

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

Letecký ústav

Laboratoř proudění a přenosu tepla

Ing. Jaroslav Horský, CSc.

**Experimentální stanovení okrajových podmínek
pro numerické modely ochlazování
a tváření kovů za tepla**

**Experimental analysis of boundary conditions
for cooling and hot metal forming
numerical models**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

Experiment, přenos tepla, okrajové podmínky, kontinuální lití, válcování, chlazení, tryska, tváření, kov, polotekutý stav

KEY WORDS

Experiment, heat transfer, boundary conditions, continuous casting, rolling, cooling, nozzle, forming, metal, mushy state.

Práce je uložena na VUT v Brně, FSI, Oddělení vědecké a zahraničních styků

Obsah

1	Úvod	5
2	Zaměření výzkumu	6
	2.1 Chlazení válců válcovacích stolic	
	2.2 Chlazení provalků při válcování za tepla	
	2.3 Odstraňování okují	
	2.4 Sekundární chlazení při kontinuálním lití oceli	
3	Metodika experimentálního stanovení okrajových podmínek přenosu tepla	9
	3.1 Stacionární metoda	
	3.2 Nestacionární metoda	
4	Experimentální standy	11
	4.1 Rotační stand	
	4.2 Lineární stand	
	2.3 Přenosný lineární stand	
	2.4 Vysokoteplotní stand	
	2.5 Experimentální stand se žhaveným elementem	
	2.6 Stand pro určování přetvárných odporů při tváření kovů za vysokých teplot	
5	Teplotní snímače	19
	5.1 Konstrukce teplotních snímačů	
	5.2 Cejchování snímačů	
	5.3 Matematický model teplotního snímače	
6	Inverzní úloha	21
	6.1 Volba výpočtové metody	
7	Programové systémy CoolRoll a Cooling	24
8	Optimalizace chlazení pracovních válců válcovací stolice	25
9	Stanovení chladicích účinků při ostříku okují	28
10	Závěr	30
11	Literatura	31
12	Abstract.....	34

Představení autora



Ing. Jaroslav Horský, CSc. je zaměstnán v Laboratoři proudění a přenosu tepla Leteckého ústavu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Narodil se 16.4. 1960 v Litomyšli. V roce 1985 ukončil s vyznamenáním vysokoškolské studium na Strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně, obor Tepelné a jaderné stroje a zařízení. Poté nastoupil do První brněnské strojírně, kde působil jeden rok. V roce 1985 zahájil studium řádné vědecké aspirantury na katedře termomechaniky a jaderné energetiky. Disertační práci na téma Termohydraulika vybraných částí parogenerátoru PGV-213 obhájil v roce 1989. V té době se podílel na řešení experimentálně i teoreticky založených výzkumných úkolů v oblasti jaderné energetiky.

Od roku 1989 pracoval na katedře termomechaniky a jaderné energetiky Strojní fakulty Vysokého učení technického v Brně. Nejdříve působil jako odborný pracovník, později jako odborný asistent. Podílel se na výuce předmětů Termomechanika, Přenos tepla a látky a Technika prostředí. V laboratořích vybudoval několik experimentálních standů s napojením na měřicí systémy řízené PC, které byly využívány pro výukové i výzkumné účely.

V 90. letech se zapojil do řešení řady zahraničních i domácích grantů. Mezi nejvýznamnější patří: US-CS Science and Technology Program, Copernicus, COST. V současné době je odpovědným řešitelem mezinárodního projektu COST 526 a grantu Grantové agentury ČR.

Od roku 1994 je zaměstnán v Laboratoři proudění a přenosu tepla Leteckého ústavu. Tato laboratoř byla nově založena a od základů vybudována. Hlavní náplní laboratoře je řešení problému z oblasti proudění a přenosu tepla s aplikacemi ve strojírenství a hutnictví. Zde vyvinul řadu experimentálních standů určených pro výzkumné i výukové účely. Mezi nejvýznamnější patří standy pro měření chladicích účinků na rotačně a lineárně se pohybujících površích a pracoviště pro zpracování a testování kompozitních materiálů. V oblasti teoretické se zabývá rozvojem inverzních metod přenosu tepla, které jsou převážně využívány pro vyhodnocení vlastních experimentálních dat. Podílí se také na řešení výzkumných úkolů pro průmysl. Mezi nejvýznamnější partnery, pro které byly řešeny úkoly patří firmy LECHLER (SRN), COMALCO (Australia), Mannesmann Demag Sack (SRN), SIEMENS AG (SRN), US Steel Košice, Nová huť Ostrava, Vítkovice, Šmeral Brno.

Celkem publikoval okolo 60 článků v časopisech a příspěvků ve sbornících na konferencích a zpracoval okolo 80 výzkumných zpráv.

