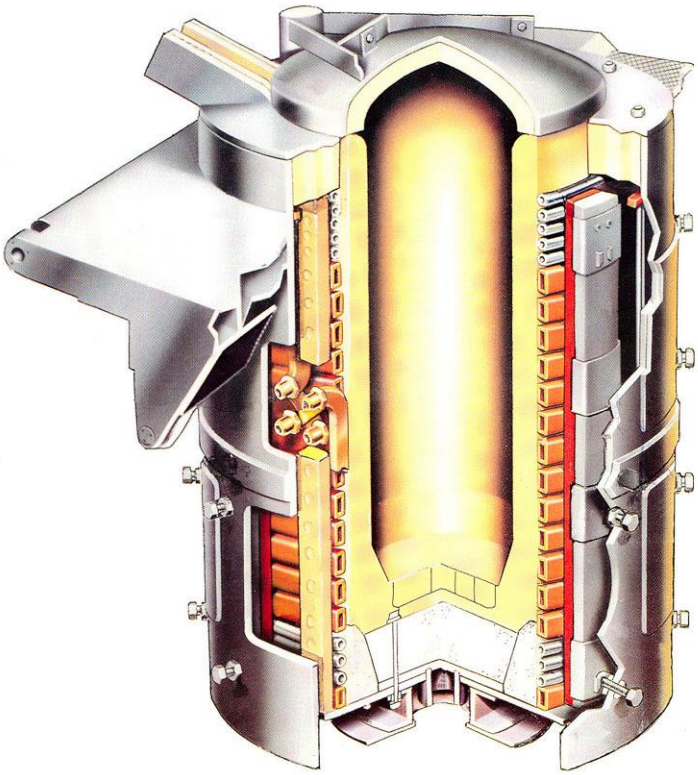
	Teplota [°C]	$\eta_{el\ max.}$ [%]
Cu	20 1 100	50 77
Al	20 660	56 77
Ocel	20 800	93 88



Obr. 1.2 Závislost elektrické účinnosti na poměru d/δ

2. INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE

2.1 Indukční pece s nevodivým kelímkem



Obr. 2.1

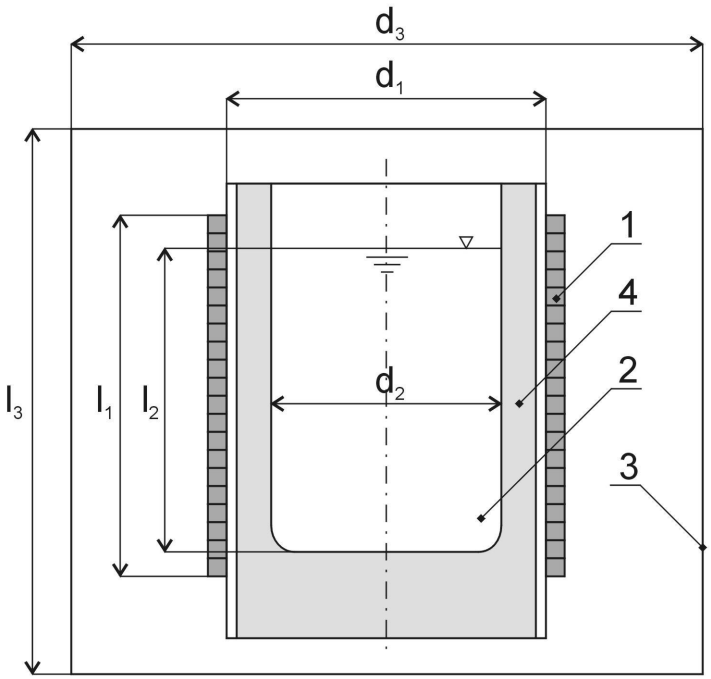
V cívce je umístěn kelímek, který se pěchuje z keramické hmoty. Pec má buď stínící plášť z mědi, nebo ocelový plášť, který na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů.

2.1.1 Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

Schematicky je pec tohoto typu vyznačena na obr. 2.2. Keramický kelímek 4 válcového tvaru elektricky nevodivý, obsahující vsázku 2, je ovinut cívkou 1.Cívku vineme zpravidla z měděné trubky obdélníkového průřezu. Cívkou prochází proud zvýšeného kmitočtu (500 až 1000 Hz), příp. proud síťového kmitočtu 50 Hz. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do své dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky, je jí pohlcováno, energie elektromagnetická se mění v tepelnou. Dutinou cívky prochází magneticky tok, který se uzavírá vně cívky. Je třeba učinit vhodné opatření, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší, aby nedocházelo k zahřívání nosných konstrukcí pece.

