

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Indukční ohřev spojky pro spojování potrubí

Radek Čermák

2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek ČERMÁK**
Osobní číslo: **E12B0010P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Indukční ohřev spojky pro spojování potrubí**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Prostudujte odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se dosavadních způsobů spojování kovových trubek, potrubí a plášťů kabelů.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického a teplotního pole a pole termoelastických deformací.
3. Uvažujte různá uspořádání a různé použité materiály.
4. Realizujte numerický model na počítači.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

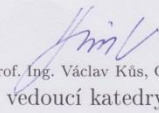
1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
2. Mayer, D., Ulrych, B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.
3. Míka, S., Příkryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na využití indukčního ohřevu při spojování trubek. V úvodu jsou popsány dosavadní používané metody při spojování potrubí. V praktické části je řešen návrh nové metody spojování potrubí pomocí indukčního ohřevu. V závěru jsou zhodnoceny obdržené výsledky jak z hlediska použitelných materiálů, tak z hlediska rozměrů.

Klíčová slova

Trubky, spojování trubek, indukční ohřev, Agros2D, potrubní spojka

Abstract

This bachelor thesis is focused on the use of induction heating for connecting pipes. The introduction describes current methods used for connecting pipes. In the practical part, is the proposal for new methods used by connecting pipes with induction heating. In conclusion, results obtained are evaluated both in terms of usable materials and size.

Key words

Pipe, connecting pipes, induction heating, Agros2D, pipe coupling

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Radek Čermák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1 POTRUBÍ.....	12
1.1 TRUBKY.....	13
1.2 SPOJOVÁNÍ KOVOVÝCH TRUBEK	15
2 INDUKČNÍ OHŘEV	19
2.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	19
3 MATEMATICKÝ MODEL.....	20
4 INDUKČNÍ OHŘEV PŘI SPOJOVÁNÍ POTRUBÍ	22
4.1 MOŽNÉ SPOJE POMOCÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU	23
4.2 MATERIÁLY ZVOLENÉ PRO SIMULACE	25
5 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ	26
5.1 AGROS2D	26
5.2 NUMERICKÝ MODEL	26
6 SIMULACE PROVEDITELNOSTI JEDNOTLIVÝCH ZPŮSOBŮ.....	28
6.1 VLOŽENÍ TRUBEK DO SEBE BEZ MECHANICKÝCH ÚPRAV	28
6.2 SPOJENÍ POMOCÍ SPOJKY A TVAROVKY	30
7 SPOJKA V INDUKČNÍM OHŘEVU	38
7.1 VSÁZKA.....	38
7.2 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO NASTAVENÍ	40
7.3 SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU	47
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	53
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratk

A	Magnetický vektorový potenciál	(Wb/m)
B	Vektor magnetické indukce	(T)
H	Vektor intenzity magnetického pole	(A/m)
J	Vektor proudové hustoty	(A/m ²)
γ	Konduktivita	(S/m)
ρ	Rezistivita	(Ω m)
w_j	Měrné Jouleovo ztráty	(W/m ³)
μ	Permeabilita prostředí	(H/m)
μ_r	Relativní permeabilita prostředí	()
μ_0	Permeabilita vakua	(H/m)
t	Čas	(s)
δ	Hloubka vniku	(m)
f	frekvence	(Hz)
I	Proud	(A)
E	Youngův modul	(Pa)
F	Síla	(N)
P	Tlak	(Pa)

λ	Koeficient teplotní vodivosti	(W/(mK))
T	Teplota	(°C)
f_0	Součinitel tření	(-)
ΔT	Teplotní rozdíl	(-)
ρ	Hustota materiálu	(kg/m ³)
c_p	Měrné teplo	(J/(kgK))
ν	Poissonovo číslo	(-)
α	Koeficient teplotní roztažnost	(K ⁻¹)
d_0	Vnitřní průměr trubky	(m)
d_1	Vnější průměr trubky	(m)
d_2	Vnější průměr spojky	(m)
S	Obsah	(m ²)
V	Objem	(m ³)
Δd	Přesah při spojení potrubí	(m)
Δd	Přesah při spojení potrubí	(m)
l	Délka	(m)
D	Vnitřní průměr cívky	(m)

Úvod

Doprava potrubím je ideální jako způsob dopravy při přenosu pevných látek a často jediné možné řešení při přenosu energií. Používá se v mnoha oblastech, např.: stavebnictví, chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu a dalších.

V současnosti se potrubí spojuje několika způsoby, které mají kromě svých specifických výhod i několik nevýhod (cena, technická náročnost, vznik výpotku v případě svaru atd.)

Tato bakalářská práce se zabývá možností využít zařízení pro indukční ohřev k nahřátí a následnému termoplastickému připojení spojky, která může být masově vyráběna, spoj není technicky ani časově náročný a není k němu kromě spojky zapotřebí žádná další přídavná látka.

S rozvojem výkonových součástí je v dnešní době možné sestrojít přenosné indukční zařízení, které bude cenově přijatelné, lze ho připojit do běžné 50 Hz distribuční soustavy a může tak nahradit v současnosti používané hořáky.

1 Potrubí

Jako potrubí označujeme zařízení, které se skládá převážně z trubek. Použité trubky jsou většinou kruhového průřezu. Nejčastěji se potrubím dopravují různé kapaliny a plyny ve formě takzvaných vzdušin. Při přepravě sypkých hmot je nutné použít nosnou látku. Podle typu nosné látky rozdělujeme potrubí na hydraulické, kde je jako nosná látka použita kapalina, a pneumatické, kde je použit plyn [1].

Potrubí je těsně uzavřeno a směsi, které jsou potrubím přenášeny, nemění své skupenství. Teplota a tlak směsi se obvykle mění v malém rozsahu. Výjimku tvoří potrubí na dlouhé vzdálenosti – desítky až stovky kilometrů. U těchto potrubí mohou nastat značné změny tlaku [1].

Rozdělení potrubí

Potrubí se nejčastěji rozděluje a třídí podle:

- **Dopravované tekutiny** – olejová potrubí, vodovody, parovody apod.
- **Podle účelu potrubí nebo dopravované tekutiny** – potrubí sací, výtlačná, vypouštěcí apod.
- **Podle stavu pracovního přetlaku nebo pracovní teploty**
- **Podle umístění potrubí** – vnitřní, venkovní, dálková, podzemní, nadzemní apod.
- **Podle materiálu a způsobu provedení** – litinové, měděné, přírubové apod.

Části potrubí

Většina potrubí se skládá ze stejných částí, které se pouze přizpůsobují konstrukci a materiálem v závislosti na tom, jaký typ látky bude potrubí přepravovat [1].

Hlavními částmi, ze kterých se potrubí skládá, jsou:

- **Trubky**
- **Spoje trubek a spoje, které spojují trubky s ostatními částmi potrubí**
- **Uzavírky pro přerušování průtoků**
- **Tvarovky**
- **Kompenzátory**

1.1 Trubky

Trubky jsou největší částí potrubí, proto se při návrhu potrubí věnuje trubkám největší pozornost. Při správném výběru materiálu a typu trubky musíme brát v úvahu charakter látky, kterou budeme přepravovat, kde bude potrubí umístěné, jakou teplotu a tlak bude mít přepravovaná látka apod.[1].

Materiály trubek

Trubky se z hlediska použitého materiálu dělí na:

- **Kovové**
- **Z neželezných kovů**
- **Nekovové**

Kovové trubky

Kovové trubky se nejčastěji používají ocelové nebo litinové [1].

Ocel

Pro běžné trubky se používá uhlíkatá ocel třídy 10, 11, 12. Pro vyšší teploty třída 15 a pro nerezavějící trubky třída 17. Mezi výhody ocelových trubek patří dobrá pružnost, pevnost, odolnost proti nárazům, snesou vysoké teploty a snadno se s nimi manipuluje. Jejich největší nevýhoda je, že jsou málo odolné proti korozi. Trubky se využívají při rozvodech vody, parovodech nebo jako rozvody ústředního topení [1], [2], [3].

Litina

Trubky se vyrábějí z černé litiny, nebo z tvárné litiny. Proto ocelovým trubkám má výhodu, že je málo náchylné na korozi a jsou velmi pevné v tlaku i v ohybu. Jejich nevýhodami jsou naopak křehkost a vysoká váha. Používají se hlavně jako vodovodní potrubí uložená v zemi [1], [2], [3].

Trubky z neželezných kovů

Jsou nákladnější než ocelové trubky a používají se hlavně v případech, kdy chceme využít chemických vlastností daného prvku [1].

Nejčastěji se nezelezné trubky vyrábějí z těchto prvků:

Měď

Trubky vyrobené z mědi patří mezi nejtrvanlivější. Díky této vlastnosti jsou trubky z mědi schopné fungovat i desítky let bez potřeby údržby. Měď má dobrou odolnost proti korozi, pevnost, dlouhodobě odolá i vyšším tlakům a teplotám. Díky svojí dobré tepelné vodivosti se používá u klimatizačních a chladících zařízení [1], [2], [3].

Hliník

Trubky se vyznačují dobrou tepelnou vodivostí a odolností proti korozi. Hliník však není příliš pevný. Používá se hlavně v chemické výrobě, díky své nízké hmotnosti se hojně používá také v automobilovém a leteckém průmyslu a v potravinářství [1], [2], [3].

Další typy

Měď a hliník patří mezi nejpoužívanější, kromě nich se používají ještě trubky vyrobené z niklu, cínu, olova [1].

Nekovové trubky

Tyto trubky se používají hlavně ve stavebnictví pod označením „trouby“. Nejčastěji se používají tyto typy [1], [3]:

- **Plastové** – V současnosti začínají nahrazovat ocelová a litinová potrubí u vodovodních instalací
- **Skleněné trubky** – Uplatňují se tam, kde je zapotřebí optická kontrola
- **Betonové** – Používají se ve venkovních kanalizacích
- **Kameninové** – Jsou velmi trvanlivé, používají se pro kanalizační potrubí uložená v zemi

1.2 Spojování kovových trubek

Při spojování trubek jsou kladeny tyto základní požadavky [1], [8]:

- **Trvanlivost**
- **Trvalá těsnost spoje zvenčí i zevnitř**
- **Spoj nesmí zeslabovat stěnu trubky nebo zmenšovat její vnitřní průměr**
- **Pevnost – záleží na požadavkách provozu**
- **Snadná montáž**

Spoje trubek se dělí na dva základní typy:

Rozebíratelné spoje

Rozebíratelné spoje jsou určeny k častému rozpojování, například při časté výměně určitých částí potrubí apod. Rozebíratelné spoje nedosahují kvalit spojů nerozebíratelných a vyžadují časté kontroly a údržbu [1], [8].

Mezi nejčastější rozebíratelné spoje patří [1], [8]:

- **Spoje přírubové**
- **Šroubení**
- **Spoje svěracím kroužkem**
- **Trubkové spojky**

Nerozebíratelné spoje

Nerozebíratelné spoje se používají tam, kde jsou na potrubí kladeny velké nároky a nepředpokládá se nutnost potrubí rozmontovat, nebo v případě uložení potrubí na těžko dosažitelných místech, kde by nebylo možné kontrolovat rozebíratelné spoje [1], [8].

Protože předpokládané spojení pomocí indukčního ohřevu by byl nerozebíratelný spoj, popíšu pouze teorii k nerozebíratelným spojům pro možnost porovnání výhod a nevýhod.

Nejpoužívanější nerozebíratelné spoje jsou:

Spojení pájením

Pomocí této metody lze spojit trubky z kovových materiálů. Lze spojovat trubky ze stejných materiálů nebo trubky z rozdílných materiálů. K pájení potřebujeme přídavný materiál, tzv. pájku. Pájka musí mít chemické složení, které nepříznivě nereaguje s materiálem trubky a zároveň nižší teplotu tavení než má materiál ze kterého je trubka vyrobena, aby nedocházelo k natavení spojovaných materiálů. Dále je zapotřebí tavidlo a pájedlo. Tavidlo je látka, která chrání pájku a trubku před oxidací a pájedlo je zařízení které umožňuje ohřátí místa spoje [7], [8].

Podle pracovní teploty můžeme rozdělit pájení na:

Pájení naměkko

Pájka, která se používá při tomto způsobu má maximální teplotu tavení do 450°C. Tyto pájky pro měkké pájení jsou hlavně cínové. Čistý cín má teplotu tavení 232°C, proto se častěji používají jeho slitiny. Nejčastější je pak slitina Pb-Sn. Jako tavidlo se používá vodní roztok chloridu zinečnatého nebo amoniaková sůl [7], [8].

Měkké pájení je možné použít pro spojování měkkých i tvrdých ocelí, hliníku, slitin mědi apod. Spoje vytvořené touto metodou mají malou pevnost a nelze potrubím přenášet látky, které mají vyšší teploty, protože by mohlo dojít k povolení a roztavení pájky [7], [8].

Tato metoda se používá např. pro potrubí s pitnou vodou [7].

Pracovní postup

Trubka se natře tavidlem a zasune se do tvarovky. Pomocí hořáku se trubka zahřívá, až dosáhne optimální teploty. Tu lze poznat podle změny barvy tavidla. Po zahřátí se přiloží pájka, která se díky principu kapilarity dostane mezi tvarovku a trubku. *Obr. 1.1* [7].



Obr. 1.1 Spojování pájením (převzato z [7])

Pájení natvrdo

Při tomto pájení používáme pájky, které mají teplotu tavení nad 450 °C. Tvrdé pájky jsou nejčastěji na bázi slitin mědi, hliníku a stříbra. Oproti pájení naměkko mají spoje pájené natvrdo větší pevnost a je možno je použít i v potrubí, které přepravuje látky o vyšších teplotách. Jeho nevýhoda oproti pájení naměkko je, že musíme materiál trubek zahřát na vyšší teplotu, čímž měníme jeho mechanické vlastnosti. Tvrdé a polotvrdé měděné trubky pak ztrácí svoji pevnost. Používá se pro teplovodní potrubí nad 110 °C [7], [8].

Pracovní postup je stejný jako při pájení naměkko, pouze pracujeme s vyššími teplotami [7].

Nevýhodou těchto spojů je poměrně složitý pracovní postup a nutnost potřeby přídavných materiálů (tavidlo, pájka) [8].