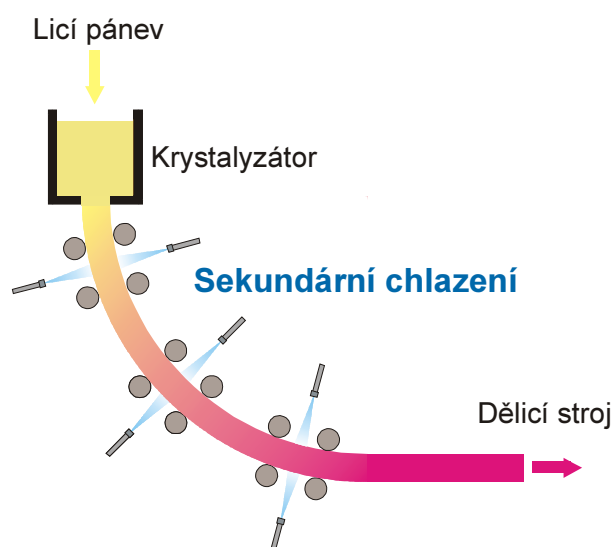
1 Úvod

Práce se zabývá výzkumem, jehož cílem je stanovení okrajových podmínek pro numerické modely použitelné k optimalizaci vybraných dějů v oblasti hutnictví a tváření kovů. Pro splnění tohoto cíle byl vytvořen postup, kdy vstupní informace jsou získávány na základě experimentů, dále je provedeno zpracování experimentálně získaných dat a jsou vytvořeny funkce, které vhodným způsobem popisují okrajové podmínky. Ty jsou poté využívány v numerických modelech.

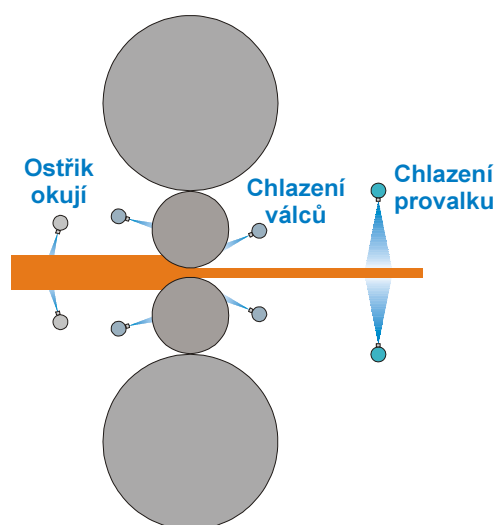
Po provedení literárních rešerší a porovnání publikovaných výsledků se potvrdila velmi často rozporuplnost uvedených informací. Jediným účinným způsobem k získání spolehlivých modelů se ukázalo zahájení experimentálně založeného výzkumu s následným vyhodnocením a přípravou okrajových podmínek pro současně vyvíjené matematické modely. První experimentální stand pro výzkum ochlazování horkých povrchů vodní tryskou vznikl v roce 1989. Od té doby byla postavena celá řada zařízení, využitelných pro simulaci chlazení a tváření v nejrůznějších podmínkách. Současně s tím byly vyvíjeny metody pro vyhodnocení experimentálních dat i vlastní numerické modely. Oblasti, ve kterých byl výzkum nejvíce rozvíjen, jsou následující:

- Chlazení válců válcovacích stolic a provalků při válcování za tepla
- Odstraňování okují
- Sekundární chlazení při kontinuálním lití oceli
- Tváření oceli v polotekutém stavu

Technologie kontinuálního lití a válcování jsou principiálně zobrazeny na obr. 1 a 2.



Obr. 1 Schema technologie kontinuálního lití



Obr. 2 Schema válcování za tepla

2 Zaměření výzkumu

2.1 Chlazení válců válcovacích stolic

S rostoucími požadavky na kvalitu válcovaného materiálu rostou i požadavky na kvalitu chlazení pracovních válců válcovacích stolic. Vhodně navržený systém chlazení musí zabezpečit dostatečně intenzivní odvod tepla z pracovních válců po ohřátí v kontaktu s provalkem. Teplota válců má podstatný vliv na kvalitu jejich povrchu a tedy i na celkovou životnost. Rozměrová přesnost provalku je ovlivněna také teplotní balicitou válců. Ta se projevuje především při válcování úzkého sortimentu na širokých válcích. V místě kontaktu provalku s válcem dochází k většímu oteplování válce, nárůstu průměrné teploty a vlivem teplotní dilatace i k lokálnímu zvětšení průměru válce. Na většině válcovacích tratí je balicita kompenzována předohybem pracovních válců. Tato metoda způsobuje vysoké zatížení ložiskových těles a stojanů. Výhodnějšího řešení lze dosáhnout vhodným režimem chlazení – tzv. zónovým chlazením. Po šířce válce je navrženo několik samostatně řízených chladicích sekcí. Intenzita chlazení je řízena tak, aby byl zajištěn požadovaný teplotní profil po šířce válce. Tak lze dosáhnout i kontrolované teplotní balicity v jednotlivých úsecích.

Na chlazení pracovních válců se v současné době již téměř výhradně používají vodní trysky s požadovanými charakteristikami. Výrobce trysek zpravidla udává následující parametry:

- Typové označení trysky
- Úhly rozstříku
- Ekvivalentní průměr otvoru trysky
- Průtok vody pro určité tlaky
- Hustotu rozložení vody po šířce paprsku

Na základě těchto údajů však nelze spolehlivě stanovit chladicí účinky. V literatuře lze nalézt vztahy, kdy intenzita přenosu tepla (většinou specifikovaná součinitelem přestupu tepla) je vypočtena z rozložení hustoty dopadající vody. Hlavní nevýhodou těchto vztahů je skutečnost, že nemohou respektovat závislost součinitele přestupu tepla na teplotě chlazeného povrchu. Další nevýhodou je těžko definovatelná oblast překrývání jednotlivých trysek.

