



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

TEPELNÝ ODPOR V KONTAKTU ZA VYSOKÝCH TEPLOT

THERMAL CONTACT RESISTANCE UNDER HIGH TEMPERATURE

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JIŘÍ KVAPIL

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV HORSKÝ, CSc.

ŠKOLITEL SPECIALISTA
SUPERVISOR SPECIALIST

Ing. MICHAL POHANKA, Ph.D.

BRNO 2016

ABSTRAKT

V poslední době se v průmyslu stále častěji používají numerické simulace k optimalizaci výrobních procesů. Tyto numerické simulace ale potřebují velké množství vstupních parametrů a některé z těchto parametrů nejsou dosud dostatečně popsány. Jedním z těchto parametrů je tepelný odpor v kontaktu, který je v literatuře nedostatečně popsán pro vyšší teploty a vyšší kontaktní tlaky.

Tato práce předkládá metodiku jak tepelný odpor experimentálně měřit a odvodit součinitel přestupu tepla v kontaktu, který je převrácenou hodnotou k tepelnému odporu a může být v numerických simulacích použit jako okrajová podmínka popisující přestup tepla při kontaktu dvou těles.

Pro účely experimentálních měření tepelného odporu bylo v Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně sestrojeno experimentální zařízení, které umožňuje měřit tepelný odpor mezi dvěma tělesy za různých podmínek, které vzniknou nastavením parametrů, jakými jsou např. kontaktní tlak, počáteční teplota těles, typ materiálu, drsnost povrchu těles, přítomnost okují na povrchu atd. Tělesa v kontaktu se označují jako senzor a vzorek a jsou v nich zabudována teplotní čidla, která při experimentu zaznamenávají teplotu. Poté jsou teplotní průběhy použity v numerickém výpočtu, který využívá inverzní metodu vedení tepla. Výsledkem výpočtu je stanovení průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu během experimentu. Na závěr jsou výsledky shrnuty a je popsáno chování tepelného odporu v závislosti na parametrech, které ho ovlivňují.

ABSTRACT

Nowadays numerical simulations are used to optimize manufacturing process. These numerical simulations need a large amount of input parameters and some of these parameters have not been sufficiently described. One of this parameter is thermal contact resistance, which is not sufficiently described for high temperatures and high contact pressure.

This work describes experimental measuring of thermal contact resistance and how to determine thermal contact conductance which can be used as a boundary condition for numerical simulations.

An Experimental device was built in Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, part of Brno University of Technology, and can be used for measuring thermal contact conductance in various conditions, such as contact pressure, initial temperatures of bodies in contact, type of material, surface roughness, presence of scales on the contact surface. Bodies in contact are marked as a sensor and a sample, both are embedded with thermocouples. The temperature history of bodies during an experiment is measured by thermocouples and then used to estimate time dependent values of thermal contact conductance by an inverse heat conduction calculation. Results are summarized and the dependence of thermal contact conductance in various conditions is described.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vedení tepla, přenos tepla, tepelný odpor v kontaktu, součinitel přestupu tepla v kontaktu, inverzní úloha

KEYWORDS

Heat conduction, heat transfer, thermal contact resistance, thermal contact conductance, inverse task

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KVAPIL, J. *Tepelný odpor v kontaktu těles za vysokých teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 93 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jaroslava Horského, CSc. a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně dne 29. 6. 2016

.....

podpis doktoranda

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Jaroslavu Horskému, CSc. za příkladné vedení během doktorského studia, také za rady profesní, ale i do života. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Pohankovi, Ph.D. za množství rad při řešení této dizertační práce. Díky také patří zbytku kolektivu z Laboratoře přenosu tepla a proudění za rodinnou atmosféru a podporu ve studiu. Na závěr bych chtěl poděkovat rodičům a přátelům, kteří mě ve studiu vždy podporovali.

OBSAH

1. ÚVOD	- 9 -
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	- 11 -
2.1. Přenos tepla.....	- 11 -
2.2. Rovnice vedení tepla.....	- 12 -
2.2.1. Rovnice vedení tepla v kartézských souřadnicích.....	- 12 -
2.2.2. Rovnice vedení tepla v cylindrických souřadnicích.....	- 13 -
2.2.3. Okrajové a počáteční podmínky	- 13 -
2.2.4. Materiálové charakteristiky	- 14 -
2.3. Přímá úloha vedení tepla.....	- 16 -
2.3.1. Analytické řešení.....	- 16 -
2.3.2. Numerické řešení.....	- 17 -
2.4. Inverzní úloha vedení tepla	- 17 -
2.4.1. Beckova sekvenční metoda	- 18 -
2.4.2. Sekvenční identifikační metoda	- 20 -
2.5. Tepelný odpor v kontaktu	- 22 -
2.5.1. Tepelný odpor v kontaktu způsobený omezením oblasti	- 24 -
2.5.2. Model tepelné vodivosti pro více kontaktních míst	- 27 -
2.5.3. Deformační vliv.....	- 27 -
2.5.4. Kondukční tepelná vodivost v mezeře při plastické deformaci povrchu.....	- 32 -
2.5.5. Radiační vodivost v mezeře	- 34 -
2.5.6. Empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu	- 34 -
2.5.7. Parametry ovlivňující tepelnou vodivost v kontaktu.....	- 35 -
2.6. Popis povrchu materiálu	- 37 -
2.7. Experimentální zařízení používané pro měření tepelného odporu v kontaktu.....	- 38 -
2.7.1. Měření při ustáleném vedení tepla (statický způsob).....	- 39 -
2.7.2. Měření při neustáleném vedení tepla (dynamický způsob).....	- 41 -
3. POPIS PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE	- 44 -
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	- 46 -
4.1. Prvotní návrh experimentálního zařízení	- 46 -
4.2. Úpravy experimentálního zařízení	- 49 -
4.3. Numerický model.....	- 51 -
4.4. Inverzní úloha pro výpočet tepelného odporu.....	- 55 -
4.5. Výpočtový software	- 55 -
4.6. Měřicí přístroje.....	- 56 -
4.7. Popis průběhu experimentu.....	- 58 -
4.8. Testovací experiment	- 60 -
4.9. Citlivostní analýza	- 62 -
4.9.1. Vliv polohy termočlánku.....	- 62 -
4.9.2. Vliv náhodné chyby při měření teploty	- 63 -
4.10. Experimentální měření	- 65 -
4.11. Vliv tlaku	- 69 -
4.12. Vliv teploty	- 70 -
4.13. Vliv drsnosti povrchu	- 72 -
4.14. Empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu.....	- 72 -

5. DISKUZE	- 75 -
6. ZÁVĚR.....	- 77 -
7. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	- 79 -
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	- 81 -
9. SEZNAM TABULEK.....	- 83 -
10. SEZNAM PŘÍLOH.....	- 84 -
11. LITERATURA.....	- 85 -
12. PUBLIKACE AUTORA	- 89 -
12.1. Články.....	- 89 -
12.2. Výzkumné zprávy.....	- 90 -
12.3. Tvůrčí aktivity	- 91 -
13. PŘÍLOHY	- 92 -
13.1. Technický výkres vzorku.....	- 92 -
13.2. Technický výkres senzoru	- 93 -

1. ÚVOD

Tváření kovů je výrobní (technologický) postup, který dává kovu požadovaný tvar tím, že tvářecím nástrojem přemístujeme jeho části převážně tlakem, méně často smykem, kroucením nebo tahem. Tváření kovů je podmíněno jejich tvářitelností. Tvářitelnost kovů je založena na plasticitě, tj. schopnosti snést určité trvalé přemístění svých částí bez porušení soudržnosti.

Při tváření kovů dochází ke kontaktu dvou a více těles, a pokud tyto tělesa mají rozdílnou teplotu, dochází k přestupu tepla. Hlavní náplní této práce bude tento přestup tepla mezi tělesy popsát pomocí okrajových podmínek ve tvaru součinitele přestupu tepla v kontaktu.

Válcování je jednou ze základních technologií tváření kovů v hutnickém průmyslu. I přes dlouhodobý vývoj technologie válcování je zde stále prostor pro zlepšení a zefektivnění výroby. S rozvojem výpočetní techniky a nástupem možnosti komplexně simulovat tvářecí procesy je zde stále větší poptávka po okrajových podmínkách pro tyto simulace. Při válcování za tepla dochází k velmi intenzivnímu přenosu energie z provalku do válce. Na druhou stranu po velmi krátké době, po výstupu z válcovací mezery, dochází k prudkému poklesu teplot, který je způsobený chlazením válce pomocí vodních trysek. Tyto rychlé změny povrchových a podpovrchových teplot se cyklicky střídají a mají vliv na životnost válce. Pomocí numerického modelování můžeme tyto rychlé děje simulovat a analyzovat. Detailní analýzy teplotního pole ve válci lze využít k optimalizaci teplotně – napjatostních stavů a minimalizaci cyklického namáhání válce. Cílem optimalizace teplotních režimů válců je tedy prodloužení životnosti válců a tím i značná úspora finančních prostředků.

Nezbytnými vstupními parametry pro realistickou simulaci válcování je okrajová podmínka (součinitel přestupu tepla) definující přestup tepla mezi vodním chlazením válce a válcem, kterou dokážeme experimentálně změřit. Druhá okrajová podmínka (součinitel přestupu tepla v kontaktu) na rozhraní mezi válcem a válcovaným materiálem nám určuje, kolik tepla přejde z válcovaného tělesa do válce. Získání této okrajové podmínky experimentálně se ukazuje jako problematické z technické obtížnosti (vysoké teploty a vysoký tlak). Jedním z možných způsobů je použití podpovrchového měření teploty a inverzní úlohou spočítané okrajové podmínky. Instalace termočlánku do válce je problematická, narušuje strukturu povrchu a pevnostní odolnost instalovaného sensoru je limitující pro některé způsoby válcování. Dosud provedené experimenty měřily pouze v omezeném rozsahu válcovacích parametrů. V literatuře nebyl problém popisující přestup tepla na rozhraní válce a válcovaného materiálu pomocí součinitele přestupu tepla do této doby uspokojivě popsán, a proto se jím tato práce zabývá.

Teoretická část této práce je zaměřena na popis rovnice vedení tepla v tělese a její řešení pomocí přímé metody a inverzních úloh. Následuje odvození tepelného odporu pro jednu plochu kontaktu a z ní odvozený základní vztah součinitele přestupu tepla pro spojení dvou ploch ve více kontaktech. Pozornost je zaměřena na vliv deformace, hlavně plastické, při které je odvozen jak přestup tepla kontaktními místy, tak přes mezeru obsahující tekutinu. Nezapomenuto není ani na přenos tepla radiací. Dále je věnován prostor topografii povrchu a trojrozměrným charakteristikám drsnosti povrchu a poslední kapitola teoretické části se věnuje přehledu stávajících experimentálních zařízení.

Praktická část se ze začátku zabývá popisem prototypu experimentálního zařízení, které bylo sestrojeno pro účely této práce. Navazuje kapitola o změnách, které bylo nutné na prototypu experimentálního zařízení provést, aby bylo možné z experimentálních výsledků stanovit součinitele přestupu tepla v kontaktu. Následuje popis numerického modelu a inverzní úlohy, které jsou použity při výpočtech. Dále je důkladně popsán průběh experimentálního měření, provedena citlivostní analýza výpočtového modelu a na konci představeny výsledky z měření a proveden jejich rozbor.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Přenos tepla

Přenos tepla je fyzikální děj, při kterém dochází k výměně energie mezi látkami s rozdílnou teplotou. Existují tři způsoby přenosu tepla:

- vedením v látkách (kondukce),
- prouděním látek (konvekce),
- zářením (radiace).

Při přenosu tepla vedením dochází k výměně kinetické energie neuspořádaných tepelných pohybů molekul pomocí srážek. Tato energie se přenáší z míst vyšší teploty do míst s nižší teplotou látky. Vedení tepla probíhá v pevných, kapalných a plynných látkách. V roce 1822 definoval rovnici vedení tepla Joseph Fourier. Tato rovnice definuje, že tepelný tok \vec{q}_v přenášený vedením je přímo úměrný teplotního gradientu ∇T a má opačné znaménko:

$$\vec{q}_v = -k\nabla T, \quad (1)$$

kde k je tepelná vodivost látky a teplotní gradient ∇T je definován v kartézských souřadnicích jako:

$$\nabla T = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

a v cylindrických souřadnicích:

$$\nabla T = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial r} + \vec{j} \frac{\partial T}{r \partial \varphi} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

Při proudění nastává přenos tepla pohybujícími se částicemi kapaliny a dělí se na volné proudění, kdy je pohyb kapaliny způsobován pouze rozdíly v hustotě kapaliny a na nucené proudění, kdy je příčinou uměle vyvolaný rozdíl tlaků (čerpadlo, ventilátor). Klasický případ je obtékání pevného tělesa kapalinou, kde se vlivem přilnavosti na povrchu pevného tělesa vytvoří tenká mezní vrstva, která brání přenosu tepla.

Tepelný tok q_k při přenosu tepla konvekcí lze pomocí Newtonova ochlazovacího zákona vyjádřit následovně:

$$q_k = hA(T_\infty - T_s), \quad (4)$$

kde h je součinitel přestupu tepla přes plochu A , T_∞ je teplota pohybující se tekutiny a T_s je teplota povrchu pevného tělesa.

Přenos tepla zářením je fyzikální proces, při kterém dochází k vyzařování energie do prostoru ve formě elektromagnetického záření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením a prouděním se může teplo přenášet zářením i ve vakuu. Tepelný tok při záření je definován pomocí Stefan-Boltzmannova zákona:

$$q_k = \varepsilon \sigma T^4, \quad (5)$$

kde ε je emisivita tělesa, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T je teplota tělesa.

2.2. Rovnice vedení tepla

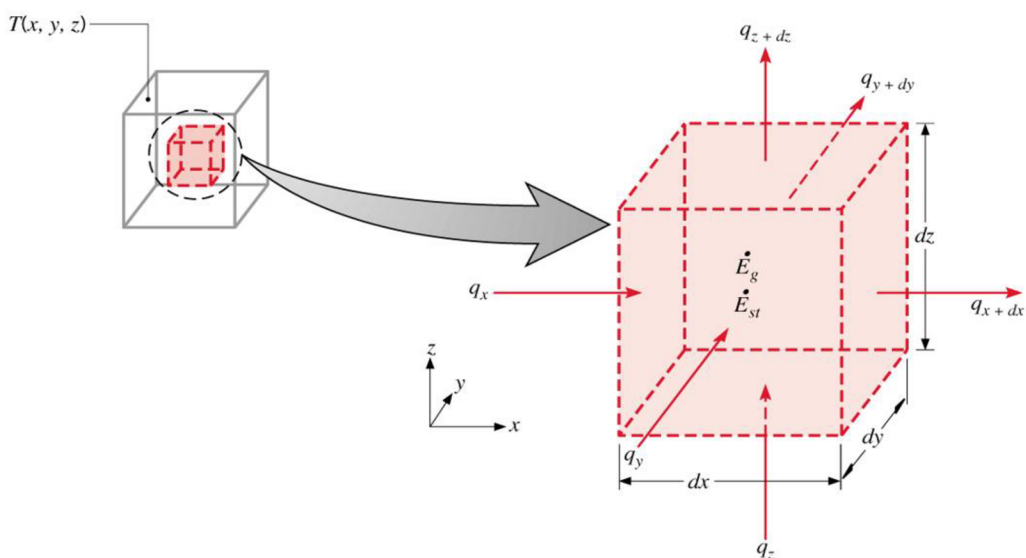
Řešení problému vedení tepla je založeno na Fourierově zákoně a zákoně zachování energie.

2.2.1. Rovnice vedení tepla v kartézských souřadnicích

Je-li uvažován homogenní materiál bez vnitřního pohybu a teplotné pole $T(x, y, z)$, které je vyjádřeno pomocí kartézské soustavy souřadnic, lze rovnici vedení tepla vyjádřit jako:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

kde k je tepelná vodivost, ρ hustota a c_p tepelná kapacita materiálu, \dot{q} tepelný zdroj, t čas a T teplota.



Obrázek 1: Popis vedení tepla v kartézských souřadnicích [1]

Pokud je tepelná vodivost konstantní, můžeme zavést pro teplotní vodivost a (tepelná difuzivita) vztah:

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \quad (7)$$

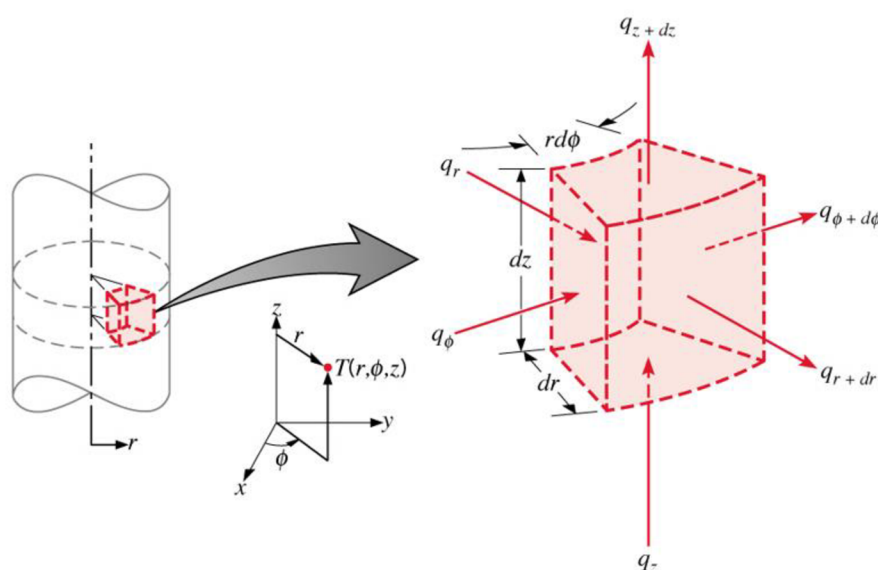
a rovnice vedení tepla se tak zjednoduší do tvaru:

$$a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

2.2.2. Rovnice vedení tepla v cylindrických souřadnicích

Podobně jak u rovnice vedení tepla v kartézských souřadnic je uvažován homogenní materiál bez vnitřního pohybu a tepelné pole $T(r, \phi, z)$, lze rovnici vedení tepla v cylindrických souřadnicích vyjádřit jako:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

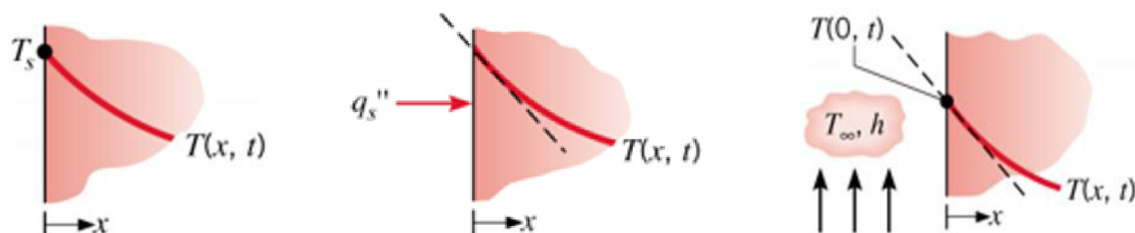


Obrázek 2: Popis vedení tepla v cylindrických souřadnicích [1]

2.2.3. Okrajové a počáteční podmínky

Pro řešení rovnice (6) musíme znát jednu počáteční podmínku tj. teplotní pole v čase $t = 0$ a dvě okrajové podmínky pro každou souřadnici.

Typy okrajových podmínek vztažených pro $x = 0$:



Obrázek 3: Okrajové podmínky – teplota, tepelný tok a součinitel přestupu tepla [1]

- prvního druhu (Dirichletova) předepisuje teplotu T_s na hranici:

$$T(0, t) = T_s \quad (10)$$

- druhého druhu (Neumannova) předepisuje na hranici tepelný tok q_s

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_s'' \quad (11)$$

- třetího druhu (Newtonova) předepisuje na hranici součin součinitele přestupu tepla a rozdílu okolní T_∞ a povrchové teploty $T(0, t)$:

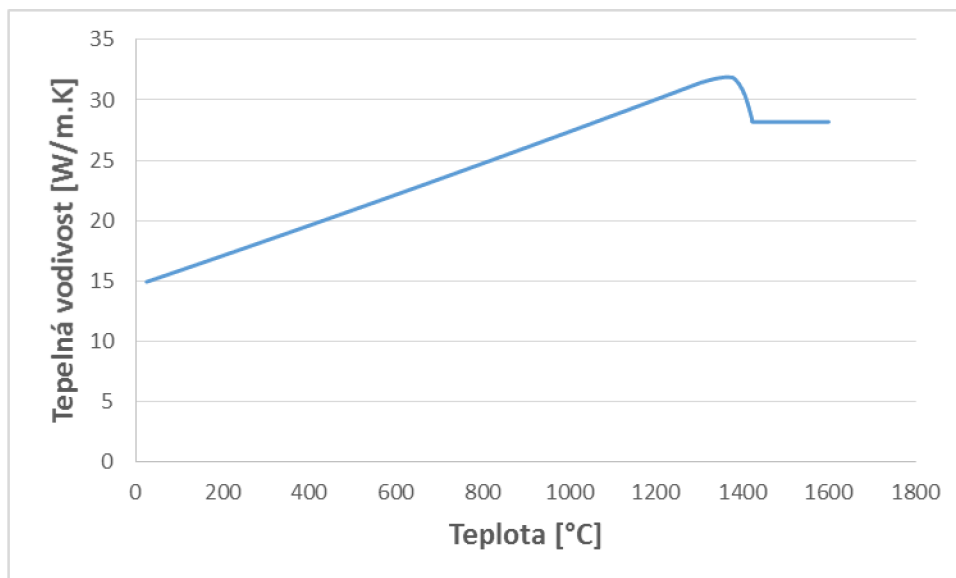
$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)] \quad (12)$$

2.2.4. Materiálové charakteristiky

V rovnici vedení tepla se vyskytuje několik veličin, které popisují vlastnosti materiálu a přímo ovlivňují tok tepelné energie v tělese. V následujících podkapitolách jsou uvedeny materiálové charakteristiky nerezové oceli (DIN 1.4828), které budou použity v praktické části této práce pro výpočet tepelného odporu v kontaktu.

2.2.4.1. Součinitel tepelné vodivosti

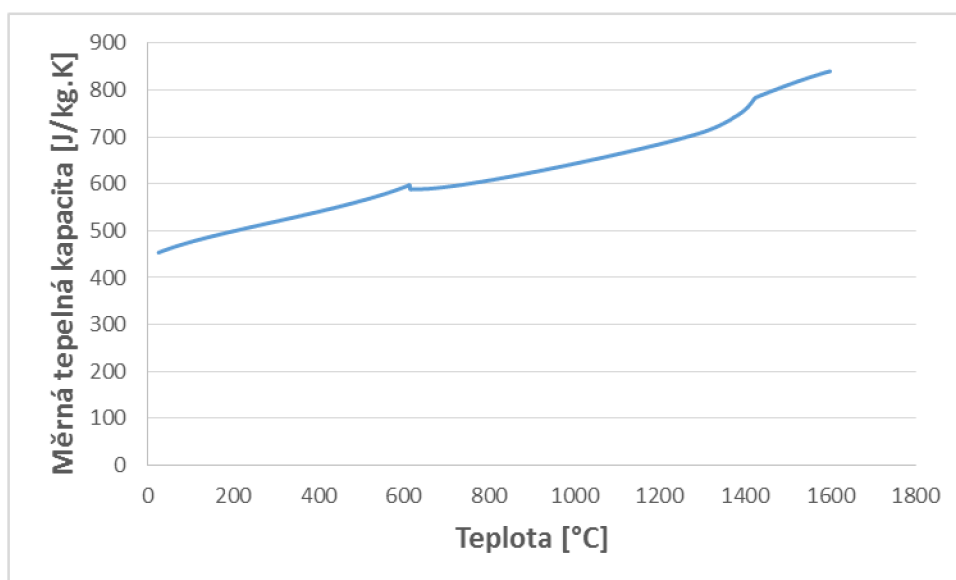
Součinitel tepelné vodivosti k je fyzikální veličina udávající míru schopnosti materiálu přenášet tepelnou energii pomocí kondukce. Nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti mají izolanty (vzduch, dřevo apod.), velkou hodnotu mají kovy (např. diamant, stříbro měď). Součinitel tepelné vodivosti je závislý na teplotě (u většiny kovů s rostoucí teplotou klesá, u polovodičů naopak roste) a zjišťuje se experimentálně.



Obrázek 4: Závislost tepelné vodivosti na teplotě, materiál DIN 1.4828

2.2.4.2. Měrná tepelná kapacita

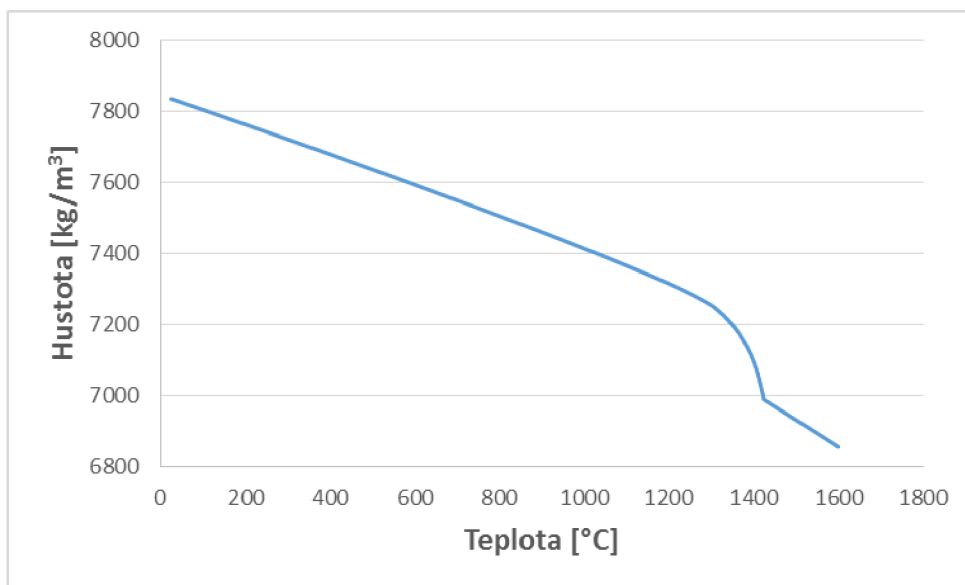
Měrná tepelná kapacita c_p je veličina udávající množství tepla, které je potřeba dodat jednomu kilogramu látky, aby se ohřál o jeden stupeň Kelvina. Hodnota měrné tepelné kapacity je závislá na teplotě a k určování jejich hodnot se používá kalorimetrická rovnice. Pro větší teplotní intervaly se zavádí střední měrná tepelná kapacita \bar{c} .



Obrázek 5: Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě, materiál DIN 1.4828

2.2.4.3. Hustota

Hustota ρ je fyzikální veličina vyjadřující poměr hmotnosti a celkového objemu.



Obrázek 6: Závislost hustoty na teplotě, materiál DIN 1.4828

2.3. Přímá úloha vedení tepla

Přímá úloha označuje takovou úlohu vedení tepla v tělese, kde jsou známy materiálové vlastnosti a počáteční a okrajové podmínky. Výsledkem řešení přímé úlohy je teplotní pole tělesa. Řešení je možné provést buď analyticky, nebo numericky. Dále záleží, zda je při výpočtu teplotního pole závislé (nestacionární) nebo nezávislé (stacionární) na čase. Od toho se odvíjí i pojmenování úlohy jako ustálené (stacionární) nebo neustálené (nestacionární, tranzientní).

2.3.1. Analytické řešení

Analytické řešení lze použít pouze pro speciální jednoduché geometrie. Pokud je geometrie složitější, tak analytické řešení selhává a je nutno použít numerický přístup. Analytické řešení je ale užitečné pro testování numerických metod a jejich přesností. Typické příklady pro analytické řešení nekonečně rozměrné desky, polonekonečného tělesa a roviny s konvekcí lze najít v [2].

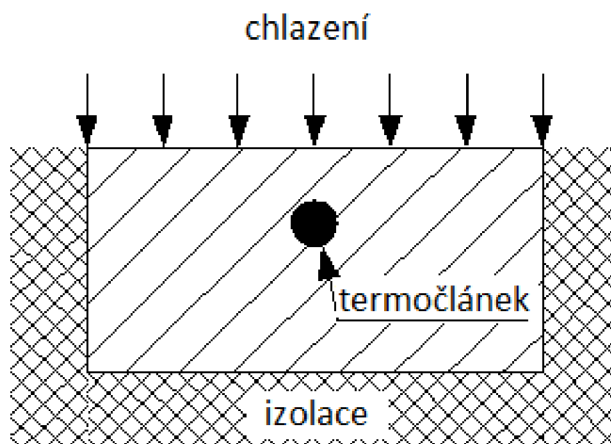
2.3.2. Numerické řešení

Ve většině případů nelze použít analytické řešení, a proto se musí použít řešení numerické. Jelikož je nestacionární rovnice vedení tepla eliptického tvaru, lze ji řešit metodou konečných diferencí, konečných prvků nebo konečných objemů [2].