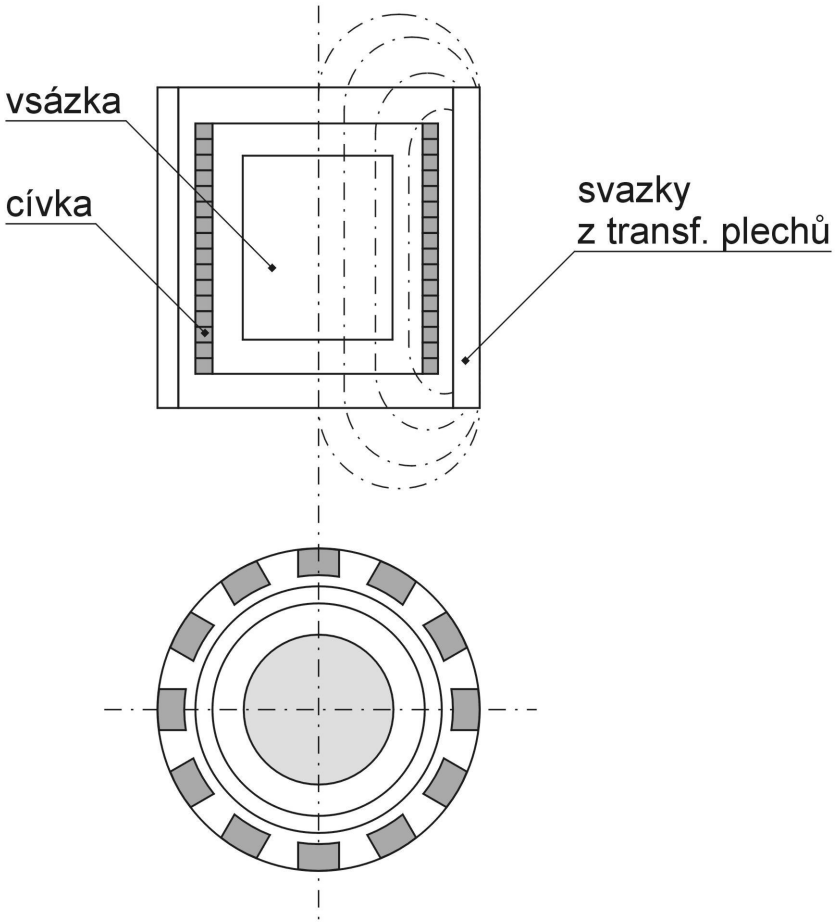
Toho dosáhneme buď tak, že pec opatříme stínícím pláštěm z dobře vodivého materiálu vhodného průměru, nebo umístíme vně cívky jádro ze železných plechů, kterým se magnetický tok uzavírá. Indukční kelímkové pece mají vždy stínění, a to buď jako vodivý stínící plášť, nebo jako jádro z transformátorových plechů vně cívky.

Počítáme-li však menší pece, můžeme zanedbat vliv stínění a pec počítáme, jakoby stínění neměla. Při výpočtu uvažujeme pouze cívku a vsázku, tedy pouze dva na sebe působící elektrické obvody. Výpočet se tím zjednoduší a zkrátí.



Obr. 2.2 Kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

2.1.2 Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky



Obr. 2.3 Kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

Je-li indukční kelímková pec opatřena vodivým stínícím pláštěm, sníží se velmi výrazně intenzita magnetického pole vně pláště. Podobného účinku dosáhneme také tak, že vně cívky, místo stínícího vodivého pláště dáme železné jádro z většího počtu svazků z transformátorových plechů, podle obr. 2.3.

Převážná část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, tj. svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště z kotlového plechu. Zařazením magneticky vodivých svazků se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tok poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost pecní cívky, tj. magnetický tok pro jednotkový proud. Rovněž vzroste vlastní indukčnost a vzájemná indukčnost M_{12}. Pec se stínícím pláštěm vyžaduje cívku s poněkud vyšším počtem závitů a větší kondenzátorovou baterií než je pec s jádrem.

Užitečný výkon je nižší a ztráty v cívce jsou vyšší u pece s pláštěm než u pece s jádrem. Hodnoty pro pec bez stínění jsou zpravidla mezi hodnotami I a III a jsou bližší hodnotám III. Elektrická účinnost je u pece s pláštěm výrazně nižší než u pece s jádrem. Nejdůležitějším výsledkem provedeného porovnáni je zjištění, že účinnost pece se železným jádrem je téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým provozem. Provedení indukční kelímkové pece se železným jádrem je

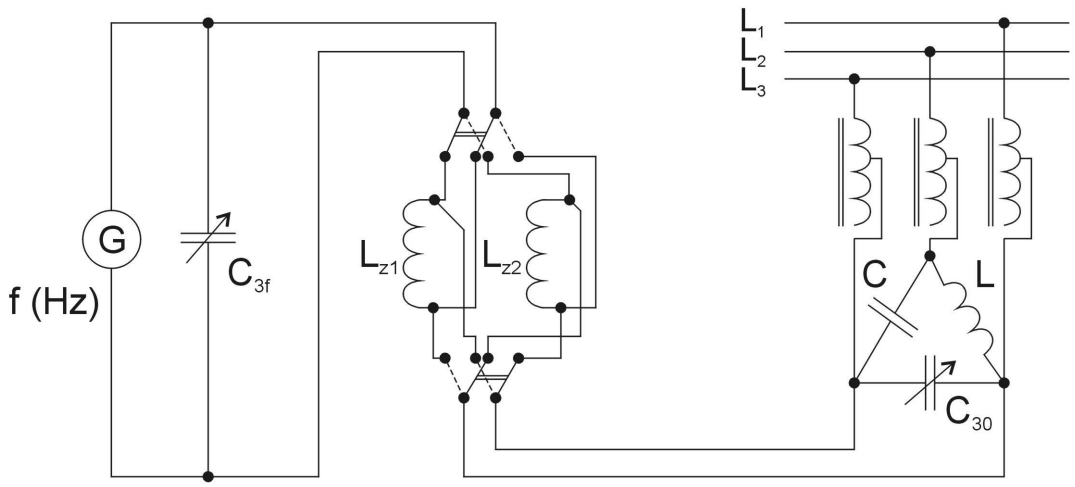
proto technicky dokonalejším řešením. Výrobně však tato pec je dražší a dojde-li při provozu k protavení kelímku, je poškozeni této pece zpravidla horší, případně dojde k úplnému zničeni pece.