Výběr trysek pro chladicí systém by měl být takový, aby požadovaných, regulovatelných chladicích účinků bylo dosaženo při minimální spotřebě chladicí vody. Toho lze dosáhnout pouze při detailní znalosti chladicích charakteristik. Spolehlivou cestou je v tomto případě experimentálně podložený výzkum.

2.2 Chlazení provalků při válcování za tepla

Na výstupu z válcovací tratě musí dojít k nutnému zchlazení provalku před dalšími technologickými operacemi. To se v praxi děje několika možnými způsoby, v závislosti na druhu válcovaného sortimentu a uspořádání tratě. V případě válcování profilů většina technologií využívá chladnutí na chladníku přirozenou nebo nucenou konvekcí vzduchu. Ploché výrobky se na konci tratě navíjejí navíječkami. Svinovací teplota je obvykle přesně definována a ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti provalků. Proto se před navíječkami, na výběhovém úseku tratě instaluje chladicí systém. Ten může být různého konstrukčního provedení. Dříve se často používaly tzv. laminární stěny. V tomto případě voda stéká z přešlapových žlabů, vytváří vodní stěnu a dopadá na chlazený povrch. Výhodou tohoto uspořádání je relativně jednoduchá konstrukce, odolná proti mechanickému poškození. Velkou nevýhodou je nespojitá regulace (reguluje se pouze počtem zapnutých a vypnutých sekcí) a možnost chlazení pouze vodorovných, směrem nahoru orientovaných povrchů. Další konstrukční variantou je využití vodních trysek. Výhoda tohoto uspořádání je ve velkém regulačním rozsahu a možnosti chladit libovolně orientovaný povrch. Toho se dá využít při programovém chlazení jak rovinných, tak i profilových provalků.

Moderní technologie vyžadují nejen ochlazení provalku na výběhu z válcovací tratě pro další technologie, ale i kontinuální tepelné zpracování, které ovlivní výslednou strukturu materiálu a tím i mechanické vlastnosti. Výhodný je postup, kdy dostatečně intenzivním ochlazením povrchové vrstvy dojde k jejímu zakalení a poté k popuštění vnitřním teplem z podpovrchových vrstev. Pro aplikaci tohoto postupu je nutná znalost kalících a popouštěcích křivek materiálu. Chladicí systém je regulován na požadovanou intenzitu chlazení. Vzhledem k potřebnému regulačnímu rozsahu jsou pro tyto účely vhodné vodní trysky se známými charakteristikami.

2.3 Odstraňování okují

Okuje se vytvářejí na povrchu ocelí při vyšších teplotách za přítomnosti kyslíku. Výskytu okují se prakticky nedá zabránit. Mohou se tvořit v průběhu procesu kontinuálního lití, v peci i při dopravě polotovarů na valníku. Je nepřijatelné, aby polotovar s okujemi na povrchu vstoupil do válcovací stolice. Zavalované okuje jsou fixovány na povrchu provalku a při dalším tváření se mohou dostat i do podpovrchových vrstev. Tím dojde ke vzniku nehomogenit v materiálu a jeho praktickému znehodnocení. Účinnému odstraňování okují je tedy nutno věnovat zvýšenou pozornost.

Dnes se již výhradně okuje odstraňují vysokotlakým vodním paprskem. Základním požadavkem je v tomto případě dosažení dokonalého odstranění okují při akceptovatelném

poklesu povrchové teploty. Mechanismus odstraňování okují je v tomto případě kombinací prudkého ochlazovacího účinku a mechanického účinku vodního paprsku. Pro ostřík jsou používány speciální trysky, vyráběné z abrazivzdorných materiálů. Pracovní tlaky jsou v rozmezí od 10 do 50 MPa.

Okuje lze principiálně rozdělit na primární – ty vznikají při ohřevech v pecích a sekundární – to jsou okuje, které vznikají po odstranění primárních okují. Je nutno odstraňovat primární i sekundární okuje a tedy ostříky jsou primární a sekundární. Okuje mají různé vlastnosti. Některé se odstraňují poměrně snadno, jiné naopak velmi obtížně. Ostříkový systém musí být schopen odstranit veškeré okuje, při minimální spotřebě vody. Příprava tlakové vody je vysoce energeticky náročná a proto optimalizace její spotřeby může přinést značné ekonomické efekty.

2.4 Sekundární chlazení při kontinuálním lití oceli

Oblast sekundárního chlazení při kontinuálním lití ocelí může rozhodujícím způsobem ovlivnit kvalitu odlévaného materiálu. Po výstupu z krystalizátoru je na povrchu materiálu relativně tenká ztuhlá vrstva. Tuhnutí v podstatné části průřezu tedy probíhá v úseku sekundárního chlazení. Požadavky na vlastnosti chlazení jsou do značné míry protichůdné. V první řadě je požadováno rychlé tuhnutí povrchové vrstvy tak, aby nedošlo k jejímu porušení a vytečení tekuté fáze z jádra – tzv. průvalu. Průval představuje havárii celého systému se značně negativními ekonomickými důsledky.

Na druhé straně příliš rychlé nebo nerovnoměrné chlazení může být příčinou vzniku povrchových trhlin. Tato vada musí být před dalším zpracováním materiálu odstraněna.

Z uvedených požadavků vyplývá, že použitý chladicí systém musí být regulovatelný ve velkém rozsahu intenzity chlazení. Tato podmínka se snadněji splní při použití vodovzdušných trysek. U těchto trysek dochází k atomizaci vodních kapek přívodem tlakového vzduchu. Volbou parametrů tlaku vody a vzduchu lze dosáhnout velkého rozdílu v intenzitě chlazení.