Nejčastěji je použita metoda konečných objemů, kdy je celé těleso rozděleno do objemů o konečných velikostech. Na každém objemu dojde k diskretizování rovnice vedení tepla, derivace jsou nahrazeny konečnými diferencemi a v každém objemu se předpokládá konstantní teplota a materiálové charakteristiky. Dále se pak řeší n rovnic ($n-2$ diskretizovaných rovnic + 2 okrajové podmínky) o n neznámých. Detailněji v [2].

2.4. Inverzní úloha vedení tepla

Pokud jsou známy okrajové podmínky (teplota, tepelný tok nebo součinitel přestupu tepla) na površích pevného tělesa jako funkce času, pak je teplotní pole v tělese v závislosti na čase vypočitatelné pomocí přímé úlohy. V praxi často nastane jiný případ a to takový, že na jednom z povrchu tělesa neznáme okrajovou podmínku, ale známe teplotní průběh v určitém místě tělesa. Pokud je toto místo vhodně zvoleno, je možné vypočítat neznámou okrajovou podmínku na povrchu tělesa pomocí inverzní metody vedení tepla. V Laboratoři přenosu tepla a proudění se pomocí inverzní úlohy ve většině případech zjišťují okrajové podmínky pod tryskou při sprchovém chlazení. Je téměř nemožné získat teplotu povrchu při průjezdu pod chladící tryskou, aniž by byla ovlivněna geometrie povrchu či nedošlo k ovlivnění chlazení. Proto jsou do chlazených těles zabudovány termočlánky (Obrázek 7), které měří teplotu v určitém místě pod povrchem. Vzdálenost termočlánku od povrchu je velmi důležitý parametr, protože čím větší je vzdálenost termočlánku od povrchu, k tím větší ztrátě informací dochází a pak není možné zjistit, co přesně se děje na povrchu chlazeného tělesa. Metodika a popis experimentálního měření je uvedeno v [3].



Obrázek 7: Průřez chlazeného tělesa

Pokud známe počáteční teplotu chlazeného tělesa a teplotní záznam z termočlánu, může být zpětně dopočítána teplota povrchu a díky ní se může určit součinitel přestupu tepla v závislosti na čase.

2.4.1. Beckova sekvenční metoda

Inverzní úloha vedení tepla je matematicky nekorektní tj. nelze u ní zaručit existenci a jednoznačnost. Pro řešení inverzní úlohy se nejčastěji používá sekvenčního Beckova algoritmu [5]. Výpočtový algoritmus je založen na minimalizaci rozdílů mezi naměřenou a vypočtenou teplotou v místě umístění termočlánu. Součet kvadratických odchylek má následující podobu:

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i)^2, \quad (13)$$

kde m je čas, T^* je naměřená teplota, T je vypočtená teplota a f je počet dopředných kroků.

Pokud je rovnice (13) rovna nule a teplota T rozvinuta do Taylorovy řady, vztah pro měrný tepelný tok je:

$$q^m = q^{m-1} + \frac{\sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i|_{q^m=0}) \xi_i}{\sum_{i=m+1}^{m+f} (\xi_i)^2}, \quad (14)$$

kde $T_i|_{q^m=0}$ jsou napočítané teploty v místě sensoru z dopředného řešiče při použití všech předchozích vypočítaných tepelných toků, ale bez nynějšího tepelného toku q^m . ξ_i je citlivostní koeficient, který udává citlivost sensoru v čase i k pulsu tepelného toku v čase m .

Citlivostní koeficient je definován jako:

$$\xi_i = \frac{\partial T}{\partial q^m} \quad (15)$$

Pokud je nalezen tepelný tok v čase m , příslušná hodnota povrchové teploty T_m^{surf} může být spočítána dopředným řešičem. Jakmile známe tepelný tok q^m a povrchovou teplotu T_m^{surf} můžeme vyčíslit součinitel přestupu tepla ze vztahu:

$$h_m = \frac{q^m}{T_m^{water} - T_m^{surf}} \quad (16)$$

Jakmile je vypočítáno h , je index času m zvýšen o 1 a procedura se opakuje pro další časové kroky.

Beckova sekvenční úloha může být použita i pro vícerozměrnou inverzní úlohu. Při teplotně nezávislých materiálových charakteristikách mohou být teploty v 1D, 2D a 3D tělesech získány pomocí:

$$T = T|_{q=0} + \zeta q, \quad (17)$$

kde

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}(m) \\ \mathbf{T}(m+1) \\ \vdots \\ \mathbf{T}(m+f-1) \end{bmatrix}, \mathbf{T}(i) = \begin{bmatrix} T_1^i \\ T_2^i \\ \vdots \\ T_{n_T^*}^i \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^{(m)} \\ \mathbf{q}^{(m+1)} \\ \vdots \\ \mathbf{q}^{(m+f-1)} \end{bmatrix}, \mathbf{q}(i) = \begin{bmatrix} q_1^i \\ q_2^i \\ \vdots \\ q_{n_q^*}^i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{cccc} \zeta(1) & & & \\ \zeta(2) & \zeta(1) & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \zeta(f) & \zeta(f-1) & \dots & \zeta(1) \end{array} \right) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\zeta}(i) = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{ccc} \zeta_{1,1}(i) & \dots & \zeta_{1,n_q}(i) \\ \vdots & \ddots & \\ \zeta_{n_T^*,1}(i) & & \zeta_{n_T^*,n_q}(i) \end{array} \right] \end{bmatrix}.$$

Sekvenční přístup pak dočasně předpokládá, že \mathbf{q} je nezávislé na čase. Poté použitím:

$$\mathbf{Z} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{I}^*, \quad (19)$$

kde

$$\mathbf{I}^* = \begin{bmatrix} 1_{1,1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1_{1,n} \\ & \vdots & \\ 1_{f,1} & & 0 \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & 1_{f,n} \end{bmatrix}, \text{ kde } n = n_{q^*} \quad (20)$$

Minimalizační funkce je:

$$SSE = (T^{*,m} - T|_{q=0} - Z^m q^m)^T (T^{*,m} - T^m|_{q=0} - Z^m q^m). \quad (21)$$

Z maticové derivace rovnice (21) s ohledem na \mathbf{q} vychází odhadovaný tepelný tok

$$\hat{q}^m = [(Z^m)^T Z^m]^{-1} (Z^m)^T (T^{*,m} - T^m|_{q=0}). \quad (22)$$

Poté je m zvýšeno o jedna a celá procedura opakována pro další časový krok.

2.4.2. Sekvenční identifikační metoda

Sekvenční identifikační metoda využívá teplotní historii získanou pomocí teplotního čidla uvnitř chlazeného nebo ohřivaného tělesa k výpočtu součinitele přestupu tepla h (ale i jiných okrajových podmínek, např. tepelný tok) v každém časovém kroku. Tato metoda používá sekvenční odhad časově proměnných okrajových podmínek s využitím dopředných kroků ke stabilizaci špatně podmíněné inverzní úlohy. K určení neznámého součinitele přestupu tepla h v čase t_m je změřená teplota T_m^* v teplotním čidle porovnána s nasimulovanou teplotou z dopředného řešiče za použití n dopředných kroků

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+n} (T_i^* - T_i)^2. \quad (23)$$

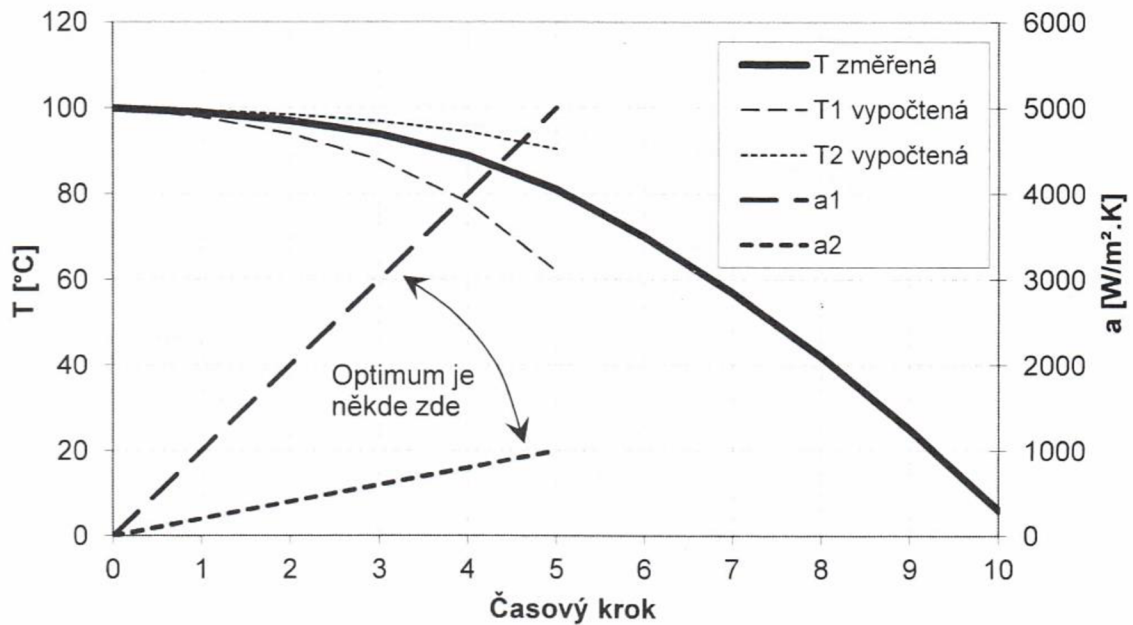
Směrnice lineárně se měnícího součinitele přestupu tepla h je definována

$$v = \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (24)$$

je měněna tak dlouho, dokud není nalezeno minimum rovnice (13).

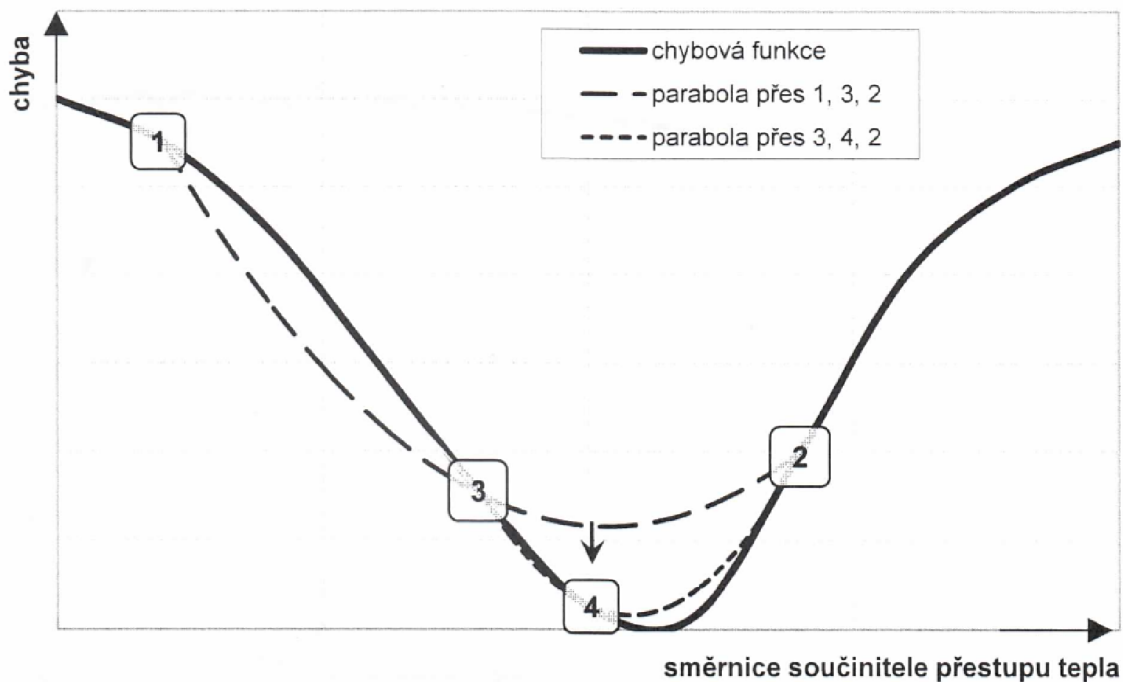
Odhad nejmenšího počtu dopředných kroků je popsán [2]. Teploty T^* se získají přímým výpočtem vedení tepla, přičemž hodnota součinitele přestupu tepla se aplikuje tak, že se zvolí

její směrnice v a vychází se z poslední známé hodnoty součinitele přestupu tepla h . Příklad vypočtených teplot je znázorněn viz Obrázek 8 jako křivky $T1$ a $T2$, přičemž použité průběhy součinitele přestupu tepla jsou znázorněny úsečkami $a1$ a $a2$. Protože naměřený průběh teplot je mezi vypočtenými teplotami $T1$ a $T2$, bude optimální směrnice součinitele přestupu tepla mezi hodnotami použitých pro úsečky $a1$ a $a2$.



Obrázek 8: Graf změřené teploty a dvou vypočtených teplot pro dvě různé směrnice součinitele přestupu tepla s použitím n dopředných kroků

Optimální směrnice se nalezne pomocí Brentovy optimalizační metody [4]. Pro vypočtené průběhy teplot $T1$ a $T2$ se vypočítá chyba, která je znázorněna body 1 a 2 viz Obrázek 9. Obdobně se vypočítá chyba pro směrnici součinitele přestupu tepla $a3$, která je v grafu znázorněna bodem 3. Body 1, 2 a 3 se proloží parabola. Vypočte se minimum paraboly a pro tuto hodnotu součinitele přestupu tepla se spočítá chyba (bod 4). Bod s největší chybou se nebere v úvahu a zbylými třemi body se opět proloží parabola. Postup se opakuje až je nalezena optimální směrnice součinitele přestupu tepla. Parametr f se volí tak, aby byla inverzní úloha stabilní. Příliš malé hodnoty vedou k nestabilitě inverzní metody a příliš velké hodnoty vedou k velkému vyhlazení prudkých změn součinitele přestupu tepla.

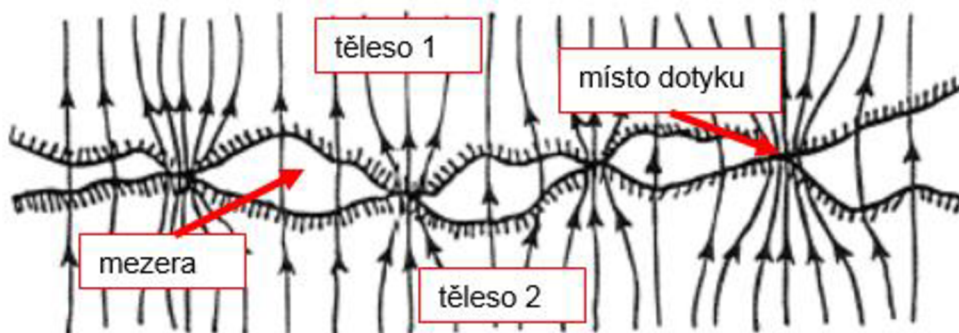


Obrázek 9: Konvergence k minimu pomocí inverzní parabolické interpolace

2.5. Tepelný odpor v kontaktu

Jestliže jsou dvě tělesa v kontaktu, vznikne mezi nimi nedokonalý spoj (rozhraní). To, jakým způsobem teplo mezi oběma tělesy přestupuje, zajímalo velké množství vědců již od roku 1930 a od této doby bylo na toto téma publikováno mnoho článků, knih, technických zpráv atd. Z tohoto důvodu můžeme usoudit, že přestup tepla mezi dvěma tělesy je jak z vědeckého, tak z komerčního hlediska velmi zajímavým tématem.

Vznik nedokonalého spoje je způsoben hlavně drsností obou povrchů těles a jejich tvarem. V případě, že jsou obě tělesa rovinného tvaru, jejich spoj se skládá z mnoha diskrétních mikrokontaktů, které jsou ve spoji rozloženy náhodně, pokud jsou obě tělesa rovinného tvaru. Pokud těleso nemá rovinný tvar, jsou mikrokontakty rozloženy do určité oblasti spoje. Velikost mikrokontaktů a jejich hustota ve spoji závisí na parametrech určujících drsnost povrchu a fyzikálních vlastnostech materiálu. Dalším parametrem, který ovlivní velikost a rozložení mikrokontaktů ve spoji, je velikost tlaku v kontaktu a typ deformace nerovností na povrchu obou těles. V místě, kde ve spoji nedochází k přímému dotyku obou materiálů, vzniká mezera. V mezeře se nejčastěji nachází tekutina (např. vzduch, voda, olej atd.).



Obrázek 10: Detail kontaktu povrchů dvou materiálů [6]

Přenos tepla mezi dvěma tělesy v kontaktu může nastat pomocí:

- kondukce přes místo přímého dotyku (mikrokontakt),
- kondukce a konvekce přes mezeru,
- radiace přes mezeru.

Celkový tepelný výkon přes kontakt je součtem tří dílčích tepelných výkonů:

$$Q = Q_d + Q_m + Q_r, \quad (25)$$

kde Q_d , Q_m a Q_r jsou tepelné výkony přes místo dotyku, mezeru a radiací.

Kondukce přes místa dotyku je hlavní složkou přenosu tepla, i když tento přestup tepla probíhá na velmi malých plochách. Definujme zdánlivou plochu A_z jako plochu společného kontaktu dvou těles a skutečnou plochu A_s jako plochu, která udává součet ploch všech mikrokontaktů ve spoji. Obvyklá plocha mikrokontaktů při nezatížením stavu je asi 0,01 – 0,1% ze zdánlivé plochy [7]. I při tlacích v řádech desítek MPa tvoří celková plocha mikrokontaktů pouze 1 – 2 % ze zdánlivé plochy (platí pro většinu kovových materiálů) [8]. Kondukce přes mezeru bývá velmi často chybně zanedbávána. Vezmeme-li v úvahu velikost plochy, kterou probíhá přestup tepla přes tekutinu (např. vzduch, kapalina), je množství přestoupeného tepla nezanedbatelná. A to hlavně v situaci, kdy jsou použity materiály s menší vodivostí (např. nerezová ocel) nebo při dobré vodivosti kapaliny v mezeře. Radiaci zanedbáváme, pokud teplota povrchu nepřesáhne 500 °C.

Přestup tepla přes rozhraní mezi dvěma tělesy vede k omezení tepelného toku, které označujeme jako tepelný odpor v kontaktu, který je definován jako [6]:

$$R_k = \frac{\Delta T}{Q}, \quad (26)$$

kde Q je tepelný výkon a ΔT je teplotní pokles na rozhraní.

Reciproční k tepelnému odporu je součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k :

$$h_k = \frac{1}{AR_k} = \frac{Q}{A\Delta T} = h_d + h_m + h_r, \quad (27)$$

kde A je plocha spoje obou těles, h_d , h_m a h_r jsou součinitelé přestupu tepla přes místo dotyku, mezeru a radiaci.

Velikost tepelného odporu v kontaktu závisí na:

- geometrii kontaktních ploch (povrchová drsnost, rovinnost, tvar plochy),
- tlak v kontaktu,
- šířka mezery (bezkontaktní oblast),
- typ tekutiny v mezeře (vzduch, voda, vakuum, atd.),
- tlak tekutiny v mezeře,
- tepelná vodivost materiálů a tekutin,
- mikrotvrdomost nerovností na povrchu tělesa (při plastické deformaci povrchu),
- modul pružnosti a Poissonův poměr (při elastické deformaci povrchu),
- průměrná teplota v místě dotyku ovlivňující jak velikost radiační složky tepelného výkonu, tak termofyzikální vlastnosti materiálu.

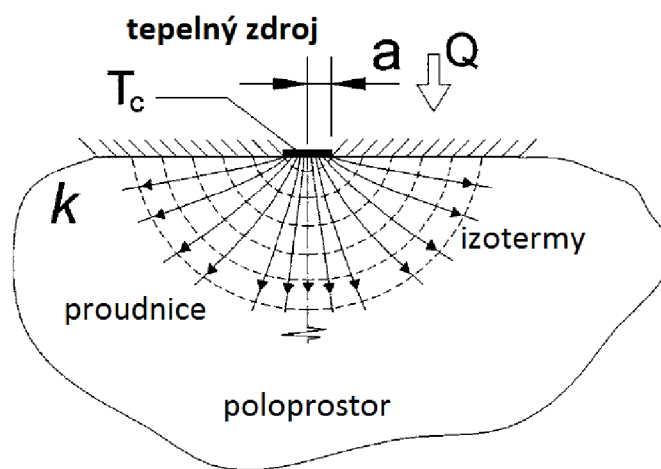
2.5.1. Tepelný odpor v kontaktu způsobený omezením oblasti

Z důvodu velké komplexnosti byl vytvořen zjednodušený termofyzikální model, který má následující vlastnosti [9]:

- tělesa v kontaktu jsou izotropní (tepelná vodivost a fyzikální vlastnosti jsou ve všech směrech konstantní),
- tělesa v kontaktu mají dostatečnou tloušťku vzhledem k drsnosti a vlnitosti povrchu,
- povrchy těles jsou čisté (bez okují),
- kontakt mezi tělesy je statický (žádné vibrace),
- pouze jeden zatěžovací cyklus (bez hysterezního efektu),
- poměr kontaktního tlaku a tvrdosti materiálu není menší než 10^{-6} a větší než 10^{-1} ,
- radiace je zanedbatelná,
- tepelný tok v mikrokontaktech je menší než 10^7 W/m^2 ,

- v mezeře mezi tělesy je vakuum nebo tekutina, která může být považována za kontinuum
- tekutina dokonale smáčí oba povrchy těles, které jsou v kontaktu.

Základním typem tepelného odporu je tzv. tepelný odpor ze zúžení či rozšíření R_Z , který je způsoben omezením oblasti, kterou protéká teplo. Mějme izotropní poloprostor (Obrázek 11), kde na hranici, která má tvar kruhu, předepíšeme jako okrajovou podmínku konstantní teplotu nebo konstantní tepelný tok.



Obrázek 11: Model pro odvození tepelného odporu způsobeného rozšířením oblasti [10]

Pro konstantní teplotu jako okrajovou podmínku dostáváme pro tepelný odpor zúžením, resp. rozšířením vztah [11]:

$$R_{Z,T=konst} = \frac{1}{4ka} \quad (28)$$

a pro konstantní tepelný tok [11]:

$$R_{Z,q=konst} = \frac{8}{3\pi^2} \frac{1}{ka'} \quad (29)$$

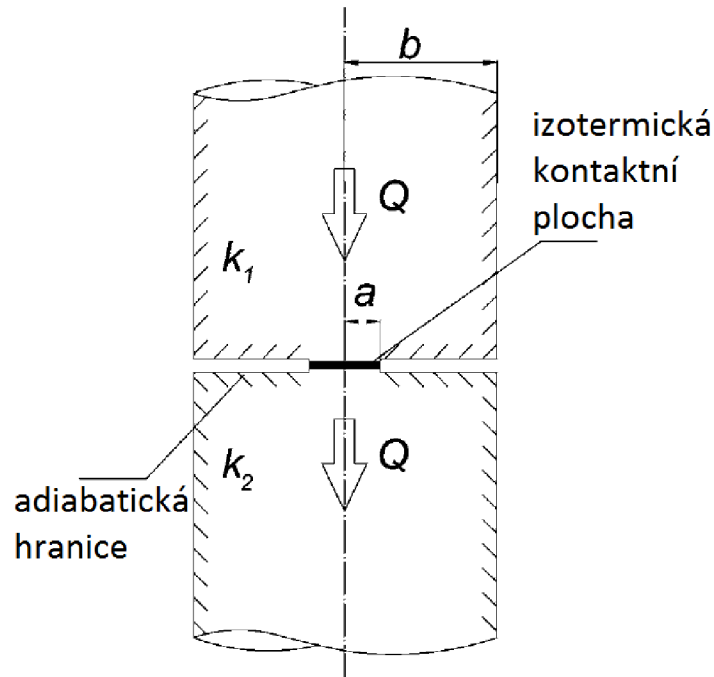
kde a je poloměr kontaktního místa, k tepelná vodivost materiálu.

Odvozené vztahy pro další tvary (elipsa, obdélník a pravidelný polygon) kontaktních míst na hranici lze nalézt v [11], [12], [9] a pomocí Fluentu v [13].

Navazujícím modelem je polonekonečný válec (Obrázek 12), který napodobuje reálný kontakt. V 70. – 90. letech se jím zabývali [14], [15], [16] a [17]. Pro jednu kontaktní plochu byl odvozen tepelný odpor jako [6]:

$$R_k = R_{z,T=\text{konst}} \cdot \psi(\epsilon) = \frac{\psi(\epsilon)}{4ka} , \quad (30)$$

kde a je poloměr kontaktního místa, $\psi(\epsilon)$ je koeficient omezení tepelného toku a jeho vyjádření bude uvedeno později a kde velikost relativní plochy kontaktu $\epsilon = \sqrt{A_s/A_z}$, A_s je skutečná plocha kontaktu (součet ploch všech mikrokontaktů) a A_z je celková plocha spoje.



Obrázek 12: Model polonekonečného válce [10]

Pro jednu plochu kontaktního místa ve tvaru nekonečného válce byla odvozena rovnice tepelného odporu (30). Obě plochy kontaktního místa popisuje vztah:

$$R_k = R_{k1} + R_{k2} = \frac{\psi(\epsilon)}{4k_1a} + \frac{\psi(\epsilon)}{4k_2a} = \frac{\psi(\epsilon)}{2ak_m} , \quad (31)$$

kde k_1 a k_2 jsou tepelné vodivosti těles a k_m je definováno jako:

$$k_m = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} . \quad (32)$$

Wang [18] pokládá stávající model za nedostatečný a nabádá k tomu, aby byl vytvořen nový model pro reálný mikrokontakt s oběma povrchy kontaktu. Dále dodává, že současný model je problematické použít v měřítku atomů či molekul a při ultrarychlých dějích. Velikost tepelné kondukce podle Fourierova zákona se při tomto případě může značně lišit od reálné situace. Pro mikrokontakty o velikosti nanočástic byly vytvořeny dva modely: „acoustic mismatch

model“ [19] a „diffusive mismatch model“ [20]. Pokud tělesa v kontaktu nejsou rovinného tvaru, vzniká další tepelný odpor v literatuře označovaný jako makroskopický. Podrobněji je tato nadstavba základního (rovinného) modelu tepelného odporu v kontaktu popsána v [21], [22] a [10]. Tato práce se zabývá pouze základním rovinným tvarem obou těles v kontaktu.

2.5.2. Model tepelné vodivosti pro více kontaktních míst

Ve většině literatury se uvádí vztahy pro součinitel přestupu tepla v kontaktu, proto bude uvedena i v další části této práce. Základní vztah pro součinitele přestupu v kontaktu, kde je bráno v úvahu více kontaktních míst ve spoji, je:

$$h_k = \frac{1}{A_z R_k} = \frac{2ak_m}{A_z \psi(\epsilon)} = \frac{2na_{av}k_m}{\psi(\epsilon)}, \quad (33)$$

kde n je hustota mikrokontaktů a a_{av} je průměrný poloměr mikrokontaktu.

Pro kontakt s konstantní teplotou v místě mikrokontaktu byl odvozen koeficient omezení tepelného toku ve tvaru [23]:

$$\psi(\epsilon) = (1 - \epsilon)^{1,5}. \quad (34)$$

2.5.3. Deformační vliv

Nyní bude pozornost zaměřena na určení poměru A_s/A_z , hustoty mikrokontaktu n a průměrného poloměru kontaktní plochy a_{av} . Tyto neznámé jsou odvozeny pomocí analýzy deformace povrchu těles. Existují tři základní typy deformace: plastická, elastická a elastoplastická.

Mikić [24] vytvořil kritérium, které nám určí typ deformace v kontaktu:

$$\varphi = \frac{H_c}{mE'}, \quad (35)$$

kde H_c je Vickersova tvrdost, m je standardní odchylka sklonů nerovností viz rovnice (48) a kde koeficient E' je definován jako:

$$E' = \frac{E_1 E_2}{E_2(1 - \nu_1) + E_1(1 - \nu_2)}, \quad (36)$$

kde $E_{1,2}$ je modul pružnosti a $\nu_{1,2}$ je Poissonův poměr pro jednotlivá tělesa v kontaktu. Pokud je $\varphi \leq 0,33$ nastane plastická deformace, pro $\varphi \geq 3$ dojde k elastické deformaci. Pro kovy obvykle platí, že deformace bude plastická a závislá na tvrdosti materiálu.

Vickersova tvrdost H_c může být odvozena z meze kluzu τ pomocí:

$$H_c \cong 3\tau \quad . \quad (37)$$

2.5.3.1. Plastická deformace

Cooper [15] vytvořil model pro plastickou deformaci založenou na předpokladu, že povrchová drsnost má Gaussovské rozdělení. Z tohoto modelu dále vychází Mikić [24]. Na oba modely navázal Yovanovich [23] a vytvořil přesnější korelaci. Slabé místo těchto modelů se ukazuje při použití malých tlaků, při nichž modely nemusejí pracovat vždy korektně [25].

