\newpage

**\chapter{Technologie pro tvrdé pájení mědi}**

\noindent Za tvrdé pájení označujeme veškeré pájení s teplotou nad 450°C.

V průmyslu je dnes přibližně 75\% všech pájení prováděno plamenem." [Roberts] Kromě pájení plamenem se v praxi setkáváme s mnoha dalšími metodami tvrdého pájení: odporové pájení, pájení v pecích či ponorné pájení. Čím dál více se však do popředí dostává právě indukční pájení. Je to dáno především snadnou automatizací celého procesu pájení, rychlostí a širokou škálou možných aplikací. Indukčním pájením lze dosáhnout širokého spektra teplot, díky tomu, že teplo vniká v samotné vsázce. Tento fakt napomáhá i větší bezpečnosti celého provozu, není přítomen otevřený plamen či leptavé látky. Celý pájecí systém je potom vzhledem k ostatním metodám tichý, méně náročný na údržbu a lze ho použít i v ochranných atmosférách. Induktor však nemusí být umístěn pouze na automatické výrobní lince, ale často se v malovýrobě setkáváme i s manuálními nástroji s výměnnými tvary induktorů pro rozličné aplikace. \\

\indent Parametry pájení lze v případě indukční metody ovlivňovat několika způsoby. Jedním ze způsobů je volba vhodného tvaru induktoru. V praxi se setkáme s různými tvary používaných induktorů, od typického tvaru solenoidu až po různorodé jednozávitové induktory. Samotné induktory potom často bývají chlazené pro snížení Jouleových tepelných ztrát. Chladit je lze jak vzduchem, tak častěji kapalinou, v praxi nejčastěji vodou. Induktory jsou často doplněny o koncentrátory elektromagnetického pole, které pomáhají soustředit elektromagnetické vlnění do vsázky. Dále lze celý proces ovlivňovat velikostí proudu induktorem a jeho frekvencí. Právě možnost ovlivnit hloubku vniku, tedy hloubku do které bude daná vsázka ohřívána, pomocí změny frekvence je jednou z předností indukčního ohřevu.\\

\indent "Při vhodné optimalizaci celého procesu lze snadno dosáhnout i účinností nad 90\%." [Zinn] Na rozdíl od pájení plamenem lze ve vsázce dosahovat mnohem většího rozsahu požadovaných teplot. Při pájení se ideálně zahřívá pouze konkrétní pájené místo, při ohřevu nechtěných částí vsázky se vystavujeme nebezpečí zakřivení materiálu či následné korozi. Při příliš dlouhém ohřevu je problémem také růst zrn pájky a oduhličení. Indukční pájení tyto problémy do jisté míry eliminuje a "lze jím docílit poměrně přesného rozložení teploty v malém konkrétním místě spoje." [Rudnev...] Životnost takového spoje je pak výrazně delší.\\

\indent Ačkoliv lze induktor vyrobit v nejrůznějších tvarech, jedním z problémů indukčního pájení je pájení složitých nebo velkých geometrií, pro tyto aplikace se stále používají spíše pájecí pece. Také náklady na automatizovaný systém indukčního pájení jsou poměrně vysoké a vyplatí se proto spíše pro velkosériovou výrobu. Nutné je také vzít v potaz velikost komplexního systému indukčního pájení zahrnujícího nejen induktor, ale hlavně zdroj elektrického proudu a chlazení celé systému. Nevýhodou je i to, že jeden tvar induktoru není většinou možné použít pro odlišné geometrie. Ze samotného principu je pak zřejmé, že nelze pájet elektricky nevodivé materiály.