Teplotní rozsah, ve kterém probíhá sekundární chlazení, je v oblasti, kde zpravidla leží Leidenfrostova teplota pro uvedený typ trysek. Je velmi nepřesné využít pro popis intenzity přenosu tepla vztahy využívající přepočtení hustoty dopadající vody na součinitel přestupu tepla. Teplotní závislost součinitele přestupu tepla je výrazná a pohybuje se v rozsahu i několika řádů. K získání věrohodných hodnot se jeví opět nejspolehlivější experimentální stanovení požadovaných charakteristik.

2.5 Tváření oceli v polotekutém stavu

Tváření kovů v polotekutém stavu, to je při teplotách v oblasti mezi solidem a likvidem, je poměrně nová technologie, která se začala uplatňovat v sedmdesátých letech. Motivací pro zavádění této technologie byla snaha vyrábět metodou tváření polotovary nebo hotové výrobky z kovů a slitin jinými metodami obtížně tvařitelnými. Také se očekávaly výjimečné mechanické vlastnosti. Nejprve se tato metoda začala uplatňovat u hliníku a jeho slitin, pravděpodobně pro příznivé hodnoty tvářecích teplot. Při experimentálním zkoumání se objevil zajímavý efekt výrazného dynamického odpevňování materiálu. To znamená, že při zvyšující rychlosti deformace začaly klesat přetvárné odpory. Využití tohoto efektu by bylo velmi zajímavé např. u obtížně tvařitelných ocelí. Touto metodou se dle dostupných literárních informací nikdo systematicky nezabýval. V rámci projektu COPERNICUS se naskytla příležitost zapojit se do výzkumu, který se zabýval experimentálním studiem a matematickým modelováním chování oceli v polotekutém stavu. V naší laboratoři byl prováděn experimentální výzkum, jehož výsledky byly poskytnuty zahraničním partnerům zabývajícím se tvorbou matematických modelů. Bylo vyvinuto zařízení, které umožňuje stanovení přetvárných odporů kovových vzorků při teplotách až 1 600 °C. Používá se metodika vpichování tenkého nástroje do nataveného vzorku a tváření zkušebního válečku mezi rovnoběžnými nástroji. Výsledky potvrdily existenci efektu dynamického odpevňování i pro ocelové vzorky.

3 Metodika experimentálního stanovení okrajových podmínek přenosu tepla

Do výpočtových programů vedení tepla jsou zadávány materiálové charakteristiky, počáteční a okrajové podmínky. Materiálové charakteristiky a počáteční podmínky zpravidla nebývá obtížné specifikovat. Vzhledem k množství mechanismů a způsobů přenosu tepla mezi pevným povrchem a tekutinou je obtížnější stanovení realistických okrajových podmínek. Jak již bylo dříve zmíněno, pro případy ostříku horkého povrchu vodní nebo vodovzdušnou tryskou byla zvolena metoda vlastního, experimentálně podloženého výzkumu. Nejvhodnější okrajová podmínka do numerických modelů pro uvedené případy je druhého (zadává se hodnota tepelného toku) nebo třetího druhu (tepelný tok se vyjadřuje přes hodnotu součinitele přestupu tepla). Tyto charakteristiky jsou obecně teplotně a prostorově závislé. Experimentální stanovení hodnot součinitele přestupu tepla může probíhat v podmínkách stacionárního nebo nestacionárního režimu přenosu tepla.

3.1 Stacionární metoda

Při stacionárním uspořádání experimentu je teplosměnný povrch udržován na požadované konstantní teplotě. Tepelný výkon odváděný tekutinou je kompenzován přívodem do teplosměnného povrchu tak, aby bylo dosaženo tepelné rovnováhy. Zdroj musí mít dostatečný měrný tepelný výkon (vztažený na jednotku plochy), neboť chladicí výkony trysek jsou vysoké. Nejčastěji je využíváno induktivního ohřevu, ohřevu plamenem a ohřevu vlastního vzorku průchodem elektrického proudu. Všechny uvedené způsoby ohřevu mají své výhody i nevýhody a technické limity.

Induktivní ohřev vyžaduje umístění vzorku do induktoru. Velkou nevýhodou tohoto způsobu je praktická nemožnost přesné regulace na konstantní povrchovou teplotu. Bezkontaktní měření povrchové teploty selhává, neboť při ostříku tryskou dochází k tvorbě vodní páry a tím i rozptylu a pohlcování tepelného záření. Při umístění teplotního čidla do materiálu dochází ke generaci tepla i v materiálu čidla a ke zkreslení údaje teploty.

Ohřev s využitím plamene je pro určité případy využitelný, ale hlavní omezení plyne většinou z nedostatečného tepelného výkonu. Dynamika regulace hořáků není dostatečná a udržení konstantní povrchové teploty je obtížné. Prostor plamene a vodního paprsku musí být oddělen dostatečně silnou stěnou. Teplotní gradient ve stěně je značný a dosažení vyšší povrchové teploty na straně ostříku je limitováno teplotou natavení vzorku na straně plamene. Vlastní provádění experimentů nebývá v těchto případech příliš bezpečné.