Plastická deformaci hraje hlavní roli při kontaktu dvou kovů. Podle [23] byly odvozeny vztahy pro A_s/A_z , n a a_{av} :

$$\frac{A_s}{A_z} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}} \right) \quad , \quad (38)$$

$$n = \frac{1}{16} \left(\frac{m}{\sigma} \right)^2 \frac{\exp(-\lambda^2)}{\operatorname{erfc}(\lambda/\sqrt{2})} \quad , \quad (39)$$

$$a_{av} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left(\frac{\sigma}{m} \right) \exp \left(\frac{\lambda^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}} \right) \quad , \quad (40)$$

Součinem n a a_{av} dostaneme:

$$na_{av} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{m}{\sigma} \right) \exp \left(-\frac{\lambda^2}{2} \right) \quad , \quad (41)$$

kde m je standardní odchylka sklonů nerovností povrchu, σ je střední kvadratická odchylka výšek nerovností povrchu, erfc je chybová funkce, λ značí střední rovinu oddělení, definovanou jako:

$$\lambda = \frac{Y}{\sigma} \quad , \quad (42)$$

kde Y značí vzdálenost středních rovin povrchu obou těles (Obrázek 13). Dále jsou uvedeny charakteristiky drsnosti povrchu [14]:

- R_a – aritmetická odchylka výšek nerovností,

$$Ra_{1,2} = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad , \quad (43)$$

- Rq – střední kvadratická odchylka výšek nerovností,

$$\sigma_{1,2} = Rq_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} , \quad (44)$$

- m – standardní odchylka sklonů nerovností:

$$m_{1,2} = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dy(x)}{dx} \right| dx , \quad (45)$$

kde $y(x)$ značí výšku bodu od průměrné hodnoty výšky profilu (Obrázek 13) a L je délka profilu.

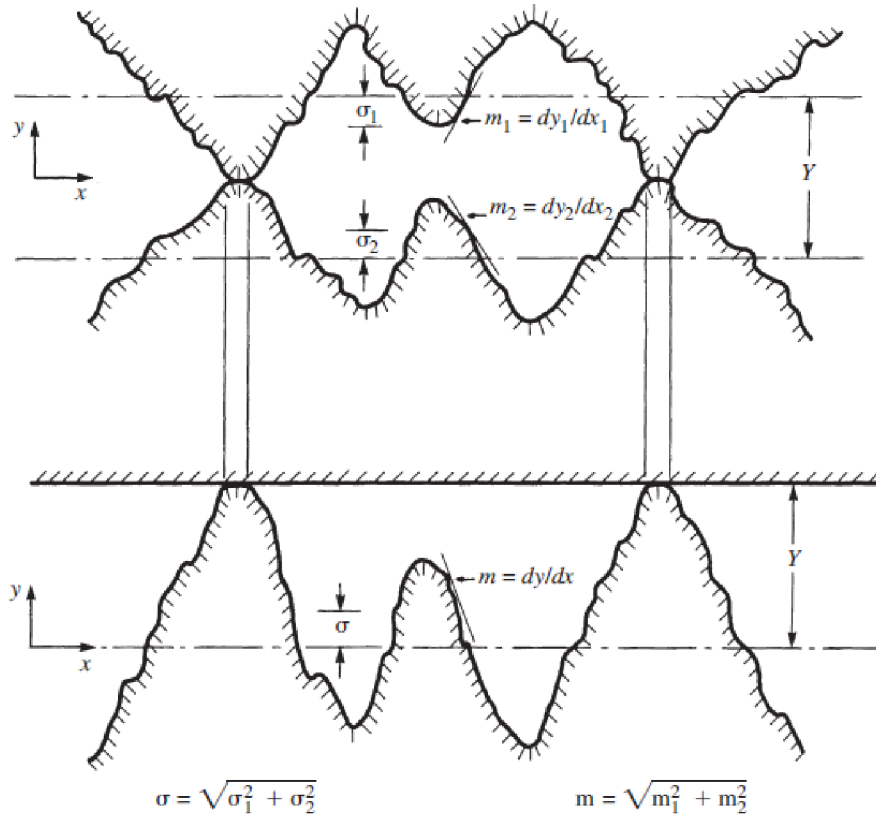
Pokud budeme uvažovat drsnost povrchu s Gaussovským rozdělením, můžeme Ra a Rq podle [14] vyjádřit pomocí vztahu:

$$\sigma_{1,2} = Rq = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot Ra , \quad (46)$$

Výpočet hodnot σ a m je proveden podle vzorců:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} , \quad (47)$$

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} , \quad (48)$$



Obrázek 13: Detail kontaktu dvou těles

V rovnici (41) zbývá poslední neznámá proměnná λ . Určíme ji pomocí silové rovnováhy:

$$PA_z = \sum_{i=1}^N H_{c,i} A_{s,i} \quad (49)$$

kde P je tlak působící na plochu dotyku, A_z je zdánlivá plocha kontaktu, $H_{c,i}$ je mikrotvrdość jednoho kontaktu, který má plochu $A_{s,i}$ a N je počet kontaktních míst. Dále se uvažuje, že všechny kontaktní místa mají stejnou mikrotvrdość H_c :

$$PA_z = \sum_{i=1}^N H_{c,i} A_{s,i} = H_c \sum_{i=1}^N A_{s,i} = H_c A_s \quad (50)$$

Z rovnice (38) je odvozen vztah:

$$\frac{P}{H_c} = \frac{A_s}{A_z} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}} \right) , \quad (51)$$

Výsledná aproximace pro λ má tvar:

$$\lambda = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{2P}{H_c} \right) , \quad (52)$$

V rovnici (52) nelze analyticky určit hodnotu inverzní chybové funkce. Korelační vztahy pro λ udávají rovnice (53) a (54).

Yovanovich [23] vytvořil korelaci pro odhad λ :

$$\lambda = 1,184 \left[-\ln \left(3,132 \frac{P}{H_c} \right) \right]^{0,547} . \quad (53)$$

Později publikovali Song s Yovanovichem další korelaci [26]:

$$\lambda = 1,363 \left[-\ln \left(5,589 \frac{P}{H_c} \right) \right]^{0,5} . \quad (54)$$

Vztahy (53) a (54) se mohou použít, pokud $2 \leq \lambda \leq 4,75$ a $10^{-6} \leq P/H_c \leq 2 \cdot 10^{-2}$.

Pro plastickou deformaci povrchu byl odvozen vztah pro výpočet poměru P/H_c pomocí Brinellovy tvrdosti [27]:

$$\frac{P}{H_c} = \left[\frac{P}{1,62c_1(\sigma/(\sigma_0 m))^{c_2}} \right]^{1/(1+0,071c_2)} , \quad (55)$$

kde $\sigma_0 = 1\mu m$, c_1 a c_2 jsou koeficienty vyjádřeny podle [27]:

$$c_1 = H_{BGM}(4 - 5,77\kappa + 4\kappa^2 - 0,61\kappa^3) , \quad (56)$$

$$c_2 = -0,57 + 0,82\kappa - 0,41\kappa^2 + 0,06\kappa^3 , \quad (57)$$

$$\kappa = \frac{H_B}{H_{BGM}} , \quad (58)$$

kde $H_{BGM} = 3,178 \text{ GPa}$ (označuje průměr z minimální a maximální hodnoty tvrdosti podle Brinella H_B).

Tvrdot podle Brinella je definována jako [28]:

$$H_B = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} , \quad (59)$$

kde F je síla zatížení, D je průměr zatěžovací kuličky a d je průměr vtisknutí do materiálu.

Z rovnic (33), (34), (38) a (41) je odvozen výsledný teoretický předpis pro součinitele přestupu tepla v kontaktu při plastické deformaci povrchu:

$$h_k = \frac{k_m m}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-\lambda^2/2)}{\left[1 - \sqrt{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc}(\lambda/\sqrt{2})\right]^{1,5}} \quad (60)$$

Tento vztah je základem pro teorii součinitele přestupu tepla v kontaktu pro rovinná tělesa při plastické deformaci.

Rovnici (60) lze zmodifikovat do tzv. bezrozměrné tepelné vodivosti v kontaktu pro plastickou deformaci povrchu kontaktů:

$$C_k = \frac{\sigma}{m} \frac{h_k}{k_m} = f(\lambda) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-\lambda^2/2)}{\left[1 - \sqrt{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc}(\lambda/\sqrt{2})\right]^{1,5}} \quad (61)$$

2.5.3.2. Elastická deformace

Mikić [24] vytvořil model založený na Herztově teorii a bere v úvahu všechna dotyková místa, která vzniknou elastickou deformací drsného rovinného povrchu. Komplexnější model byl vytvořen Sridharem [29]. Uvedené modely jsou dobré pro odhad tepelné vodivosti v kontaktu u tvrdých materiálů, např. nástrojové oceli. Pro měkké materiály jsou modely krajně nevhodné.

2.5.3.3. Elastoplastická deformace

Srindar a Yovanovich [30] vytvořili elastoplastický model založený na plastickém modelu od Coopera [15] a elastickém modelu od Mikiće [24].

2.5.4. Kondukční tepelná vodivost v mezeře při plastické deformaci povrchu

Druhou částí přestupu tepla přes nedokonalý spoj je kondukce přes mezeru vyplněnou tekutinou.

Základní rovnici pro výpočet tepelné vodivosti v mezeře vyplněné plynem ve formě integrálu odvodili [31], [32]:

$$h_m = \frac{k_p}{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{\exp[-(\lambda - u)^2/2]}{u + M/\sigma} du = \frac{k_p}{\sigma} I_p \quad , \quad (62)$$

kde k_p je tepelná vodivost plynu, $u = t/\sigma$ bezrozměrná tloušťka mezery, M je plynový parametr ředění definovaný podle [31] a [32] jako:

$$M = \alpha\beta\Lambda \quad , \quad (63)$$

kde

$$\alpha = \frac{2 - \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{2 - \alpha_2}{\alpha_2} \quad , \quad (64)$$

$$\beta = \frac{2\gamma}{(\gamma + 1)Pr} \quad , \quad (65)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(\frac{T_p}{T_{p,0}} \right) \left(\frac{P_{p,0}}{P_p} \right) \quad , \quad (66)$$

kde $\alpha_{1,2}$ je koeficient přizpůsobení, který zodpovídá za účinnost výměny tepla mezi povrchem a tekutinou. Tento koeficient musí být zjištěn experimentálně pro příslušnou kombinaci plynu a pevné látky. β je parametr závislý na poměru měrných tepelných kapacit $\gamma = c_p/c_v$ a Prandtlově číslu Pr . Střední volná dráha molekuly Λ závisí na referenční hodnotě Λ_0 , teplotě plynu T_p a tlaku plynu P_p , stejně jako na referenční teplotě plynu $T_{p,0}$ a referenčním tlaku plynu $P_{p,0}$.

Negus a Yovanovich [32] odvodili pro integrál z rovnice (62) korelační výraz:

$$I_p = \frac{f_p}{\lambda + M/\sigma} \quad , \quad (67)$$

který platí pro $2 \leq \lambda \leq 4$ a kde

$$f_p = 1,063 + 0,0471(4 - \lambda)^{1,68} [\ln(\sigma/M)]^{0,84} \quad , \quad \text{pro } 0,01 \leq M/\sigma \leq 1 \quad (68)$$

$$f_p = 1 + 0,06(\sigma/M)^{0,8} \quad , \quad \text{pro } 1 \leq M/\sigma \leq \infty \quad (69)$$

Tato korelace má maximální chybu přibližně 2%.

2.5.5. Radiační vodivost v mezeře

Poslední částí přestupu tepla je radiace. Přenos tepla pomocí radiace mezi dvěma tělesy je definován jako [9]:

$$Q_r = \sigma_r A_a \Omega_{12} (T_{j1}^4 - T_{j2}^4) , \quad (70)$$

Kde σ_r je Stefan – Boltzmannova konstanta, A_z je plocha přestupu, $T_{j1,2}$ jsou teploty v kontaktu obou těles, radiační parametr Ω_{12} je dán vztahem:

$$\frac{1}{\Omega_{12}} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 , \quad (71)$$

kde $\epsilon_{1,2}$ je emisivita materiálu.

Výsledná radiační vodivost je odvozena jako:

$$h_r = \frac{Q_r}{A_z (T_{j1} - T_{j2})} = \frac{\sigma \Omega_{12} (T_{j1}^4 - T_{j2}^4)}{T_{j1} - T_{j2}} . \quad (72)$$

2.5.6. Empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu

Snahou většiny výzkumníků zabývajících se tímto tématem je najít co nejlepší aproximaci jejich teoretických a experimentálních výsledků do tvaru:

$$C_k = \frac{\sigma h_k}{m k_m} = u \left(\frac{P}{M} \right)^v , \quad (73)$$

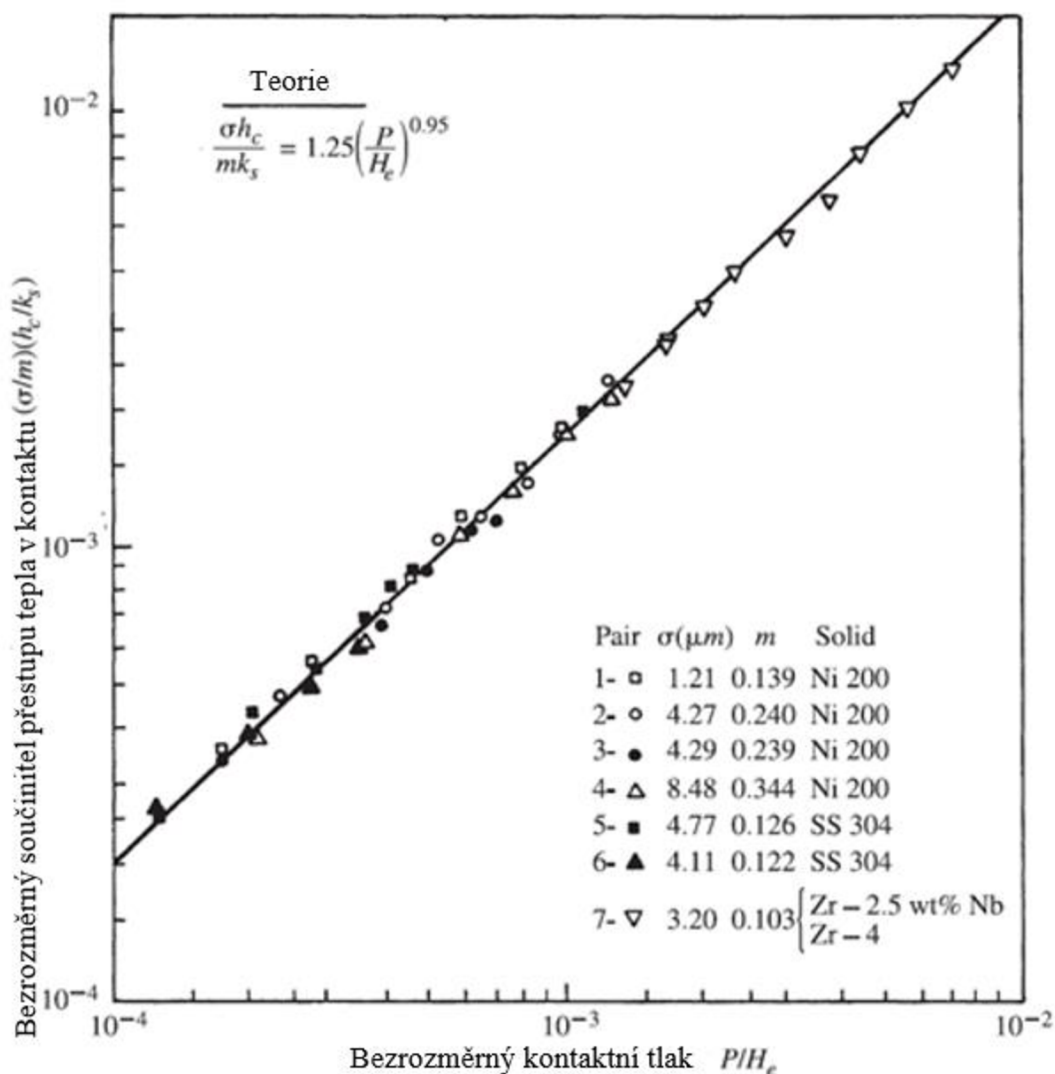
kde P je tlak, M je tvrdost nebo Youngův modul u, v jsou korelační koeficienty.

První empirický model pro plastickou deformaci navrhnul Mikić [24]:

$$C_k = \frac{\sigma h_k}{m k_m} = 1,13 \left(\frac{P}{M} \right)^{0,94} , \quad (74)$$

Dalším model rovněž pro plastickou deformaci publikoval Yovanovich [23]:

$$C_k = \frac{\sigma h_k}{m k_m} = 1,25 \left(\frac{P}{M} \right)^{0,95} , \quad (75)$$



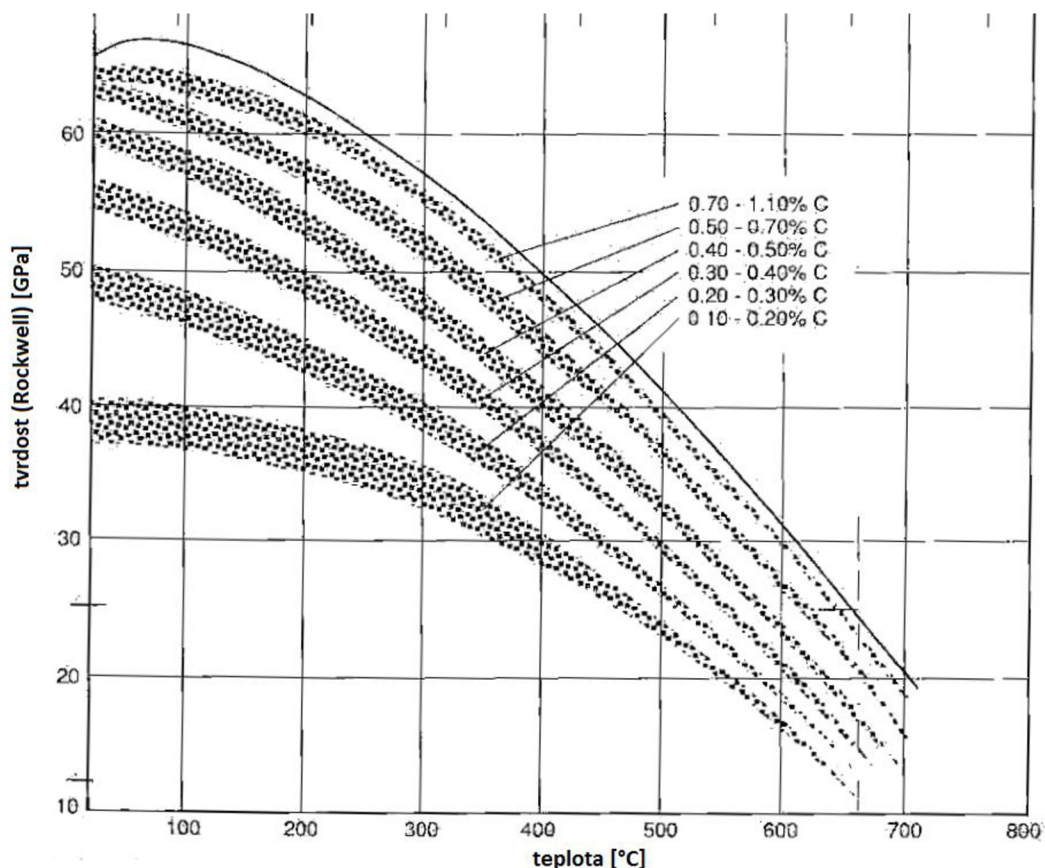
Obrázek 14: Srovnání teoretických a experimentálních výsledků bezrozměrné tepelné vodivosti v kontaktu pro Yovanovichův model [8]

Na tyto dva základní modely navázalo mnoho další výzkumníků. Detailní přehled teoretických a experimentálních modelů lze najít v [25].

2.5.7. Parametry ovlivňující tepelnou vodivost v kontaktu

2.5.7.1. Vliv teploty

Zásadní vliv na tepelnou vodivost v kontaktu má teplota tělesa. Hlavní důvodem je závislost tvrdosti materiálu na teplotě. Se vzrůstající teplotou klesá tvrdost materiálu a tím dochází k lepší deformaci povrchu materiálu. Výsledkem je větší plocha skutečného kontaktu a zvýšená tepelná vodivost v kontaktu. Zvýšenou teplotou rovněž dochází k tvorbě okují na povrchu materiálu.



Obrázek 15: Vliv teploty na tvrdost oceli s různým obsahem uhlíku [32]

Tvorba vrstvy okují na povrchu kovových materiálů může významně ovlivnit tepelnou vodivost v kontaktu. Jeden z důvodů je menší tepelná vodivost okují. Druhým důvodem je zmenšení reálné kontaktní plochy, protože drsnost okují většinou převyšuje drsnost povrchu kovového materiálu [34]. Dokonce i velmi tenká vrstva okují může značně snížit tepelnou vodivost v kontaktu. Otázkou je jakým způsobem zakomponovat okuje do modelu přestupu tepla přes kontakt. Velmi zjednodušeným způsobem je do modelu použít drsnost povrchu kovového materiálu a tepelnou vodivost okují. Další možností je uvažovat okuje jako třetí těleso v kontaktu.

2.5.7.2. Vliv cyklického zatěžování na součinitel přestupu tepla v kontaktu

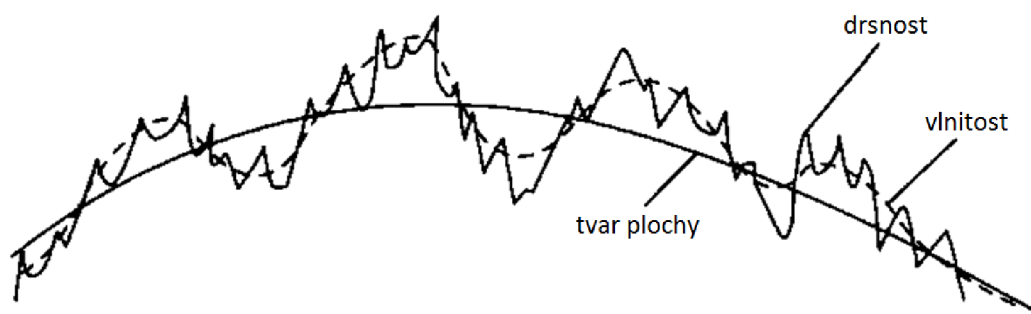
Pokud při kontaktu dvou těles dochází k plastické deformaci, mění se povrchové vlastnosti materiálu. Když je stejný tlak aplikovaný několikrát po sobě, dochází ke zvětšování reálné plochy kontaktu oproti prvnímu zatížení. Tento efekt se nazývá cyklické namáhání a jeho

studium se zabývali Wahid a Madhusudana [35] a zjistili, že po 25 cyklech zatížení již nedochází k nárůstu součinitele přestupu tepla v kontaktu.

2.6. Popis povrchu materiálu

Jedním ze základních problémů pro odvození tepelného odporu v kontaktu je získat co nejpřesněji charakteristiku a rozložení všech kontaktních míst v rozhraní. Topografii obecného povrchu můžeme rozdělit na tři základní komponenty:

- drsnost,
- vlnitost,
- tvar plochy.



Obrázek 16: Tvar povrchu materiálu [36]

V současné době je pro kalkulaci součinitele přestupu tepla v kontaktu brána v úvahu pouze drsnost a tvar plochy. Avšak Kumar s Ramamurthim tvrdí, že i vlnitost je důležitá pro správné odvození velikost tepelné vodivosti v kontaktu [37].

Rozložení a velikost mikrokontaktů se většinou odhaduje pomocí drsnosti povrchu materiálu založené na dvourozměrných charakteristikách viz rovnice (44) a (45). Trojrozměrné charakteristiky povrchu jsou sice definovány, ale nejsou normovány a používány do modelů tepelné vodivosti v kontaktu.

Podle [38] byly definovány následující 3D parametry drsnosti povrchu:

- aritmetická odchylka výšek nerovností získaná pomocí 3D topografie:

$$S_a = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} |\eta(x, y)| dx dy , \quad (76)$$

- střední kvadratická odchylka výšek nerovností získaná pomocí 3D topografie:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} |\eta^2(x, y)| dx dy} , \quad (77)$$

- standardní odchylka sklonů nerovností získaná pomocí 3D topografie:

$$m_{3D} = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left| \frac{\partial \eta(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial \eta(x, y)}{\partial y} \right| dx dy , \quad (78)$$

kde l_x, l_y je úsek na ose x, y ; $\eta(x, y)$ je výška bodu od průměrné roviny výšky profilu.

V 70. let byl přijat předpoklad, že rozdělení výšek drsnosti je Gaussovské. Na této podmínce postavila svůj model pro tepelnou vodivost v kontaktu většina autorů, např. Cooper [15] a Mikić [24]. V roce 2001 vydali svůj článek Greenwood a Wu [39], kteří tvrdí, že předpoklad Gaussovského rozdělení výšek drsnosti je špatný.

Mnoho autorů se snaží popisovat povrch materiálu pomocí fraktálů, např. [40]. Jiang [41] publikoval článek, který popisuje povrch obrobeného povrchu pomocí Weierstrass – Mandelbrotovy fraktální funkce. Warren [42], [43] simuloval povrch materiálu pomocí Kantorových fraktálních množin. Popis povrchu materiálu pomocí fraktálů byl sice publikován, ale nikdo nevěděl jak získat fraktální rozměry povrchu. Na tuto otázku odpověděl až Wang [44], [45], který navrhl novou metodu pro získání rozměrů fraktálu nazvanou jako „wavelet transform“. Použití fraktálů nemusí být korektní, protože Wang [18] si není jist, zda je povrch materiálu vůbec fraktální a dále navrhuje, že by měl být povrch materiálu popsán pomocí 3D topografie a to nejen výše uvedenými vztahy.

2.7. Experimentální zařízení používané pro měření tepelného odporu v kontaktu

V praxi se používají dva typy experimentálních zařízení pro měření tepelného odporu. První typ zařízení zjišťuje tepelný odpor pomocí konstantního tepelného toku, který prochází oběma tělesy, ve kterých jsou zabudovány termočlánky. Z konstantního tepelného toku a rozdílu teplot v kontaktu snad získáme hodnotu tepelného odporu pro daný experiment. Výhodou je, že tento způsob dává velmi přesné hodnoty tepelného odporu. Nevýhodou je ale časová náročnost, kde zajištění konstantního tepelného toku zabere několik hodin.

Druhý způsob spočívá nahřání jednoho z těles, poté rychlého přiložení k druhému tělesu a vytvoření kontaktu. Metoda se zakládá na měření teploty v určitém místě těles pomocí

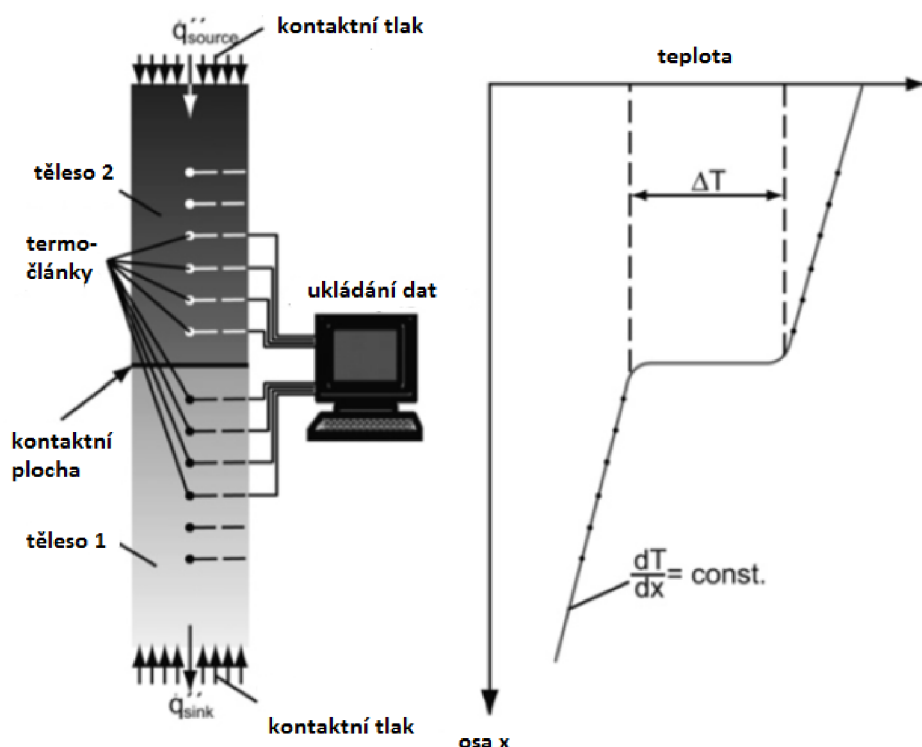
termočlánků a zpětnému dopočítávání tepelného odporu v kontaktním místě pomocí teplotních záznamů z termočlánků nebo infrakamery. K zpětnému dopočítávání okrajové podmínky v místě dotyku je použita inverzní úloha vedení tepla.