Svarové spoje

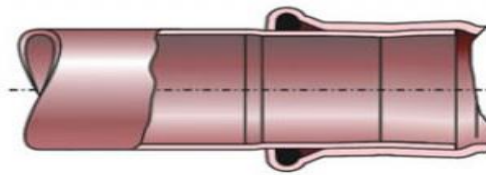
Svařováním můžeme spojovat pouze stejné materiály. Svary musí mít takové vlastnosti, aby mohly přenášet síly, které vznikají při provozu potrubí. Spoje se dělí na [8]:

- **Svařování tavné** – návarové plochy jsou nataveny a spojení dílů vznikne splynutím roztavených částí s tekutým přídavným materiálem
- **Svařování tlakem** – nejprve se návarové plochy nataví do těstovitého stavu a poté se spojí tlakem nebo rázem

Svařování je technicky náročnější a je potřeba mít k němu osobu s platným svářečským průkazem, ale výhodou těchto spojů je vysoká pevnost a spolehlivost [8].

Lisované spoje

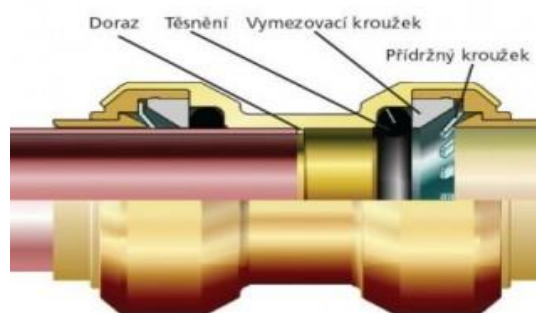
Při lisovaném spoji se trubka zastrčí do tvarovky, která se následně stlačí lisovacími čelistmi. Obr. 1.2 Tento spoj je velmi rychlý a snadný na provedení [7].



Obr. 1.2 Lisovaný spoj (převzato z [7])

Zástrčné spojení

Na Obr.1.3 je ukázka tohoto spoje pro měděnou trubku. Tento spoj vznikne tak, že se trubka zastrčí do spojky. Tato spojka má dobré těsnící vlastnosti a spoj je velice snadný a rychlý na provedení. Jeho nevýhodou je cena spojky. U spojek od některých výrobců je možné několikrát rozebrat a spojku znovu použít, aniž by to ovlivnilo její spolehlivost [7].



Obr. 1.3 Potrubní spojka (převzato z [7])

2 Indukční ohřev

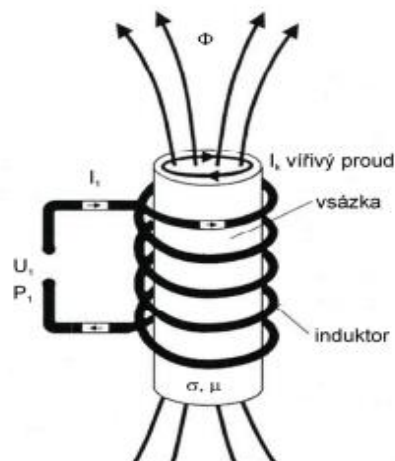
Při indukčním ohřevu se ohřívá vodivý materiál za pomoci vířivých proudů, které jsou v něm indukovány elektromagnetickým polem. Dnes se indukční ohřev běžně používá při: tavení, tváření, povrchovém kalení, pájení, lisování za tepla a ke speciálním účelům např.: vakuové tavení, plasma apod. [4].

Mezi největší výhody indukčního ohřevu patří:

- **Rychlost ohřevu**
- **Minimální vliv na životní prostředí**
- **Dobré řízení regulace teploty**
- **Není zapotřebí kontakt mezi vsázkou a cívkou**

2.1 Princip indukčního ohřevu

Základem pro každé zařízení je cívka, ve které prochází střídavý proud, zdroj a vsázka, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené z cívky. Při průchodu proudem válcovou cívkou vyzařuje tato cívka do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. Induktor se vsázkou a naznačeným polem je na *Obr. 2.1* [4].



Obr. 2.1 Princip indukčního zařízení (převzato z [4])

Ve vsázce se indukuje napětí, následkem čehož vznikají vířivé proudy, které vsázku ohřívají. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje se zvyšující se vzdáleností od

povrchu vsázky. Definuje se takzvaná hloubka vniku δ . Ve vzdálenosti δ od povrchu vsázky vzniká přibližně 86,6% veškerého tepla. Hloubku vniku lze spočítat z tohoto vztahu [4]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (2.1)$$

3 Matematický model

K simulování spojky v indukčním ohřevu využijeme v programu Agros2D elektromagnetické, tepelné a termoelastické pole, tato pole jsou navzájem sdružena a jsou popsána diferenciálními rovnicemi [6].

Elektromagnetické pole

Přechodný elektromagnetický problém je řešen v oblasti, která může obsahovat obecně nelineární elektricky vodivé materiály. Řešení vychází z Maxwellových rovnic. Při využití vztahů $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ a $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$ je rozložení elektromagnetického pole možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro vektorový magnetický potenciál. V osově souměrném uspořádání lze problém popsat rovnicí pro magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} takto:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext} \quad (3.1)$$

kde μ označuje magnetickou permeabilitu, γ je elektrická vodivost, a \mathbf{J}_{ext} je vnější proudová hustota v poli cívky. Rovnici (3.1) lze v takovém případě pro válcovou spojku i indukční cívku vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial (r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial z} \right) - \gamma_{el} \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} = -\mathbf{J}_\varphi \quad (3.2)$$

a odpovídající střední měrné Jouleovy ztráty, ohřívající válcovou spojku, popsat výrazem:

$$w_j(t) = \frac{\gamma_{el}}{V} \int_V \left(\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right)^2 dV \quad (3.3)$$

kde V je objem uvažované spojky, který v našem případě představuje objem dutého válce:

$$V = \pi \frac{d_2^2}{4} l_s - \pi \frac{d_{1min}^2}{4} l_s \quad (3.4)$$

Objemové Jouleovo ztráty w_j představují teplo, které ohřívá válcovou spojku a vyplývá ze vzorce [6]:

$$w_j = \gamma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^2 \quad (3.5)$$

Tepelné pole

Problém přenosu tepla v tepelně vodivé prostředí je popsán rovnicí:

$$\text{div}(\lambda \text{grad} T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - w_j \quad (3.6)$$

kde symbol T je teplota, λ označuje tepelnou vodivost, ρ znamená hustotu materiálu a c_p je specifické teplo při konstantním tlaku [6].

Termoelastické pole

Problém strukturální analýzy je popsán pomocí Lamého rovnice ve tvaru:

$$(\varphi + \psi) \text{grad} \text{div} u + \psi \Delta u - (3\varphi + 2\psi) \alpha_T \text{grad} T = -f \quad (3.7)$$

$$\varphi = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \psi = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.8)$$

kde $\varphi \geq 0, \psi > 0$ jsou koeficienty spojené s parametry materiálu. E značí Youngův modul pružnosti a ν je Poissonova konstanta, u představuje vektor posunu (teplotní dilatace), α_T je koeficient tepelné roztažnosti a f reprezentuje vektor objemových vnitřních sil [6].

Po doplnění rovnic příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami tyto rovnice umožňují určit teplotní dilatace uvažované termoelastické spojky [6].

4 Indukční ohřev při spojování potrubí

Indukční ohřev má při ohřevu kovových materiálů mnoho výhod, například bezkontaktní přenos, zahřívá se hlavně vsázka, takže nedochází k opotřebení zařízení, je šetrný k životnímu prostředí apod. Jeho využití by tak bylo při spojování potrubí možnou modernizací této oblasti. Jsou možná dvě využití [4]:

1. Použít zařízení pro indukční ohřev jako náhradu hořáků při pájení naměkko a natvrdo nebo jako náhradu svářecích přístrojů při svařování potrubí.
2. Vytvořit nový způsob spojování trubek pomocí tepelné roztažnosti materiálu a využití třecí síly a tlaku, který by výsledný spoj vytvořil.

První způsob má nesporné výhody. Pouze bychom upravili a zmodernizovali způsob, kterým se trubky spojují již několik desítek let. Díky dlouholeté praxi víme vše o vlastnostech těchto spojů. Nahrazením hořáků a svářecích přístrojů zařízeními pro indukční ohřev by mělo příznivé dopad na životní prostředí a umožňovalo by přesnější nastavení času a teploty, na kterou se vsázka ohřeje.

Druhý způsob má tu výhodu, že není zapotřebí žádný přídavný materiál, jako je tomu u pájení, a manipulace a technické provedení je snazší než u spojů pomocí svarů. Nebyl by zapotřebí např. svářecí průkaz.

4.1 Možné spoje pomocí indukčního ohřevu

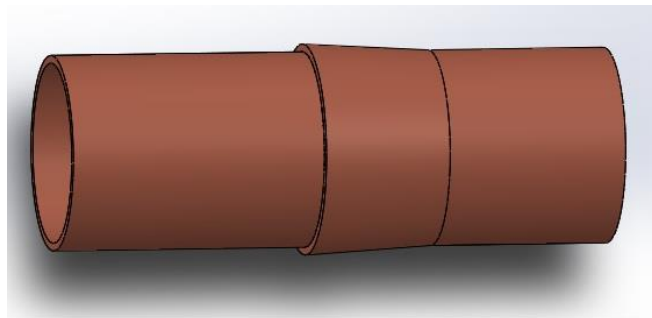
Protože tento spoj funguje na základě tepelné roztažnosti materiálů, bylo by vhodné, aby se používal pouze pro spojování trubek ze stejných materiálů.

Navrhuji tři nejsnáze proveditelné způsoby jak spojit potrubí ze stejných materiálů.

1. Ohřát trubku tak aby se její vnitřní průměr roztáhl natolik, aby bylo možné do trubky zasunout stejnou trubku.
2. Spojit trubky pomocí spojky.
3. Vytvořit na trubce tvarovku o odpovídajícím průměru.

Vložení trubky do sebe bez mechanických úprav

Jako nejpraktičtější a nejrychlejší se na první pohled jeví první způsob. Kdyby se nám pouhým zahřátím podařilo trubku roztáhnout natolik, aby do ní bylo možné vložit trubku o stejném průměru, získali bychom po vychladnutí dostatečně pevný spoj. Hlavní výhoda tohoto způsobu je, že bychom k němu nepotřebovali žádný dodatečný materiál nebo nástroje, pouze odpovídající zařízení pro indukční ohřev. Na *Obr. 4.1* je vidět jak by teoreticky tento spoj mohl vypadat. Oproti výhodám by měl několik zjevných nevýhod, jako například deformaci materiálu a zúžení vnitřního průměru trubky.

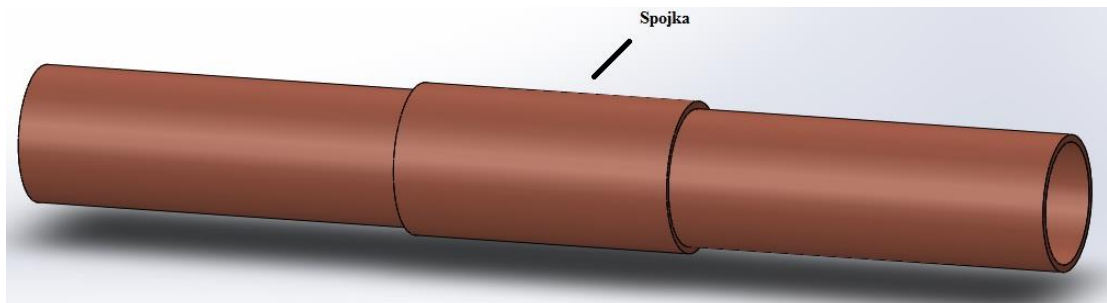


Obr. 4.1 Spoj bez mechanických úprav

Spojení pomocí spojky

Tento způsob je na první pohled složitější, protože je k němu zapotřebí spojka o takovém průměru, který je při stejné teplotě spojky a trubky menší než vnější průměr trubky, ale zároveň se po zahřátí dokáže roztáhnout natolik, aby bylo možné vložit trubku z každé strany.

Viz *Obr. 4.2*. Oproti předchozímu způsobu má dvě velké výhody. Nedochozí k zahřátí trubky, ale pouze spojky. Díky možnosti zvolit si průměr spojky si můžeme určit sílu, která bude působit na trubky po vychladnutí. Nebude tak docházet k velkému mechanickému namáhání, které by jinak způsobilo deformaci trubky.



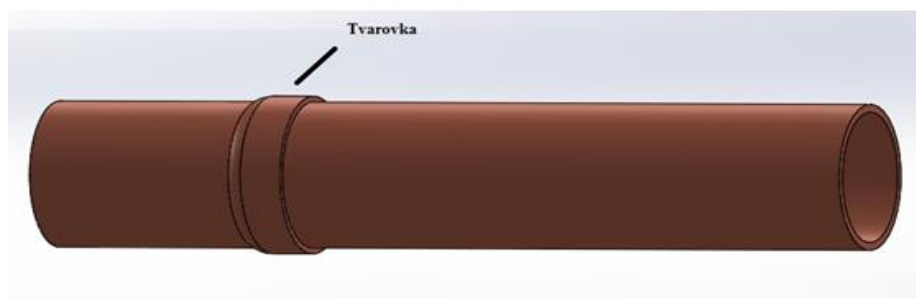
Obr. 4.2 Spojení dvou trubek pomocí spojky

Vytvoření tvarovky

Tvarovky se běžně používají například při kapilárním pájení, kde je však vnitřní rozměr tvarovky d_{1min} větší než vnější průměr trubky d_1 . Jednalo by se tak o rozměrovou úpravu v již zavedené výrobě. K vytvoření tvarovky lze také využít nástroj expandér *Obr 4.3*, který umožňuje roztáhnutí trubek. Výsledné spojení na *Obr 4.4* [14].



Obr. 4.3 Vytvoření tvarovky expandérem (převzato z [14])



Obr. 4.4 Spojení dvou trubek pomocí tvarovky

4.2 Materiály zvolené pro simulace

Abych mohl využití této metody popsat konkrétněji, rozhodl jsem se simulovat a navrhnout postup řešení pro tři různé materiály, které se běžně používají pro výrobu trubek.