2.1.3 Indukční kelímková pec pro síťový kmitočet

V posledním desetiletí se i u nás poměrně hodně rozšířilo používání indukčních kelímkových pecí, které se přes autotransformátor připojují na trojfázovou síť 3 x 380 V, 50 Hz. Vzhledem k tomu, že v jejich elektricky nevodivém kelímku nastává intenzívní víření roztavené vsázky, mohou se používat pro výrobu legovaných ocelí. V takovém případě lze je plnit již roztavenou vsázkou z pece obloukové nebo martinské („duplex proces“).

Důvodem, proč se tyto pece zavádějí, je nižší investiční náklad, jehož cena je asi 40 % z pořizovacích nákladů pro celé pecní zařízeni středofrekvenční. Tento rozdíl v pořizovacích nákladech se částečně zmenší tím, že pec pro 50 Hz má větší, a tedy dražší kondenzátorovou baterii. Obsluha pece přímo připojené k síti je jednodušší. Důležitou roli hraje i elektrická účinnost celého zařízení. Např. elektrická účinnost samotné kelímkové pece na 1000 kg oceli při 50 Hz je asi 74,5 %, při 1000 Hz je 81,5 %. Při zvýšeném kmitočtu však musíme uvažovat elektrickou účinnost měniče kmitočtu, která bývá u větších zařízení asi 85 %. Je proto výsledná účinnost indukční pece při 1000 Hz rovna:
0,815 . 0,85 = 0,692, tedy asi o 5 % nižší.

V posledních letech se používají také indukční kelímkové pece připojené na síťový kmitočet, jde-li o udržení roztaveného kovu na požadované teplotě (pece udržovací). Pecní zařízení má v takovém případě obvykle tři stejné vlastní pece, kelímky s cívkou, jeden společný napájecí generátor a jednu kondenzátorovou baterii pro 50 Hz. V provozu jsou vždy dvě pece, třetí je jako rezerva. Elektrické schéma tohoto soupecí je uvedeno ne obr. 2.4.



Obr. 2.4 Schéma kelímkové pece pro síťový kmitočet

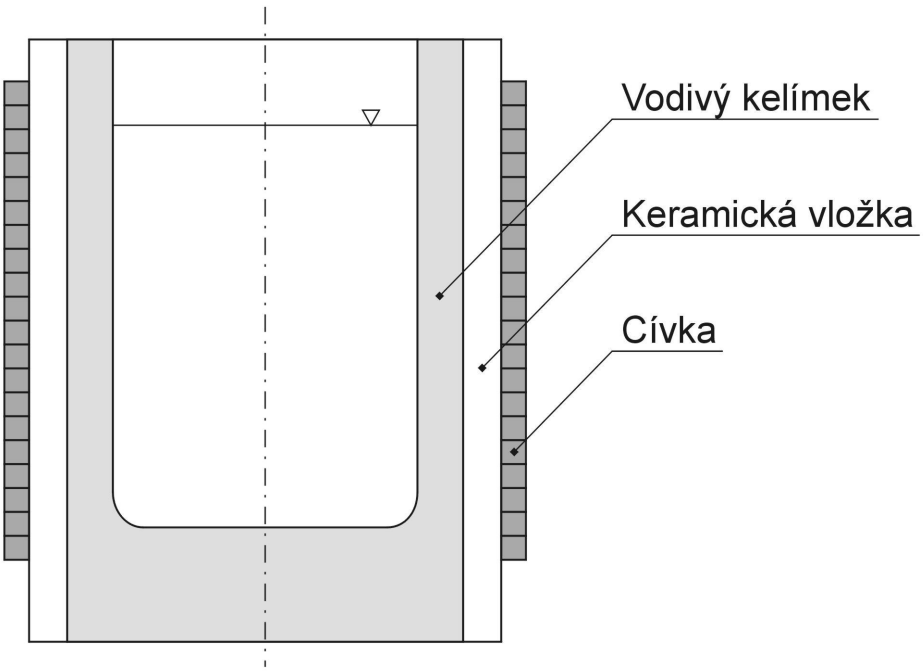
Provedení kelímkových pecí na síťový kmitočet je téměř stejné, jako u pecí na zvýšené kmitočty. Přiváděný výkon bývá obvykle menší než u středofrekvenční pece stejného obsahu kelímku, takže případné tavení trvá déle. Proto se tyto pece (tavící i udržovací) opatřují keramickým víkem, které zmenšuje ztráty sáláním z povrchu vsázky. Víření roztavené vsázky je tím intenzivnější, čím je kmitočet nižší.

Protože příliš vysoké vzdutí by mělo za následek obnažení povrchu lázně a její oxidaci, je nutné snížit víření zmenšením příkonu. V některých případech se také snižuje cívka, její horní okraj nepřesahuje hladinu lázně, jako je obvyklé u pecí středofrekvenčních. U pecí na síťový kmitočet necháme přesahovat hladinu lázně nad okrajem cívky. Tím se vytvoří na hladině lázně tlumící polštář, který zabrání obnažování jejího povrchu.

Výpočet kelímkové pece na tavení oceli nebo litiny pro síťový kmitočet je stejný jako u pece středofrekvenční. Poněkud odlišný je výpočet pece udržovací. Cívka (počet závitů) se vypočítá podle napětí, výkonu a kmitočtu středofrekvenčního zdroje.