Ohřev vzorku průchodem elektrického proudu vyžaduje především dostatečně výkonný zdroj proudu při nízkém napětí. Vzorek může být tenký a k měření teploty lze využít buď znalosti elektrického odporu v závislosti na teplotě, nebo lze zabudovat i teplotní čidlo. Velikost teplosměnné plochy vzorku je limitována výkonem zdroje. Regulace s využitím polovodičových výkonových prvků a rychlého regulátoru je dostatečně přesná.

3.2 Nestacionární metoda

Při nestacionárním uspořádání experimentu nemá teplosměnný povrch konstantní teplotu. V našem případě je povrch chlazen z počáteční teploty na konečnou teplotu. Běžný postup je takový, že vzorek je ohřát na požadovanou počáteční teplotu a je dosaženo známého teplotního rozložení uvnitř tělesa (nejvýhodnější je homogenní teplotní rozložení). Poté je vzorek vystaven ostříku chladicím médiem. Do vzorku je třeba vhodným způsobem umístit teplotní čidla tak, aby byly získány potřebné informace pro následné vyhodnocení a zpracování experimentálních dat. Hlavní výhodou nestacionárního experimentu je to, že teplosměnná plocha může být podstatně větších rozměrů, než v případě stacionárního experimentu, kde je velikost limitována výkonem zdroje. Tím se tento druh experimentu více

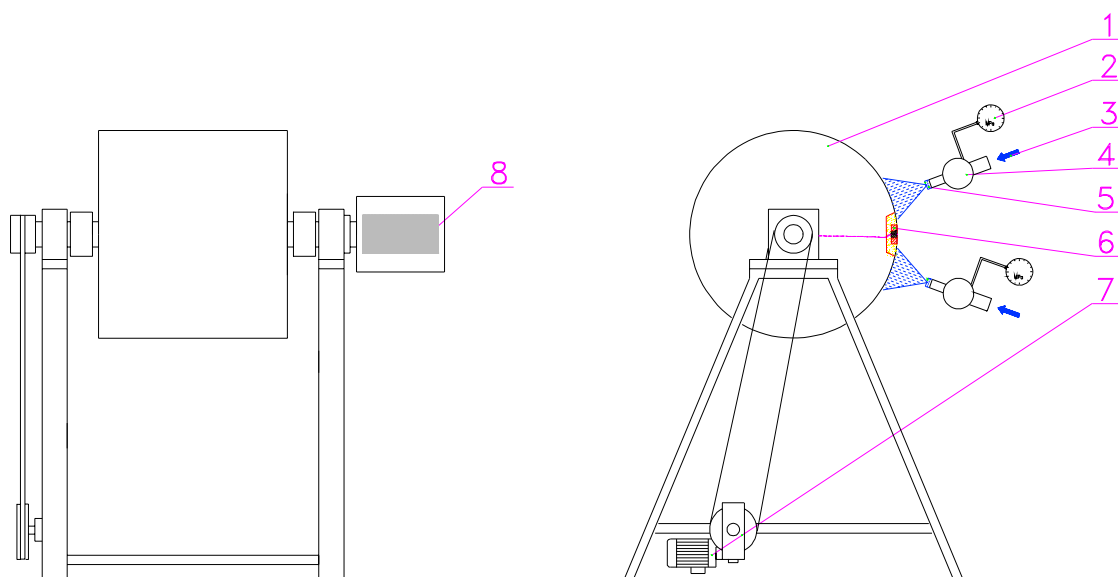
přibližuje podmínkám v reálných provozech. Velkou pozornost je třeba věnovat výběru a způsobu zabudování teplotních čidel. Dynamické vlastnosti těchto čidel mohou výrazně ovlivnit kvalitu výsledků v dalším zpracování. Při intenzivním způsobu chlazení dojde k rychlému snížení povrchové teploty teplosměnné plochy. V digitálních záznamech průběhů teplot z čidel pak může být nízký počet údajů pro vyšší teploty ve srovnání s nízkými teplotami. Z toho vyplývají i vyšší nároky na rychlost a přesnost měřicí techniky.

4 Experimentální standy

Většina realizovaných výzkumných projektů je řešena na základě experimentálně získaných podkladů. Snahou vždy bylo vytvořit podmínky experimentu takové, aby se co nejvíce blížily podmínkám v reálném provozu. Z tohoto požadavku vznikla potřeba vyvinout celou řadu experimentálních standů vhodných pro simulaci sledovaných dějů.

4.1 Rotační stand

Rotační stand byl navržen pro studium chladicích účinků trysek na válcovém rotujícím povrchu. Experimentální výsledky, získané na tomto standu, jsou aplikovatelné především na pracovní válce válcovacích stolic na ploché provalky. Rozměry a výkonové parametry byly voleny tak, aby se uvedenému požadavku co nejvíce přiblížily. Schéma tohoto standu je na obr. 3.



1 válec
2 manometr
3 přívod chladicí vody
4 rozvodná komora

5 tryska
6 měřicí deska
7 elektromotor
8 datalogger

Obr. 3 Rotační stand

Ve stojanu je na ložiscích usazena dutá hřídel. Na ní jsou nasazena dvě pevná čela. Plášť válce je vytvořen z plechu. Průměr je 650 mm, šířka 600 mm. Část obvodu je vyjímatelná a do tohoto prostoru lze vsadit měřicí element osazený čidly. Nejčastěji se používá deska tloušťky 20 mm s termočláňkovými čidly. Signály z čidel jsou vyvedeny dutou hřídelí z prostoru válce vně ložisek, kde je uložen datalogger. Ten se otáčí společně s válcem. Pohon je zabezpečen elektromotorem s převodovkou a klínovým řemenem. Elektromotor je napájen frekvenčním měničem. To umožňuje plynulou změnu otáček od 0 do 5 ot/s. Chladicí trysky lze libovolně rozmístit po obvodě válce v jedné nebo více řadách. Rozvodné komory jsou napájeny z čerpadla přes regulační ventily. Teplotu vody v nádrži lze zvýšit na požadovanou hodnotu pomocí ohřívacího tělesa.