**\section{Induktory}**

\noindent Tvar induktoru je klíčový pro výslednou kvalitou pájeného spoje, avšak navrhnout správný tvar induktoru je poměrně složité. Pokud není geometrie vsázky příliš neobvyklá, vychází se z osvědčených, v praxi využívaných tvarů. Skoro vždy je však testováno více variant induktoru. Jednotlivé induktory se testují budťo přímo v provozu, z ekonomického hlediska je ale většinou nevýhodné vyrábět několik možných variant induktorů a často se tedy přistupuje k počítačovým simulacím. Analytické výpočty jsou z hlediska složitosti celého problému nemyslitelné. Poslední dobou se objevují i experimentální postupy optimalizace, jako využití Taguciho neuronové sítě.\\

\indent Obecně lze tvrdit, že z důvodů minimalizace ztrát by měl být induktor co nejblíže ohřívané vsázce. V mnoha případech ale toto tvrzení vědomě porušujeme. Výhoda poměrně přesného zacílení místa ohřevu vsázky může být často nevýhodou z hlediska velkého teplotního gradientu, který způsobuje reziduální mechanické namáhání. Oddálením induktoru od vsázky tento gradient zmenšíme a vsázku prohříváme rovnoměrněji. Větší odstup induktoru od vsázky je nutný i v případě, že se průřezy pájených entit liší, či jsou vyrobeny z odlišně elektricky vodivých materiálů. Oddálení je využito i v tehdy, když je jeden tvar induktoru používán pro více různých vsázek. V tomto případě je geometrie pájeného spoje vždy tvarově odlišná a je tak nutné dané místo ohřívat rovnoměrněji. Problém reziduálního namáhání se v praxi někdy řeší tak, že je na výrobní linku za vysokofrekvenční pájecí induktor umístěn další induktor prohřívací s řádově nižší frekvencí. Tento induktor jednak redukuje teplotní gradient a reziduální namáhání, ale také zjemňuje a vylepšuje mikrostrukturu rychle zapájeného spoje.\\

\indent Kategorizace induktorů je poměrně obtížná, jelikož každá geometrie vyžaduje speciálně uzpůsobený tvar. Ve všech případech je však snaha induktor co nejblíže tvarově přizpůsobit tvaru vsázky. V potaz musí být samozřejmě bráno i chlazení induktoru a to, jak je celý systém automatizován. Nejběžnějšími induktory jsou jedno či vícezávitové a to jak s kruhovým průřezem pro cylindrické vsázky, tak s čtvercovým, obdélníkovým či jinak atypickým. Tyto induktory se používají jednak ve vnější variantě, tak ve vnitřní variantě, kdy je induktor uvnitř duté vsázky. V těchto případech lze tvar elektromagnetického pole ovlivňovat vzdáleností induktoru od vsázky, počtem závitů, vzdáleností mezi nimi a samotným průměrem vodiče. Velmi často není induktor tvořen vodičem, ale je vyroben z masivního kovového bloku. Výrobně je složité v těchto induktorech tvořit dutiny pro chladící médium, chlazení je proto zajišťováno z vnějšku. Tyto induktory se většinou používají pro pájení více vsázek najednou. Lze se také setkat se systémy v nichž se vsázka nebo dokonce samotný induktor v průběhu pájení otáčí, či posouvá a je tak nutné aby elektromagnetické pole působilo po celé trase stejně. \\