2.7.1. Měření při ustáleném vedení tepla (statický způsob)

Nejčastější metodou měření tepelného odporu je použití experimentů, kde dojde k ustálenému vedení tepla. Mezi dvěma tělesy je vytvořen kontakt a na opačných koncích těles dochází buď k nahřívání, nebo k ochlazování. Teplotní pole je měřeno pomocí termočlánků (viz Obrázek 17). Lineární teplotní profil udává konstantní gradient a teplotní rozdíl v místě kontaktu obou těles je vypočten pomocí extrapolace z teplot zjištěných pomocí termočlánků. Výsledný tepelný odpor R (součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k) je

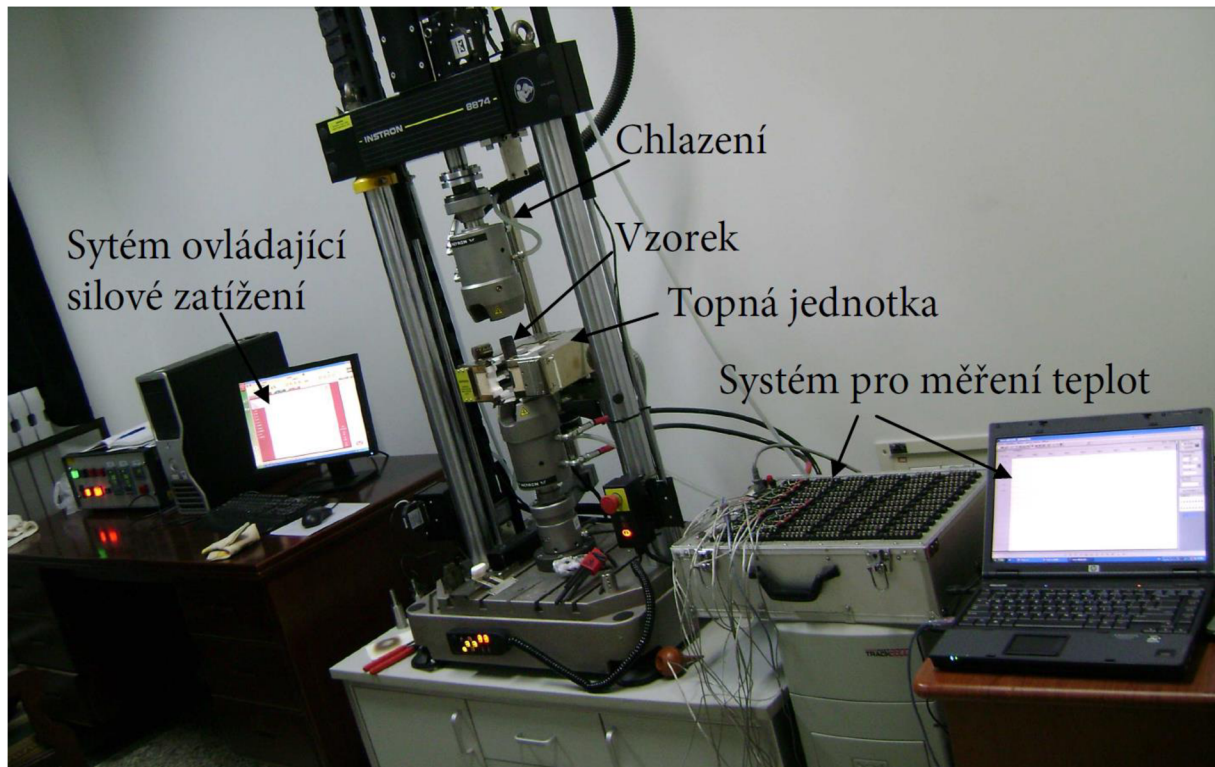
$$R = \frac{1}{h_k} = \frac{\Delta T}{q_{konst.}} \quad (79)$$

kde ΔT je rozdíl povrchových teplot v místě kontaktu a $q_{konst.}$ je velikost tepelného toku po ustálení.



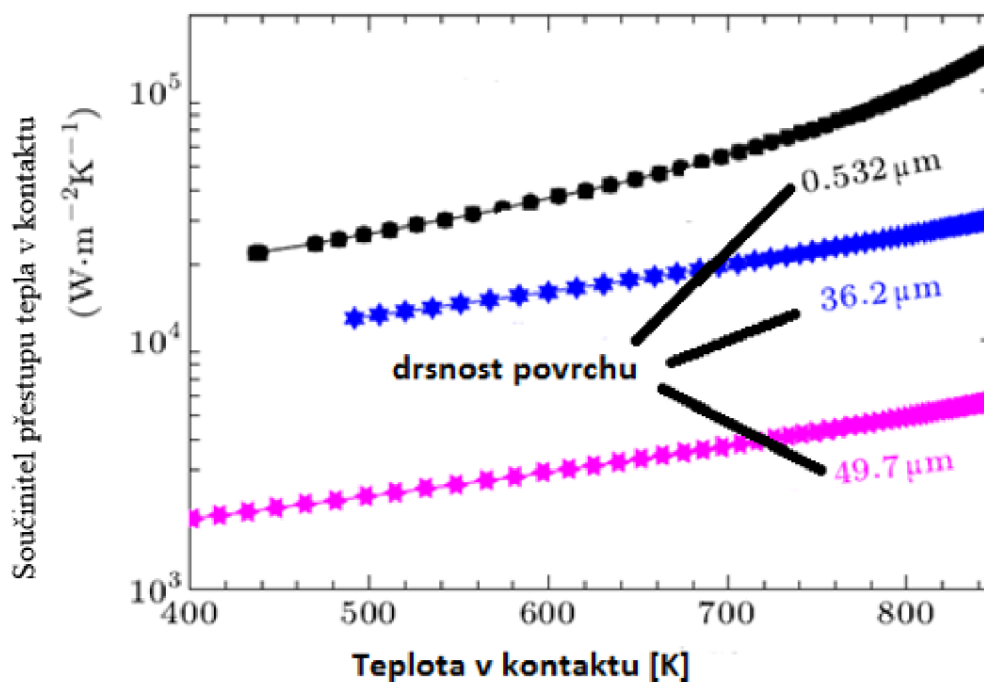
Obrázek 17: Nákres experimentálního zařízení při měření a odpovídající teplotní profil [46]

Typický způsob měření tepelného odporu v kontaktu představil Liu [47], viz Obrázek 18. Zařízení se skládá z testovací jednotky, systému ovládající velikost silového zatížení, topné a chladicí jednotky a systému pro měření teplot. Testovací jednotka se skládá z tepelného zdroje, 12 termočlánků, dvou vzorků a chlazení. Při experimentu byly vzorky stlačeny pomocí hydraulického systému a vzorky byly na vrchní straně ochlazovány a spodní ohřívány. Termočlánky typu K byly vloženy do děr vyvrtaných kolmo k ose symetrie použitých vzorků.



Obrázek 18: Experimentální zařízení pro měření tepelného odporu [47]

Během experiment docházelo k ukládání dat z termočlánků do počítače. Průměr vzorku byl 15 mm, při použití silového zatížení 12 kN byl výsledný kontaktní tlak 17 MPa. Vzorky byly vytvořeny z materiálu GH600 a uhlík-uhlíkového laminátu (angl. C-C composite). Díky lineárnímu teplotnímu profilu je pomocí rovnice (17) dopočítán součinitel přestupu tepla v kontaktu, jeho hodnoty pro různé drsnosti je zobrazen na Obrázek 19.



Obrázek 19: Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu [47]

Velkou nevýhodou tohoto způsobu měření je velká časová náročnost, Fieberg [46] udává, že k dosažení ustáleného vedení tepla je v některých případech potřeba až několik hodin. Obtížné je rovněž regulovat teploty na koncích vzorků tak, aby bylo dosaženo konstantního tepelného toku. Nevýhodou může být i měření teploty uvnitř těles pomocí termočlánků, které narušují teplotní pole v tělesech a podle mnoha autorů je celkem obtížné získat věrohodné výsledky. Dále se touto problematikou zabývají v [49], [50].

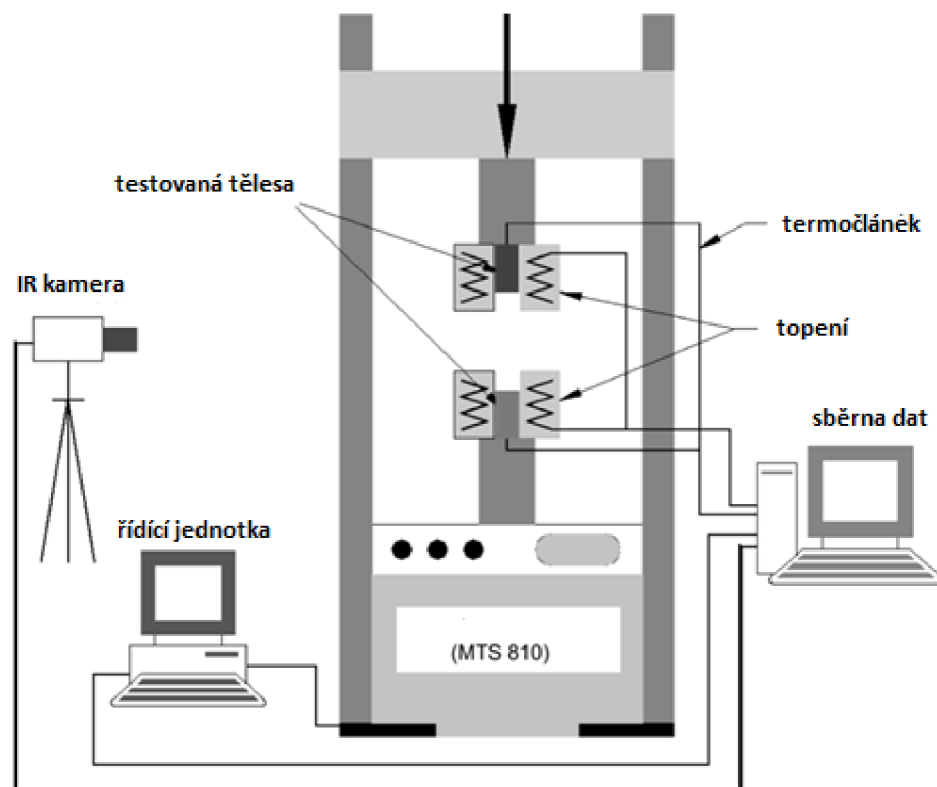
2.7.2. Měření při neustáleném vedení tepla (dynamický způsob)

Tento způsob měření tepelného odporu je v literatuře popsán jen v několika případech. Důvodem, proč se tento způsob měření do dnešní doby neprosadil, je obava vědecké obce z nepřesných výsledků při měření teploty uvnitř tělesa pomocí termočlánků. Má se za to, že porušení teplotního pole uvnitř tělesa zabudováním termočlánku vede k velkým problémům při numerických výpočtech.

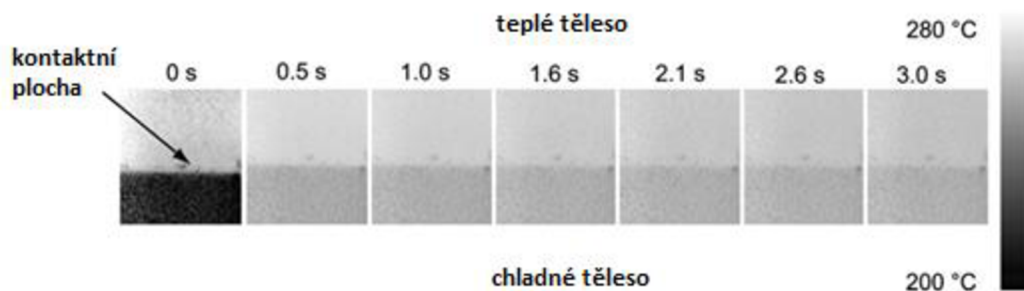
Při experimentu se nejdříve nahřeje jedno z těles na požadovanou teplotu a poté se rychle přitlačí k druhému při požadovaném kontaktním tlaku. Během experimentu se měří teploty buď uvnitř těles v kontaktu pomocí termočlánků, nebo jsou tělesa v kontaktu snímána infračervenou

kamerou. Po experimentu se vytvoří numerický model a použije se inverzní úloha vedení tepla tak, aby se nastavením tepelného odporu v každém časovém kroku během experimentu dosáhlo v místech umístění termočlánků nebo v bodě při snímání infračervenou kamerou stejné teploty jako při měření.

Pro zjišťování tepelného odporu mezi částmi spalovací motoru představil Fieberg [46] metodu jak měřit tepelný odpor v kontaktu pomocí infračervené kamery. Experiment je zaměřen na zjištění tepelného odporu mezi válcem (ocel) a pístu (hliník) při teplotě až 280 °C a kontaktním tlaku až 85 MPa. Experimentální zařízení (Obrázek 20) se skládá ze dvou vzorků, topných těles, termokamery a systému pro ukládání dat. Na začátku experimentu se vzorky nahřejí na různou teplotu a jsou k sobě přitisknuty při požadovaném kontaktním tlaku.

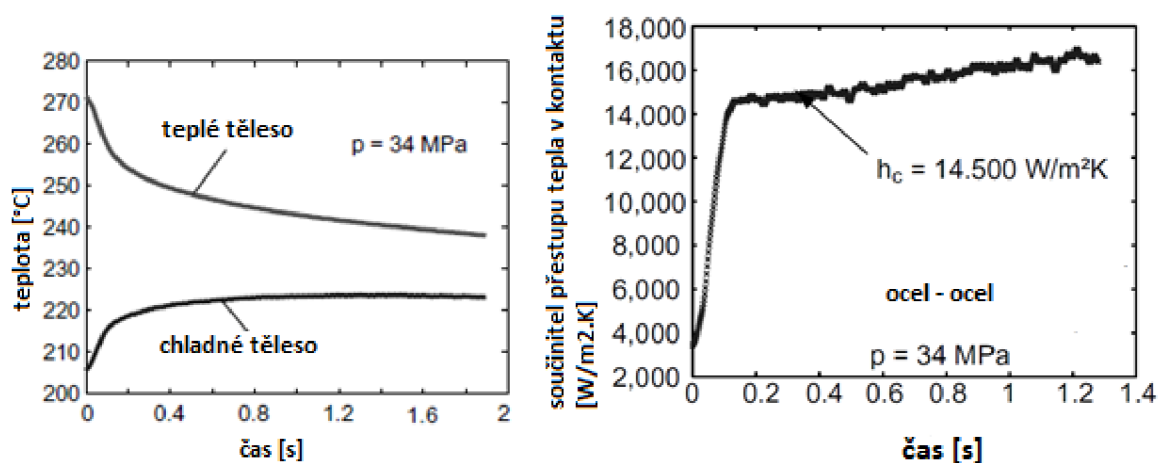


Obrázek 20: Nákres experimentálního zařízení pro měření tepelného odporu pomocí infračervené kamery [46]



Obrázek 21: Teplotní pole při kontaktu dvou těles změřené pomocí infračervené kamery

Aby se zamezilo vlivu okolní radiace, byly vzorky natřeny černou barvou s emisivitou $\varepsilon = 0.95$. Na Obrázek 21 jsou vidět snímky z infrakamery, mezi nimiž je časový rozdíl půl sekundy. Z těchto snímků byly odečteny teploty (Obrázek 22, vlevo) ve dvou bodech, které byly vzdáleny 52 μm od linie kontaktu. Dále byl pomocí inverzní úlohy vedení tepla vypočten průběh součinitele přestupu tepla během experimentu, kde počáteční teplota těles byla 206 $^{\circ}\text{C}$ a 273 $^{\circ}\text{C}$, kontaktní tlak 34 MPa a vzorky byly vyrobeny z nerezové oceli.

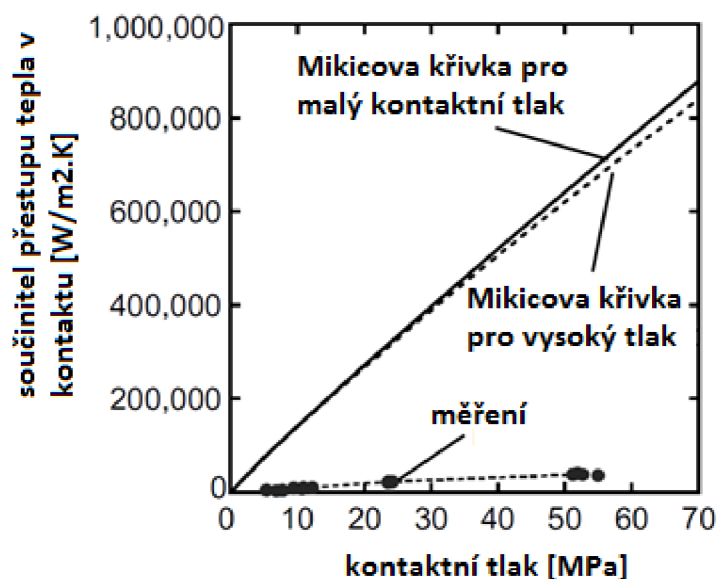


Obrázek 22: Průběh teplot během experimentu (vlevo) a součinitele přestupu tepla v kontaktu (vpravo) [46]

3. POPIS PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Tato práce je zaměřena na měření tepelného odporu (resp. součinitele přestupu tepla) v kontaktu zjištěného pomocí experimentálních měření za podmínek, které panují při tváření kovů a válcování za tepla – vysoké teploty (až 1000 °C pro ocel) a vysoký kontaktní tlak (až 100 MPa). Zkoumaným materiálem této práce je nerezová ocel DIN 1.4828.

Existuje několik empirických modelů (viz kapitola 2.5) pro odvození tepelného odporu v kontaktu, které jsou hojně využívány. Tyto modely se dají použít, pouze pokud kontaktní tlak nepřesáhne 7 MPa [24]. Další důležitým faktorem ovlivňujícím velikost tepelného odporu je teplota materiálu, která spolu s kontaktní tlakem ovlivňuje deformaci povrchu při kontaktu dvou těles. Fieberg [46] uvádí, že závislost tepelného odporu na teplotě materiálu je znatelná až nad 500 °C pro ocel, do této hodnoty nemá teplota na velikost tepelného odporu znatelný vliv, což je v rozporu s výsledky publikovanými v [49]. Fieberg ve svém článku také uvádí srovnání hodnot tepelného odporu v kontaktu (ocel a hliník) mezi používanými empirickými modely a jeho experimentálními měřeními (Obrázek 23), kde je vidět značná nadhodnocenost součinitele přestupu tepla v kontaktu při vysokých tlacích.



Obrázek 23: Srovnání hodnot tepelného odporu v kontaktu mezi teoretickými modely (Mikic) a experimentálním měřením, tělesa v kontaktu: ocel – hliník [46]

Rovněž Wang [18] ve své rešerši uvádí, že pokrok v určení tepelného odporu v kontaktu se neobejde bez vývoje nových experimentálních metod a s nimi spojenými experimentálními měřeními.

Znalost chování tepelného odporu v kontaktu za vysokých teplot a kontaktních tlaků je velmi důležitá pro hutní průmysl, kde se v poslední době objevují stále přesnější numerické modely vedení tepla, které výzkumníkům dávají představu, jak výrobní proces funguje a vzniká tak prostor pro vylepšení. Důležitým parametrem pro numerické simulace vedení tepla je tepelný odpor (resp. součinitele přestupu tepla) v kontaktu, který je ale pro potřeby hutního průmyslu v literatuře popsán jen velmi málo. Tato práce si dává za cíl tento stav zlepšit a najít způsob, jak pomocí experimentálního měření určit tepelný odpor v kontaktu pro vysoké teploty a tlaky.

Cílem práce je tedy vyvinout metodiku měření tepelného odporu pomocí vlastního experimentálního zařízení, která bude použitelná pro různé variace nastavení kontaktního odporu, tj. bude možnost nastavit různý kontaktní tlak, teplotní rozdíl mezi tělesy v kontaktu, typ materiálu, drsnost povrchu kontaktních ploch, přítomnost okují atd.

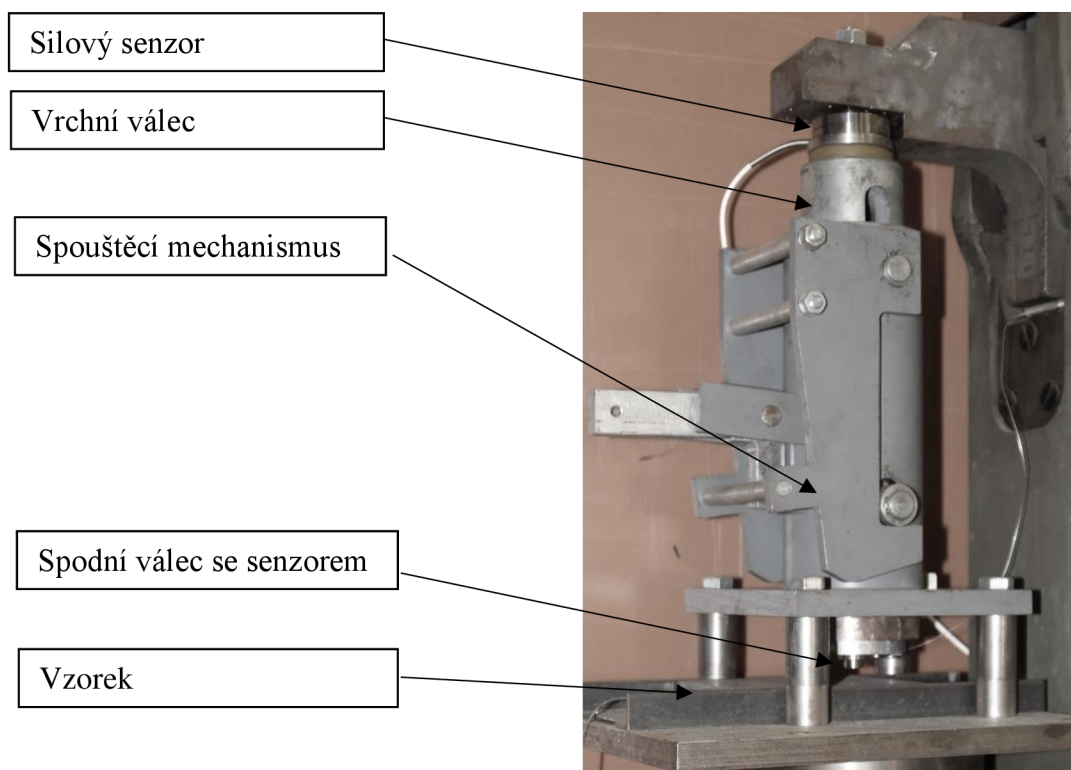
Dalším cílem práce je shrnutí experimentálních výsledků a nalezení obecného vztahu, který by vyjadřoval velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu v závislost na kontaktním tlaku, teplotě a drsnosti povrchu pro kontakt dvou těles z nerezové oceli DIN 1.4828.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

K popisu tepelného odporu mezi dvěma tělesy je zapotřebí experimentální zařízení, které umožní zkoumat tepelný odpor pomocí vhodně zvoleného souboru experimentů. Experiment spočívá v měření teploty při kontaktu dvou těles s rozdílnou teplotou. Jedno z těles se nahřeje na požadovanou teplotu v elektrické peci a po vytažení se co nejrychleji vloží do experimentálního zařízení, kde se vytvoří kontakt s druhým tělesem za požadovaného tlaku. Teploty se měří pomocí termočlánků v definovaném místě uvnitř obou těles. Poté jsou záznamy teplot použity v numerickém modelu a pomocí inverzní úlohy vedení tepla je vypočítána velikost tepelného odporu pro daný experiment. Experimenty se navzájem liší různým nastavením parametrů (kontaktní tlak, teplota těles, drsnost povrchu, přítomnost okují atd.).

4.1. Prvotní návrh experimentálního zařízení

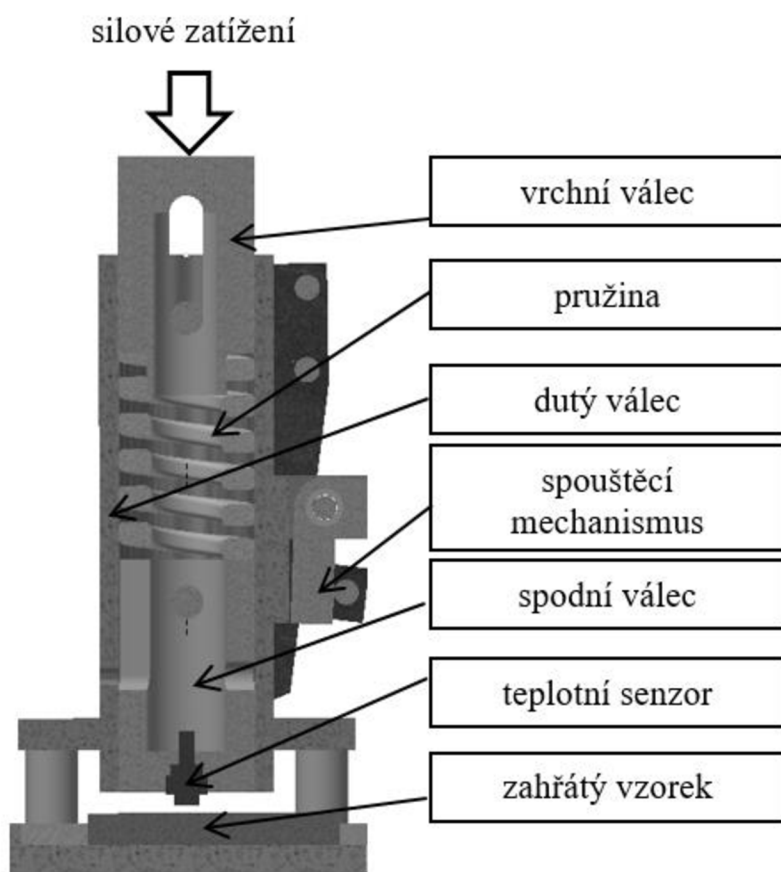
Prvotní prototyp zařízení (Obrázek 24, v řezu Obrázek 25) pro měření tepelných odporů byl vyvinut a sestaven v Laboratoři přenosu tepla a proudění a byl dán k dispozici před zahájením řešení této práce.



Obrázek 24: Experimentální zařízení

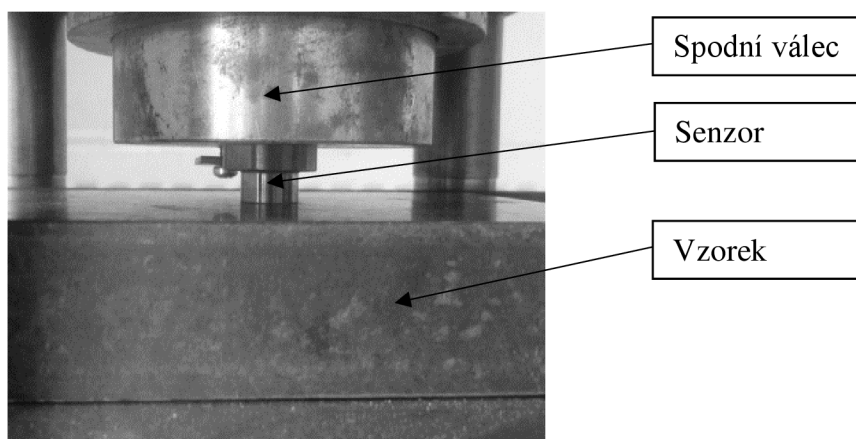
Zařízení umožňuje vytvořit v krátkém časovém okamžiku kontakt mezi dvěma tělesy. Důležitým parametrem tepelného odporu je kontaktní tlak, a proto byl kladen důraz, aby u experimentálního zařízení byla možnost nastavit kontaktní tlak dle potřeby. Dalším požadavkem byla možnost co nejrychlejšího vložení nahřátého vzorku z elektrické pece do experimentálního zařízení a zahájení experimentu. Důvodem je, že jednou ze vstupních podmínek pro výpočet tepelného odporu v kontaktu je ustálená teplota ve vzorku při vzniku kontaktu se senzorem. Pokud se vzorek přemísťuje z pece do experimentálního zařízení, dochází k jeho ochlazování. Po několika experimentech se ukázalo, že tento problém se vyskytuje u nerezové oceli při teplotě nad 600 °C z důvodu radiace. Při teplotách nad 600 °C byl vzorek z bočních stran zaizolován.

Kostru zařízení (Obrázek 25) tvoří ocelové tělo ve tvaru dutého válce, ve kterém jsou uvnitř umístěny dva válce (horní a dolní), které se mohou pohybovat pouze ve vertikálním směru. Mezi těmito válci je umístěna pružina, která slouží k vytvoření požadovaného kontaktního tlaku mezi dvěma tělesy (senzor a vzorek).



Obrázek 25: Řez experimentálního zařízení

Spodní válec tvoří jednu z aktivních ploch kontaktu a je vybaven senzorem (Obrázek 26), který je ve tvaru válce (průměr podstavy 12 mm, výška 7 mm), ve kterém je zabudován termočlánek typu K o průměru 0,5 mm. Tento termočlánek je umístěn 1 mm pod povrchem od kontaktní plochy a slouží k záznamu teploty během experimentu. Další částí zařízení je vzorek, který je ve tvaru kvádra (výška 150 mm, šířka 100 mm, tloušťka 20 mm) a pomocí něhož se mění parametry, které ovlivňují velikost kontaktního odporu v kontaktu (typ materiálu, počáteční teplota, drsnost povrchu, přítomnost okují).



Obrázek 26: Detail kontaktu teplotního senzoru a vzorku

Ke vzniku kontaktního tlaku je uvnitř experimentálního zařízení použita pružina. V závislosti na typu pružiny a jejího maximálního zatížení spolu s průměrem senzoru jsou získány příslušné maximální kontaktní tlaky (Tabulka 1).