Fosforem dezoxidovaná měď – EN CW024A

Tento typ trubek patří mezi nejpoužívanější typy měděných trubek. Využívá se u výměníku, kondenzátorů, klimatizací. Skládají se z 99,9 % z čisté mědi [12] [1].

Hliník – EN AW 6060

Tyto trubky jsou vyrobeny ze slitiny AlMgSi0,5. Používají se zejména při výrobě nábytku v potravinářském průmyslu, při výrobě oken a dveří [1], [11].

Ocel - ČSN 11 343

Tento typ oceli se nejčastěji používá při výrobě svařovaných ocelových trubek. Má zaručený stupeň čistoty. Trubky z této oceli mají všeobecné použití [1].

Rozměry zvolených materiálů

Měď a hliník

Rozměry trubek se určují podle rozměrových norem. Pro praktičtější výsledky jsem zvolil pro měděné a hliníkové trubky takové rozměry, které se běžně prodávají a používají v praxi. Maximální vnější průměr jsem zvolil $d_1 = 266$ mm a maximální tloušťku stěny $h = 3$ mm.

Ocel

Protože v praxi se používají všechny možné typy rozměrů a tloušťky stěn, rozhodl jsem se pro obecné rozměry, kde jsem si maximální vnější průměr trubky zvolil stejný jako u měděných a hliníkových trubek, a stejně jsem zvolil i tloušťky stěn.

5 Numerické řešení

Řešení rovnic uvedených v kapitole 3 bude provedeno numericky. Aby bylo možné provést simulace, musíme zvolit souřadnicový systém, vytvořit model a definovat jeho geometrické rozměry, zadat materiály a nastavit okrajové podmínky pro každé z řešených polí.

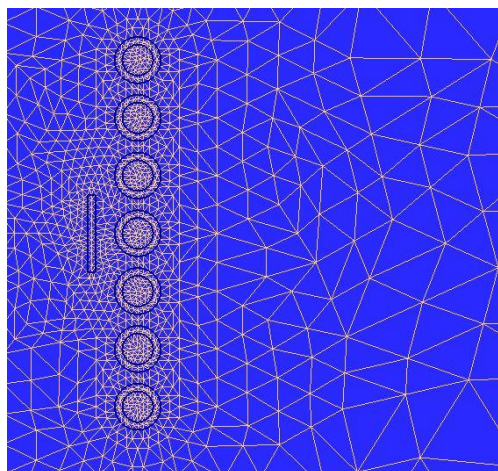
5.1 Agros2D

Všechny simulace jsou provedeny v programu Agros2D. Agros2D je multiplatformní počítačový program, který je určený pro řešení fyzikálních polí v kartézském nebo v osově symetrickém uspořádání.

Simulační program pro řešení příslušných parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D. Tato knihovna je založena na adaptivní metodě konečných prvků vyššího řádu přesnosti. Grafické prostředí je vytvořeno pomocí knihovny Qt a je plně multiplatformní. Pro vykreslování geometrie a vypočtených dat je použita knihovna OpenGL [17].

5.2 Numerický model

Řešená oblast se dělí na jednotlivé podoblasti. Podoblasti tvoří: vzduch a spojka a závitová cívka, které jsou představovány mezikružímí. Na *Obr. 5.1* je znázorněna tato síť pro magnetické pole. Výpočetní síť je zjemněna v podoblastech řešených materiálů [17].



Obr. 5.1 Výpočetní síť Agros2D

V případě matematického modelování termoelastické spojky je v návaznosti na sebe třeba řešit tři pole:

Elektromagnetické pole

Toto pole určuje šíření siločar elektromagnetického pole prostorem pro zvolené materiály, zadává se tedy permeabilita materiálu μ a vodivost materiálu γ . Hodnoty pro použité materiály jsou v *Tab. 5.1* [17].

Okrajová podmínka je formulována pro magnetický vektorový potenciál. Řešíme podle rovnice (3.1). Na hranici řešené oblasti platí okrajová podmínka, jež určena rovnicí pro vektorový magnetický potenciál $\mathbf{A} = 0$ [17].

Teplotní pole

Toto pole vypočítává šíření tepla v materiálu a jeho přestupu do okolí. Jako počáteční teplotu materiálu jsem nastavil pokojovou teplotu 20 °C a analýzu řešení jako přechodový stav. V tomto poli potřebujeme teplotní vodivost λ , hustotu materiálu ρ a měrné teplo c_p . Hodnoty pro použité materiály jsou v *Tab. 5.1* [17].

Pole je řešeno podle rovnice (3.6) Zadává se okrajová podmínka pro teplotní tok, která definuje přestup tepla do okolí. V podmínce se definuje okolní teplota $T_e = 293$ K, koeficient přestupu tepla $\alpha = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ a emisivita $\varepsilon = 0$ [17].

Termoplastické pole

Pro toto pole řeší program roztažnost materiálů v závislosti na teplotě. Zadávané konstanty jsou Youngův modul E , Poissinovo číslo ν a koeficient teplotní roztažnosti α . Hodnoty pro použité materiály jsou opět v *Tab. 5.1*. Síly působící na vloženou spojku jsem zanedbával [17].

K řešení využijeme rovnici (3.7) Pomocí okrajové podmínky si můžeme určit směr roztažení materiálu a jeho případná omezení z jedné strany. Tuto podmínku jsem zvolil jako volná-volná a díky tomu se materiál může roztahovat do všech stran [17].

Tab. 5.1 Použité materiály a jejich konstanty (převzato z [10], [11], [12])

	$\mu_r(-)$	$\gamma(\text{Sm}^{-1})$	$\lambda(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\rho(\text{kgm}^{-3})$	$c_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$	$E(\text{GPa})$	$\nu(-)$	$\alpha(\text{K}^{-1})$
Měď	0,99	$49,2 \cdot 10^6$	391	8920	383	130	0,33	$16,9 \cdot 10^{-6}$
Ocel	8000	$7,6 \cdot 10^6$	50	7850	460	210	0,31	$11 \cdot 10^{-6}$
Hliník	1	$30 \cdot 10^6$	210	2700	896	70	0,31	$23,4 \cdot 10^{-6}$
Vzduch	1	0	/	/	/	/	/	/

6 Simulace proveditelnosti jednotlivých způsobů

Cílem této kapitoly je teoreticky spočítat a simulovat vlastnosti a proveditelnost výše zmíněných navržených spojení.

6.1 Vložení trubek do sebe bez mechanických úprav

Nejprve jsem se rozhodl vyzkoušet, zda je možné spojovat trubky o stejných průměrech pouze pomocí zahřátí. Výsledky těchto simulací je teplotní rozdíl ΔT . Tato hodnota určuje, jaký teplotní rozdíl mezi sebou musí trubky mít, aby je bylo možné spojit. Simulaci jsem zaměřil na trubky s maximální tloušťkou stěny $h = 3 \text{ mm}$.

Měděné a hliníkové trubky

Simuloval jsem vždy pro trubku s největším průměrem pro danou tloušťku stěny, která se v praxi běžně používá.

Z Tab. 6.1 je jasně vidět že tento způsob je prakticky nepoužitelný. ΔT je příliš velký než, aby jej bylo možné dosáhnout. Tato metoda vychází nejlépe pro měděné trubky o vnějším průměru $d_1 = 266 \text{ mm}$, kde by měl stačit $\Delta T = 1387$, ale protože měď má bod tání $T = 1083 \text{ °C}$, tento bod nesmíme překročit. Znamenalo by to, že pokud bychom jednu trubku zahřáli na $T_1 = 1080 \text{ °C}$, kde by ještě teoreticky k tání nedošlo, tak by trubka, kterou bychom chtěli vložit, musela mít teplotu $T_2 = 1080 - 1387 = -307 \text{ °C}$. Z těchto důvodů jsem tuto metodu vyloučil a již se jí dále nezabýval. Teplota tání hliníku je $T = 585 \text{ °C}$ [10],[12].

Tab. 6.1 Potřebné teplotní rozdíly pro roztažení trubek

$h(\text{mm})$	Měď		Hliník	
	$d_1(\text{mm})$	ΔT	$d_1(\text{mm})$	ΔT
1	22	6207	32	3007
1,5	44,5	4407	40	3507
2	76	3407	90	2007
2,5	108	3007	35	7207
3	267	1387	120	2307

Ocelové trubky

Protože výběr rozměrů u ocelových trubek je daleko větší, simuloval jsem od jakého minimálního průměru d_1 by bylo možné tuto metodu využít. Teplota tání oceli je $T = 1539 \text{ }^\circ\text{C}$. Výsledkem simulace je tedy vnitřní průměr, pro který platí, že po zahřátí o $\Delta T = 1499$ vznikne $d_{0max} > d_1$ pro danou tloušťku stěny Tab. 6.2 [11].

Tab. 6.2 Vnitřní průměry ocelových trubek

$h(\text{mm})$	$d_0(\text{mm})$ Simulace	$d_0(\text{mm})$ Výpočet
1	126	118
1,5	178	177
2	238	236
2,5	296	295
3	356	354

Od těchto průměrů je tedy možné ocelové trubky používat pro tuto metodu.

Výpočet

Protože simulace není v praxi vždy nejrychlejší řešení, lze přibližné výsledky pro libovolný materiál spočítat pomocí vzorce pro délkovou teplotní roztažnost. Pokud si délku vztáhneme k průměru trubky, dostaneme vztah [15]:

$$d_1 = d_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (6.1)$$

$$d_0 + 2h = d_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (6.2)$$

$$d_0 = \left| \frac{2h}{\alpha\Delta T} \right| \quad (6.3)$$

Protože koeficient teplotní roztažnosti se se stoupající teplotou materiálu mění, nedostaneme zcela přesné výsledky, ale pro přibližnou hodnotu by měly stačit. V *Tab. 6.2* lze vidět porovnání mezi vypočítanou a naměřenou hodnotou pro ocel [15].

6.2 Spojení pomocí spojky a tvarovky

Tyto dva způsoby spojení jsou velice podobné, proto se následující kapitola zabývá oběma způsoby dohromady.

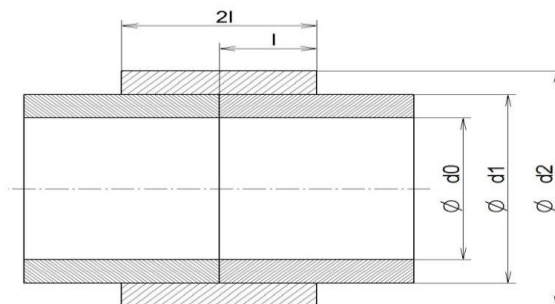
Simulace dokázaly, že je nutné trubku mechanicky upravit vytvořením tvarovky nebo spojky. Pro tento spoj platí dvě zásady:

1. Spoj musí být dostatečně pevný.
2. Musí být fyzicky a ekonomicky možné vytvořit potřebné rozměry tvarovky/spojky dostatečně přesně.

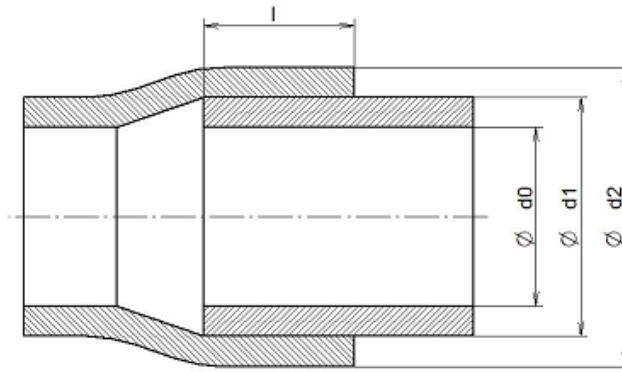
Pevnost spoje

Tento typ spojení se běžně používá ve strojním inženýrství, např. ke spojování ozubených kol osou apod. Jeho vlastnosti budou tedy velmi podobné. Z hlediska spojování potrubí je pro nás výhodné, že spoje tohoto typu se vyznačují zejména vysokou spolehlivostí, nepotřebují údržbu a jsou schopny snést velká střídavá i rázová zatížení [5].

Na *Obr 6.1* je vidět předpokládaný vnitřní průřez spoje za pomoci spojky. Pro účely výpočtu budeme předpokládat, že délka zasunutí je pro obě trubky stejná, a že mezi zasunutými trubkami nevznikne žádná mezera. Na *Obr 6.2* lze vidět průřez spojení v tvarovce.



Obr. 6.1 Řez spojení v místě spojky



Obr. 6.2 Řez spojení v místě tvarovky

Výpočet síly spojení

Následující vztahy se používají pro výpočty při vložení duté hřídele do vnější části (ozubené kolo). Pro výpočet působícího tlaku se použije vztah:

$$\Delta d = \frac{d_1 P (C_1 + C_2)}{E} \rightarrow P = \frac{E \Delta d}{d_1 (C_1 + C_2)} \quad (6.4)$$

Konstanty C_1 a C_2 se počítají ze vztahů:

$$C_1 = \frac{d_1^2 + d_0^2}{d_1^2 - d_0^2}, \quad C_2 = \frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \quad (6.5)$$

Síla, která díky tomuto tlaku působí se počítá ze vztahu:

$$F_r = SP = \pi d_1 l P \quad (6.6)$$

kde S je společný povrch na kterém dochází ke spojení, l je délka zasunutí trubky ve spojce nebo tvarovce. Poté co vezmeme v úvahu koeficient tření f_0 , který udává poměr mezi třecí silou a tlakovou silou, dostaneme výsledný vztah pro působící sílu [5]:

$$F = f_0 F_r \quad (6.7)$$

Pro zvolené materiály platí že: $f_{0\text{měď}} = 1$, $f_{0\text{hliník}} = 1,05$, $f_{0\text{ocel}} = 0,78$

Kromě materiálových vlastností můžeme výslednou sílu ovlivnit hlavně volbou přesahu Δd a délky zasunutí l .