Po roztavení vsázky tuto pecní cívku přepneme na síť s kmitočtem 50 Hz. Pec musí být i v tomto případě vyladěna připojením vhodné kondenzátorové baterie pro 50 Hz. Pro tento kmitočet určíme výpočtem výslednou indukčnost L_I, výsledný odpor R_I a potřebnou kapacitu C. Z tohoto dostaneme zatěžovací odpor R_Z, který vůči zdroji 50 Hz nahrazuje vyladěnou pec.

2.2 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem



Obr. 2.5 Indukční pec s vodivým kelímkem

Indukční pec s nevodivým kelímkem má nízkou elektrickou účinnost při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny apod. Elektrická účinnost podstatně stoupne jestliže pec opatříme vodivým kelímkem

schematicky podle obr. 2.5 (pro tavení Al a Cu). Jedná-li se o nižší teploty, jaké přicházejí v úvahu při tavení hliníku a jeho slitin, zhotovuje se kelímek z ocelolitiny.

Pro vyšší teploty se používají tzv. grafitové kelímky. Zhotovují se ze směsi šamotu a grafitu. Čím více grafitu, tím je kelímek vodivější. Velká vodivost však není žádoucí. Mezi kelímkem a cívkou je keramická izolační vrstva, která zmenšuje ztrátový tepelný tok ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky.

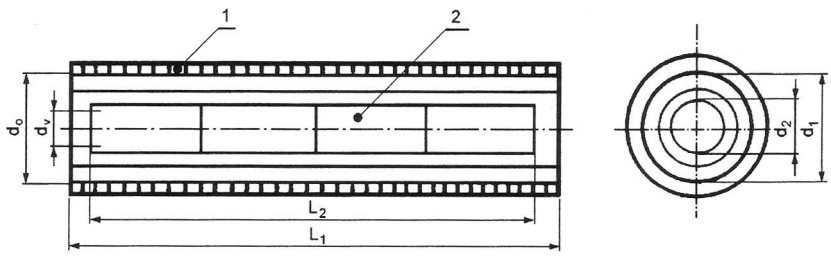
Zavedeme-li do cívky proud, dopadá elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, indukuje proud ve stěně a jeho průchodem se kelímek zahřívá. Ten potom předává teplo vsázce, vložené do jeho dutiny. Poměry jsou obvykle takové, že ve stěně kelímku se přemění v teplo větší část dopadající elektromagnetické energie, menší část však projde stěnou a zahřívá přímo vsázku. Rozhodující je vzájemný poměr mezi tloušťkou stěny $š_3$ a hloubkou vniku d_3. Je-li hloubka vniku malá proti tloušťce stěny, pohltí se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku.

Výpočet je stejný jako pro dva souosé válce u pece s nevodivým kelímkem. Při vypočtu považujeme kelímek za vsázku. Není-li však $d_3 << š_3$, projde značné část elektromagnetické energie stěnou kelímku do vsázky.

2.3 Indukční prohřívací zařízení

V závodech, kde se zhotovují součásti kováním nebo lisováním za horka, je důležitým problémem rovnoměrné prohřátí materiálu. Kovové vývalky válcového nebo čtyřhranného tvaru – nejčastěji ocelové – je třeba ohřát na kovací teplotu (ocel 1150° až 1250°). Ve starších kovárnách se k prohřívání vývalků používá pecí palivových, vytápěných plynem, práškovým uhlím nebo naftou. Rovnoměrné prohřátí v celém průřezu však trvá příliš dlouho a během této doby dochází na povrchu k oxidaci materiálu. Několik procent materiálu se zničí a mimoto vzniklé okuje poškozují při další operaci zápustky a zkracují jejich životnost. Naproti tomu prohřívání v indukční peci trvá velmi krátkou dobu, takže prakticky nenastává oxidace na povrchu. Ekonomické výhody jsou příčinou rychlého zaváděni indukčního prohříváni do nově budovaných kováren.

U nás byly na začátku šedesátých let dány do provozu některé moderní kovárny s indukčním prohříváním, zejména v automobilkách v Mladé Boleslavi a v Kopřivnici. Indukční pec (indukční ohřívačka) na vývalky má obvykle válcový tvar, schematicky podle obr. 2.6.



Obr. 2.6 Indukční ohřívačka

Hlavní části indukční ohřívačky (obr. 2.6) je indukční cívka 1 o délce obvykle asi 1 m. Její průměr se volí podle průměru vývalků, které mají být indukčně prohřívány. V induktoru je obvykle větší počet (4 až 7) vývalků téže délky.

2.3.1 Volba kmitočtu a doby prohřívání

Rovnoměrné prohřátí nastane tak, že se teplo z povrchové vrstvy, kde vzniká, šíří vedením do nitra vývalku. Z tohoto hlediska je výhodnější, aby vrstva, ve které se teplo vyvíjí, nebyla příliš slabá, což jinými slovy znamená, že kmitočet nesmí být příliš vysoký. Je proto třeba zvolit vhodný kmitočet, a tím i vrstvu, ve které se teplo vyvíjí tak, aby nastalo absorbování energie s dobrou účinností, avšak aby nedocházelo k přehřívání povrchu. Za optimální lze označit takový kmitočet, při kterém je přibližně r_2 = (2,5 až 3,0) . d_2.