Postup experimentu:

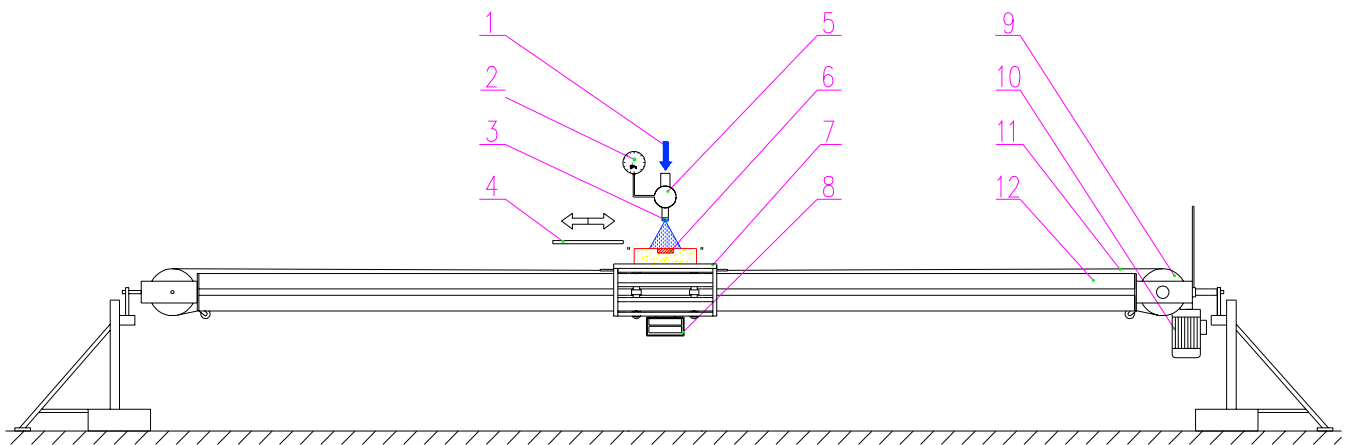
- Měřicí deska s teplotními čidly je zahřáta na počáteční teplotu externí ohřívací peci.
- Po ustálení teplot je pec odejmuta a válec je roztočen na požadované otáčky.
- V definované pozici válce je zahájen ostřik (je zde synchronizace pohybu válce a počátku ostřiku).
- Po ochlazení válce je rotace zastavena a data z vnitřní paměti dataloggeru jsou přenesena do počítače.

4.2 Lineární stand

Lineární stand umožňuje studium chladicích a mechanických účinků trysek na přímočaře se pohybujících vzorcích. Motivací pro vývoj a výrobu tohoto standu byl poznatek o výrazném vlivu rychlosti pohybu na chladicí účinky. Na tomto zařízení se dají velmi dobře simulovat podmínky při chlazení provalku na výběhovém úseku válcovací tratě a odstraňování primárních i sekundárních okují (obr.4).

Konstrukčně je stand navržen tak, aby umožňoval pohyb vzorků do hmotnosti 50 kg plynule nastavitelnou rychlostí od 0 do 5 m/s. Základní částí je nosný rám uchycený otočně na stojanech. Je sestaven ze čtyř uzavřených ocelových profilů délky 6 m. Na nosném rámu se pohybuje vozík, na který se fixuje zkoumaný vzorek s teplotními čidly a měřicím systémem – dataloggerem. Pohyb vozíku je zabezpečen tažným lanem přes poháněcí kladku a motor s převodovkou. Motor je napájen frekvenčním měničem s možností plynulé změny otáček a reverzací. Dráha pohybu vozíku je rozdělena do tří částí. V prvním úseku délky asi 1.5 m dojde k urychlení vozíku na požadovanou rychlost, ve střední části v délce 2 m se vozík pohybuje konstantní rychlostí a na posledním úseku je zastaven. Směr může být reverzován a průjezdy opakovány v požadovaném počtu. Celý cyklus je naprogramován a řízen

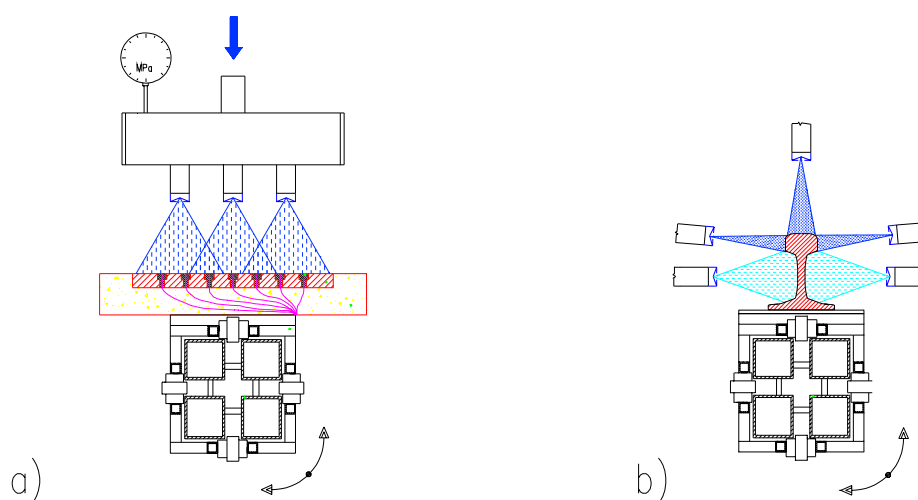
nadřazeným PC. Ve středním úseku je umístěna ostříková sekce, kde lze sestavit libovolnou konfiguraci trysek (obr. 5).