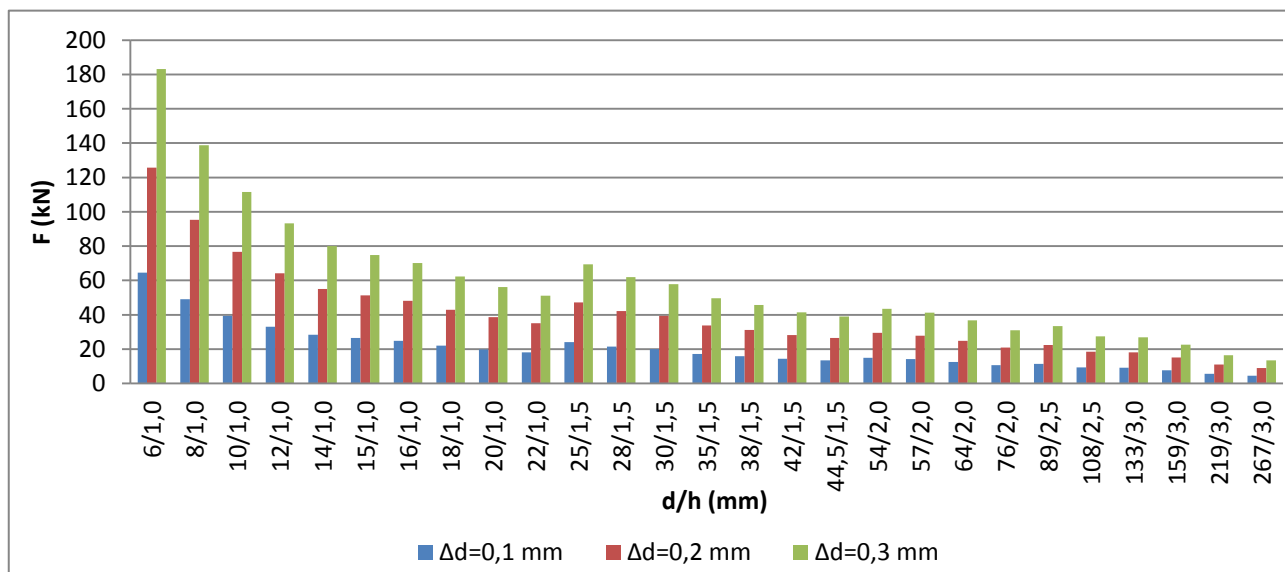
Volba přesahu

Protože délku zasunutí l si v rozumném rozsahu můžeme zvolit téměř libovolně, je důležité určit si přesah Δd , aby byla splněna druhá podmínka a bylo možné tvarovku nebo spojku vyrobit dostatečně přesně. Také o tento přesah je nutné roztáhnout vnitřní průměr spojky/tvarovky. Platí, že čím větší přesah, tím větší bude potřeba materiál zahřívat a tím více se bude materiál namáhat. Z těchto důvodů jsem zvolil minimální přesah větší nebo roven 0,1mm.

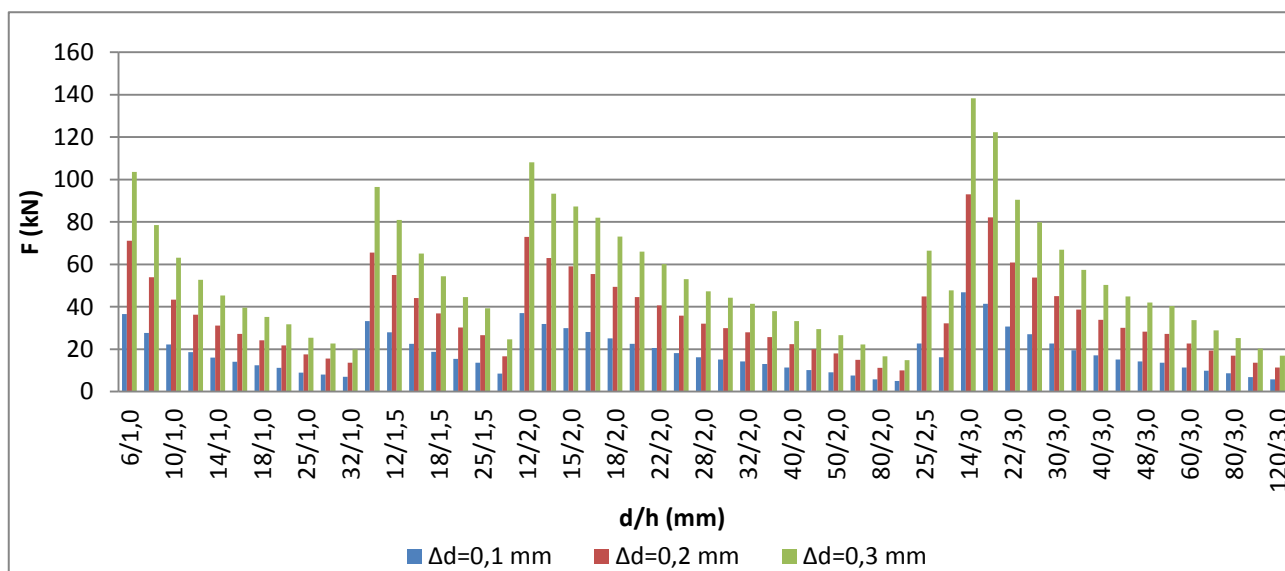
Zvolené přesahy jsou $\Delta d = 0,1 \text{ mm}$, $\Delta d = 0,2 \text{ mm}$ a $\Delta d = 0,3 \text{ mm}$. Menší přesahy jsem nebral v úvahu, protože by bylo velmi obtížné vyrobit je s dostatečnou přesností na setiny milimetru. Tyto výpočty jsou spíše orientační a v praxi bude hrát roli povrch materiálu, tolerance při výrobě a mnoho dalších faktorů. Výpočty by ale měly být natolik přesné, aby dokázaly, že přesah větší nebo roven 0,1 mm je pro měď a hliník dostačující k vytvoření pevného spoje s reálně dosažitelnou délkou zasunutí l .

Výsledné síly pro měď a hliník

Pro měď a hliník jsem počítal rozměry pro nejčastěji používané trubky s danou tloušťkou stěny. Z grafů na *Obr 6.3 a Obr 6.4* je patrné, že síla klesá v závislosti na poloměru trubky. I pro největší průměry trubek je ale i při nejmenším přesahu síla stále větší než 4kN. Proto si myslím, že přesahy jsou dostačující a spoj bude mít spolehlivou pevnost. Délka zasunutí je zde zvolena $l = 1$ cm.



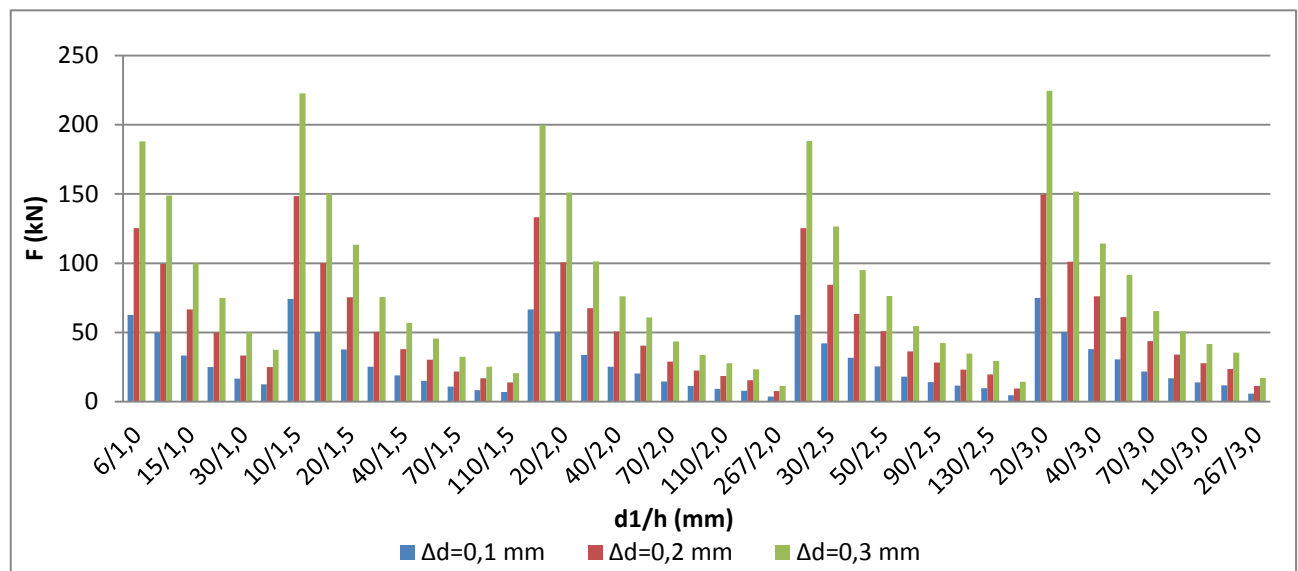
Obr. 6.3 Síla v závislosti na rozměrech měděné spojky (hodnoty v příloze A)



Obr. 6.4 Síla v závislosti na rozměrech hliníkové spojky (hodnoty v příloze B)

Výsledné síly pro ocel

Zvolil jsem nejpoužívanější rozměry ocelových trubek pro danou tloušťku stěny. Z grafu na Obr 6.5 lze vidět, že se zvětšujícím se průměrem síla prudce klesá, ale tomu lze snadno předejít například tím, že si zvolíme větší délku zasunutí l , a tím sílu zvětšíme. Zvolené přesahy jsou tedy dostačující i pro ocel. Délka zasunutí je zde zvolena $l = 1$ cm.



Obr. 6.5 Síla v závislosti na rozměrech ocelové spojky (hodnoty v příloze C)

Teplotní rozdíl spojka/tvarovka

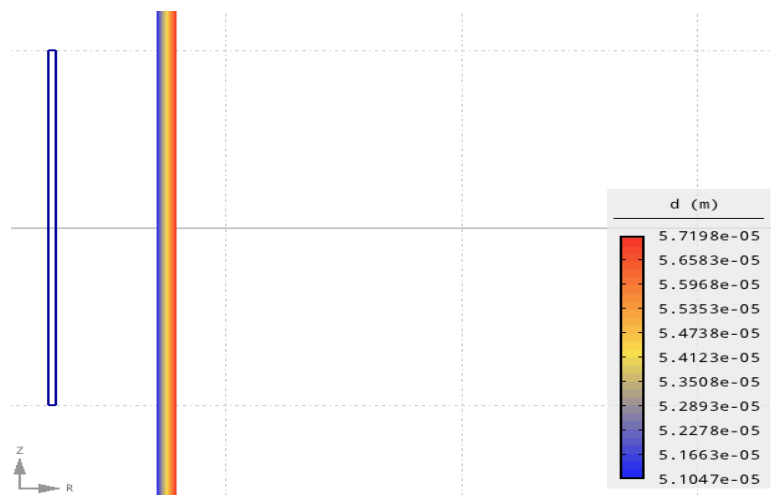
Protože už jsou nám známy minimální přesahy, je potřeba zjistit, jaký je potřebný teplotní rozdíl ΔT , který budeme potřebovat, aby se tvarovka/spojka roztáhla o přesah Δd a bylo do ní možné zasunout trubku.

Aby simulace měla smysl a byla v praxi použitelná, musíme vzít v úvahu teploty, při kterých materiál taje Tab. 6.3. Protože chceme, aby bylo možné indukční ohřev použít ve venkovních podmínkách, musíme vzít v úvahu i teplotu okolí. Pro naše podmínky může nejvyšší teplota dosahovat cca $T_v = 40$ °C. Proto potřebujeme maximálně takový teplotní rozdíl ΔT_{max} , pro který bude platit, že $\Delta T + T_v < T$. V tabulce jsou konkrétní hodnoty pro zvolené materiály.

Tab. 6.3 Maximální dovolené teplotní rozdíly

	$T(^{\circ}\text{C})$	ΔT_{max}
Měď	1083	1043
Hliník	585	545
Ocel	1539	1499

Pomocí strukturální analýzy pole lze vyhodnotit, o kolik a jakým směrem se předmět rozšíří nebo smrští v závislosti na teplotě viz Obr 5.5. V Tab. 5.1 je vidět, jaké materiálové vlastnosti jsem zadával pro konkrétní materiál.



Obr. 6.5 Model roztažnosti materiálu v Agros2D

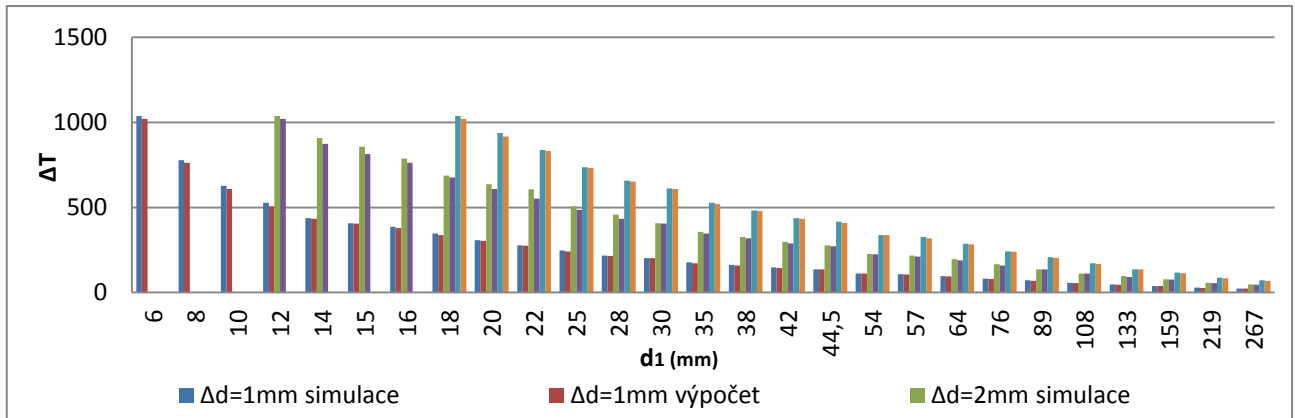
Na Obr. 6.5 je vidět konkrétní příklad takovéto simulace. Posun naznačený barevně je pouze orientační, velikost reálného posunu je dána barevnou stupnicí. Simulace je pro spojku o vnitřním průměru d_{1min} a chceme do ní vložit trubku o vnějším průměru d_1 . Plánovaný přesah je $\Delta d = 0,1$ mm, takže před zahřátím platí, že $d_{1min} + \Delta d = d_1$. Po zahřátí o teplotní rozdíl ΔT , pro který platí, že $\Delta T < \Delta T_{max}$ se pak vnitřní poloměr spojky roztáhne o $\Delta d_v = 2 \cdot 0,51$ mm. Protože nyní platí, že $\Delta d_v > \Delta d$, mělo by být možné trubku do spojky zasunout.