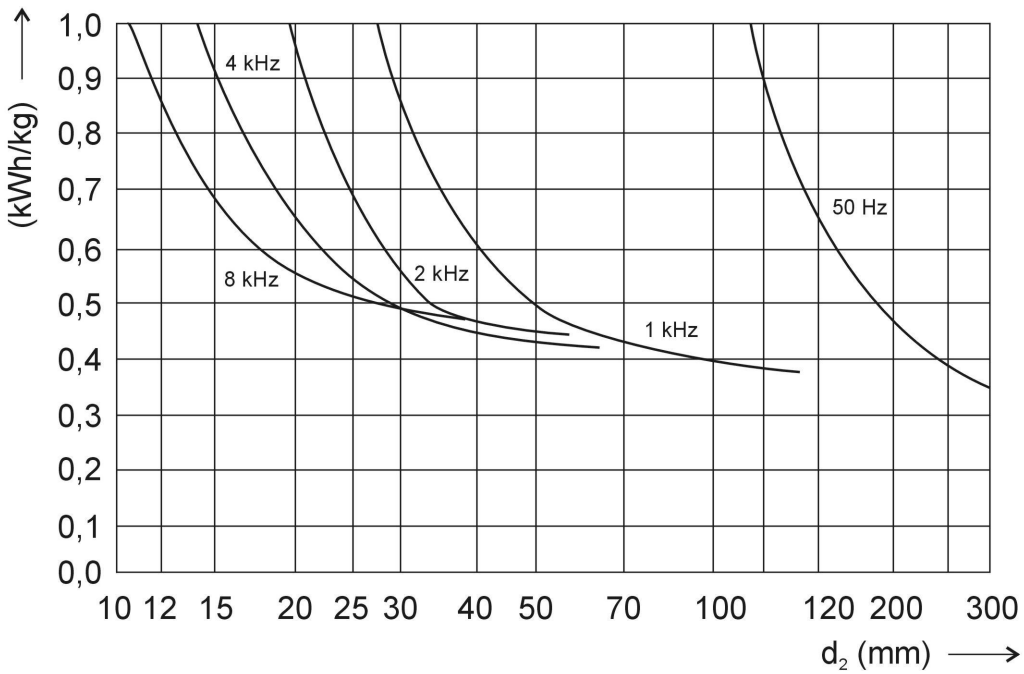
Bereme hloubku vniku pro materiál již prohřátý, tj. magnetický, jde-li o ocel. V praxi se volí kmitočet pro indukční prohřívání oceli v závislosti na průměru vývalků podle tabulky.

f (Hz)	50	500	1000	2000	4000	8000
d (mm)	160+500	80+280	50+180	35+120	22+70	15+50

Tab. 2.1 Volba kmitočtu v závislosti na průměru vývalku

Z tabulky (2.1) vidíme, že každý kmitočet lze použít pro průměry ve značném rozsahu různé.

Na obr. 2.7 vidíme závislost měrné spotřeby na průměru vývalku.



Obr. 2.7 Závislost měrné spotřeby na průměru vývalku

Z diagramu (obr. 2.7) je zřejmé, že měrná spotřeba v kWh na prohřátí 1 kg oceli na 1200 °C stoupá, jestliže se blížíme k dolní hranici rozsahu průměrů. Materiál se stává průzračným. Pro průměr d_2 = 10,0 cm oceli je měrná spotřeba energie ze sítě asi 0,40 kWh/kg při kmitočtu 1000 Hz. Doba *t*, potřebná k rovnoměrnému prohřátí oceli se obvykle nepočítá a bere se z příslušného diagramu.

Rovnoměrnost prohřátí vývalku je postačující, jestliže ke konci prohřívaného procesu není rozdíl teploty na povrchu a v ose větší než 100 °C. Nerovnoměrnost se ještě zmenší během dalších zpravidla několika desítek vteřin, které uplynou mezi koncem prohřívání a kovací operací v lisu.

Doba prohřátí se dá zkrátit asi o třetinu v případě tzv. rychloohřevu. Při rychloohřevu je část cívky na začátku induktoru, kterým vstupují studené vývalky, provedena se zhuštěnými závity.

2.4 Indukční zařízení pro povrchový ohřev

Pro povrchové prohřívání předmětů řádově do hloubky 10-; m používáme vysoké frekvence, řádově 10^4 až 10^6 Hz. V průmyslu se používají indukční prohřívací zařízení, induktory, k těmto technologickým účelům:

- Kalení
- Pájení
- Svařování
- Rafinační přetavování

Hloubka prohřáté vrstvy závisí na frekvenci podle následující tabulky:

Frekvence (kHz)	Hloubka vniku d (mm) (ocel - 1000 °C)	Hloubka ohřáté vrstvy g = (2 až 3) d (mm)
10	5,00	10 - 15
100	1,60	3,2 - 5
1 000	0,50	1 - 1,5
10 000	0,16	0,3 - 0,5
30 000	0,09	0,2 - 0,3
100 000	0,05	0,1 - 0,15

Tab. 2.2 Závislost hloubky ohřáté vrstvy na frekvenci

Kalení

Pro kalení používáme specifický výkon v rozsahu 1 až 20 kW/cm^2. Optimální frekvence se vypočítá ze vztahu:

$$\frac{0{,}015}{d^2} < f < \frac{0{,}25}{d^2} \qquad (2.1)$$

d ..... hloubka zakalení (mm)

f ..... frekvence (Hz)

Pájení

Při pájení používáme frekvenci v rozsahu 2 kHz až 2,5 Mhz. Pájení na měkko využívá pro teploty od 150 do 450 °C výkony 0,5 až 5 kW. Pájení natvrdo využívá pro teploty od 450 do 1 050 °C výkony 3 až 30 kW.

Svařování trubek

Používají se zdroje o frekvenci 8 až 500 kHz a výkony 50 až 700 kW podle různé hloubky prohřátí.