Tabulka 1: Závislost kontaktního tlaku na průměru senzoru a typu zvolené pružiny

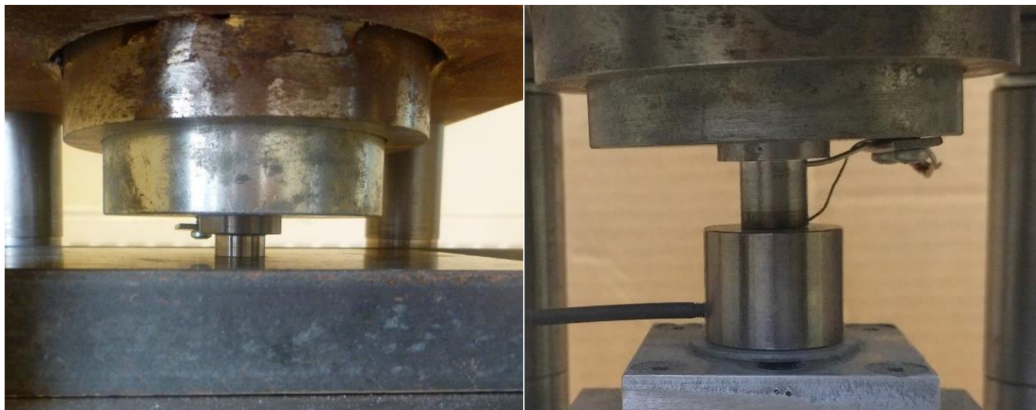
	Maximální zatížení pružiny [N]	Průměr senzoru [mm]	Kontaktní tlak [MPa]
Pružina 1	8398	20	26,7
	8398	15	47,5
	8398	12	74,3
	8398	10	106,9
	8398	8	167,1
Pružina 2	18200	20	57,9
	18200	15	103,0
	18200	12	161,0
	18200	10	231,8
	18200	8	362,1

Součástí experimentálního zařízení je spouštěcí mechanismus (Obrázek 24), který zablokuje dolní válec v pozici, kdy při vložení vzorku pod senzor vznikne zhruba dvoucentimetrová mezera. Pokud je spodní válec odblokován při silovém zatížení pružiny, dojde k nárazu senzoru do vzorku a ke vzniku kontaktu.

4.2. Úpravy experimentálního zařízení

Bylo provedeno několik testovacích měření, které měly ověřit použitelnost stávajícího testovacího zařízení pro měření tepelného odporu za různých podmínek. Z těchto měření bylo zjištěno, že jsou nutné následující úpravy:

- 1.) Vzorek ve tvaru kvádrů (výška 150 mm, šířka 100 mm, tloušťka 20 mm, Obrázek 27 vlevo) byl nahrazen podstatně menším vzorkem ve tvaru válce o průměru 25 mm a výšce 20 mm (Obrázek 27 vpravo). Došlo tak k velké úspoře materiálu, snížila se doba nahřívání vzorku v peci a zjednodušila se manipulace při přesunu vzorku z pece do experimentálního zařízení. Do středu vzorku (10 mm od kontaktní plochy) byl umístěn termočlánek typu K o průměru 1 mm (výkres viz Příloha 13.1).



Obrázek 27: Změna geometrie senzoru a vzorku, detail kontaktu senzoru a vzorku u prvotního návrhu (vlevo), detail kontaktu senzoru a vzorku po úpravě (vpravo)

- 2.) Délka senzoru byla prodloužena ze 7 na 12 mm, aby se 10 mm od kontaktní plochy mohl vložit další termočlánek, který slouží jako okrajová podmínka pro numerickou simulaci. Srovnání prvotního prototypu senzoru a vylepšeného je zobrazeno viz Obrázek 27. Průměr senzoru byl ponechán 12 mm. Výkres senzoru je zobrazen v Příloze 13.2.

3.) Při experimentech, kde byl nastaven vysoký kontaktní tlak (100 MPa) a vysoká teplota (900 °C), docházelo k otisku senzoru do vzorku (Obrázek 28), který měl hloubku až 1 mm. Následkem bylo nejen zničení povrchu vzorku a termočlánku, ale i nemožnost experiment jakkoliv vyhodnotit. Příčinou problému byla vzdálenost kolem 2 cm (Obrázek 29, vlevo) mezi vzorkem a senzorem, kdy při odjištění spodního válce došlo k nárazu senzoru do vzorku. Náraz byl tak prudký, že došlo k plastické deformaci na povrchu vzorku.



Obrázek 28: Deformace povrchu vzorku

Nakonec byla vzdálenost mezi vzorkem a senzorem zmenšena na 2 – 3 mm a při odjištění spodního válce už nedochází k prudkým nárazům senzoru do vzorku a významné poruše povrchu materiálu (Obrázek 29, vpravo).



Obrázek 29: Změna vzdálenosti mezi senzorem a vzorkem

Experimentální zařízení může být použito pro následující parametry:

- Různé druhy materiálu (vzorek, senzor)
- Kontaktní tlaky: až 160 MPa (při použití senzoru s průměrem 12 mm)
- Povrch testovacího vzorku: broušený, leštěný, hrubě obrobený, s okujemi.
- Ohřev testovacího vzorku může být proveden v ochranné atmosféře.
- Maximální teplota testovacího vzorku až 1200 °C.

4.3. Numerický model

Důležitou částí této práce bylo vytvořit numerický model, který by sloužil k zpětné simulaci experimentálního měření a s využitím inverzní úlohy vedení tepla k následnému výpočtu tepelného odporu během experimentu. Velmi často se v literatuře na toto téma objevuje, že jakékoliv použití termočlánků, které jsou zabudovány do pevného tělesa, vede ke značnému rozrušení teplotního pole uvnitř tělesa a k velkým problémům z takto naměřených hodnot teploty získat nějaké reálné výsledky [46]. Laboratoř přenosu tepla a proudění má více než dvacetileté zkušenosti se simulováním přestupu tepla. Při svých výzkumných projektech se laboratoř zaměřuje zejména na chlazení plechů sprchovým chlazením. Využívá proto experimentů, které se snaží simulovat provozní podmínky. Většina experimentů je založena na nerezové desce, která jezdí pod sprchovým chlazením. V desce je zabudováno teplotní čidlo, které měří teplotu v definované vzdálenosti od povrchu. Poté je vytvořen odpovídající numerický model, pomocí inverzní úlohy (viz kapitola 2.4) a s použitím teplotního záznamu z čidla během experimentu je určen tepelný tok, povrchová teplota a z těchto hodnot vypočten součinitel přestupu tepla pro každý časový krok.

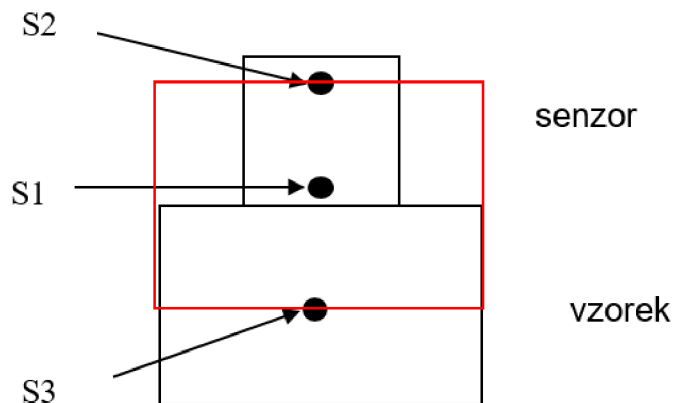
Ze začátku vývoje metodiky pro výpočet tepelného odporu z experimentálních měření bylo navrženo, aby se výpočet tepelného odporu prováděl podobně jako výpočet součinitele přestupu tepla při sprchovém chlazení. Nutností bylo použití 2D-axisymetrického modulu z důvodu simulace přestupu tepla mezi dvěma válci (senzor, vzorek) s různými průměry, nelze tedy použít model v kartézských souřadnicích.

Dále vyvstala otázka, jestli simulovat každý válec zvlášť, tj. vytvořit dva nezávislé modely, které by si při výpočtu vyměňovaly informace o povrchové teplotě a na kontaktní plochu obou těles by byl předepisován v každém časovém kroku stejný tepelný tok. K tomu by byly vyžadovány dva termočlánky v každém válci. První termočlánek by byl těsně pod povrchem v blízkosti kontaktní plochy a sloužil by jako referenční teplota pro inverzní úlohu vedení tepla.

Druhý by byl použit jako okrajová podmínky prvního řádu, tj. předepsaná teplota na hranici numerického modelu. Tento přístup byl zamítnut ze dvou důvodů:

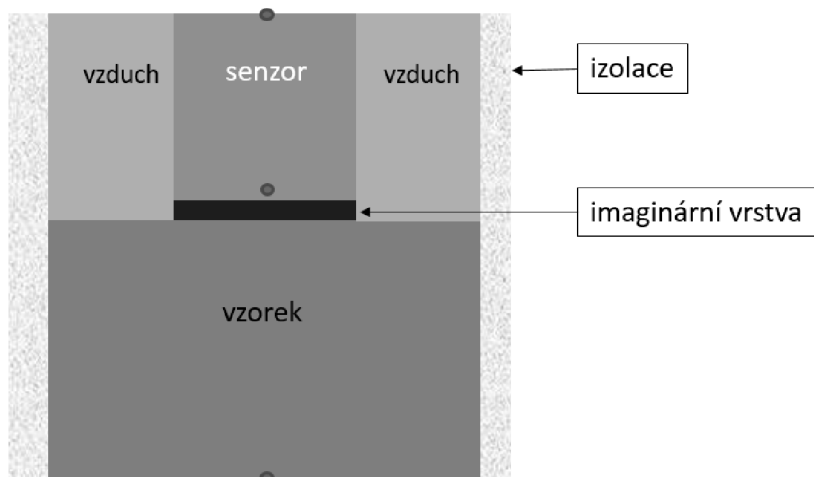
1. Tepelný tok není konstantní v místě dotyku obou válců.
2. K měření teploty těsně u povrchu se používá termočlánek typu K o průměrem 0,5 mm, který je velmi křehký při vysokých teplotách a při nahřívání vzorku na teplotu 900°C docházelo k jeho zničení.

Nakonec bylo rozhodnuto, že se vytvoří jeden model a použijí se tři termočláanky (Obrázek 30). Dva v senzoru a třetí ve vzorku. Červený obdélník značí oblast, která je simulována pomocí numerického modelu.



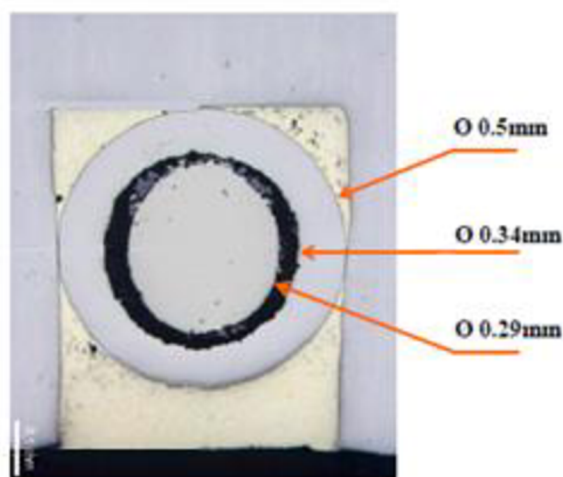
Obrázek 30: Náčrt kontaktu senzoru a vzorku

Součástí numerického modelu (Obrázek 31) je sensor, vzorek a mezi ně je vložena imaginární vrstva, volné místo kolem senzoru je vyplněno vzduchem. Úkolem této vrstvy je řídit přestup tepla mezi vzorkem a senzorem. Imaginární vrstva má tloušťku 0,01 mm a množství tepla, které se předá mezi vzorkem a senzorem v každém časovém kroku výpočtu je nastaveno pomocí tepelné vodivosti této vrstvy.



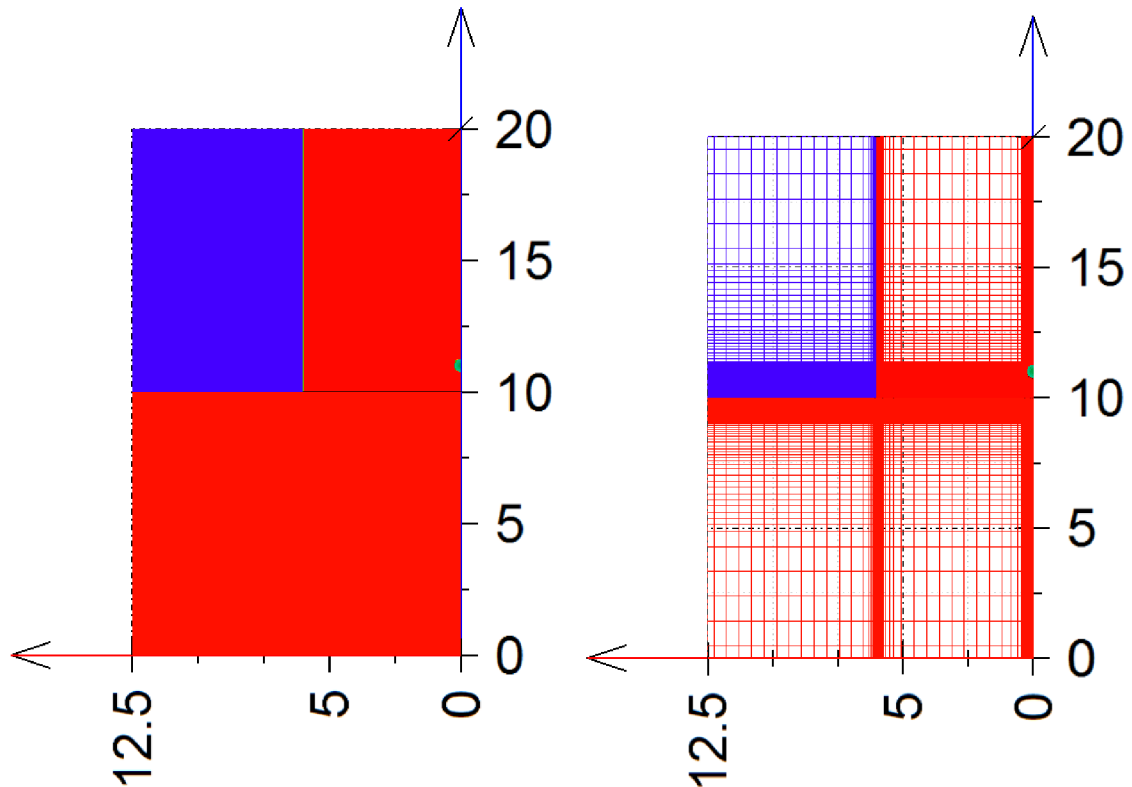
Obrázek 31: Návrh numerického modelu

Součástí modelu je i termočlánek S1 včetně jeho vnitřní struktury. Termočlánek typu K (Obrázek 32) je tvořen vnějším obalem z inconelu s vnějším průměrem 0,5 mm a vnitřním 0,34 mm. Izolaci mezi obalem a kuličkou termočlánu tvoří oxid hořečnatý (černá barva) a uprostřed je útvar kulového tvaru s průměrem 0,29 mm, který vznikne jako svařenec z chromelu a alumelu, které tvoří termočlánekové vedení.



Obrázek 32: Řez termočlánekem typu K o průměru 0,5 mm [50]

Termočláanky S2 a S3 slouží jako okrajové podmínky pro vrchní a spodní stranu numerického modelu. Jejich vnitřní strukturu v modelu zanedbáváme z důvodu pomalé změny teploty v místech jejich umístění. Z levé a pravé strany je model izolován, tj. okrajová podmínka je nastavena na nulový tepelný tok.



Obrázek 33: Výpočetní síť numerického modelu, osy jsou v milimetrech

Na Obrázek 33 (vpravo) je znázorněn osově symetrický 2D model s jednotlivými elementy. Červená barva znázorňuje pevný materiál (nerezová ocel DIN 1.4828) a modrá vzduch. Součástí je i termočlánek S1 se všemi jeho částmi.

Model byl nejprve pokryt obdélníky o straně 1 mm ve směru osy x a 0,5 mm ve směru osy y.

Dále bylo provedeno zjemnění modelu dle zkušeností s výpočtem okrajových podmínek při chlazení následovně:

- Ve směru osy x
 - Od 5 do 15 mm, délka strany obdélníku 0,5 mm
 - Od 7,5 do 12,5 mm, délka strany 0,125 mm
 - Od 8,75 do 11,25 mm, délka strany 0,025 mm
 - Od 10 do 10,01 mm, délka strany 0,001 mm
- Ve směru osy y
 - Od 0 do 0,5 mm, délka strany 0,025 mm
 - Od 9,75 mm do 10,25 mm, délka strany 0,025 mm

4.4. Inverzní úloha pro výpočet tepelného odporu

K výpočtu velikosti tepelného odporu je použita sekvenční identifikační metoda, která je popsána v kapitole 2.4.2. s rozdílem, že se místo součinitele přestupu tepla optimalizuje tepelná vodivost imaginární vrstvy v každém časovém kroku tak, aby nasimulovaná teplota v místě termočlánku S1 byla co nejvíce podobná naměřené teplotě během experimentu. Výsledný tepelný odpor R_k se vypočte jako

$$R_k^i = \frac{\Delta x}{k_i}, \quad (80)$$

kde Δx je tloušťka imaginární vrstvy (v případě této práce byla nastavena na 0,01 mm), k je vypočtená tepelná vodivost imaginární vrstvy a i je časový krok.

Pro účely této práce nebude v následujících výsledcích experimentů použita velikost tepelného odporu, ale její převrácená hodnota značící součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k

$$h_k = \frac{1}{R_k} \quad (81)$$

Důvodem je lepší vypovídající hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu, která se častěji používá jako obecná okrajová podmínka v numerických simulacích.

4.5. Výpočtový software

Pro výpočet součinitele přestupu tepla v kontaktu byl vytvořen program ve vývojovém prostředí Borland Delphi 7. Pro simulaci kondukce v tělese byla použita knihovna, kterou vytvořil Ing. Michal Pohanka, Ph.D. při zpracování své dizertační práci [2]. Knihovna je napsána v jazyce C++ a umožňuje vytvořit různé tvary těles a v nich počítat teplotní pole v čase v závislosti na počátečních a okrajových podmínkách. Při výpočtu používá efektivní algoritmus známý jako TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm). Lze použít 1D, 2D nebo 3D model v kartézských nebo cylindrických souřadnicích. Knihovna rovněž obsahuje teplotně závislé materiálové charakteristiky základních materiálů, které lze využít při výpočtu.

Přesnost výpočtu byla ověřena pomocí programu Comsol Multiphysics, který je ale pro výpočet inverzní úlohy nevhodný z důvodu z výpočtové náročnosti. Výše zmíněná knihovna pro výpočet teplotního pole v tělese je rychlejší.

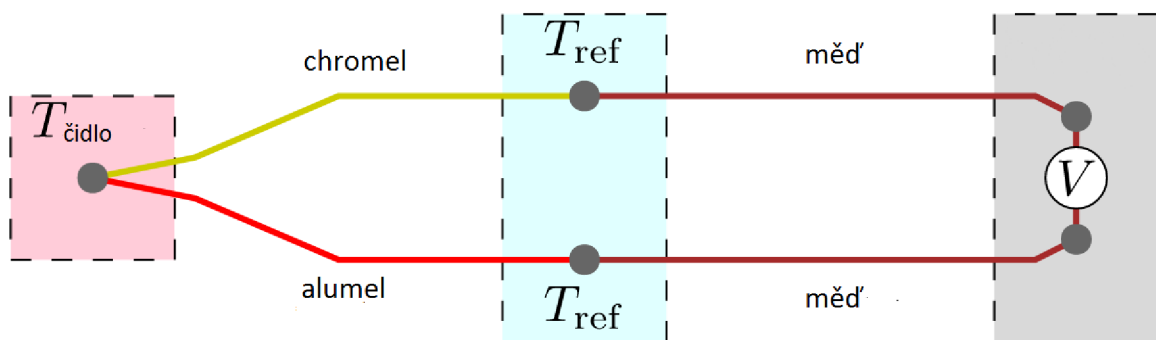
Při spuštění programu dojde nejdříve k vytvoření modelu (Obrázek 33) s náležitými materiálovými charakteristikami a nastaví se počáteční a okrajové podmínky. Při výpočtu se

používá inverzní úloha používající sekvenční identifikační metodu, u které se optimalizuje součinitel tepelné vodivosti imaginární vrstvy. Z průběhu součinitele tepelné vodivosti je pak odvozen součinitel přestupu tepla v kontaktu podle rovnice (80) a (81).

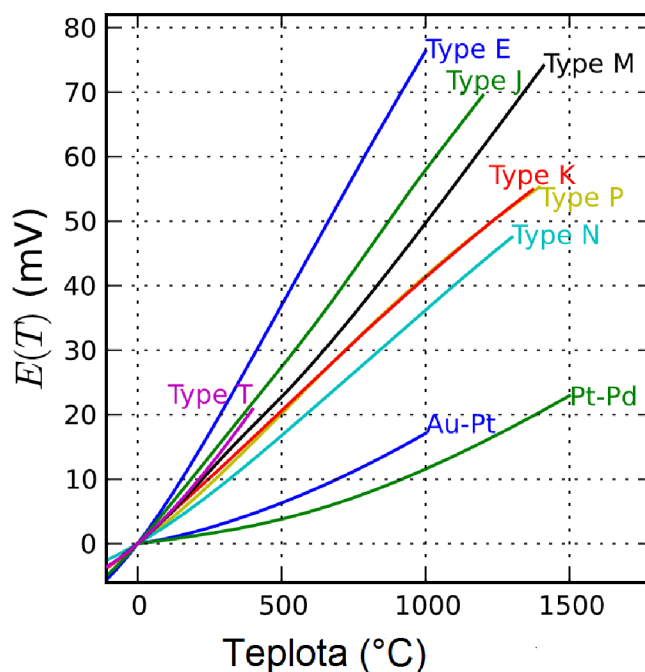
4.6. Měřicí přístroje

K měření tepelných odporů v kontaktu je kromě experimentálního zařízení potřeba několik dalších periferních zařízení – datalogger, silový senzor a počítač.

Měření teploty pomocí termočlánku je založeno na termoelektrickém jevu [52]. Termočlánek je složen ze dvou drátků, které mají jiné chemické složení (u termočlánku typu K se používá chromel a alumel). Pokud tyto drátky na jedné straně spojíme a tak na druhém konci se generuje napětí v desítkách mV (Obrázek 34).



Obrázek 34: Schéma termočlánku typu K [53]



Obrázek 35: Teplotní charakteristika pro různé typy termočlánků [53]

Toto napětí během experimentu zaznamenává datalogger (Obrázek 36), který umožňuje měřit až 12 kanálů s maximální frekvencí 320 Hz. Poté jsou průběhy napětí přepočítány na teplotu pomocí následujícího vztahu

$$E(T_{\text{čidlo}}) = V + E(T_{\text{ref}}) \quad (82)$$

kde $E(T)$ je teplotní charakteristika pro daný typ termočlánku viz Obrázek 35, V je napětí změřené dataloggerem a T_{ref} je referenční teplota změřená rovněž dataloggerem.



Obrázek 36: Datalogger Ht800

K měření silového zatížení vrchního válce byl použit silový sensor 8438-6050 od firmy Burster (Obrázek 37), který je připojen přes převodník k počítači, kde se ukládají data z měření během experimentu. Použitý silový sensor umožňuje měřit silové zatížení v intervalu 0 – 50 kN a je umístěn mezi horní válec experimentálního zařízení a hydraulický zvedák viz Obrázek 24.



Obrázek 37: Silový sensor

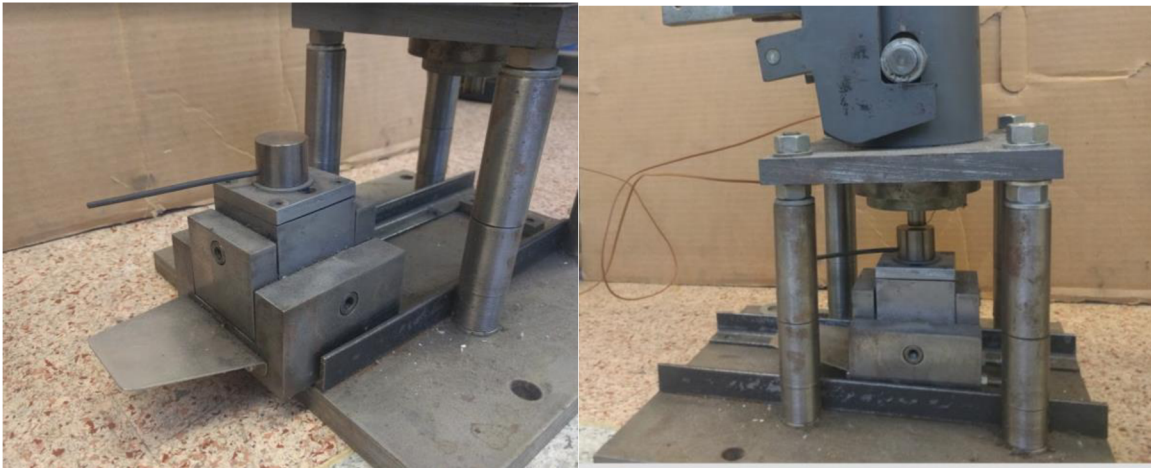
4.7. Popis průběhu experimentu

Před vlastním experimentem je nutné vzorek upravit tak, aby se s ním dalo lehce manipulovat při vytahování z pece a vkládat do posuvného stolku (Obrázek 39) experimentálního zařízení. Obrázek 38 zobrazuje vzorek, ke kterému je připevněn drát o průměru 3 mm, který slouží k manipulaci se vzorkem pomocí kleští a také slouží k připevnění termočlánku, aby nedocházelo k jeho nechtěnému vytažení ze vzorku. Dále se pomocí hydraulického zvedáku nastaví požadovaná hodnota kontaktního tlaku.



Obrázek 38: Vzorek umístěný v peci

Experiment začíná vložením vzorku do pece, kde dojde k nahřátí na předepsanou teplotu. Během nahřívání dojde ke kontrole dataloggeru, který slouží k ukládání naměřených teplot z termočlánků umístěných v čidle a vzorku a zapne se ukládání teplot těsně před vyjmutím vzorku z pece. Pak je vzorek položen na posuvný stolek a i se stolcem zasunut pod senzor (Obrázek 39).



Obrázek 39: Vzorek v posuvném stolku (vlevo) a po zasunutí pod senzor (vpravo)

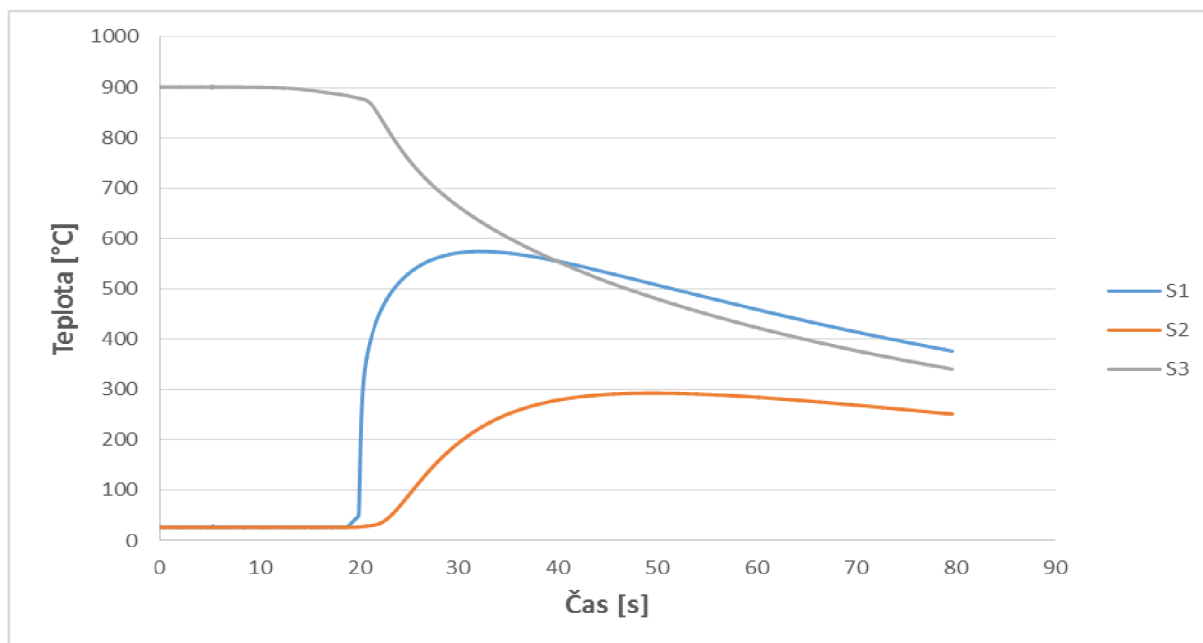
Následuje odjištění spodního válce a vytvoření kontaktu mezi vzorkem a senzorem (Obrázek 40). Měření trvá přibližně minutu a poté dojde k vypnutí záznamu teplot a stáhnutí dat do počítače.



Obrázek 40: Odjištění spodního válce a vytvoření kontaktu mezi vzorkem a senzorem

4.8. Testovací experiment

Byl proveden testovací experiment, u kterého byla počáteční teplota vzorku nastavena na 900 °C, kontaktní tlak 100 MPa, drsnost povrchu vzorku 7,2 Ra, drsnost povrchu senzoru 0,8 Ra. Během celého experimentu byly zaznamenávány teploty ve všech třech teplotních čidlech S1 – S3 (Obrázek 41).