- | | | | |
|---|-------------------------|----|----------------------------|
| 1 | přívod chladicího média | 7 | vozik |
| 2 | tlakoměr | 8 | datalogger |
| 3 | tryska | 9 | poháněcí kladka |
| 4 | deflektor | 10 | elektromotor s převodovkou |
| 5 | rozvodná komora | 11 | tažné lano |
| 6 | testovaný vzorek | 12 | nosný rám |

Obr. 4 Lineární laboratorní stand

V ostříkové sekci lze využít deflektoru k odklonění vodního paprsku a zamezení ostříku vzorku. Toho se využívá při požadavku ostříku pouze z jednoho směru. V opačném směru vzorek projede aniž by byl vystaven účinkům vodního paprsku. Tímto způsobem lze simulovat průchod několika, za sebou řazenými ostříkovými sekcemi.



Obr. 5 Konfigurace trysek při ostříku a) plochého vzorku
b) profilu

Experimentální postup při určování chladících účinků.

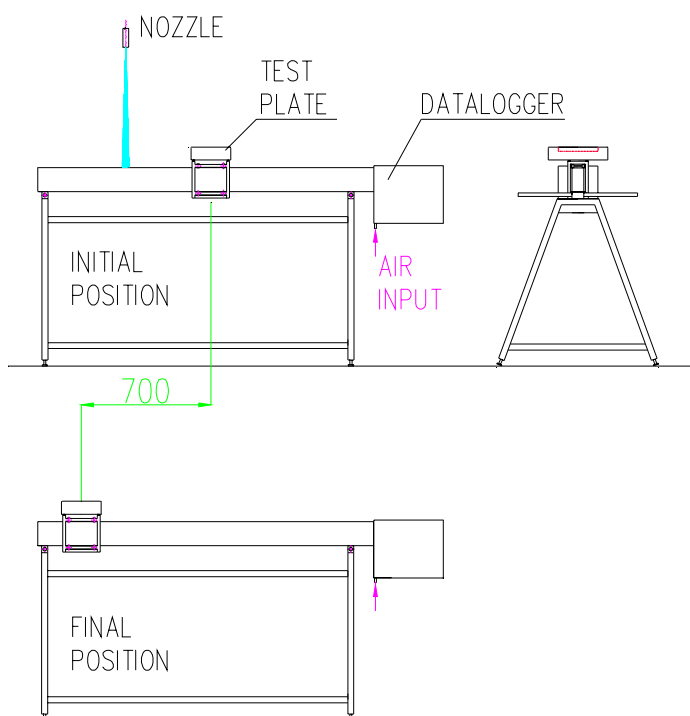
Vzorek je osazen teplotními čidly napojenými na datalogger. Před vlastním experimentem je vozík se vzorkem umístěn do krajní polohy a vnější peci ohřát na požadovanou teplotu. Po ustálení je topidlo odstraněno, stand otočen do ostřikové polohy, spuštěno čerpadlo a odstartován pojezd vozíku. Signály z čidel jsou snímány dataloggerem, který se pohybuje společně se vzorkem. Současně je snímán i signál indukující okamžitou polohu vozíku. Po provedení požadovaného počtu průjezdů jsou data z vnitřní paměti dataloggeru exportována do počítače pro další zpracování.

Experimentální postup při odkujovacích testech.

V případě posuzování kvality odkujení je jako vzorek použita deska s vrstvou primárních nebo sekundárních okují. Je realizován vysokotlaký ostřík podle předepsaného ostřikového plánu. Po ukončení je deska dochlazena v inertní atmosféře. Je posuzována kvalita povrchu a určována tloušťka zbytkové vrstvy okují.