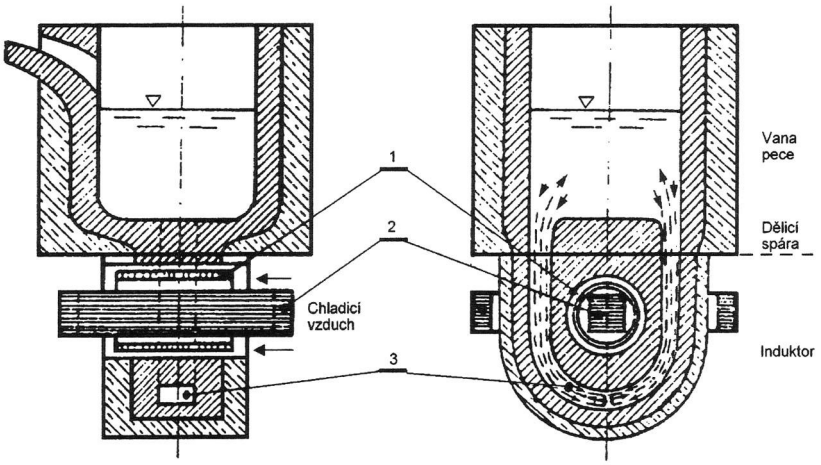
Rafinační přetavování

Používají se zdroje o frekvenci 400 kHz až 5 MHz při výkonech 10 až 50 kW.

3. KANÁLKOVÉ INDUKČNÍ PECE

3.1 Provedení kanálkové indukční pece

Indukční kanálková pec je v podstatě transformátor s uzavřeným železným jádrem, s primární cívkou připojenou na síť. Kanálek vyplněný roztaveným kovem je sekundární stranou transformátoru. Je to vlastně závit spojený nakrátko (obr. 3.1).



1 – ohřívací cívka chlazená vzduchem (vyznačeno šipkami)
2 – jádro z transformátorových plechů plášťového typu, na jehož středním sloupku je ohřívací cívka (1)
3 – kanálek, který obepíná ohřívací cívku jako závit nakrátko

Obr. 3.1 Kanálková pec na barevné kovy

Elektrické indukční kanálkové pece se používají na tavení barevných kovů, zejména mědi a jejích slitin, hliníku a jeho slitin, případně k přihřívání litiny roztavené předtím, například v kuplovně. Při zvyšování příkonu do pece s odkrytým kanálkem se zjistilo, že při překročení jisté kritické hodnoty proudu ve vsázce nastává nežádoucí účinek, tzv. „uskřipovací jev“.

Vlivem elektrodynamických sil působících v radiálních rovinách všemi směry kolmo k povrchu tekutého vodiče dojde k přerušení souvislého prstence roztaveného kovu. V tom okamžiku však skončí elektrodynamické působení, prstenec se znovu spojí a jev se opakuje. Vznikají rázy, které znemožňují řádný provoz pece. Částečně se tomuto jevu čelilo vhodnou konstrukcí pecní cívky. Ještě vhodnější se však ukázalo řešení se zakrytým kanálkem zapuštěným do dna pece. Hydrostatický tlak roztaveného kovu do značné míry zabraňuje vzniku uskřipovacího jevu.

Při odlévání se v peci ponechá asi třetina vsázky, zaplňující kanálek a dno pece, aby se po zapnutí transformátoru v uzavřeném závitu mohlo vyvíjet teplo. Pec se potom naplní vsázkou, která se taví ponořením do přehřáté lázně u dna pece. U těchto pecí vzniká teplo pouze ve vsázce nalézající se v kanálku. Působením elektrodynamického tlaku je kov z kanálku plynule vytlačován do nístěje a chladnější kov z nístěje vtéká do kanálku. Tím se přenáší teplo z kanálku do celé vsázky v nístěji. Má-li kanálek svislou plochu, napomáhá intenzivnímu pronikání horkého kovu z kanálku i rozdíl teplot, protože teplejší kov je lehčí.

3.2 Připojení kanálkových pecí k síti

3.2.1 Pece jednofázové

Jednofázové pece mají zpravidla jeden kanálek. Připojuji se na fázové nebo sdružené napětí sítě 3 x 380 V, 50 Hz. Jednofázové pece se vyrábí až do zdánlivého příkonu 150 kVA. V huti je zpravidla podobných pecí větší počet a jejich prostřídaným připojením k různým fázím se zhruba vyrovnává zatížení ve všech třech fázích.