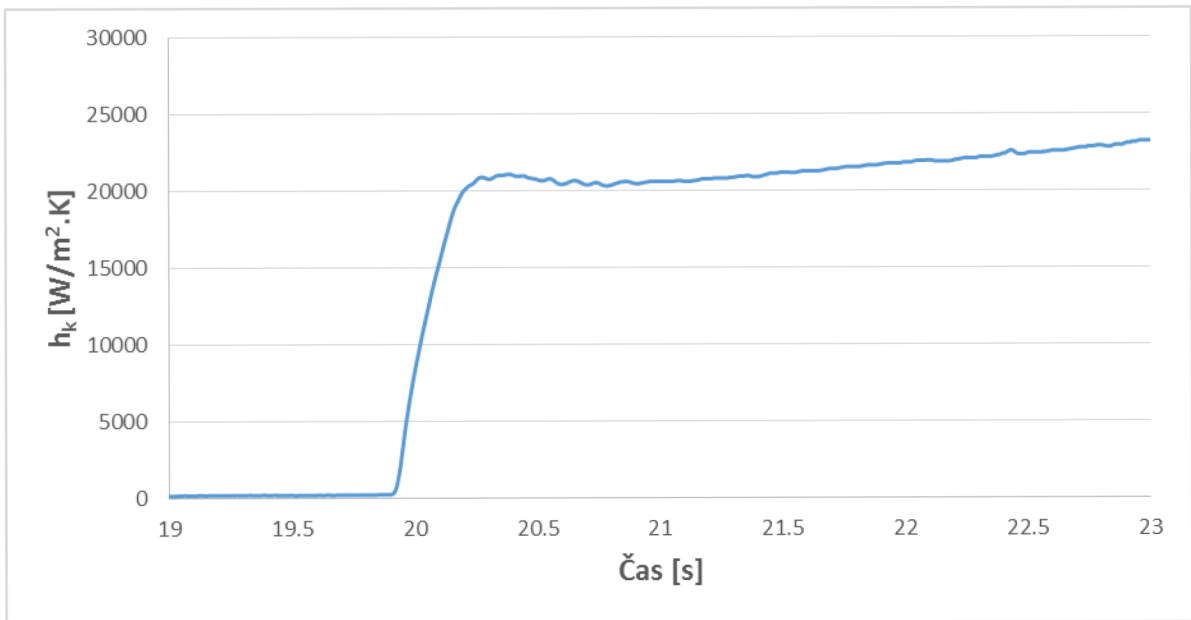


Obrázek 41: Změřené teploty během experimentu

Při výpočtu byla použita inverzní metoda vedení tepla a optimalizovala se tepelná vodivost imaginárního rozhraní v každém výpočtovém kroku tak, aby se nasimulovaná teplota v místě teplotního čidla S1 co nejvíce blížila naměřené teplotě v senzoru během experimentu viz kapitola 4.4, resp. 2.4.2. Vypočtený průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu je zobrazen viz Obrázek 42.

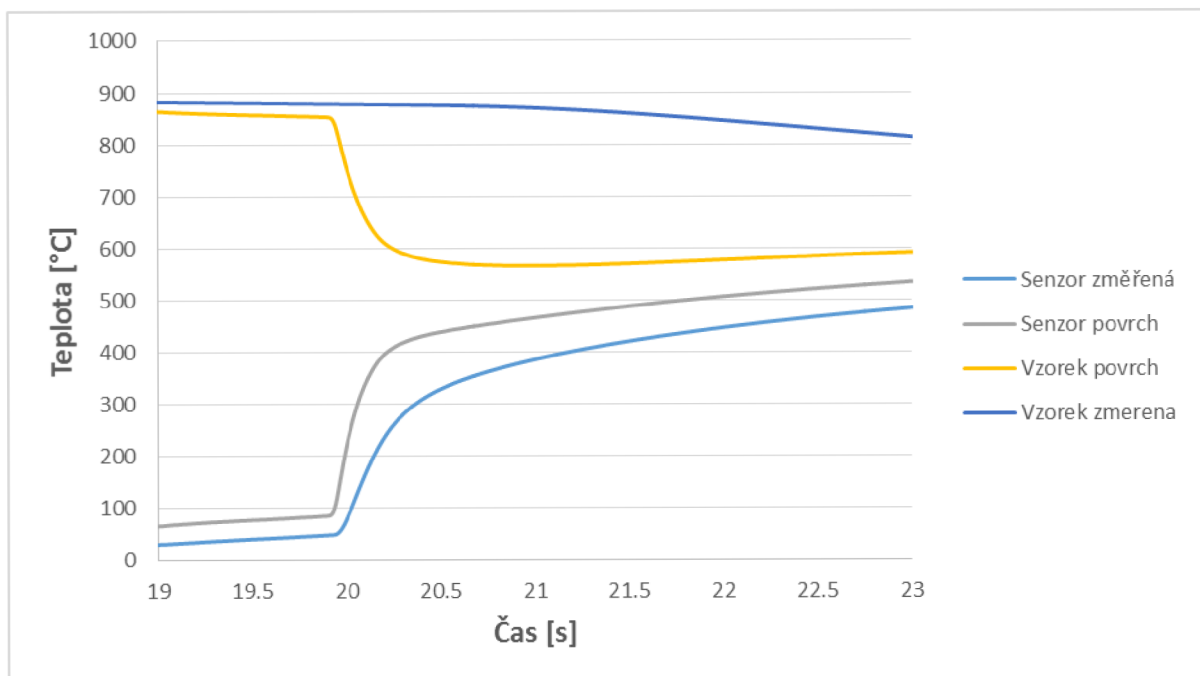
Dle obrázku je možno průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu rozdělit na tři části: první část je časově vymezena od 0 do 19,9 s a s hodnotou součinitele přestupu tepla blízkou nule představuje část experimentu před vytvořením kontaktu; druhá část je časově vymezena od 19,9 do 20,3 s, kde po vytvoření kontaktu dochází k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla v kontaktu; třetí část je časově vymezena od 20,5 s dále a došlo k ustálení hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu. Jako výslednou hodnotu součinitele přestupu tepla v kontaktu pro tento a další experimenty je brána hodnota přibližně 0,5 s po ustálení (v případě tohoto testovacího experimentu je to hodnota součinitele přestupu tepla v čase 20,6). Důvodem, proč byl zvolen čas 0,5 s je ten, že v tomto časovém okamžiku by již měl být průběh součinitele

přestupu tepla ustálen. Podobně odečítání hodnot součinitele přestupu tepla v kontaktu provedl Fieberg (Obrázek 22, vlevo). Pro tento testovací experiment se hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu pohybuje kolem 20200 W/m².K.



Obrázek 42: Výsledná závislost součinitele přestupu tepla v kontaktu

Výsledkem numerické simulace je kromě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu i průběh povrchových teplot senzoru a vzorku viz Obrázek 43.



Obrázek 43: Změřené a vypočítané teploty senzoru a vzorku

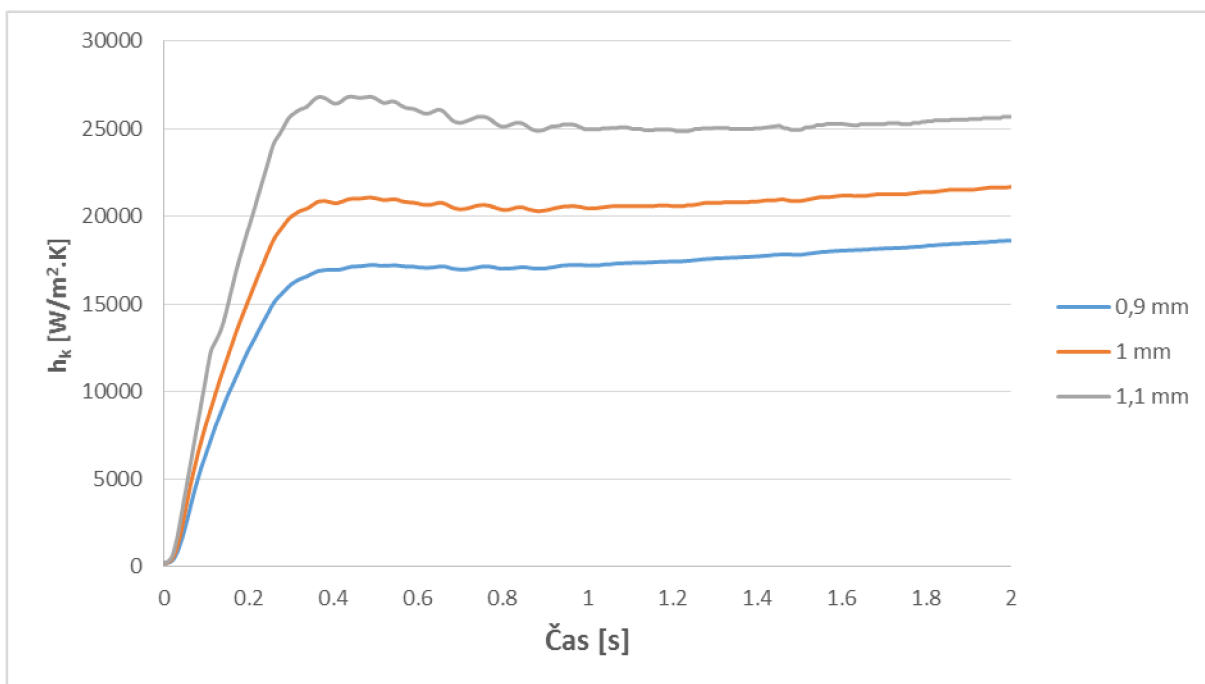
4.9. Citlivostní analýza

K ověření správnosti inverzní úlohy se porovnávají teploty vypočtené v místě termočláčku S1 s těmi naměřenými. Při výpočtu v místě termočláčku S1 mezi vypočtenou a změřenou teplotou rozdíl nepřesáhne 0,1 °C, například pro testovací experiment (kapitola 4.8) byla největší odchylka mezi naměřenou a spočtenou teplotou $4,3 \times 10^{-3}$ °C při použití 10 dopředných kroků.

Dalším parametrem, který má vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla je poloha termočláčku. V ideálním případě se místo, kde se měří teplota, nachází ve středu termočláčku. Reálně není známo, kde je teplota uvnitř termočláčku měřena, proto musíme počítat s odchylkou $\pm 0,1$ mm. V následující kapitole je zobrazen vliv polohy termočláčku na výslednou hodnotu součinitele přestupu tepla v kontaktu.

4.9.1. Vliv polohy termočláčku

Při experimentech je použit senzor, do kterého je zabudován termočlánek 1 mm od kontaktní plochy (technický výkres viz Příloha 13.2). Z důvodu nejistoty přesné polohy měření teploty uvnitř termočláčku byly provedeny další dva výpočty, kde byla poloha termočláčku v modelu změněna na 0,9 a 1,1 mm od kontaktní plochy. Pro testování vlivu polohy termočláčku byl použit testovací experiment (kapitola 4.8). Pro polohu 1 mm byla zjištěna hodnota součinitele přestupu tepla 20200 W/m².K, pro 0,9 mm byla hodnota o 3000 W/m².K menší a pro 1,1 mm o 6200 W/m².K větší.

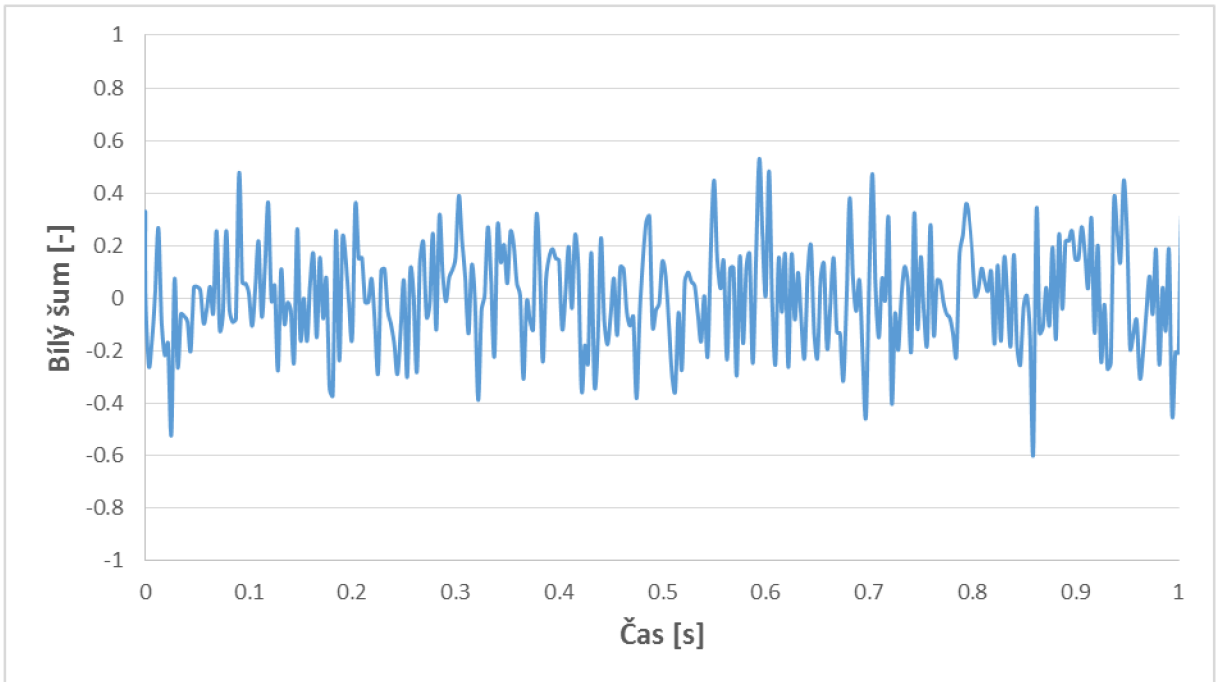


Obrázek 44: Vliv polohy termočlánku na součinitele přestupu tepla v kontaktu

Výsledné průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu ukazují značnou závislost i na velmi malé změně polohy termočlánku. Tato závislost se zmenšuje při použití materiálu s větší tepelnou vodivostí a naopak. K přesnému určení polohy termočlánku v senzoru bylo použito metodiky, která byla vyvinuta Ing. Michalem Pohankou, Ph.D. a patentována [54].

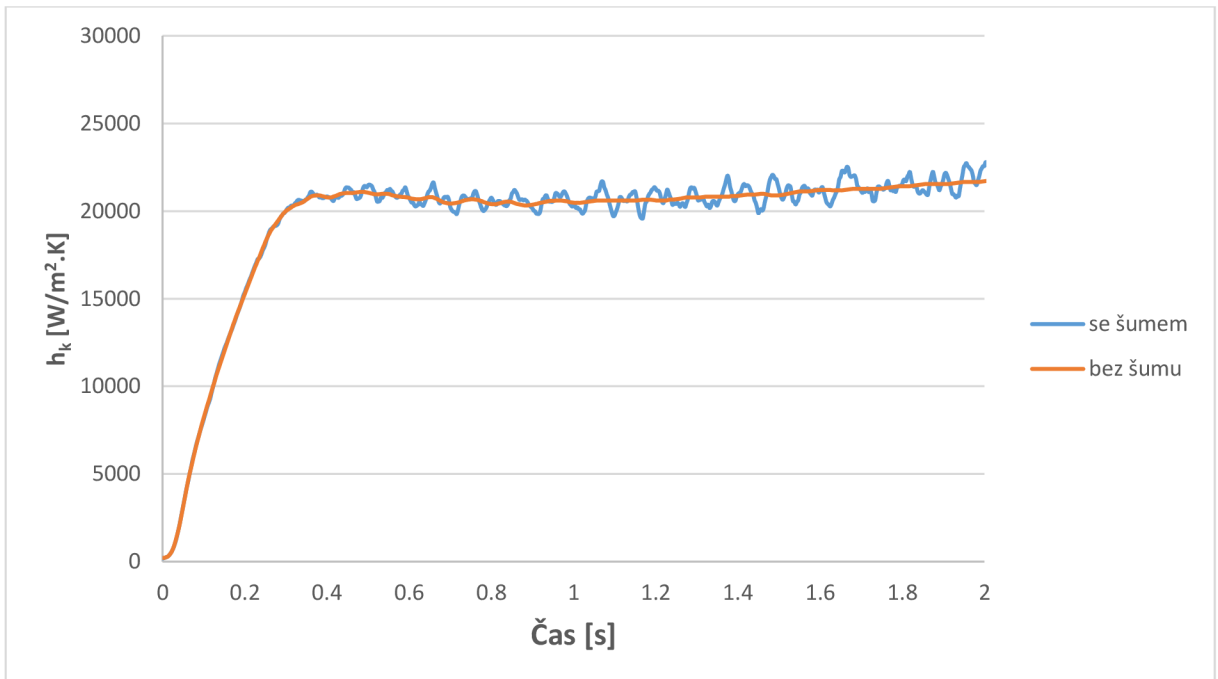
4.9.2. Vliv náhodné chyby při měření teploty

Dále byla sledována citlivost úlohy na šum tak, že k naměřeným hodnotám teplot z termočlánku S1 během testovacího experimentu byl přičten šum z intervalu $(-0,6,0,6)$ °C (Obrázek 45).



Obrázek 45: Aplikovaný šum na data z termočlánku S1

Obrázek 46 ukazuje citlivost inverzní úlohy, kde byl na vstupních datech termočlánku S1 přidán šum z intervalu $(-0,6, 0,6)$ °C, který způsobil odchylky v průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu ± 1500 W/m².K pro 10 dopředných kroků použitých v inverzní úloze vedení tepla. Šum lze eliminovat přidáním dalších dopředných kroků.



Obrázek 46: Součinitel přestupu tepla po přidání šumu do vstupních dat z intervalu $(-0,6, 0,6)$ °C

4.10. Experimentální měření

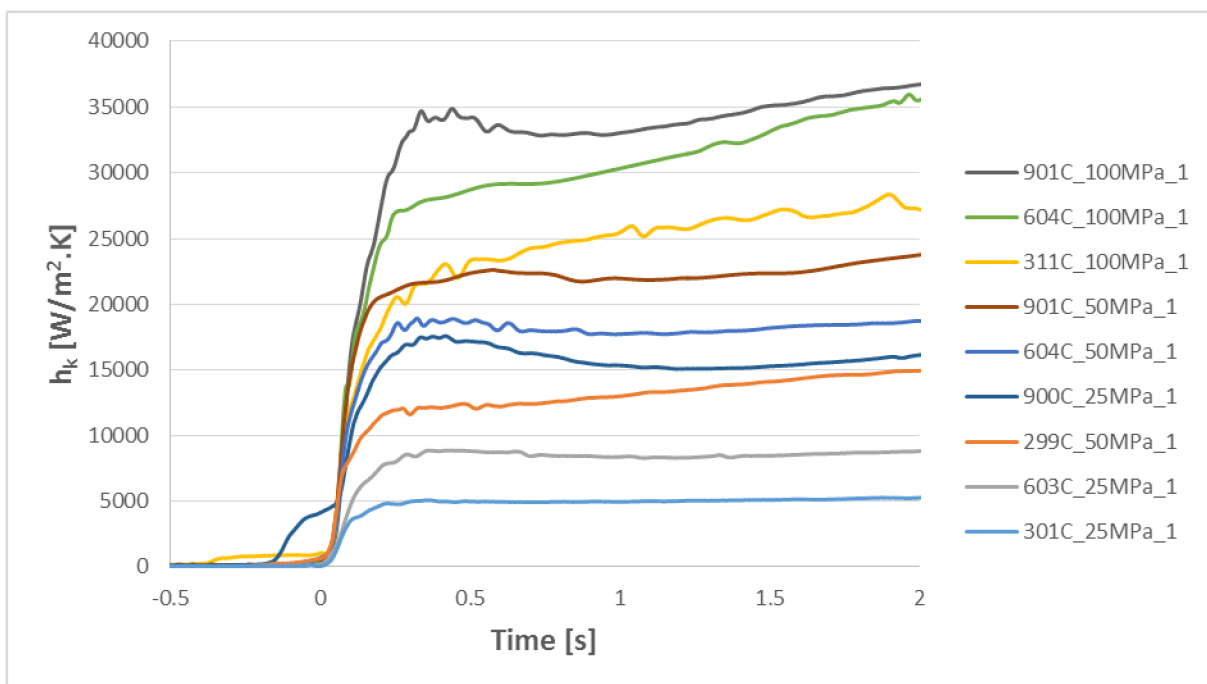
Bylo provedeno několik experimentů, které měli ukázat vliv parametrů (kontaktní tlak, teplota, drsnost povrchu) na velikosti součinitele přestupu tepla v kontaktu. Materiálem pro vzorek a senzor byla použita nerezová ocel DIN 1.4828. Experimenty byly navrženy tak, aby pokryly co největší oblast, kterou umožňuje nastavení experimentálního zařízení.

Nejdříve byly provedeny dvě sady měření po 9 experimentech, které se liší velikostí drsnosti povrchu vzorku. U první sady měření byl povrch vzorku i senzoru obroben a vznikl povrch s drsností Ra 0,8. U druhé sady byl obroben pouze senzor, povrch vzorku byl neupravený s drsností Ra 7,2.

Třetí sada experimentů byla navržena tak, aby simulovala tepelný odpor v kontaktu mezi opěrným válcem a provalkem při kontinuálním lití oceli, což odpovídá kontaktu rovinného a válcového tělesa. Při experimentech (Tabulka 6) byl kontakt opěrného válce a provalku zjednodušen do podoby kontaktu dvou rovinných ploch, kterými se zabývá tato práce. Výstupem byl článek [55] ve spolupráci s firmou ArcelorMittal East Chicago sídlící ve Spojených státech amerických.

Tabulka 2: Sada 1, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 0,8

Název experimentu	Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Povrch senzoru / materiál	Povrch vzorku / materiál
301C_25MPa_1	301	25	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828
299C_50MPa_1	299	50		
311C_100MPa_1	311	100		
603C_25MPa_1	603	25		
604C_50MPa_1	604	50		
604C_100MPa_1	604	100		
900C_25MPa_1	900	25		
901C_50MPa_1	901	50		
901C_100MPa_1	901	100		



Obrázek 47: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 0,8

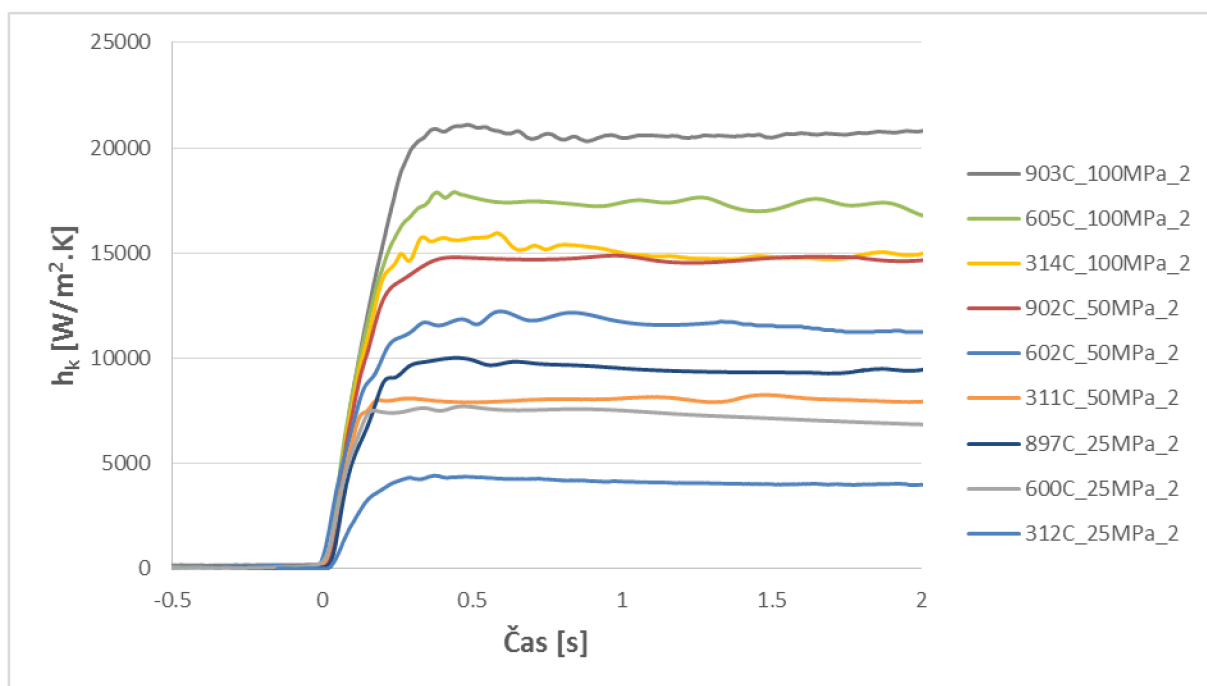
Z průběhů součinitele tepla v kontaktu byly odečteny hodnoty v čase 0,5 s, které jsou zobrazeny viz Tabulka 3.

Tabulka 3: Sada 1, velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 0,8

Název experimentu	Součinitel přestupu tepla v kontaktu [W/m2.K]
301C_25MPa_1	4964
299C_50MPa_1	12358
311C_100Mpa_1	23325
603C_25MPa_1	8838
604C_50MPa_1	18627
604C_100MPa_1	28769
900C_25MPa_1	17126
901C_50MPa_1	22247
901C_100MPa_1	33122

Tabulka 4: Sada 2, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 7,2

Název experimentu	Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Povrch senzoru / materiál	Povrch vzorku / materiál
312C_25MPa_2	312	25	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828	neupravený (Ra 7,2) / nerezová ocel DIN 1.4828
311C_50MPa_2	311	50		
314C_100MPa_2	314	100		
600C_25MPa_2	600	25		
602C_50MPa_2	602	50		
605C_100MPa_2	605	100		
897C_25MPa_2	897	25		
902C_50MPa_2	902	50		
903C_100MPa_2	903	100		



Obrázek 48: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, sada 2, drsnost vzorku Ra 7,2

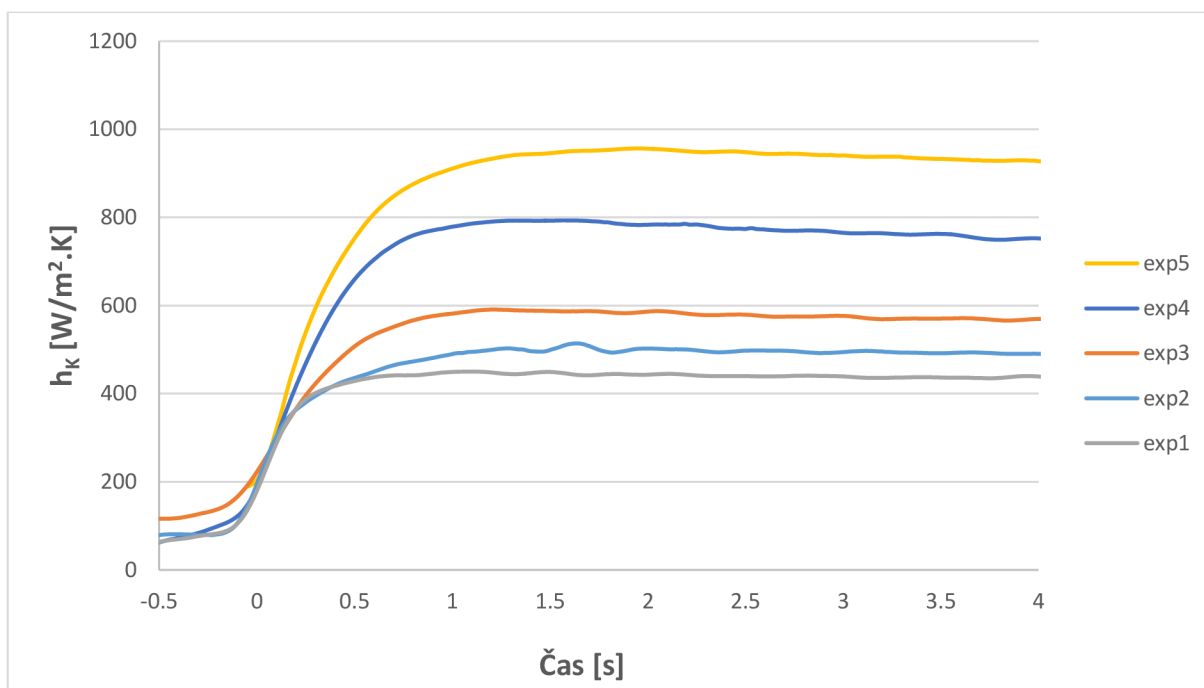
Stejně jak u předchozí sady měření pro drsnost povrchu Ra 0.8 byly odečteny hodnoty z grafu (Obrázek 48) a zapsány viz Tabulka 5.