Tab. 6.4 Minimální vnitřní průměry spojek

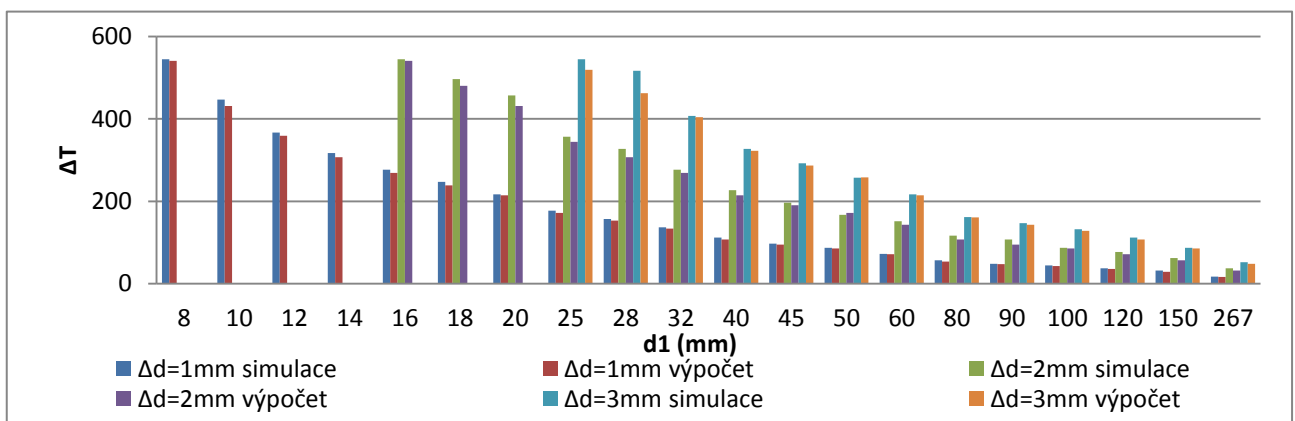
	$\Delta d = 0,1$ mm		$\Delta d = 0,2$ mm		$\Delta d = 0,3$ mm	
	d_{1min} (mm)	d_1 (mm)	d_{1min} (mm)	d_1 (mm)	d_{1min} (mm)	d_1 (mm)
Měď	5,9	6	12,8	13	17,7	18
Hliník	7,9	8	15,8	16	24,7	25
Ocel	6,9	7	14,8	15	19,7	20

V Tab. 6.4 jsou nasimulované minimální hodnoty průměrů trubek, pro které se při teplotním

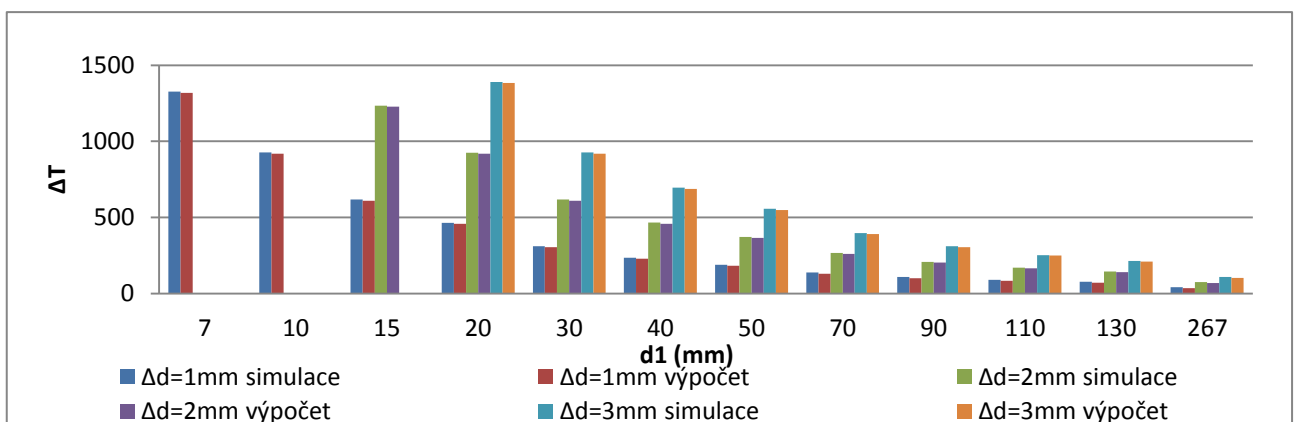
rozdílu, který je $\Delta T < \Delta T_{max}$, roztáhnou o hodnotu potřebnou k zasunutí. Protože tloušťka stěny trubky h nehraje roli, můžeme říci, že tuto metodu můžeme použít pro libovolnou trubku, která má d_1 větší nebo rovno než je hodnota uvedena v *Tab. 6.4* pro daný přesah.



Obr. 6.6 Graf potřebné teploty pro roztažení měděných spojek (hodnoty v příloze A)



Obr. 6.7 Graf potřebné teploty pro roztažení hliníkových spojek (hodnoty v příloze D)



Obr. 6.8 Graf potřebné teploty pro roztažení ocelových spojek (hodnoty v příloze E)

Z grafů na *Obr 6.6*, *Obr 6.7* a *Obr 6.8* jsou vidět minimální potřebné teplotní rozdíly ΔT , které potřebujeme při určitém přesahu, aby se spojka/tvarovka o daném průměru dostatečně roztáhla. Roztažnost vnitřního průměru nezávisí na velikosti vnějšího průměru nebo na délce. To je pro nás velmi výhodné, protože díky tomu nemusíme při roztažnosti řešit tloušťku stěny trubky.

Další výhodou je, že se při zahřátí trubky roztáhne trubka i spojka v místě spoje stejně, takže spoj bude mít stále stejnou pevnost, která nebude závislá na teplotě.

Výpočet teplotního rozdílu

Jak již bylo zmíněno dříve, simulace není v praxi vždy nejrychlejší řešení, proto i v tomto případě můžeme použít vztah pro délkovou roztažnost materiálů a dopočítat si přibližný potřebný teplotní rozdíl ΔT pro libovolně zvolenou trubku ze vztahu:

$$d_1 = d_{1min}(1 + \alpha\Delta T) \quad (6.8)$$

$$\Delta T = \frac{\frac{d_1}{d_{1min}} - 1}{\alpha} \quad (6.9)$$

V grafech na *Obr.6.6*, *Obr. 6.7* a *Obr. 6.8* je možno porovnat vypočtené hodnoty s nasimulovanými. Je vidět že se hodnoty liší, ale jako přibližný výpočet jsou dostačující [15].

7 Spojka v indukčním ohřevu

Cílem této kapitoly je na základě předchozích poznatků navrhnout a nasimulovat indukční ohřev pro zvolené materiály.

7.1 Vsázka

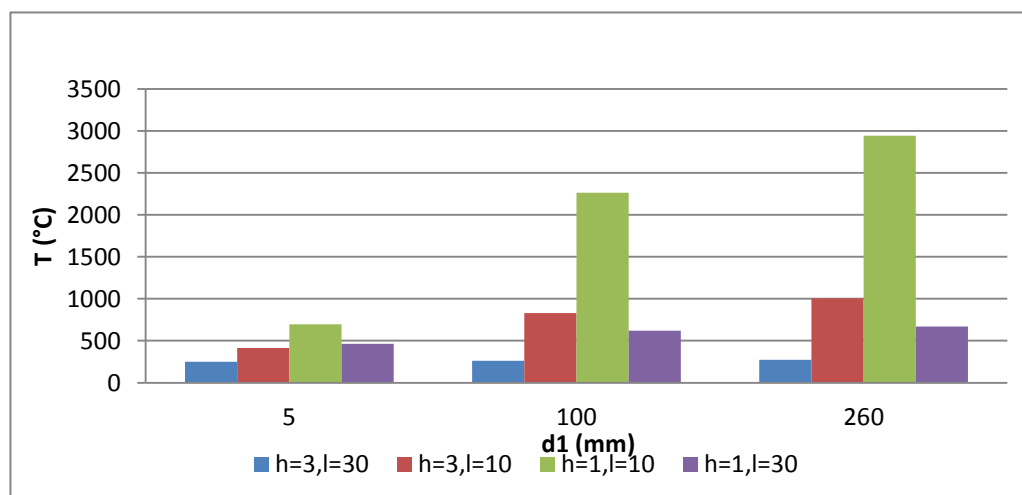
Vsázka je předmět, který je vložený do elektromagnetického pole cívky. V našem případě se jedná o spojku nebo o trubku, která je zakončena tvarovkou [4].

Vliv rozměrů vsázky na rychlost ohřevu

Protože účinnost a rychlost zahřátí je přímo úměrná rozměrům spojky, rozhodl jsem se nejprve simulovat tuto závislost. Simuloval jsem tedy spojku o stejném materiálu s měnící se tloušťkou stěny h a délkou l vloženou do cívky, kterou protéká harmonicky proměnný proud. Tyto změny jsem simuloval pro tři různé průměry spojky. Čas vložení byl pro všechny simulace stejný, stejně tak proud procházející cívkou. Z grafu na *Obr 7.1* jsou tedy vidět tyto závislosti:

1. Se **zvyšujícím** se průměrem se zvyšuje rychlost zahřátí
2. Se **snížujícím** se tloušťkou stěny se zvyšuje rychlost zahřátí
3. Se **snížujícím** se délkou spojky se zvyšuje rychlost zahřátí

Dále je vidět že rychlost zahřátí nejvíce ovlivňuje tloušťka stěny h .



Obr. 7.1 Závislost teploty na rozměrech spojky

Na základě předchozích výpočtů a simulací nyní můžeme stanovit ideální rozměry spojky pro konkrétní průměry používaných trubek.

Tloušťka stěny

Určil jsem si, že tloušťka stěny spojky h bude stejná jako tloušťka stěny trubky, kterou spojka spojuje. Toto jsem si určil z důvodů, že je možné roztahovat trubky expandérem a při tomto procesu zůstane zachovaná tloušťka stěny. Z grafu na *Obr 7.1* také vyplývá, že čím menší tloušťka stěny, tím rychleji se materiál zahřeje, a zároveň čím menší průměr spojky d_1 , tím pomaleji se materiál zahřeje. Z údajů v grafu na *Obr 6.6*, *Obr 6.7* a *Obr 6.8* je vidět, že největší teplotní rozdíl potřebujeme právě pro spojky o nejmenších průměrech, které se nejčastěji používají s tloušťkou stěny $h = 1$ mm.

Zvolený přesah

Ideální přesah jsem volil hlavně v závislosti na potřebném teplotním rozdílu Δt , který je potřeba pro roztažení spojky. Při větším Δd je výsledná síla větší, ale zároveň musíme spojku více zahřívat, abychom docílili roztažení. Snažil jsem se tedy najít kompromis mezi údaji z grafů na *Obr 6.3*, *Obr 6.4* a *Obr 6.5* a jejich potřebným teplotním rozdílem z grafů na *Obr 6.6*, *Obr 6.7* a *Obr 6.8*

Délka zasunutí

Z kapitoly 5.2 z rovnice (6.6) vyplývá, že kromě zvoleného přesahu můžeme výslednou sílu ovlivňovat délkou zasunutí. Platí, že se snižující se délkou zasunutí se úměrně zmenšuje síla a z údajů v grafu na *Obr 7.1* platí, že se zmenšující se délkou spojky se zvyšuje rychlost zahřátí. Proto je pro nás výhodné si zvolit kratší spojky pro menší průměry a naopak delší spojky pro větší průměry.

Tvarovka

Pro tloušťku stěny a pro průměr platí stejné souvislosti jako pro spojku, ale protože je tvarovka umístěna na trubce, která může mít teoreticky libovolnou délku, platí, že čím je trubka delší, tím pomaleji se tvarovka ohřeje.

Zvolené hodnoty

Z hlediska praxe a výroby by bylo velmi výhodné, aby bylo možné použít indukční zařízení pro více typů materiálů. Z těchto důvodů jsem pro všechny tři materiály zvolil stejný přesah a stejnou délku zasunutí pro stejné průměry trubek.

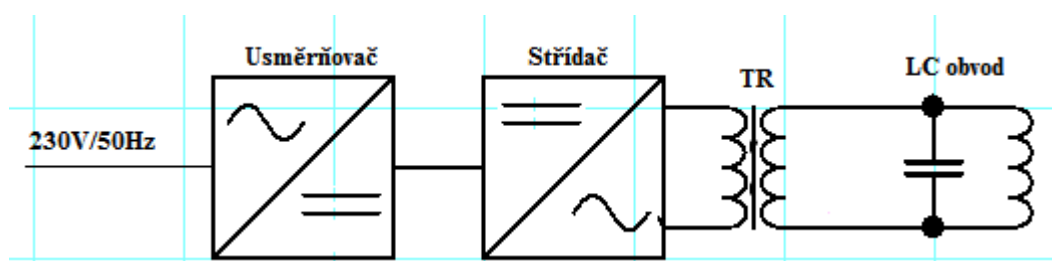
V Tab. 7.1 lze vidět výsledné hodnoty. Protože síla spoje se při stejné délce zasunutí zmenšuje s průměrem, udává síla F v tabulce vždy nejmenší sílu, která nastane pro největší průměr při zadané délce l a tloušťce stěny. ΔT udává v jakém rozmezí teplotních přesahů se budeme pro zadaný rozsah pohybovat.