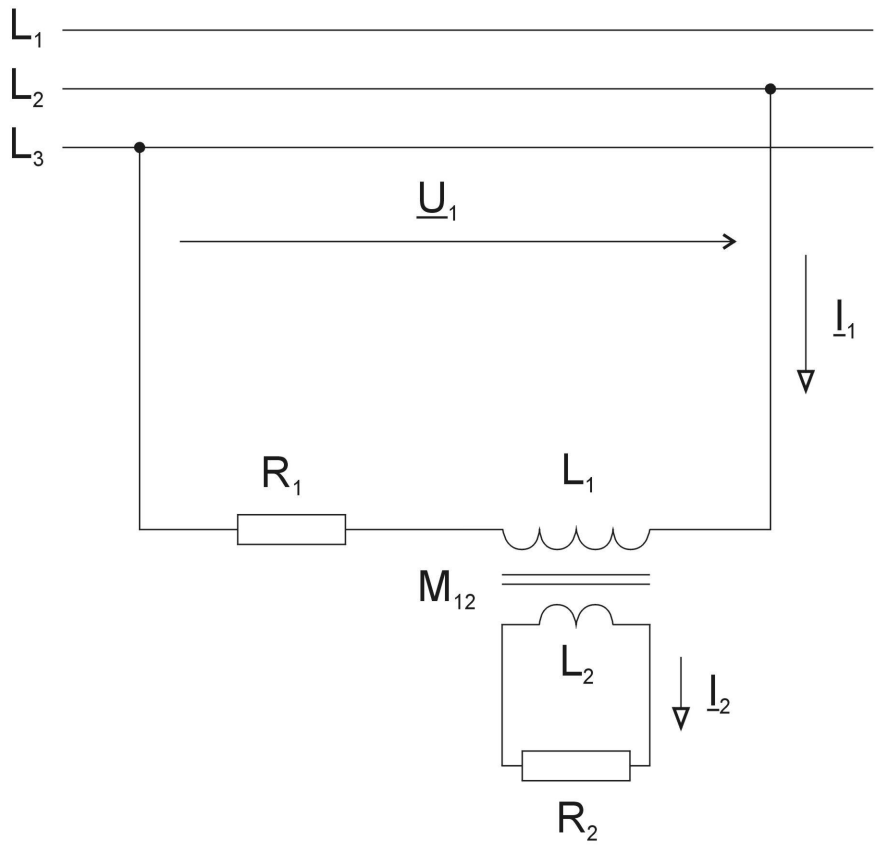
Schematicky je připojení jednofázové indukční pece s jedním kanálkem vyznačeno na obr. 3.2.

Pecní cívka má indukčnost L_1, odpor R_1, vsázka (závit nakrátko vyplněný roztaveným kovem) má hodnoty L_2, R_2.

Pec je připojena na sdružená napětí U_1. Zatěžuje nesymetricky síť a odebírá ze sítě vedle činného výkonu i výkon jalový tím větší, čím nižší je účiník cosφ. U pecí na tavení odporových slitin je cosφ = 0,8, při taveni hliníku je asi 0,3. Abychom odlehčili sít od dodávky jalového výkonu, připojujeme paralelně k cívce vhodně velikou kapacitu *C*.
Potřebná kapacita pak je:

$$C = \frac{L_I}{R_I^{\,2} + (wL_I)^2}\,(F;\,H;\,\Omega) \qquad (3.1)$$

U kanálkových pecí se z úsporných důvodů obvykle kompenzuje na výsledný cosφ = 0,95. Ušetří se část kondenzátorové baterie, proud I_S ze sítě je větší než by byl při úplné kompenzaci. V některých případech je žádoucí učinit takové opatření, aby jednofázová indukční pec zatěžovala symetricky všechny tří fáze.



Obr. 3.2 Připojení jednofázové kanálkové pece k síti

Symetrického zatížení trojfázové sítě vyladěnou jednofázovou pecí lze dosáhnout pomocí tzv. symetrizačního zařízení. Je to umělá zátěž, sestávající ze tří větví:

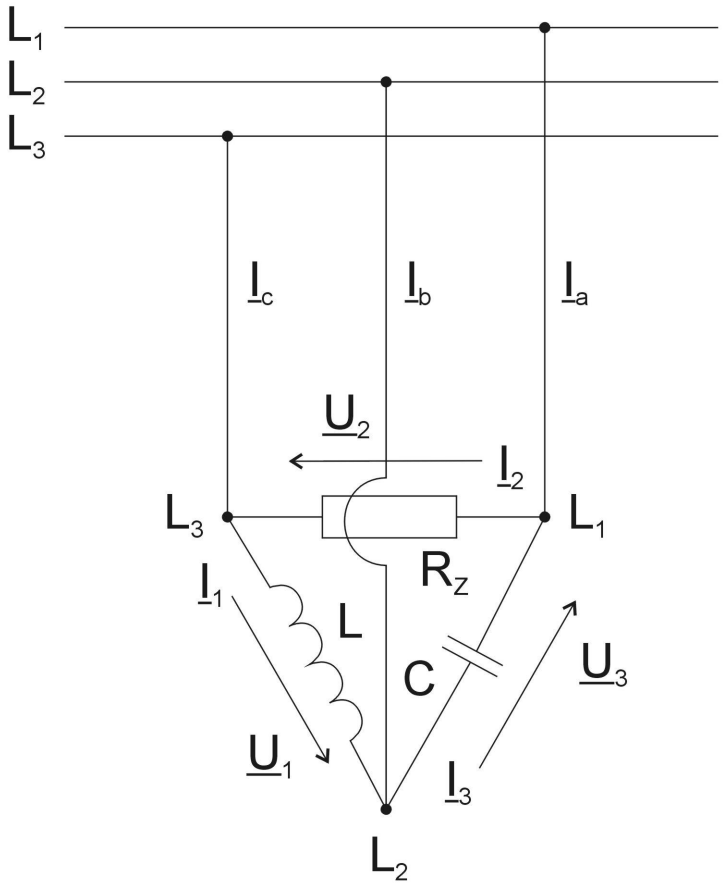
V jedné větvi je odpor R_Z, nahrazující vyladěnou indukční pec, ve druhé větvi je indukčnost *L* vhodné velikostí a ve třetí větvi je vhodně veliká kapacita *C*. Tyto tři větve symetrizačního zařízení mohou být zapojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy.

V obou případech lze dosáhnout při správném sledu fázi přesně symetrického zatížení všech tří fází při cosφ = 1,0. Na obr. 3.3 je vyznačeno symetrizační zařízení v zapojení do trojúhelníka.