Tabulka 5: Sada 2, velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 7,2

Název experimentu	Součinitel přestupu tepla v kontaktu [W/m ² .K]
312C_25MPa_2	4375
311C_50MPa_2	7722
314C_100MPa_2	15669
600C_25MPa_2	7732
605C_100MPa_2	11612
605C_100MPa_2	17527
897C_25MPa_2	9971
902C_50MPa_2	14767
903C_100MPa_2	20952

Tabulka 6: Sada 3, parametry experimentů, kontinuální lití oceli

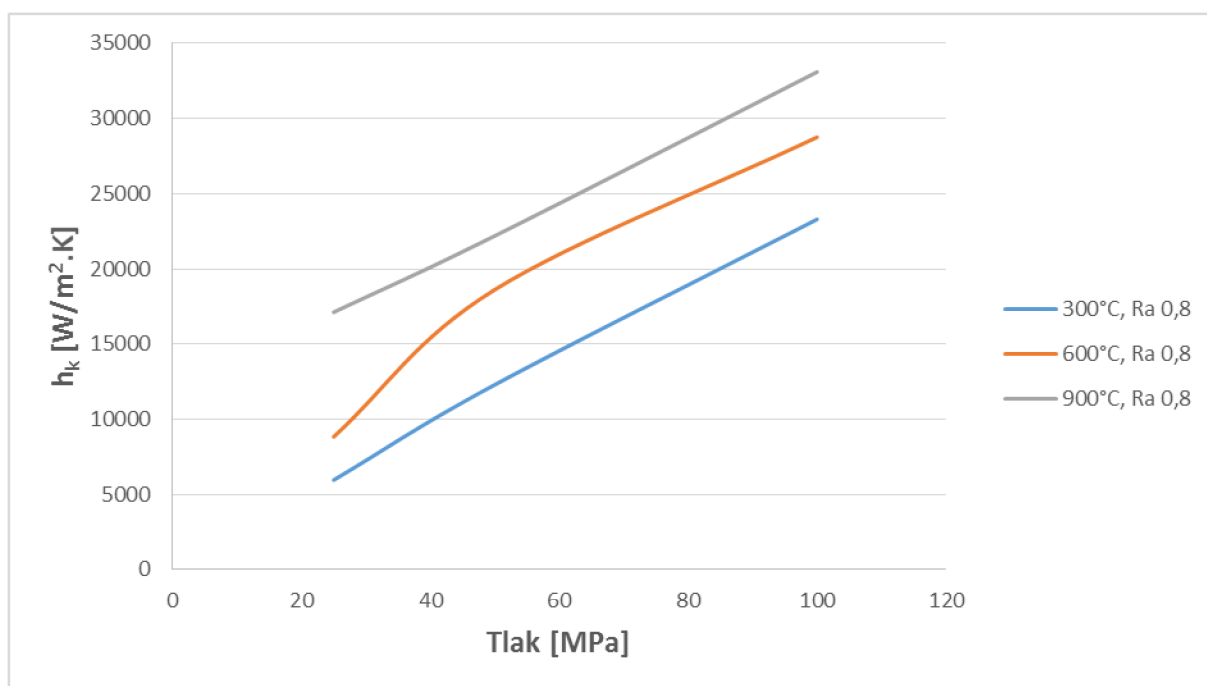
Název	Počáteční teplota vzorku [°C]	Tlak [MPa]	Drsnost povrchu vzorku	Součinitel přestupu tepla [W/m ² .K]
exp1	800	0.2	Ra 3.5	445
exp2	800	0.4	Ra 3.5	502
exp3	800	0.6	Ra 3.5	582
exp4	800	0.8	Ra 3.5	783
exp5	800	1	Ra 3.5	956



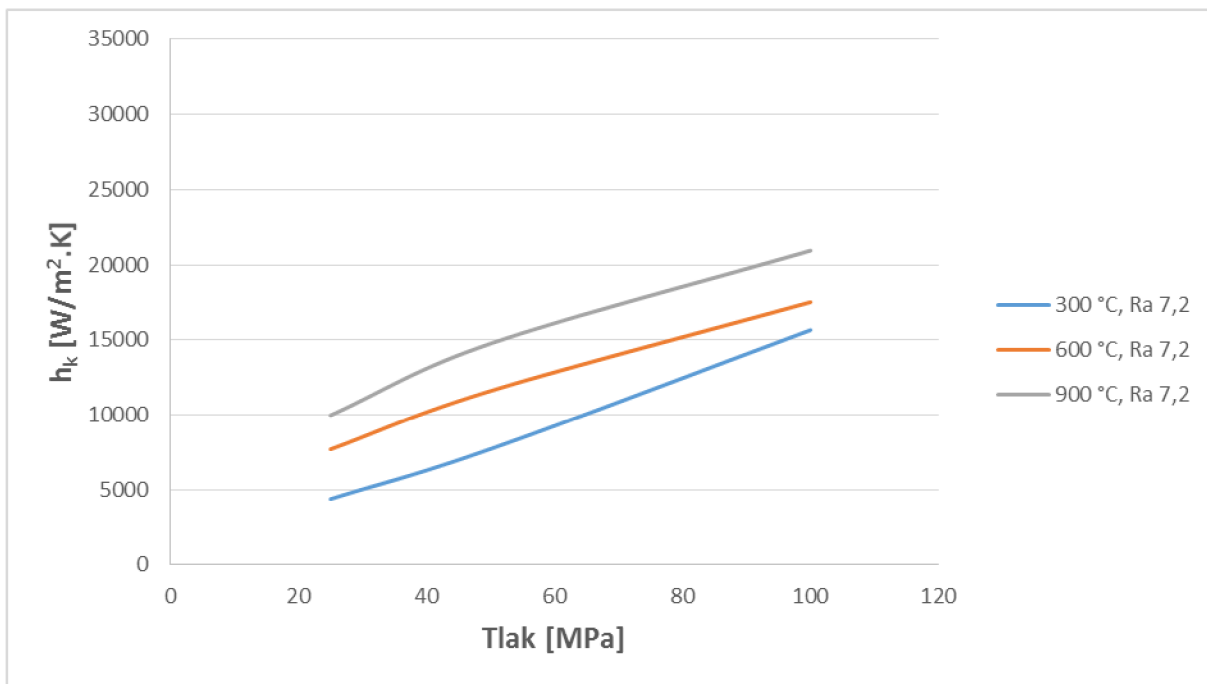
Obrázek 49: Průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu pro experimenty simulující kontakt opěrného válce a bramy při kontinuálním lití

4.11. Vliv tlaku

Tlak je jedním z parametrů, který nejvíce ovlivňuje velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu. Z výsledných hodnot (Tabulka 3 a Tabulka 5) byly vytvořeny závislosti součinitele přestupu tepla v kontaktu na kontaktním tlaku pro teploty 300, 600 a 900 °C viz Obrázek 50 pro měření s drsností povrchu Ra 0,8 a Obrázek 51 pro měření s drsností povrchu Ra 7,2. Z výsledných grafů je vidět silná lineární závislost součinitele přestupu tepla na kontaktním tlaku.



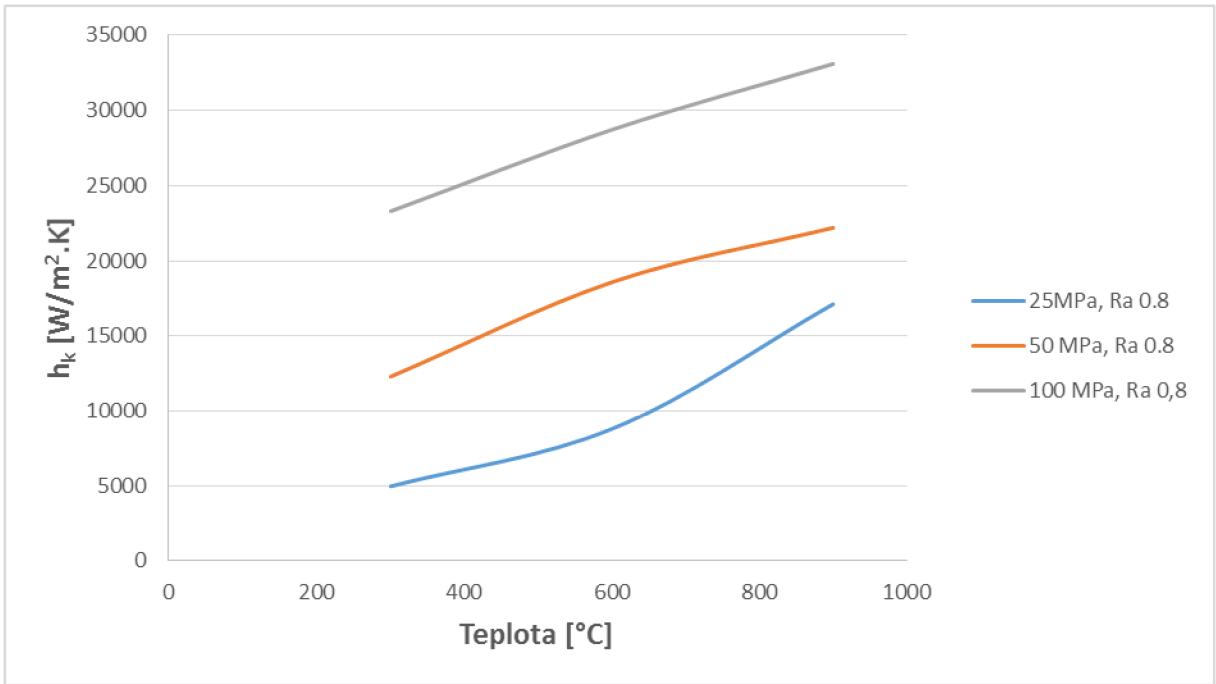
Obrázek 50: Vliv tlaku na součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu vzorku Ra 0,8



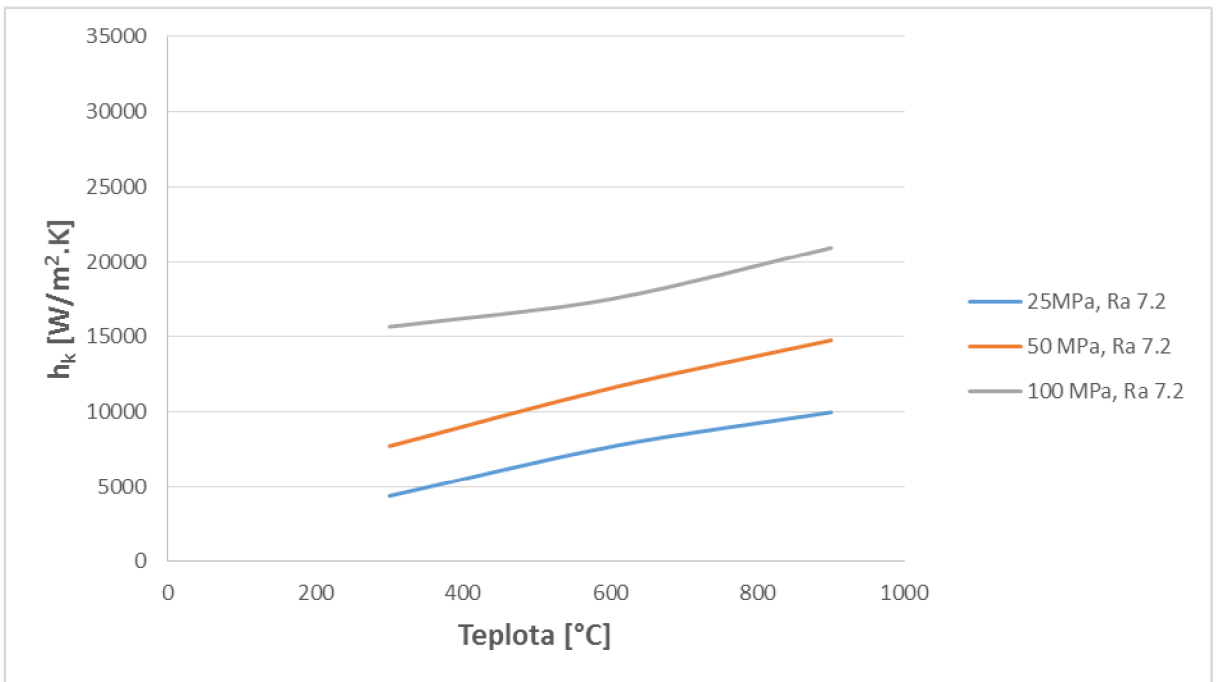
Obrázek 51: Vliv tlaku na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu vzorku Ra 7,2

4.12. Vliv teploty

Podobně jako v předchozí kapitole byly hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu z experimentů vyneseny do grafu jako závislosti součinitele přestupu tepla v kontaktu na teplotě. Z grafů je patrné, že i teplota má významný vliv na velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu.



Obrázek 52: Vliv teploty na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu Ra 0,8



Obrázek 53: Vliv teploty na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu Ra 7,2

4.13. Vliv drsnosti povrchu

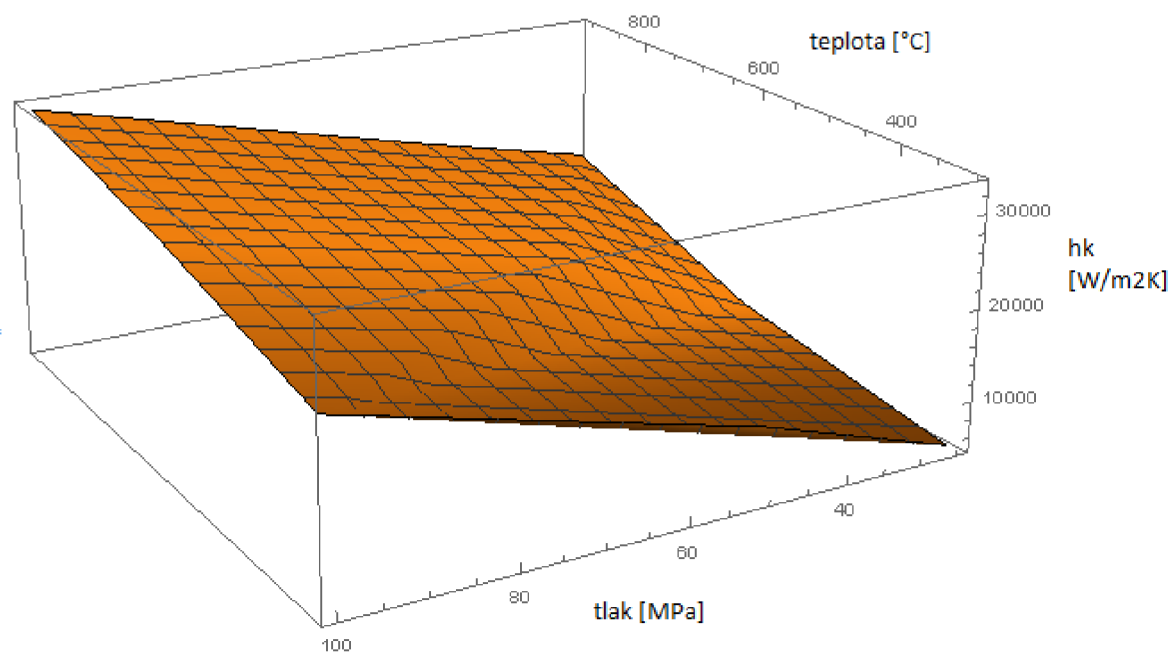
Z předchozích grafů (Obrázek 50, Obrázek 51, Obrázek 52 a Obrázek 53) je vidět, že hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu je větší pro menší drsnost Ra 0,8 než pro Ra 7,2. Tato skutečnost odpovídá i obecnému povědomí o vlivu drsnosti povrchu na hodnotu součinitele přestupu tepla v kontaktu.

4.14. Empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu

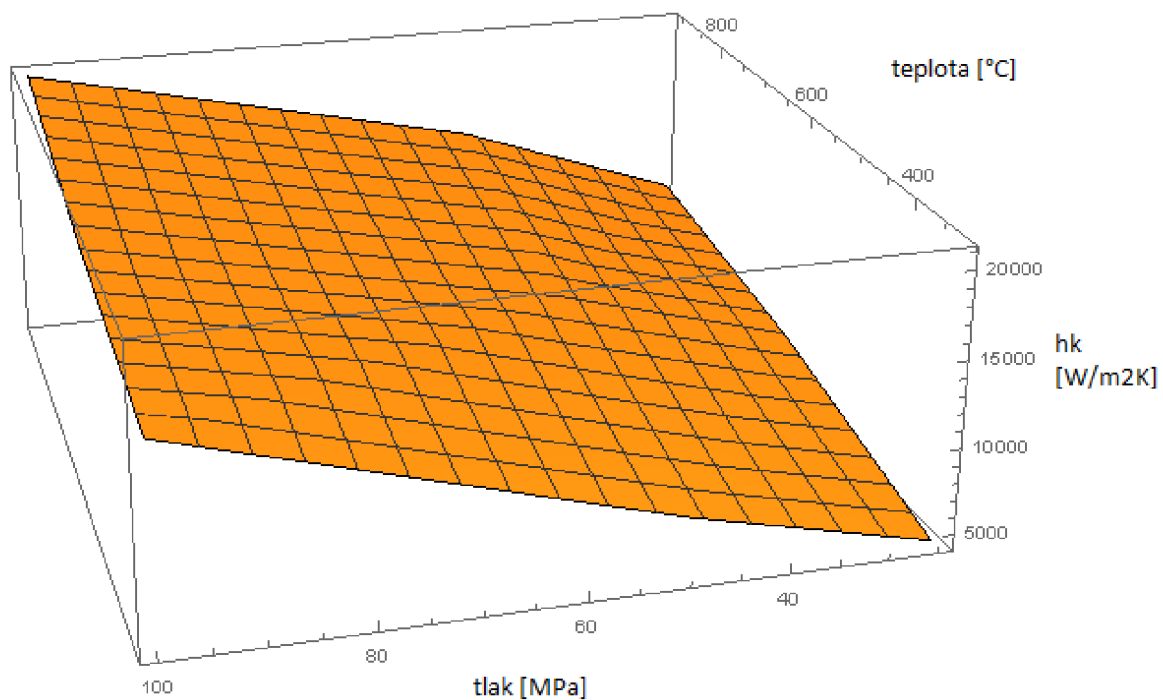
Data z první a druhé sady měření byla použita k odvození empirického vztahu pro součinitele přestupu tepla v kontaktu

Tabulka 7: Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla pro odvození empirického vztahu

Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Drsnost [Ra]	Součinitel přestupu tepla v kontaktu [W/m ² .K]	Rezidua z lineární regrese
301	25	0,8	4964	-2807,19
299	50	0,8	12358	289,237
311	100	0,8	23325	778,132
603	25	0,8	8838	-2446,23
604	50	0,8	18627	1617,32
604	100	0,8	28769	327,665
900	25	0,8	17126	2392,83
901	50	0,8	22247	899,641
901	100	0,8	33122	-1323,49
312	25	7,2	4375	-2370,16
311	50	7,2	7722	375,947
314	100	7,2	15669	708,59
600	25	7,2	7732	-825,654
604	50	7,2	11612	-70,7961
604	100	7,2	17527	-391,484
897	25	7,2	9971	-396,939
902	50	7,2	14767	843,637
903	100	7,2	20952	-13,4229



Obrázek 54: Graf součinitele přestupu tepla pro drsnost povrchu Ra 0,8



Obrázek 55: Graf součinitele přestupu tepla pro drsnost povrchu Ra 7,2

K odvození vztahu pro byla použita funkce NonLinearModelFit v programu Wolfram Mathematica. Jako předpis byla použita lineární regresní funkce ve tvaru:

$$h_k^{emp} = a \cdot T + b \cdot p + c \cdot \sigma + d \cdot T \cdot p - e \cdot p \cdot \sigma - f \cdot T \cdot \sigma - g \cdot T \cdot p \cdot \sigma \quad (83)$$

kde a , b , c , d , e , f , g jsou regresní koeficienty, T je teplota vzorku, p je kontaktní tlak, σ je drsnost povrchu materiálu.

Výsledný empirický vztah pro odvození součinitele přestupu tepla v kontaktu

$$h_k^{emp} = 9,25644 \cdot T + 168,11 \cdot p + 346,166 \cdot \sigma + 0,121614 \cdot T \cdot p - 10,4959 \cdot p \cdot \sigma - 0,61 \cdot T \cdot \sigma - 0,00947 \cdot T \cdot p \cdot \sigma \quad (84)$$

kde T je teplota vzorku z intervalu $\langle 300, 900 \rangle$ °C, p je kontaktní tlak z intervalu $\langle 25, 100 \rangle$ MPa, σ je drsnost povrchu materiálu z intervalu $\langle 0,8, 7,2 \rangle$ Ra. Výsledná rezidua mezi empirickým vztahem a vypočtenými hodnotami z experimentálních měření jsou uvedeny viz Tabulka 7.

5. DISKUZE

V této práci jsou zveřejněny výsledky experimentálních měření pro kontakt dvou těles (senzor, vzorek) vyrobených z nerezové oceli DIN 1.4828 za různých kontaktních tlaků (25 – 100 MPa), pro různé počáteční teploty vzorku (300 – 900 °C) a při použití dvou drsností povrchu vzorku (Ra 0,8, 7,2). Výsledné průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu jsou zobrazeny v grafech (pro drsnost povrchu vzorku Ra 0,8 Obrázek 47 a pro Ra 7,2 Obrázek 48).

Optimální průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu je z počátku rychlý nárůst a poté by měl následovat konstantní průběh. To je dobře viditelné pro sadu experimentů s drsností povrchu vzorku Ra 7,2 (Obrázek 48). Pro sadu experimentů s drsností povrchu vzorku Ra 0,8 (Obrázek 47) je vidět, že několik experimentů má místo konstantní tendence spíše rostoucí (např. experiment 901C_100MPa_1). Tento jev je výrazný pro vysoké kontaktní tlaky a vysoké teploty. Jelikož je součinitel přestupu tepla definován jako podíl tepelného toku a rozdílu povrchových teplot, tak při malých rozdílech povrchových teplot těles v kontaktu může dojít k nestabilitě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu. Podobný jev lze sledovat i ve výsledcích publikací [46] a [49]. Důvodem tohoto chování je numerická chyba při výpočtu z důvodu velké citlivosti součinitele přestupu tepla v kontaktu na rozdílu povrchových teplot tělese v kontaktu.

Experimentální měření publikované v této práci ukazují velmi silnou závislost součinitele přestupu tepla na kontaktním tlaku, závislost na drsnosti povrchu vzorku je rovněž výrazná. Z výsledků je patrná i závislost součinitele přestupu tepla v kontaktu na počáteční teplotě vzorku. Ačkoliv Fieberg [46] uvádí, že teplotní závislost by měla být více znatelná až od 500 °C, kdy dochází k plastické deformaci kontaktních ploch. Ve výsledcích z experimentů publikovaných v [49] je však rovněž patrný vliv teploty na součinitele přestupu tepla i při teplotách pod 500 °C.

Porovnat výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu uvedených v této práci s jinými publikacemi je značně obtížné. Hlavním důvodem je malý počet studií, které se touto problematikou zabývají. Fieberg [46] zveřejnil ve svém článku výsledek experimentu, kde byly v kontaktu dvě tělesa z oceli při kontaktním tlaku 34 MPa s výsledným součinitelem tepla v kontaktu 14500 W/m².K (Obrázek 22). Fieberg bohužel ve svém článku neuvedl přesný typ oceli a drsnost povrchu materiálu v kontaktu. Z výsledků této práce je dle podmínek nejbližší experiment 301C_50MPa_1 s výslednou hodnotou součinitele přestupu tepla v kontaktu 12358 W/m².K.

Malinowski [49] publikoval studii, kde měřil součinitele přestupu tepla za kontaktního tlaku 30 – 90 MPa a počáteční teploty jednoho z těles 300 – 900 °C při použití nerezové oceli DIN 303. Drsnost povrchu prvního tělesa Ra 0,42 μm a druhého Ra 0,61 μm. Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu byly maximálně 20000 W/m².K. V porovnání s první sadou měření (Obrázek 47), kde maximální hodnota dosáhla až 33000 W/m².K, jde o značný rozdíl. Autor této práce se domnívá, že důvodem je použití jiného typu nerezové oceli, kde nerezová ocel DIN 303 má od teploty 300 °C vyšší součinitel tepelné vodivosti než DIN 1.4828. Vyšší tepelná vodivost má za následek zvýšení rozdílu povrchových teplot těles v kontaktu a díky tomu snížení velikosti součinitele přestupu tepla v kontaktu.

Součástí této práce jsou i průběhy součinitele přestupu tepla pro velmi nízký tlak (0,2 – 1 MPa) a pro vysokou teplotu (800 °C) simulující kontakt opěrného válce s provalkem ve zjednodušeném provedení experimentu (kontakt dvou rovinných ploch). Získané hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu jsou v intervalu 450 – 1000 W/m².K.

6. ZÁVĚR

Hutní průmysl investuje nemalé prostředky do zlepšení výroby. Testování přímo ve výrobě je v současné době stále velice nákladné, a proto se velmi často používají numerické simulace, které se snaží co nejlépe popsat výrobní proces z pohledu výměny tepla. Vstupem do numerických simulací vedení tepla jsou okrajové podmínky, z nichž některé nejsou ani v současné době dostatečně popsány. Jednou z takových okrajových podmínek je tepelný odpor v kontaktu, který je sice dobře popsán pro potřeby v elektrotechnice, letectví, atd., kde je použit nízký kontaktní tlak (jednotky MPa) a malý rozdíl teplot mezi tělesy (max 300 °C). Existuje i celá řada empirických vztahů, které docela přesně odvozují hodnotu tepelného odporu v kontaktu po daný kontaktní tlak a teploty. V hutním průmyslu se ale tepelný odpor vyskytuje za specifických podmínek, tj. vysokých kontaktních tlaků (až stovek MPa) a vysokých teplot (až 1200 °C). Při těchto až extrémních podmínkách ale empirické vztahy pro odhad tepelného odporu v kontaktu nefungují a je třeba experimentálních měření, které simulují kontakty dvou těles za podobných podmínek jako ve výrobě.

Tato práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou uvedeny základní rovnice přenosu tepla, popsána numerická simulace vedení tepla spolu s inverzní úlohou. Následuje řešeršní studie o tepelném odporu v kontaktu spolu s odvozením empirických vztahů pro odhad tepelného odporu v kontaktu za nízkých teplot a nízkých kontaktních tlaků.

Praktická část se zabývá popisem experimentálního zařízení a metodiky pro výpočet tepelného odporu v kontaktu. Metodika je založena na měření teploty během kontaktu dvou těles (senzor, vzorek) a dokáže odvodit velikost tepelného odporu v kontaktu pro různé nastavení kontaktních tlaků, typu materiálu, počáteční teploty, drsnosti povrchu, přítomnosti okují atd. Ke zpětné simulaci experimentálního měření a odvození tepelného odporu v kontaktu je použit numerický výpočet, který využívá imaginární vrstvy, která je vložena mezi tělesa, a změnou její tepelné vodivosti je nastaveno množství tepla, které přestupuje z jednoho tělesa do druhého.

Byly provedeny tři sady experimentů, při kterých byl senzor a vzorek vyroben z nerezové oceli DIN 1.4828. První dvě sady měly ukázat vliv kontaktního tlaku (25 – 100 MPa), počáteční teploty (300 – 900 °C) a drsnosti povrchu (Ra 0,8 a 7,2) na velikost tepelného odporu v kontaktu. Třetí sada experimentu, simulující dotyk opěrného válce s provalkem během kontinuálního lití oceli, byla provedena za nízkých tlaků (0,2 – 1 MPa) a vysokých teplot (800

°C). Výsledky všech sad měření jsou uvedeny ve formě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu. V závěru je uveden empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu, který vznikl zobecněním výsledků z prvních dvou sad experimentálních měření.

Přínosem této práce je vytvoření metodiky měření kontaktního odporu pomocí experimentálního zařízení, které umožňuje nastavit různé parametry ovlivňující tepelný odpor a simulovat tak reálný děj z praxe. Výsledky z měření mohou být použity jako okrajové podmínky do numerických simulací, což vede k lepšímu pochopení fyzikálního procesu během výroby např. v hutním průmyslu.

Tato práce se zabývala vyšetřování tepelných odporů v kontaktu rovinných ploch s různými parametry. Dále se počítá s rozvojem metodiky měření i pro kontakt rovinné a válcové plochy, která bude simulovat kontakt opěrného válce s provalkem při kontinuálním lití oceli a další fází bude snaha o co největší se přiblížení podmínkám, které panují při válcování za tepla.

7. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	poloměr, m
A	plocha, m^2
c, u, v	korelační koeficienty
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantního tlaku, $J/(kg K)$
c_v	měrná tepelná kapacita při konstantního objemu, $J/(kg K)$
d	průměr vtisknutí do materiálu, mm
D	průměr zatěžovací kuličky, mm
E	elastický modul pružnosti, GPa
$E(T)$	teplotní charakteristika termočlánku
f	počet dopředných kroků
F	zatěžovací síla, N
h	součinitel přestupu tepla, $W/(m^2 K)$
h_k	součinitel přestupu tepla v kontaktu, $W/(m^2 K)$
H_B	Brinellova tvrdost, GPa
H_c	Vickersova tvrdost, GPa
HTC	součinitel přestupu tepla, $W/(m^2 K)$
k	tepelná vodivost, $W/(m K)$
m	standardní odchylka sklonů nerovností
M	plynový parametr ředění, m
n	hustota kontaktů, $1/m^2$
N	počet kontaktních míst
P	tlak v kontaktu, GPa
P_p	tlak plynu, kPa
$P_{p,0}$	referenční tlak plynu, kPa
Pr	Prandtlovo číslo
q	tepelný tok, W/m^2
q_v	tepelný tok vedením, W/m^2
\dot{q}	tepelný zdroj, W/m^3
Q	tepelný výkon, W
r	poloměr, m
R_k	tepelný odpor v kontaktu, $(m^2 K)/W$
Ra	aritmetická odchylka výšek nerovností, μm
Rq	střední kvadratická odchylka výšek nerovností, μm
t	čas, s
T	teplota, K
x, y, z	souřadnice v kartézské soustavě souřadnic
$y(x)$	výška bodu od průměrné hodnoty výšky profilu, μm
Y	vzdálenost středních rovin povrchu obou těles, μm
α	tepelná vodivost, m/s^2
α	koeficient přizpůsobení pro mezeru emisivita tělesa
$\alpha_{1,2}$	koeficient přizpůsobení
γ	poměr měrných tepelných kapacit
ε	relativní plocha kontaktu emisivita tělesa
Λ	střední volná cesta molekul, μm

λ	střední rovina oddělení
ν	Poissonův poměr
ξ	směrnice součinitele přestup tepla h
ρ	citlivostní koeficient
σ_r	hustota materiálu, kg/m^3
$\sigma_{1,2}$	Stefan – Boltzmannova konstanta, $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
τ	střední kvadratická odchylka výšek nerovností povrchu, μm
ψ	mez kluzu, GPa
Ω_{12}	koeficient omezení tepelného toku radiační parametr

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Popis vedení tepla v kartézských souřadnicích [1].....	12 -
Obrázek 2: Popis vedení tepla v cylindrických souřadnicích [1].....	13 -
Obrázek 3: Okrajové podmínky – teplota, tepelný tok a součinitel přestupu tepla [1].....	14 -
Obrázek 4: Závislost tepelné vodivosti na teplotě, materiál DIN 1.4828	15 -
Obrázek 5: Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě, materiál DIN 1.4828.....	15 -
Obrázek 6: Závislost hustoty na teplotě, materiál DIN 1.4828	16 -
Obrázek 7: Průřez chlazeného tělesa.....	18 -
Obrázek 8: Graf změřené teploty a dvou vypočtených teplot pro dvě různé směrnice součinitele přestupu tepla s použitím n dopředných kroků.....	21 -
Obrázek 9: Konvergence k minimu pomocí inverzní parabolické interpolace	22 -
Obrázek 10: Detail kontaktu povrchů dvou materiálů [6].....	23 -
Obrázek 11: Model pro odvození tepelného odporu způsobeného rozšířením oblasti [10] -	25 -
Obrázek 12: Model polonekonečného válce [10].....	26 -
Obrázek 13: Detail kontaktu dvou těles	30 -
Obrázek 14: Srovnání teoretických a experimentálních výsledků bezrozměrné tepelné vodivosti v kontaktu pro Yovanovichův model [8]	35 -
Obrázek 15: Vliv teploty na tvrdost oceli s různým obsahem uhlíku [32]	36 -
Obrázek 16: Tvar povrchu materiálu [36].....	37 -
Obrázek 17: Náčrt experimentálního zařízení při měření a odpovídající teplotní profil [46] ..-	39 -
Obrázek 18: Experimentální zařízení pro měření tepelného odporu [47]	40 -
Obrázek 19: Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu [47].....	41 -
Obrázek 20: Náčrt experimentálního zařízení pro měření tepelného odporu pomocí infračervené kamery [46]	42 -
Obrázek 21: Teplotní pole při kontaktu dvou těles změřené pomocí infračervené kamery -	43 -
Obrázek 22: Průběh teplot během experimentu (vlevo) a součinitele přestupu tepla v kontaktu (vpravo) [46]	43 -
Obrázek 23: Srovnání hodnot tepelného odporu v kontaktu mezi teoretickými modely (Mikic) a experimentálním měřením, tělesa v kontaktu: ocel – hliník [46]	44 -
Obrázek 24: Experimentální zařízení	46 -
Obrázek 25: Řez experimentálního zařízení	47 -
Obrázek 26: Detail kontaktu teplotního senzoru a vzorku	48 -
Obrázek 27: Změna geometrie senzoru a vzorku, detail kontaktu senzoru a vzorku u prvotního návrhu (vlevo), detail kontaktu senzoru a vzorku po úpravě (vpravo)	49 -
Obrázek 28: Deformace povrchu vzorku	50 -
Obrázek 29: Změna vzdálenosti mezi senzorem a vzorkem	50 -
Obrázek 30: Náčrt kontaktu senzoru a vzorku	52 -
Obrázek 31: Návrh numerického modelu	53 -
Obrázek 32: Řez termočlánkem typu K o průměru 0,5 mm [50].....	53 -
Obrázek 33: Výpočetní síť numerického modelu, osy jsou v milimetrech.....	54 -
Obrázek 34: Schéma termočlánku typu K [53].....	56 -
Obrázek 35: Teplotní charakteristika pro různé typy termočlánků [53]	57 -
Obrázek 36: Datalogger Ht800	57 -
Obrázek 37: Sílový senzor	58 -
Obrázek 38: Vzorek umístěný v peci	58 -
Obrázek 39: Vzorek v posuvném stolku (vlevo) a po zasunutí pod senzor (vpravo)	59 -
Obrázek 40: Odjištění spodního válce a vytvoření kontaktu mezi vzorkem a senzorem....	59 -

Obrázek 41: Změřené teploty během experimentu	- 60 -
Obrázek 42: Výsledná závislost součinitele přestupu tepla v kontaktu	- 61 -
Obrázek 43: Změřené a vypočítané teploty senzoru a vzorku	- 61 -
Obrázek 44: Vliv polohy termočlánku na součinitele přestupu tepla v kontaktu	- 63 -
Obrázek 45: Aplikovaný šum na data z termočlánku S1	- 64 -
Obrázek 46: Součinitel přestupu tepla po přidání šumu do vstupních dat z intervalu $-0,6, 0,6$ °C.....	- 64 -
Obrázek 47: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 0,8.....	- 66 -
Obrázek 48: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, sada 2, drsnost vzorku Ra 7,2.- 67 -	-
Obrázek 49: Průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu pro experimenty simulující kontakt opěrného válce a bramy při kontinuálním lití	- 68 -
Obrázek 50: Vliv tlaku na součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu vzorku Ra 0,8.....	- 69 -
Obrázek 51: Vliv tlaku na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu vzorku Ra 7,2.....	- 70 -
Obrázek 52: Vliv teploty na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu 0.8 ...	- 71 -
Obrázek 53: Vliv teploty na součiniteli přestupu tepla v kontaktu, drsnost povrchu 7,2 ...	- 71 -
Obrázek 54: Graf součinitele přestupu tepla pro drsnost povrchu Ra 0,8.....	- 73 -
Obrázek 55: Graf součinitele přestupu tepla pro drsnost povrchu Ra 7,2.....	- 73 -

..

9. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Závislost kontaktního tlaku na průměru senzoru a typu zvolené pružiny.....	- 48 -
Tabulka 2: Sada 1, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 0,8.....	- 65 -
Tabulka 3: Sada 1, velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 0,8	- 66 -
Tabulka 4: Sada 2, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 7,2.....	- 67 -
Tabulka 5: Sada 2, velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 7,2	- 68 -
Tabulka 6: Sada 3, parametry experimentů, kontinuální lití oceli	- 68 -
Tabulka 7: Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla pro odvození empirického vztahu	- 72 -

10. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Technický výkres vzorku

Příloha B: Technický výkres senzoru

11. LITERATURA

- [1] INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1990. 919 s. ISBN 0-471-51729-1.
- [2] POHANKA, M. *Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics*, Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, 2006. 142 s.
- [3] POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P. *Design of Cooling Units for Heat Treatment, Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*. Dr. Frank Czerwinski (Ed.), [online] 2012. ISBN: 978-953-51-0768-2, InTech, DOI: 10.5772/50492.
- [4] WILLIAM H. P., SAUL A. T., WILLIAM T. V., BRIAN P. F. *Numerical Recipes in C*. 2nd ed. 1997.
- [5] BECK, J.; BLACKWELL, B.; CLAIR, St.Ch. R. *Inverse heat conduction: ill-posed problems*. New York: Wiley, c1985, 308 s. ISBN 04-710-8319-4.
- [6] MADHUSUDANA, C. *Thermal contact conductance*. New York: Springer, c1996, 165 s. Mechanical engineering series. ISBN 03-879-4534-2.
- [7] HU, Shi-cheng, Wei-ce MA, Lei DU, Xiao-qian LI a Jue ZHONG. Thermal contact conductance at continuous roll-casting interface. *Journal of Central South University of Technology*. 2007, roč. 14, č. 3, s. 374-379. ISSN 1005-9784. DOI: 10.1007/s11771-007-0074-4.
- [8] BOWDEN, F. P. a D. TABOR. *The friction and lubrication of solids*. London: Oxford University Press, 1950, 391 s.
- [9] BEJAN, Adrian a Allan D KRAUS. *Heat transfer handbook*. New York: J. Wiley, 2003, 1477 s. ISBN 04-713-9015-1.
- [10] BAHRAMI, M., J. R. CULHAM, M. M. YANANOVICH a G. E. SCHNEIDER. Review of Thermal Joint Resistance Models for Nonconforming Rough Surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. 2006, roč. 59, č. 1, s. 1-. ISSN 00036900. DOI: 10.1115/1.2110231.
- [11] CARSLAW, H. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 2003, 510 s. ISBN 01-985-3368-3.
- [12] YOVANOVICH, M. M. Thermal constriction resistance of contacts on a half-space: Intergral formulation. *Progress in Astronautics and Aeronautics: Radiative Transfer and Thermal Control*. Roč. 1976, s. 397-418.
- [13] ROSTAMI, A. A., A. Y. HASSAN a P. C. LIM. Parametric study of thermal constriction resistance. *Heat and Mass Transfer*. 2001-1-19, roč. 37, č. 1, s. 5-10. ISSN 0947-7411. DOI: 10.1007/s002310000087.
- [14] MIKIC, B. B. a W. M. ROHSENOW. *Thermal Contact Resistance*. 1966. DSR 74542-41. Technical report. MIT.
- [15] COOPER, M.G., B.B. MIKIC a M.M. YOVANOVICH. Thermal contact conductance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1969, roč. 12, č. 3, s. 279-300. ISSN 00179310. DOI: 10.1016/0017-9310(69)90011-8.
- [16] YOVANOVICH, M. M. General thermal constriction resistance parameter for annular contacts on circular flux tubes. *AIAA Journal*. 1976, roč. 14, č. 6, s. 822-824.
- [17] NEGUS, K. J. a M. M. YOVANOVICH. Constriction Resistance of Circular Flux Tubes with Mixed Boundary Conditions by Linear Superposition of Neumann Solutions. *ASME*. 1984, s. 1-6.
- [18] WANG, AnLiang a JianFeng ZHAO. Review of prediction for thermal contact resistance. *Science China Technological Sciences*. 2010, roč. 53, č. 7, s. 1798-1808. ISSN 1674-7321. DOI: 10.1007/s11431-009-3190-6.

- [19] PRASHER, Ravi. Acoustic mismatch model for thermal contact resistance of van der Waals contacts. *Applied Physics Letters*. 2009, roč. 94, č. 4, s. 041905-. ISSN 00036951. DOI: 10.1063/1.3075065.
- [20] PRASHER, Ravi. Predicting the Thermal Resistance of Nanosized Constrictions. *Nano Letters*. 2005, roč. 5, č. 11, s. 2155-2159. ISSN 1530-6984. DOI: 10.1021/nl051710b.
- [21] BAHRAMI, M., J. R. CULHAM, G. SCHNEIDER a Michael YOYANOVICH. Thermal Contact Resistance of Nonconforming Rough Surfaces, Part 1: Contact Mechanics Model. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2004, roč. 18, č. 2, s. 209-217. ISSN 0887-8722. DOI: 10.2514/1.2661.
- [22] BAHRAMI, M., J. R. CULHAM, G. SCHNEIDER a M. YOYANOVICH. Thermal Contact Resistance of Nonconforming Rough Surfaces, Part 2: Thermal Model. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2004, roč. 18, č. 2, s. 218-227. ISSN 0887-8722. DOI: 10.2514/1.2664.
- [23] YOYANOVICH, M. M. Thermal contact correlations. *AIAA 16th Thermophysics Conference*. 1981, s. 83-95.
- [24] MIKIĆ, B.B. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974, roč. 17, č. 2, s. 205-214. ISSN 00179310. DOI: 10.1016/0017-9310(74)90082-9.
- [25] LAMBERT, M. A. a L. S. FLETCHER. Review of Models for Thermal Contact Conductance of Metals. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1997, roč. 11, č. 2, s. 129-140. ISSN 0887-8722. DOI: 10.2514/2.6221.
- [26] SONG, S. a M. M. YOYANOVICH. Relative Contact Pressure: Dependence on Surface Roughness and Vickers Microhardness. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1988, roč. 2, č. 1, s. 43-47.
- [27] SRIDHAR, M.R. a M.M. YOYANOVICH. Empirical methods to predict Vickers microhardness. *Wear*. 1996, roč. 193, č. 1, s. 91-98. ISSN 00431648. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06681-0.
- [28] YOYANOVICH, M. M. Micro and Macro Hardness Measurements, Correlations, and Contact Models. *AIAA 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2006.
- [29] SRIDHAR, M. R. a M. M. YOYANOVICH. Review of elastic and plastic contact conductance models - Comparison with experiment. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1994, roč. 8, č. 4, s. 633-640. ISSN 0887-8722. DOI: 10.2514/3.592.
- [30] SRIDHAR, M. R. a M. M. YOYANOVICH. Elastoplastic Contact Conductance Model for Isotropic Conforming Rough Surfaces and Comparison With Experiments. *Journal of Heat Transfer*. 1996, roč. 118, č. 1, s. 3-. ISSN 00221481. DOI: 10.1115/1.2824065.
- [31] YOYANOVICH, M. M., J. W. DEVAAL a A. H. HEGAZY. A Statistical Model to Predict Thermal Gap Conductance Between Conforming Rough Surfaces. *AIAA / ASME 3rd Joint Thermophysics, Fluids Plasma and Heat Transfer Conference*. 1982, s. 1-4.
- [32] NEGUS, K. J. a M. M. YOYANOVICH. Correlation of the Gap Conductance Integral for Conforming Rough Surfaces. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1988, roč. 2, č. 3.
- [33] *ASM Handbook*. American Society for metals. ASM International, 2000.
- [34] SCHANKULA, M. H., D.W. PATTERSON a M. M. YOYANOVICH. The Effect of Oxide Films on the Thermal Resistance Between Contacting Zirconium Alloys. *Journal of Applied Physics*. 1982, roč. 53, č. 12.
- [35] WAHID, Syed M.S. a C.V. MADHUSUDANA. Thermal contact conductance: effect of overloading and load cycling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003, roč. 46, č. 21, s. 4139-4143. ISSN 00179310. DOI: 10.1016/S0017-9310(03)00224-2.

- [36] WHITEHOUSE, David. *Surfaces and their measurement*. 1st ed. London: Kogan Page Science, 2004, 395 s. ISBN 19-039-9660-0.
- [37] SUNIL KUMAR, S. a K. RAMAMURTHI. Influence of Flatness and Waviness of Rough Surfaces on Surface Contact Conductance. *Journal of Heat Transfer*. 2003, roč. 125, č. 3, s. 394-. ISSN 00221481. DOI: 10.1115/1.1565093.
- [38] MAINSAH, E. *Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001, 449 s. ISBN 04-128-0640-1.
- [39] GREENWOOD, J.A. a J.J. WU. Surface Roughness and Contact: An Apology. *Meccanica*. 2001, roč. 36, č. 6, s. 617-630. ISSN 00256455. DOI: 10.1023/A:1016340601964.
- [40] ZAHOUANI, H., R. VARGIOLU a J.-L. LOUBET. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Mathematical and Computer Modelling*. 1998, roč. 28, 4-8, s. 517-534. ISSN 08957177. DOI: 10.1016/S0895-7177(98)00139-3.
- [41] JIANG, S. a Y. ZHENG. An analytical model of thermal contact resistance based on the Weierstrass--Mandelbrot fractal function. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2010-04-01, roč. 224, č. 4, s. 959-967. ISSN 0954-4062. DOI: 10.1243/09544062JMES1799.
- [42] WARREN, Thomas L. a Dusan KRAJCINOVIC. Fractal models of elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces based on the Cantor set. *International Journal of Solids and Structures*. 1995, roč. 32, č. 19, s. 2907-2922. ISSN 00207683. DOI: 10.1016/0020-7683(94)00241-N.
- [43] WARREN, Thomas L. a Dusan KRAJCINOVIC. Random Cantor set models for the elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces. *Wear*. 1996, roč. 196, 1-2, s. 1-15. ISSN 00431648. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06785-X.
- [44] WANG, A.L, C.X YANG a X.G YUAN. Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography I: methodology validation. *Tribology International*. 2003, roč. 36, č. 7, s. 517-526. ISSN 0301679x. DOI: 10.1016/S0301-679X(02)00237-2.
- [45] WANG, A.L, C.X YANG a X.G YUAN. Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography 2: fractal characteristic analysis. *Tribology International*. 2003, roč. 36, č. 7, s. 527-535. ISSN 0301679x. DOI: 10.1016/S0301-679X(02)00239-6.
- [46] FIEBERG, C. a R. KNEER. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, 51(5-6), 1017-1023. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.004. ISSN 00179310.
- [47] LIU, Dong-Huan a Xin-Chun SHANG. The Physical-Mechanism Based High-Temperature Thermal Contact Conductance Model with Experimental Verification. *Chinese Physics Letters*. 2013, 30(3), 036501-. DOI: 10.1088/0256-307X/30/3/036501. ISSN 0256-307x.
- [48] Niliot, C. Le a Gallet, P. Inverse heat conduction problems: recovery of heat line sources and boundary conditions, *Revue Generale de la Thermique* 37 (1998) 629–643.
- [49] MALINOWSKI, Z., J.G. LENARD a M.E. DAVIES. A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994, 41(2), 125-142. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90057-4. ISSN 09240136.
- [50] BELLEROVÁ, H. Rozvoj inverzních úloh vedení tepla se zaměřením na velmi rychlé procesy v mikroskopických měřicích. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 108 s.
- [51] ROSOCHOWSKA, M, R BALENDRA a K CHODNIKIEWICZ. Measurements of thermal contact conductance. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 135(2-3), 204-210. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00897-X. ISSN 09240136.
- [52] Fyzika pro bakaláře: In: Vysoká škola Báňská, Ostrava [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_02_El_proud.pdf

- [53] Thermocouple [online], poslední aktualizace 21. června 2016 23:29 [cit. 29. 6. 2016], Wikipedie. Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>
- [54] POHANKA, Michal. Způsob a zařízení ke stanovení polohy teplotního čidla. Česká republika. Patentový spis, CZ 305609 B6. 2015-11-25.
- [55] HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; KENETH, B.; MORAVEC, R. Determination of Thermal Contact Conductance Based on Unsteady Temperature Measurement. In AISTech 2015. 2015. p. 3519-3525. ISBN: 978-1-935117-46- 9.

12. PUBLIKACE AUTORA

12.1. Články

- 1) KVAPIL, J.; POHANKA, M. Water impact measurement of two overlapping high pressure flat jet nozzles using two different methods. In Engineering Mechanics 2010 - sborník. 2010. p. 89-90. ISBN: 978-80-87012-26- 0.
- 2) KVAPIL, J.; HRABOVSKÝ, J.; POHANKA, M. Water chamber geometry and stabilizer construction effect on water pressure distribution of high pressure descaling nozzles. EPJ Web of Conferences, 2012, vol. 25 (2012), no. 4, p. 01076-p. 1 (01076-p.11 p.) ISSN: 2100- 014X.p. 394-404. ISBN: 978-80-7372-784- 0.
- 3) ZAHRADNÍK, R.; KVAPIL, J. Algorithm for Calculation of Heat Transfer Coefficient of Cylindrical Bar Blown by Hot Air. In Engineering mechanics 2011. Engineering mechanics. Svatka: Vladimír Fuis, 2011. p. 675-678. ISBN: 978-80-87012-33- 8.
- 4) HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; KVAPIL, J. Controlled Cooling Simulation of Steel Strips. In Steel Strip 2011. 2011. p. 163-170. ISBN: 978-80-260-0539- 1.
- 5) KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; SCHOERKHUBER, K. Optimization of working roll cooling in hot rolling. In Rolling 2013. Milano, Italy: Associazione Italiana di metallurgia, 2013. p. 1-11. ISBN: 9788885298958.
- 6) KVAPIL, J.; POHANKA, M.; HORSKÝ, J. Estimation of the Thermal Contact Conductance From Unsteady Temperature Measurements. Materiali in tehnologije, 2015, vol. 49, no. 2, p. 219-222. ISSN: 1580- 2949.
- 7) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; KENETH, B.; MORAVEC, R. Determination of Thermal Contact Conductance Based on Unsteady Temperature Measurement. In AISTech 2015. 2015. p. 3519-3525. ISBN: 978-1-935117-46- 9.
- 8) KVAPIL, J.; HORSKÝ, J.; POHANKA, M. Stanovení tepelného odporu v kontaktu na základě nestacionárního teplotního měření. Hutnické listy, 2015, roč. 68, č. 4, s. 15-19. ISSN: 0018- 8069.

12.2. Výzkumné zprávy

- 1) HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P.; KVAPIL, J.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; LUKS, T.; SLABÁKOVÁ, J. *Laboratory Measurements of HTC on Nozzle Array*, Usiminas- Brasil. 2009.
- 2) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; LUKS, T.; SLABÁKOVÁ, J.; KVAPIL, J. *Heat transfer measurement CCI NF Nozzles*, ArcelorMittal Burns Harbor. 2010.
- 3) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; LUKS, T.; SLABÁKOVÁ, J.; KVAPIL, J. *Heat transfer measurement CCI NF Nozzles*, ArcelorMittal Burns Harbor. 2010.
- 4) HORSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; ONDROUŠKOVÁ, J.; LUKS, T.; KVAPIL, J.; BOHÁČEK, J. *HTC measurements Secondary cooling 2 CC*, ArcelorMittal, 2010.
- 5) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; BELLEROVÁ, H.; ONDROUŠKOVÁ, J.; KVAPIL, J.: *Řízené dochlazování kolejnič-4.část Poloprovozní zkoušky*, výzkumná zpráva pro Třinecké železářny, a.s., 2010.
- 6) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; LUKS, T.; BOHÁČEK, J. *Heat Transfer Tests*, Everloy Shoji CO., LTD., 2010.
- 7) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; LUKS, T. *Heat Transfer Measurement – Phase 1*. ArcelorMittal Indiana Harbor, 2010
- 8) HORSKÝ, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; KOTRBÁČEK, P.; KVAPIL, J.; LUKS, T.; HNÍZDIL, M. *Heat Transfer Measurement – Phase 4*. ArcelorMittal Burns Harbor, 2010
- 9) HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KVAPIL, J. *Measure Heat Transfer Characteristics of Nozzles in Secondary Cooling Zone of CC Machine*. 2010. p. 1 (p.)
- 10) HORSKÝ, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; KVAPIL, J.; LUKS, T.; ZAHRADNÍK, R.; *Influence of the surface orientation for heat transfer*, ArcelorMittal, 2011.
- 11) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; LUKS, T. *Heat Transfer Measurement – Phase 2*. ArcelorMittal Indiana Harbor, 2011.
- 12) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; LUKS, T. *Heat Transfer Measurement – Phase 3*. ArcelorMittal Indiana Harbor, 2011.
- 13) HORSKÝ, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; KVAPIL, J.; LUKS, T.; ZAHRADNÍK, R.; KOTRBÁČEK, P. *Heat Transfer Measurement – Phase 1*. ArcelorMittal Gent, 2011.
- 14) RAUDENSKÝ, M.; LUKS, T.; POHANKA, M.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; HORSKÝ, J. *Heat Transfer and Impact Measurements of Water and Mist Nozzles*. CEM Project Department, POSCO. 2011.

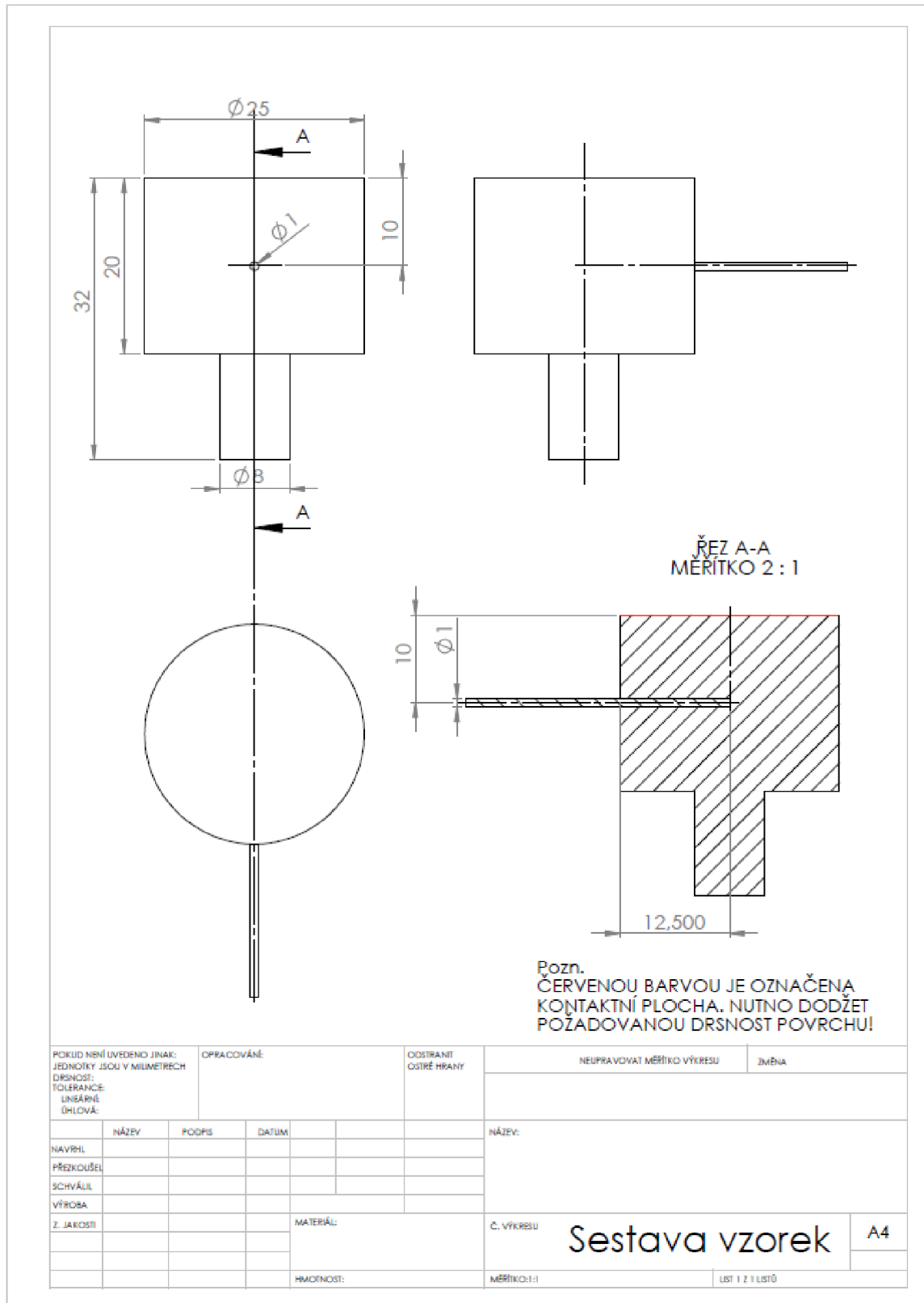
- 15) HORSKÝ, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; KVAPIL, J.; LUKS, T.; ZAHRADNÍK, R.; KOTRBÁČEK, P. *Heat Transfer Measurement – Phase I*. ArcelorMittal Ostrava, 2011.
- 16) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; KVAPIL, J. *Heat Transfer Measurement on Colling System Stage I-V*. AMAG Rolling. 2011-2012.
- 17) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; KVAPIL, J. *Thick Plate Temperature Measurement*. voestalpine Stahl GmbH. 2012.
- 18) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; KVAPIL, J. Research - plant heat transfer measurements. 2012. p. 1-12.
- 19) RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; CHABIČOVSKÝ, M.; LUKS, T.; KVAPIL, J.; PELÍŠEK, M.; HRAZDIL, V. Measurement of the existing sprayline cooling capacity and determining of upper limit of cooling intensity. 2012. p. 1-36.
- 20) KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ASTROUSKI, I.; BULEJKO, P. Optimization of Working Roll Cooling In Hot Rolling. 2013. p. 1-20.
- 21) HORSKÝ, J.; LUKS, T.; POHANKA, M.; KVAPIL, J. Thermal and friction sensors for roll-gap - development. 2013. p. 1-30.
- 22) HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; KVAPIL, J. *Development of Cooling Unit - H-profile, Siemens VAI, 2014*

12.3. Tvůrčí aktivity

- 1) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; FV01/LPTP/6/2011; Zařízení pro zjišťování teplotních přechodových odporů při kontaktu dvou povrchů.
- 2) HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.: FV01/05/ 2012; Senzor pro měření teplotních průběhů ve válcovací mezeře. ArcelorMittal Maizieres, Francie. URL: <http://www.heatlab.cz>. (funkční vzorek)

13. PŘÍLOHY

13.1. Technický výkres vzorku



13.2. Technický výkres senzoru