Tab. 7.1 Minimální síly a rozmezí teplotních rozdílů

d_1 (mm)	Δd (mm)	l (mm)	materiál	h (mm)			ΔT
				1	2	3	
				F (kN)			
6 - 25	0,1	5	Měď	7,9	16,1	23,9	1037 - 247
			Hliník	4,5	9,1	13,5	545 - 177
			Ocel	10,1	20,2	30,1	1327 - 372
26 - 45	0,2	10	Měď	17,2	35,3	53,3	457 - 277
			Hliník	9,7	19,9	30,2	327 - 197
			Ocel	21,6	44,5	67,2	740 - 415
46 - 266	0,3	15	Měď	6,3	13,2	20,1	337 - 72
			Hliník	3,6	7,5	11,4	257 - 52
			Ocel	7,9	16,7	25,3	620 - 108

7.2 Indukční zařízení a jeho nastavení

Obecně by se dalo říci, že indukční zařízení pro domácí použití se skládá z usměrňovače, střídače, oddělovacího transformátoru a LC obvodu. Zjednodušené blokové schéma je na Obr. 7.2[16].



Obr. 7.2 Blokové schéma indukčního zařízení

- **Usměrňovač:** Slouží k usměrnění napětí sítě.
- **Střídač:** Pomocí výkonových součástek mění usměrněné napětí na střídavé o požadované frekvenci. Protože je nutné frekvenci měnit, kvůli požadavkům na rezonanci je nutné, aby byl plynule nastavitelný.
- **TR:** Jedná se o výkonový oddělovací transformátor, který zajišťuje transformaci nízkých proudů od střídače na vysoké proudy protékající LC obvodem.
- **LC obvod:** Paralelní rezonanční LC obvod, kde C je pracovní kondenzátor a L je pracovní cívka do které se vkládá vsázka.

Účinnost indukčního zařízení

Abychom spojku ohřáli v rozumném čase a s maximálním využitím energie, je pro nás důležitá účinnost η . Tu lze ovlivnit dvěma faktory. První je volba pracovní frekvence a s tím související hloubka vniku a druhým je volba poměru velikosti mezi vnitřním průměrem cívky D a vnějším průměrem vsázky d_2 . Platí tedy [4], [9]:

1. Účinnost klesá se zvětšením poměru $\frac{D}{d_2}$.
2. Účinnost roste se zvětšením poměru $\frac{d_2}{\delta}$.
3. Účinnost je závislá na materiálu a mění se s jeho teplotou.

Pracovní cívka

Protože platí, že se zmenšením poměru mezi vnitřním průměrem cívky a vnějším průměrem vsázky dosahujeme lepší účinnosti, bylo by nejvýhodnější použít pro každý rozměr spojky takovou cívku, kde by se tento poměr blížil k 1. Toto řešení by ovšem v praxi bylo velmi neekonomické a bylo by použitelné, pouze pokud by zákazník pracoval s jedním rozměrem trubek a nevyžadoval by všestrannost.

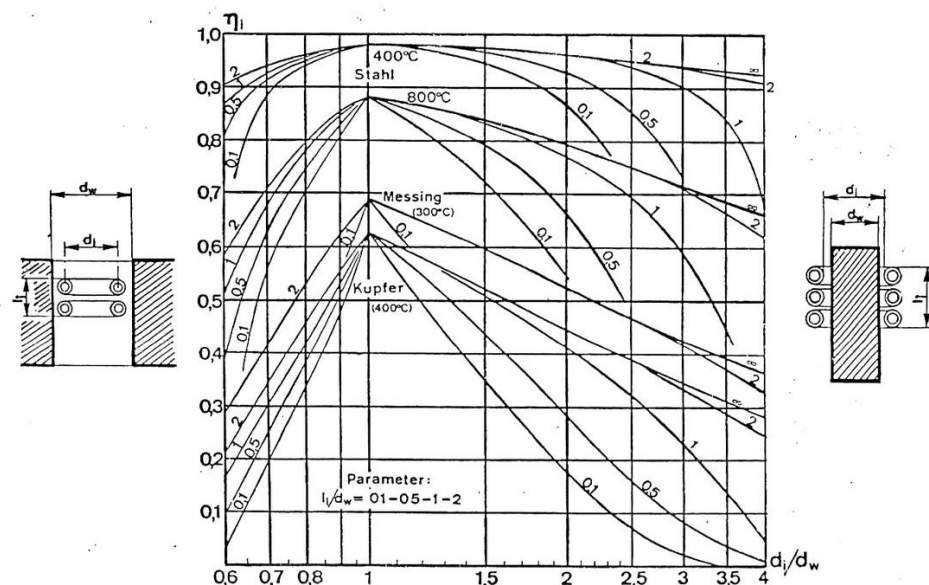
Protože maximální účinnost, kterou lze dosáhnout u konkrétního materiálu, je přímo závislá na teplotě materiálu, můžeme z *Tab. 7.2* vyčíst hodnoty pro zvolené materiály. Lze vidět, že nejhorší účinnosti bude vždy dosahovat měděná vsázka a při běžných teplotách nepřekročí její účinnost $\eta = 50 \%$ [4].

Tab.7.2 Účinnost materiálů (převzato z [4])

	$T(^{\circ}\text{C})$	$\eta(\%)$
Měď	20	50
	1100	77
Hliník	20	56
	660	77
Ocel	20	93
	800	88

Rozměry cívky

Je pro nás důležité zvolit si takové rozměry, cívky aby byla co nejuniverzálnější a bylo by možné ji použít pro co největší možný rozsah rozměrů spojek. Z Obr 7.3 lze vidět závislosti účinnosti na rozměrech cívky při měděné (kupfer) a ocelové (stahl) vsázce. Závislost hliníku bohužel není k dispozici, ale protože má téměř shodnou účinnost s mědí, nebudeme ji potřebovat [9].



Obr. 7.3 Závislost účinnosti ohřevu na rozměrech cívky (převzato z [9])

Průměr cívky

Závislost mezi vnitřním průměrem cívky D a vnějším průměrem vsázky d_2 je na Obr 7.3. Rozhodl jsem se simulovat pro poměr - $\frac{D}{d_2} = 2,5$. V Tab. 6.4 simulace ukázaly, že nejmenší poloměr trubky d_1 pro který můžeme použít tuto metodu, je pro měděnou trubku, kde

$d_1 = 6$ mm. Pro tuto trubku platí, že vnější poloměr spojky je $d_2 = 7,9$ mm. Tuto hodnotu jsme použil jako počáteční pro výpočet průměrů cívky D [9].

Z grafu na *Obr 7.3* je vidět, že vsázka může být umístěna uvnitř i vně cívky. Vně cívky však její účinnost rychle klesá a přinášelo by to konstrukční nevýhody při vyvedení vodičů od cívky ke zdroji, proto jsem se rozhodl simulovat pouze vsázku umístěnou uvnitř.

Délka cívky

Účinnost je také velmi ovlivněna poměrem mezi délkou cívky l_c a vnějším průměrem vsázky d_2 . Z grafu na *Obr 6.3* je vidět, že se snižujícím se poměrem $\frac{l_c}{d_2}$ prudčeji klesá účinnost. Výhodné by bylo zvolit si, že $\frac{l_c}{d_2} = 2$, ale tento poměr by zapříčinil, že pro spojky o velkých poloměrech bychom potřebovali obrovské cívky [9].

Protože spojky o velkých průměrech nepotřebujeme zahřát tolik jako spojky o malých průměrech, rozhodl jsem se pro průměry cívky do $D = 45$ mm zvolit poměry $\frac{l_c}{d_2} = 2$. Pro $D = 45 - 100$ mm poměr $\frac{l_c}{d_2} = 1$ a pro

$D = 100 - 200$ mm poměr $\frac{l_c}{d_2} = 0,5$ a pro $D \geq 200$ mm poměr $\frac{l_c}{d_2} = 0,1$.

Volba proudu

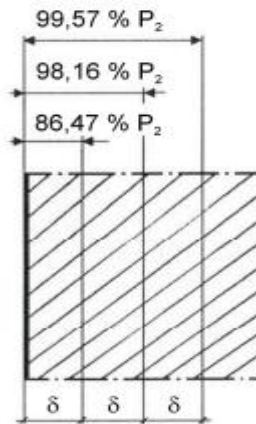
Díky tomu, že LC obvod pracuje v rezonanci je budící proud, který protéká obvodem zařízení, mnohem menší než proud který protéká cívkou. Lze dosahovat hodnot desítek až stovek ampér. Zvolil jsem si tedy proud $I = 300$ A [16].

Provedení cívky

Protože cívkou prochází velké proudy, používá se jako vodič cívky měděná trubka, uvnitř které proudí tekutina a obstarává tak chlazení. Pro simulace jsem zvolil takový případ, že je cívka vyrobena z měděné trubky o vnějším průměru $d_1 = 6$ mm a vnitřním průměru $d_0 = 4$ mm.

Hloubka vniku

V indukčním ohřevu se vsázka nezahřívá rovnoměrně, ale od povrchu na který dopadá elektromagnetické vlnění od cívky. Toto vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Z tohoto důvodu se zavádí hloubka vniku δ . Tato hodnota udává, že ve vzdálenosti δ od povrchu vsázky se vyvíjí 86,47 % tepla. Ve vzdálenosti 2δ se vyvíjí 98,16 % a ve vzdálenosti 3δ vzniká 99,57 % . Viz *Obr 7.4* [4].



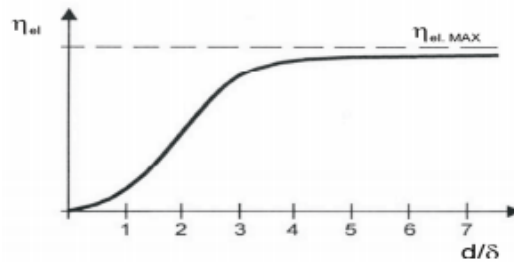
Obr. 7.4 Množství tepla vytvořené v materiálu podle hloubky vniku (převzato z [4])

Abychom si mohli určit vhodnou pracovní frekvenci, musíme si určit vhodnou hloubku vniku. Hloubka vniku se běžně počítá ze vztahu [4]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (7.1)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že hloubka vniku je závislá na materiálových vlastnostech a na frekvenci, ne však na rozměrech materiálu. Protože vlastnosti materiálu neovlivníme, můžeme si hloubku vniku upravovat hlavně za pomoci frekvence. Platí, že čím vyšší frekvence - tím menší δ [4].

Dále je pro volbu velikosti hloubky vniku důležité brát v úvahu její vliv na účinnost. Na *Obr 7.5* lze vidět, že účinnost se zvyšuje se zvyšujícím se poměrem $\frac{d_1}{\delta}$. Je tedy pro nás důležité zvolit si δ dostatečně malou, aby platilo že $\frac{d_1}{\delta} \geq 5$ [4].



Obr. 7.5 Závislost účinnosti na poměru mezi průměrem vsázky a hloubkou vniku (převzato z [4])

Volba hloubky vniku

Nejvýhodnější ohřev pro naši aplikaci by byl takový, aby se spojka ohřála rovnoměrně, aby nedocházelo k přehřátí povrchu. Z Obr. 6.4 lze vidět, že téměř 100% tepla se vytvoří ve vzdálenosti 3δ od povrchu vsázky, proto by pro nás bylo ideální zvolit si takovou pracovní frekvenci, aby platilo, že tloušťka stěny $h = 3\delta$. Znamená to, že téměř 100% tepla se bude tvořit po celém průřezu spojky, nebude docházet k přehřátí povrchu a materiál se bude zahřívat rovnoměrně. Díky tomu se i spojka rovnoměrně roztáhne. Ze vztahu (7.1) si vyjádříme rovnici pro pracovní frekvenci [4]:

$$f = \frac{\rho}{\delta^2 \pi \mu_0 \mu_r} \quad (6.2)$$

kde rezistivita $\rho_{m\acute{e}d}$ = 0,0203 $\mu\Omega\text{m}$, $\rho_{hliník}$ = 0,0333 $\mu\Omega\text{m}$, ρ_{ocel} = 0,1315 $\mu\Omega\text{m}$ [10],[11],[12]

Při takto zvolené hloubce vniku bude vždy platit že $\frac{d_1}{\delta} \geq 5$ a účinnost se bude blížit ke svému maximu. V Tab. 7.3 jsou hodnoty vypočítané frekvence pro zvolené materiály.

Tab. 7.3 Frekvence pro použité hloubky vniku

$h(\text{mm})$	$\delta(\text{mm})$	Měď $f(\text{Hz})$	Hliník $f(\text{Hz})$	Ocel $f(\text{Hz})$
1	0,33	47300	77573	38
1,5	0,5	20438	33790	16
2	0,66	11613	19393	9,5
2,5	0,83	7363	12262	6
3	1	5151	8447	4

Zvolené hodnoty pro simulace

Protože indukční ohřev je rezonanční obvod, bylo by nevýhodné volit pro každý materiál různou frekvenci, protože by to pro nás znamenalo mít pro každý materiál odpovídající kapacitu.

Protože pro ocel, díky její vysoké permeabilitě vychází hodnoty pro frekvenci příliš malé, kvůli čemuž by docházelo k pouze minimální změně a indukovaný proud by tak byl minimální, rozhodl jsem se zvolit frekvenci jako střední hodnotu mezi ideální frekvencí pro měď a hliník v závislosti na tom, jaká tloušťka stěny se nejčastěji používá při daném průměru trubky. V *Tab. 7.4* jsou uvedeny hodnoty, pro které jsem simuloval.