Pro velikost potřebné indukčnosti *L* a kapacity *C* platí:

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{w}\ ;\ C = \frac{1}{w \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z}\ ;\ wL = \frac{1}{wC} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad (H, F, \Omega) \qquad (3.2)$$

Při montáži pece se symetrizačním zařízením se vloží do všech tří přívodů ampérmetry. Při správném sledu fází ukazují všechny ampérmetry stejnou výchylku. Při nesprávném sledu fází ukazují ampérmetry ve fázích *a* a *c* proud vyšší, než ve fázi *b*. Přehodíme-li mezi sebou kterékoliv dva přívody, dostaneme správný sled fází.

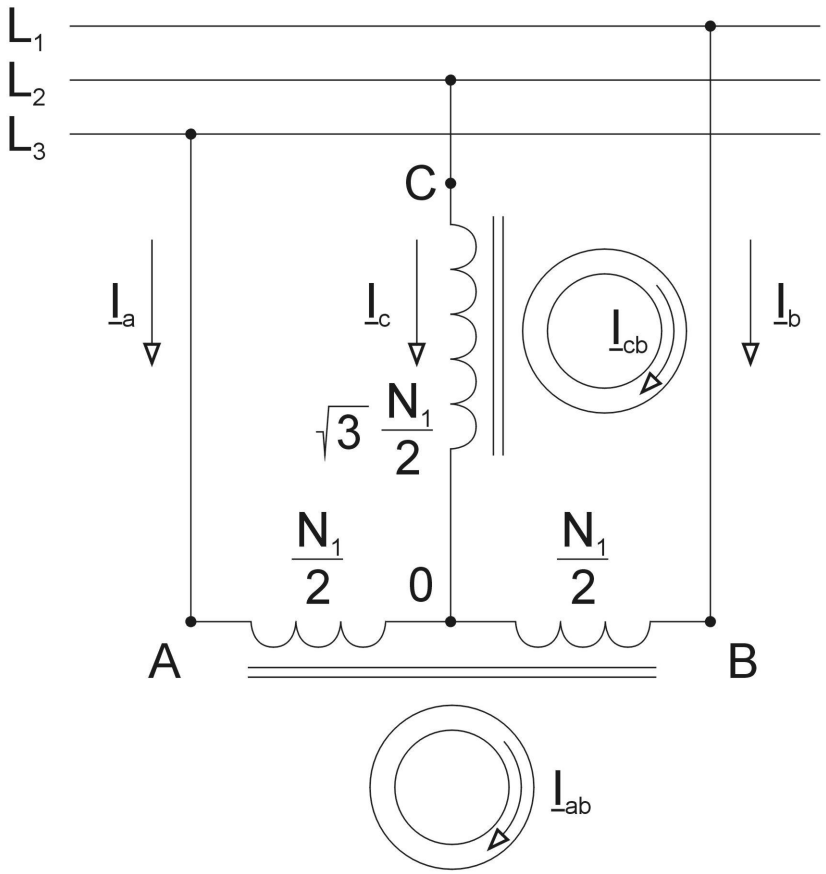


Obr. 3.3 Symetrizační zařízení v zapojení do trojúhelníka

3.2.2 Pece dvoufázové

Jsou to indukční pece se dvěma, případně až čtyřmi kanálky, z nichž vždy dva jsou spojeny paralelně a mají pro oba kanálky společný pecní transformátor. Symetrického rozložení na všechny tři fáze sítě dosáhneme buď použitím dvou pecních transformátorů ve Scottově zapojení, nebo lze také užít zvláštního symetrizačního zapojení. Na obr. 3.6 je pec se dvěma stejnými kanálky ve Scottově zapojení:

Každý z obou kanálků má svůj pecní transformátor, připojený k trojfázové síti. Mezi body *A* a *B* (obr. 3.4) je připojen tzv. „hlavní“ transformátor, který má primární vinutí rozdělané na dvě stejné části. Počet závitů v každé části jsme označili $N_1/2$. Mezi třetí fázi (bod C) a střed vinutí hlavního transformátoru (bod 0) je připojen „pomocný“ transformátor s počtem závitů $3^{1/2}/2.\ N_1$. Oba kanálky jsou přesně stejné. Při takovém uspořádání jsou proudy odebírané z jednotlivých fází stejné. Stejné jsou i proudy naindukované v obou kanálcích, a tedy i množství tepla, které se v nich vyvine.

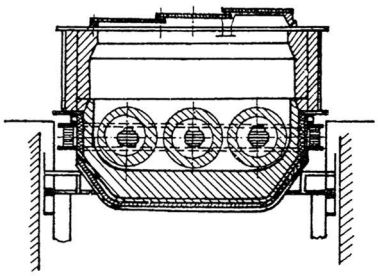


Obr. 3.4 Indukční pec se dvěma stejnými kanálky ve Scottově zapojení

3.2.3 Pece třífázové

Pece třífázové se třemi, případně se šesti kanálky, z nichž vždy dva jsou paralelně připojeny na společné jádro. Tyto pece mají třífázový pecní transformátor buď v jádrovém nebo plášťovém provedení. Každé ze tří jader nese pecní cívku, kolem které je buď jeden nebo paralelně dva stejné kanálky. Všechny tři cívky jsou připojeny na síť buď v zapojení do trojúhelníka (cívky jsou na sdružené napětí), nebo do hvězdy (cívky jsou na fázové napětí).

Zatížení všech tři fází je symetrické, pro zlepšení cosφ je třeba připojit třífázovou kondenzátorovou baterii. Na obr. 3.5 je třífázová pec se třemi kanálky a třífázovým transformátorem, určená k tavení barevných kovů. Tato pec symetricky zatěžuje třífázovou sít.



Obr. 3.5 Třífázová pec se 3 kanálky