Designu induktoru musí být řešen i s ohledem na vzájemné ručení magnetických polí. Nízkofrekvenční cívky jsou většinou velké a vícezávitové. Cívky ve tvaru spirály lze využít na kuželová ozubená kola. Ploché palačinkové induktory jsou používány, pokud chceme vsázku prohřát pouze z jedné strany, nebo není možné jí induktorem obklopit. Pokud je nutné udělat induktor ve vnitřní variantě pouze jednozávitový, je většinou pro dosažení rovnoměrného ohřívání nutné vsázkou či induktorem otáčet. Při vyšších frekvencích se často přehřívají ostré hrany a otvory ve vsázkách, lze tomu zamezit jednak tvarem induktoru, tak vyplnění otvoru kovovým vložkami. Pokud je vsázka pájena na dvou blízkých místech jedním induktorem a přesto je nežádoucí aby se materiál mezi pájenými spoji příliš ohříval, je nutno cívku motat tak, aby se pole obou části vzájemně rušila. Pro tento účel lze také využít absorbérů, které pohlcují nežádoucí magnetický tok, absorbéry musí být často chlazeny. V případě cívek z masivních bloků je třeba dbát na vzdálenosti mezi jednotlivými vsázkami. Při pohybu cívky lze přehřívání omezit nejen tvarem cívky ale i jejím přibližováním a oddalováním od vsázky. Trubice pro induktor se volí nejčastěji s kruhovým či čtvercovým průřezem. "Trubice se čtvercovým průřezem mají tu výhodu, že předávají víc magnetického toku vsázce, než-li trubice s průřezem kruhovým." [Zinn] Při konstrukci induktoru je nutné vzít v potaz i síly působící mezi vsázkou a induktorem. Induktor je tak často kromě upevnění konců k napájecímu zdroji ještě připevněn k pevné konstrukci. V případě nízkofrekvenčních induktorů je třeba uvažovat i akustický šum.

**\section{Koncentrátory a stínění}**

Častým problémem při optimalizaci indukčního ohřevu je nedokonalé rozložení teploty ve vsázce. Pokud tento problém nelze dostatečně eliminovat tvarem induktoru či parametry, lze pro lepší zacílení a zvýšení efektivity ohřevu použít koncentrátory a stínění. Koncentrátory jsou materiály s vysokou relativní permeabilitou. Tyto materiály přirozeně představují snazší cestu pro magnetický tok a ten se jimi uzavírá, lze tak magnetické pole koncentrovat do požadovaného místa. Pro nižší frekvence se využívají svazky laminovaných elektrotechnických plechů. Plechy musí být nevodivě odděleny aby se co nejvíce eliminovaly ztráty vířivými proudy. Nevýhodou těchto svazků je vysoká hmotnost. Pro frekvence vyšší se potom využívají ferity vyráběné z keramických oxidů, jsou odolné proti korozi, ale velmi křehké. Problém také nastává při překročení Curieho teploty, kdy tyto materiály ztrácí svoje magnetické vlastnosti. Z tohoto důvodu často vyžadují vlastní chlazení.

Stínění spíše než pro koncentraci magnetického pole slouží k jeho odstínění tak, aby nebyla zahřívána nežádoucí místa jak na vsázce, tak na samotném systému indukčního ohřevu. Pro stínění jsou obecně používány kovové pláty s takovou tloušťkou, aby bylo pole induktoru při dané frekvenci utlumeno. Nejčastěji je používána ocel, hliník či měď.

**\section{Susceptory}**

Susceptory popírají tvrzení, že indukčně nelze pájet nevodivé materiály. Susceptory jsou elektricky vodivé materiály přejímající roli vsázky ohřívané působením magnetického pole induktoru. Toto teplo je následně předáno vedením sáláním a prouděním samotné pájené entitě. Susceptor se jakožto součást systému nesmí ohřevem nikterak zakřivovat, namísto kovů se tedy používá grafit či molybden. Nevýhodou těchto materiálů je, že při vyšších teplotách rychle oxidují, susceptory tak často vyžadují ochrannou atmosféru či pokrytí vrstvou karbidu křemíku. Susceptory jsou v praxi využívány hlavně v polovodičové technice a při práci s optickými vlákny, kde jsou vyžadovány vysoké teploty.

**\section{Pájky}**

**\section{Napájecí zdroje}**

**\section{Chlazení}**

Induktor se od vsázky přirozeně ohřívá sáláním a prouděním. Zvýšení teploty vede u vodičů k nárůstu rezistivity a k vyšším Jouleovým ztrátám. Tyto ztráty sou samozřejmě závislé i na frekvenci a je nutno podle ní volit i šířku stěny induktoru.