Tab. 7.4 Rozměry použitých cívek a jejich frekvence

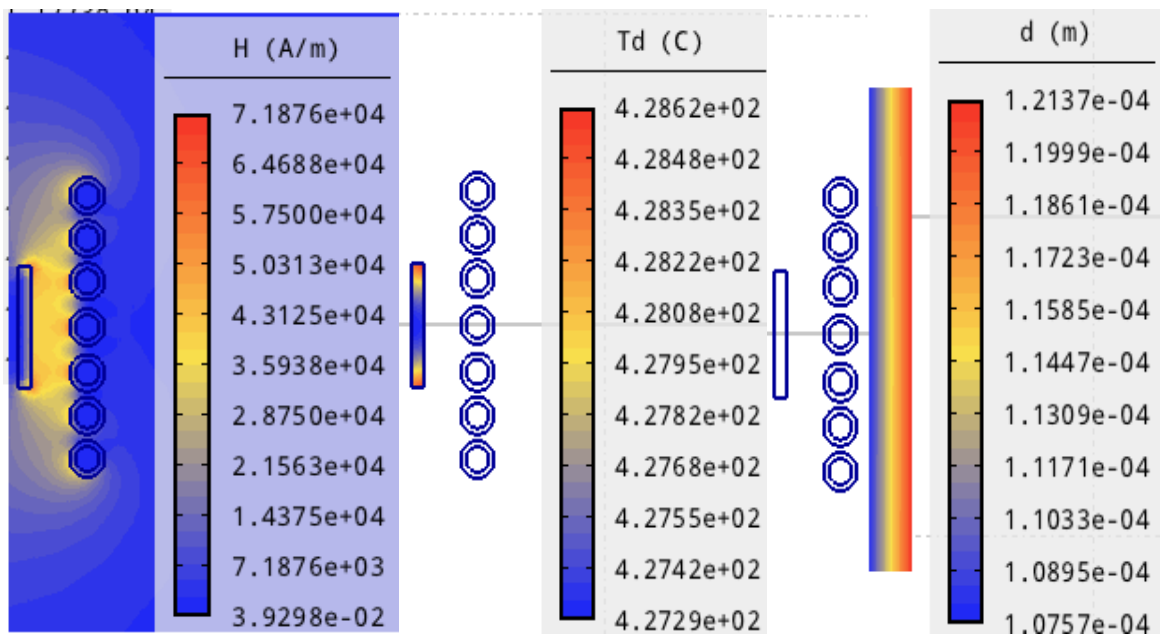
$D(\text{mm})$	$l_c(\text{mm})$	$f(\text{kHz})$
20	40	62,4
49	49	15,5
123	62	6,8
273	27	6,8

7.3 Simulace indukčního ohřevu

Simuloval jsem tedy pro tři zvolené materiály spojky o různých průměrech a tloušťkách stěn.

Příklad simulace

Jako počáteční teplotu jsem si zvolil pokojovou teplotu $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledkem simulací je čas, který je potřeba k ohřátí spojky na minimální teplotu potřebnou k jejímu roztažení. Jako maximální čas jsem si zvolil $t = 200\text{ s}$. Pokud se spojka zahřívala delší dobu, už jsem jí do výsledků neuváděl. Na *Obr 7.6* je znázorněna spojka ležící v magnetickém poli cívky, na *Obr. 7.7* je rozložení tepla, které vznikne díky vířivým proudům a na *Obr 7.8* je znázorněno nasimulované roztažení. Znázorněná měděná spojka o $d_{1min} = 31,8\text{ mm}$, se z počáteční teploty $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zahřála o teplotu vyšší než je vypočítaný teplotní rozdíl $\Delta T = 378$ a dostali jsme tak spojku o vnitřním průměru $d_{1max} = 2d + d_{1min} = 2 \cdot 0,107 + 31,8 = 32,015\text{ mm}$ a mělo by být možné do ní zasunout trubku o vnějším průměru $d_1 = 32\text{ mm}$.



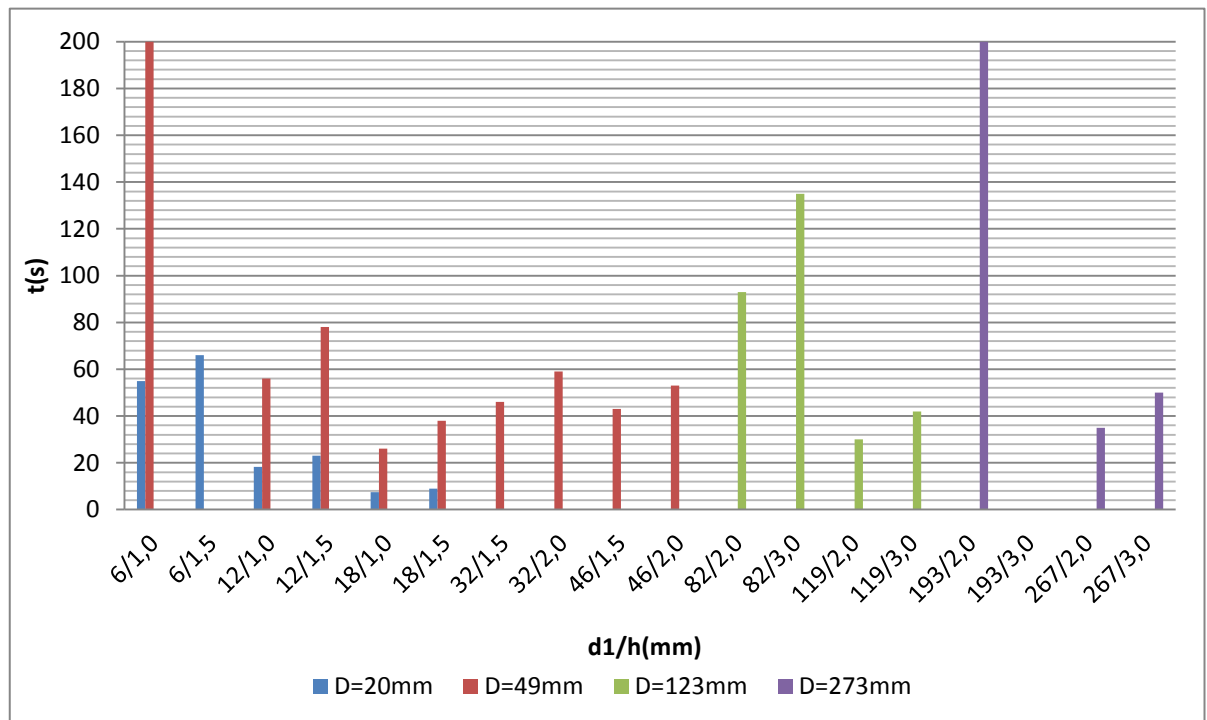
Obr. 7.6 Elektromagnetické pole

Obr. 7.7 Rozložení tepla

Obr. 7.8 Strukturální analýza

Rychlost ohřevu měděných spojek

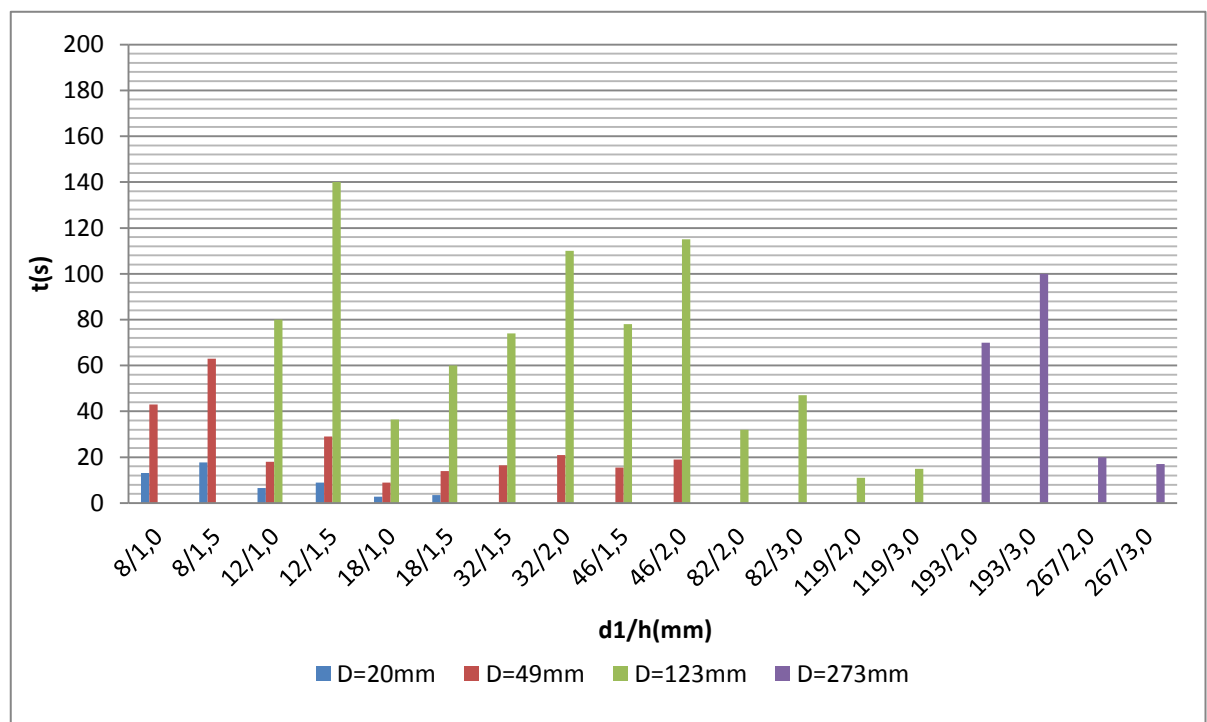
Měděné vsázky dosahují nejhorší účinnosti a simulace to potvrzují. Z grafu na *Obr. 6.9* lze vidět, že ve srovnání s ocelí a hliníkem je potřeba více času na to, aby se spojka ohřála na minimální potřebnou teplotu, ale zároveň se i při nejvyšší frekvenci $f = 62,4$ kHz spojka prohřívá rovnoměrně s maximálním rozdílem mezi nejteplejší a nejstudenější částí ± 1 °C. Pro spojky větších průměrů je z *Obr. 7.9* vidět, že je zapotřebí velkých časů k jejich prohřátí.



Obr. 7.9 Čas potřebný k ohřátí měděných spojek (hodnoty v příloze F)

Rychlost ohřevu hliníkových spojek

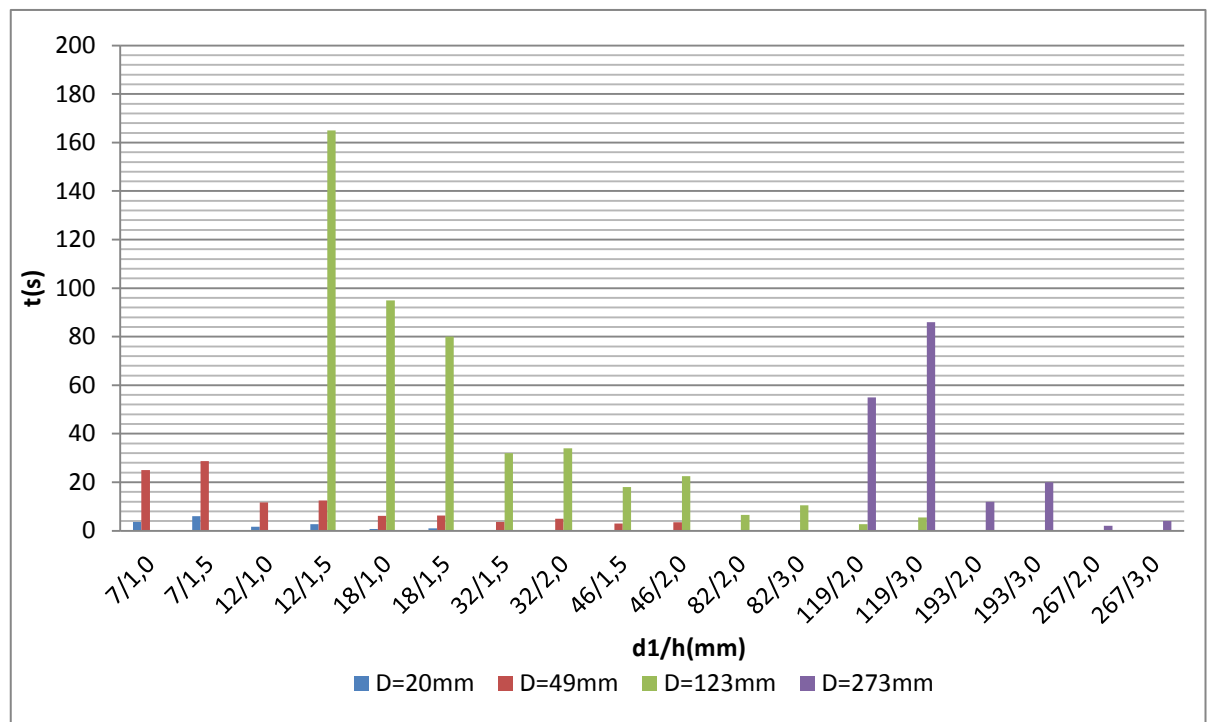
Pro ohřátí spojky z hliníku potřebujeme kratší časy než pro spojky z mědi a také můžeme z grafu na *Obr 7.10* vidět, že zvolený poměr $\frac{D}{d_2} = 2,5$ je pro hliník vhodnější než pro měď, protože můžeme ohřívat více spojek v rozumných časech a zařízení by tak bylo levnější. Teplotní rozdíl, který vznikl mezi nejstudenější a nejteplejší částí spojky, byl při těchto frekvencích rovněž zanedbatelný a mohli bychom v případě potřeby frekvenci navýšit a tím zvýšit rychlost ohřevu.



Obr. 7.10 Čas potřebný k ohřátí hliníkových spojek(hodnoty v příloze G)

Rychlost ohřevu ocelových spojek

V grafu na *Obr 7.11* lze vidět, že ocelová spojka je z hlediska rychlosti prohřátí nejvýhodnější. Pro všechny spojky, pro které platilo, že $\frac{D}{d_2} \leq 2,5$ nepřekročila doba potřebná k zahřátí 25 s. Teplotní rozdíly, které vznikaly při použitých frekvencích, nejsou zanedbatelné. V případě, že byla spojka umístěna v těsné blízkosti od vnitřního okraje cívky, dosahovaly hodnot až 167 °C. Při větší vzdálenosti mezi okrajem cívky a spojky se tyto rozdíly zmenšovaly a pro průměry spojek od $d_{1min} \geq 82$ mm dosahovaly zanedbatelných hodnot, protože jsme používali nízké frekvence, které jsou pro ocelové vsázky vhodnější. U cívek, kde jsou použity vyšší frekvence, dosahovaly teplotní rozdíly až ± 50 °C, z důvodu velmi rychlého ohřátí materiálu. Proto si nemyslím, že by bylo vhodné používat pro ocel vyšší frekvence.



Obr. 7.11 Čas potřebný k ohřátí ocelových spojek (hodnoty v příloze H)

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval možnostmi využít indukční ohřev při spojování kovových potrubí pomocí spojky.

V úvodní části práce je popsána teorie týkající se spojování potrubí, používaných materiálů a indukčního ohřevu.

V šesté kapitole jsem provedl návrhy spojení a ukázalo se, že by toto spojení mělo mít dobrou pevnost, která lze díky možnosti volby přesahu Δd a délky zasunutí l spočítat a určit takové rozměry spojky, jež by byly nejvhodnější pro požadovanou aplikaci.

Simulace teplot, které by spojka potřebovala, aby se roztáhla o požadovanou vzdálenost ukázaly, že při přesahu $\Delta d = 0,1$ mm by tato metoda byla použitelná pro průměry trubek: u měděných $d_1 = 6$ mm, u hliníkových $d_1 = 8$ mm a u ocelových $d_1 = 7$ mm. Z toho vyplývá, že je tuto metodu možné použít téměř pro všechny rozměry trubek.

V sedmé kapitole jsem simuloval zahřátí těchto spojek v indukčním zařízení. Výsledky těchto simulací ukazují, že pro spojky z dobře vodivých materiálů (měď, hliník) bychom potřebovali indukční zařízení s vysokou pracovní frekvencí desítky až stovky kHz, abychom dosáhli časů, které by byly použitelné v praxi. Pro ocelové trubky simulace ukazují, že vysoké frekvence ohřejí spojku velmi rychle, to ale způsobí nerovnoměrné zahřátí materiálu a v důsledku toho i nerovnoměrné roztažení. Tuto informaci je důležité vzít v úvahu při návrhu univerzálního indukčního zařízení.

Ocelové spojky mají z uvažovaných materiálů nejvyšší hodnotu modulu pružnosti $E = 210$ GPa. Díky tomu dosahují jimi vytvořené spoje nejvyšší pevnosti. Další jejich výhodou je, že ocelová spojka potřebuje k roztažení vyšší ΔT než měděné a hliníkové trubky o stejném průměru, protože má nejmenší součinitel teplotní délkové roztažnosti $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Také v indukčním ohřevu dosahují nejvyšší účinnosti. Z těchto důvodů si myslím, že ocelová spojka je nejvhodnější pro univerzální použití při spojování trubek z různých typů materiálů, plášťů kabelů apod.

Domnívám se, že tento způsob spojování potrubí je v praxi dobře použitelný, hlavně z těch důvodů, že na rozdíl od ostatních používaných způsobů nepotřebuje žádný přídavný materiál, jako například u pájení, a je jednodušší než svařování. Také při správné konstrukci indukčního zařízení by bylo možné větší univerzálnosti, než je tomu například u hořáků určených ke svařování.

Další řešení této problematiky by mělo spočívat ve vhodnějším návrhu rozměrů spojky, aby nedocházelo ke zbytečným deformacím materiálu, a návrhu indukčního zařízení, které by bylo možné v praxi použít.

Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] MIKULA, Julius *akol*. *Potrubí a armatury*. 2. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974. 585 s.
- [2] DAŇKOVÁ, Jitka. *Trubní materiály – pomůcka pro učební obor instalatér*. [online]. [Cit. 1.5.2016]. Dostupné z: http://www.soutrutnov.cz/images/materialy/trubni_materialy.pdf
- [3] SKÁLOVÁ, Jana, KOUTSKÝ, Jaroslav a MOTYČKA, Vladislav. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. 232 s
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk, LÁZNÍČKOVÁ, Ilona a KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 266 s. ISBN 978-80-01-04938-9
- [5] HOSNEDL, Stanislav. *Obecné strojní části 1*. 1. vydání, online. Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. 402 s. ISBN 978-80-261-0125-3.
- [6] ŠROUBOVÁ, Lenka., KROPÍK, Petr a HAMAR, Roman. *Connection of Cylindrical Pipes by Induction Shrink Fits*. In *XXIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits*. Plzeň: University of West Bohemia, 2014. s. 69-70. ISBN: 978-80-261-0350-9
- [7] *Měděné rozvody. Způsoby spojování*. [online]. [Cit. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://medenerozvody.cz/zpusoby-spojovani>
- [8] DAŇKOVÁ, Jitka. *Spojování potrubí – pomůcka pro učební obor instalatér*. [online]. [Cit. 1.5.2016]. Dostupné z: http://www.soutrutnov.cz/images/materialy/spojovani_potrubu.pdf

- [9] Plustherm. Inductorefficiency of an induction heating unit. [online]. [Cit. 4.5.2016]. Dostupné z: <http://www.plustherm.ch/inductor-efficiency.html>
- [10] Nedalextrusion. Data sheet. [online]. [Cit. 5.4.2016]. Dostupné z: http://www.nedalextrusion.com/files/4013/0678/5548/Data_6060.pdf
- [11] TZB-info. Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů. [online]. [Cit. 5.4.2016]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>
- [12] Aalco. Literature & Datasheet. [online]. [Cit. 5.4.2016]. Dostupné z: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Copper-and-Copper-Alloys-CW024A-Sheet-and-Plate_122.ashx
- [13] e-Konstrukter. Součinitel tření. [online]. Poslední změna 10.8.2011. [Cit. 10.4.2016]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [14] Nako. Expandéry na trubky. [online]. Poslední změna 23.6.2016. [Cit. 7.4.2016]. Dostupné z: <http://www.nako.cz/9128-extol-premium-8848050-expandery-na-trubky-sada-7ks.html>
- [15] Fyzika.jreich. Délková teplotní roztažnost. [online]. [Cit. 17.5.2016]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/634-delkova-teplotni-roztaznost>
- [16] Choze.aspone. Indukční ohřev. [online]. Poslední změna 6.8.2012. [Cit. 20.5.2016]. Dostupné z: <http://choze.aspone.cz/inducak.aspx>
- [17] Agros2D. Home. [online]. Poslední změna 24.11.2014. [Cit. 1.5.2016]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>

Přílohy

Příloha A – Teplotní rozdíly a vypočítané síly spoje pro měděné spojky

d_1 (mm)	h (mm)	$\Delta d = 0,1$ mm		$\Delta d = 0,2$ mm		$\Delta d = 0,3$ mm	
		F (kN)	ΔT	F (kN)	ΔT	F (kN)	ΔT
6	1	65	1037	126	/	183	/
8	1	49	777	95	/	139	/
10	1	39	627	77	/	112	/
12	1	33	527	64	/	93	/
14	1	28	437	55	907	80	/
15	1	26	407	51	857	75	/
16	1	25	387	48	787	70	/
18	1	22	347	43	687	62	1037
20	1	20	307	39	637	56	937
22	1	18	277	35	607	51	837
25	1,5	24	247	47	507	69	737
28	1,5	21	217	42	457	62	657
30	1,5	20	202	39	407	58	612
35	1,5	17	177	34	357	50	527
38	1,5	16	162	31	327	46	482
42	1,5	14	147	28	297	41	437
44,5	1,5	14	137	27	277	39	417
54	2	15	112	29	227	44	337
57	2	14	107	28	217	41	327
64	2	13	97	25	197	37	287
76	2	11	82	21	167	31	242
89	2,5	11	72	22	137	33	207
108	2,5	9	57	19	112	27	172
133	3	9	47	18	97	27	137
159	3	8	38	15	77	23	117
219	3	6	28	11	57	16	87
267	3	5	23	9	47	13	72

Příloha B – Vypočítané síly spoje pro hliníkové spojky

d_1 (mm)	h (mm)	$\Delta d = 0,1$ mm	$\Delta d = 0,2$ mm	$\Delta d = 0,3$ mm
		F (kN)	F (kN)	F (kN)
6	1	36	71	104
8	1	28	54	78
10	1	22	43	63
12	1	19	36	53
14	1	16	31	45
16	1	14	27	40
18	1	12	24	35
20	1	11	22	32
25	1	9	17	25
28	1	8	16	23
32	1	7	14	20
10	1,5	33	65	96
12	1,5	28	55	81
15	1,5	22	44	65
18	1,5	19	37	54
22	1,5	15	30	45
25	1,5	14	27	39
40	1,5	9	17	25
12	2	37	73	108
14	2	32	63	93
15	2	30	59	87
16	2	28	55	82
18	2	25	49	73
20	2	23	45	66
22	2	21	41	60
25	2	18	36	53
28	2	16	32	47
30	2	15	30	44
32	2	14	28	41
35	2	13	26	38
40	2	11	22	33
45	2	10	20	30
50	2	9	18	27
60	2	8	15	22
80	2	6	11	17
90	2	5	10	15
25	2,5	23	45	66
35	2,5	16	32	48
14	3	47	93	138
16	3	41	82	122
22	3	31	61	90
25	3	27	54	80
30	3	23	45	67
35	3	19	39	57
40	3	17	34	50
45	3	15	30	45
48	3	14	28	42
50	3	14	27	40
60	3	11	23	34
70	3	10	19	29
80	3	9	17	25
100	3	7	14	20
120	3	6	11	17
267	3	3	5	8

Příloha C - Vypočítané síly spoje pro ocelové spojky

d_1 (mm)	h (mm)	$\Delta d = 0,1$ mm	$\Delta d = 0,2$ mm	$\Delta d = 0,3$ mm
		F (kN)	F (kN)	F (kN)
6	1	63	125	188
10	1	50	99	149
15	1	33	67	100
20	1	25	50	75
30	1	17	33	50
40	1	13	25	38
10	1,5	74	148	223
15	1,5	50	100	150
20	1,5	38	75	113
30	1,5	25	50	76
40	1,5	19	38	57
50	1,5	15	30	45
70	1,5	11	22	33
90	1,5	8	17	25
110	1,5	7	14	21
15	2	67	133	200
20	2	50	101	151
30	2	34	67	101
40	2	25	51	76
50	2	20	41	61
70	2	15	29	44
90	2	11	23	34
110	2	9	18	28
130	2	8	16	23
267	2	4	8	11
20	2,5	63	125	188
30	2,5	42	84	126
40	2,5	32	63	95
50	2,5	25	51	76
70	2,5	18	36	55
90	2,5	14	28	42
110	2,5	12	23	35
130	2,5	10	20	29
267	2,5	5	10	14
20	3	75	150	225
30	3	51	101	152
40	3	38	76	114
50	3	31	61	92
70	3	22	44	65
90	3	17	34	51
110	3	14	28	42
130	3	12	24	35
267	3	6	11	17

Příloha D – Teplotní rozdíly potřebné k ohřátí hliníkových spojek v závislosti na přesahu

d_1 (mm)	ΔT		
	$\Delta d = 0,1$ mm	$\Delta d = 0,2$ mm	$\Delta d = 0,3$ mm
8	545	/	/
10	447	/	/
12	367	/	/
14	317	/	/
16	277	545	/
18	247	497	/
20	217	457	/
25	177	357	545
28	157	327	517
32	137	277	407
40	112	227	327
45	97	197	292
50	87	167	257
60	72	152	217
80	57	117	162
90	48	107	147
100	44	87	132
120	37	77	112
150	32	62	87
267	17	37	52

Příloha E – Teplotní rozdíly potřebné k ohřátí ocelových spojek v závislosti na přesahu

d_1 (mm)	ΔT		
	$\Delta d = 0,1$ mm	$\Delta d = 0,2$ mm	$\Delta d = 0,3$ mm
7	1327	/	/
10	927	/	/
15	617	1234	/
20	464	924	1390
30	311	618	926
40	235	466	696
50	189	372	556
70	137	265	396
90	108	208	310
110	90	169	252
130	77	144	214
267	41	74	108

Příloha F – Časy potřebné k ohřátí měděných spojek na minimální teplotní rozdíl

d ₁ /h(mm)	Δt(s)			
	D = 20 mm	D = 49 mm	D = 123 mm	D = 273 mm
6/1,0	55	200	/	/
6/1,5	66	0	/	/
12/1,0	18,2	56	/	/
12/1,5	23	78	/	/
18/1,0	7,5	26	/	/
18/1,5	9	38	/	/
32/1,5	/	46	/	/
32/2,0	/	59	/	/
46/1,5	/	43	/	/
46/2,0	/	53	/	/
82/2,0	/	/	/	/
82/3,0	/	/	135	/
119/2,0	/	/	30	/
119/3,0	/	/	42	/
193/2,0	/	/	/	200
193/3,0	/	/	/	0
267/2,0	/	/	/	35

Příloha G – Časy potřebné k ohřátí hliníkových spojek na minimální teplotní rozdíl

d ₁ /h(mm)	Δt(s)			
	D = 20 mm	D = 49 mm	D = 123 mm	D = 273 mm
8/1,0	13,1	43	/	/
8/1,5	17,7	63	/	/
12/1,0	6,5	18	80	/
12/1,5	9	29	140	/
18/1,0	2,8	9	36,5	/
18/1,5	3,5	14	60	/
32/1,5	/	16,5	74	/
32/2,0	/	21	110	/
46/1,5	/	15,5	78	/
46/2,0	/	19	115	/
82/2,0	/	0	32	/
82/3,0	/	0	47	/
119/2,0	/	0	11	/
119/3,0	/	0	15	/
193/2,0	/	0	0	70
193/3,0	/	0	0	100
267/2,0	/	0	0	20
267/3,0	/	0	0	17

Příloha H – Časy potřebné k ohřátí ocelových spojek na minimální teplotní rozdíl

d ₁ /h(mm)	Δt(s)			
	D = 20 mm	D = 49 mm	D = 123 mm	D = 273 mm
7/1,0	3,6	25	/	/
7/1,5	6	28,7	/	/
12/1,0	1,7	11,7	/	/
12/1,5	2,7	12,5	165	/
18/1,0	0,8	6,1	95	/
18/1,5	1	6,3	80	/
32/1,5	/	3,7	32	/
32/2,0	/	5	34	/
46/1,5	/	3	18	/
46/2,0	/	3,5	22,5	/
82/2,0	/	/	6,6	/
82/3,0	/	/	10,5	/
119/2,0	/	/	2,7	55
119/3,0	/	/	5,5	86
193/2,0	/	/	/	12
193/3,0	/	/	/	20
267/2,0	/	/	/	2
267/3,0	/	/	/	4