4.3 Přenosný lineární stand

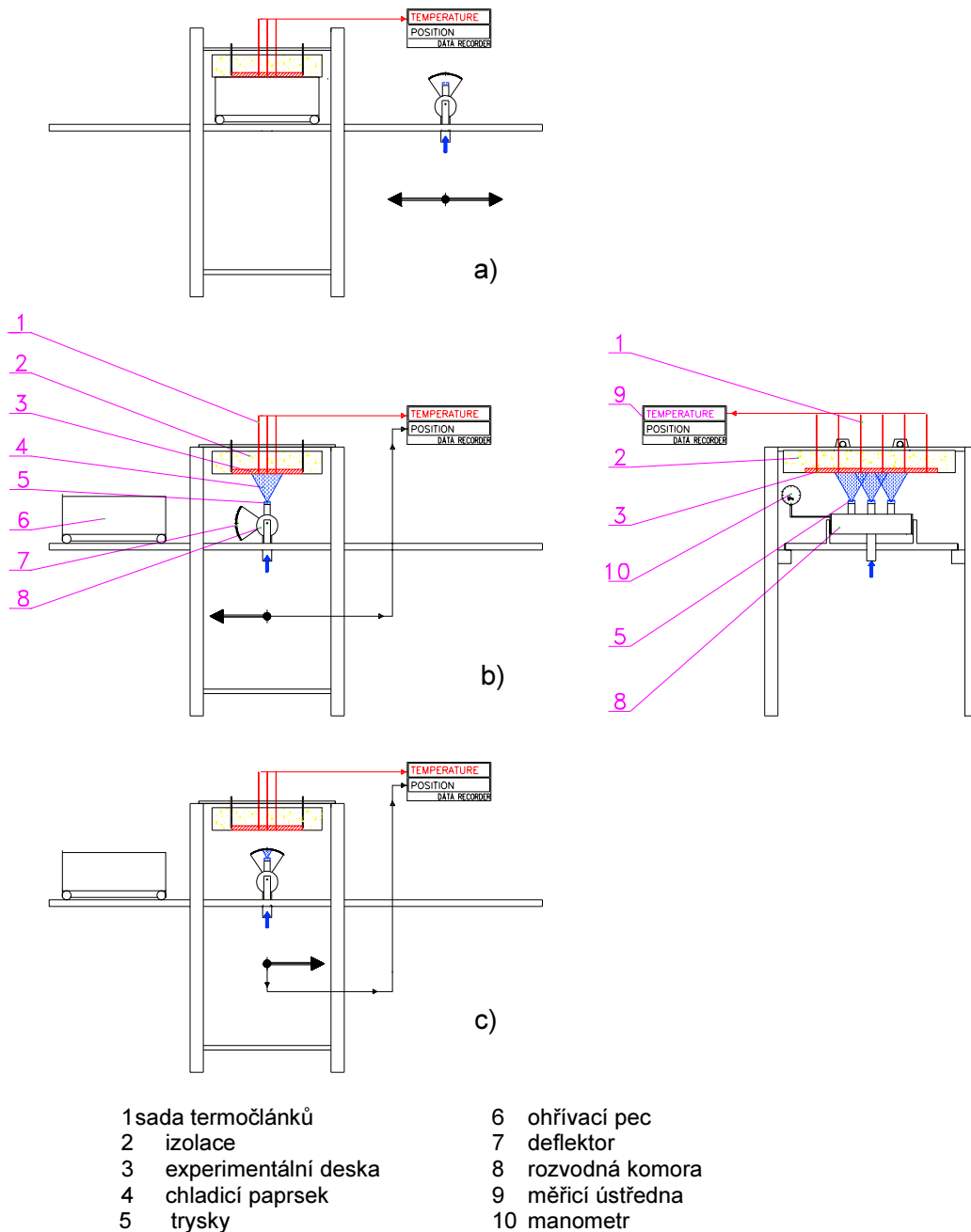
Přenosný lineární stand byl vyvinut pro potřeby měření mimo laboratoř. Splňuje obdobné požadavky jako stand laboratorní, je snadno přenosný, ale má nižší výkonové parametry. Maximální hmotnost vzorku je 10 kg, při rychlosti 3 m/s. Využitelná dráha je v délce 700 mm.



Obr. 6 Přenosný lineární stand

4.4 Vysokoteplotní stand

Jako vysokoteplotní stand je označováno zařízení, které slouží k simulaci sekundárního chlazení při kontinuálním lití oceli. Teplotní rozsah, ve kterém toto chlazení probíhá, je nejčastěji od 1300 °C do 800 °C. Relativní rychlost mezi materiálem a tryskami je v tomto případě v rozsahu od 0.5 do 5 m/min.



Obr. 7 Vysokoteplotní stand a) ohřívání desky
 b) pracovní pojezd trysky – otevřený deflektor
 c) zpětný pojezd trysky – zavřený deflektor

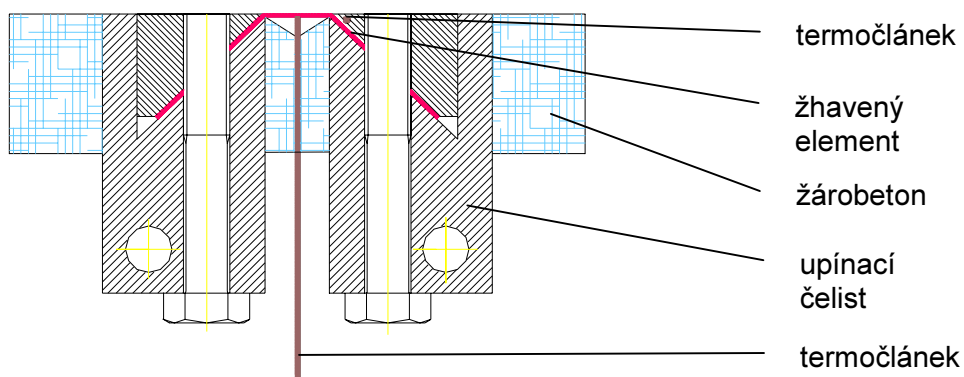
Základním prvkem vysokoteplotního standu je deska z austenitické oceli o rozměrech 600x320 mm. Používané tloušťky desky jsou v rozmezí od 20 do 30 mm. Deska je osazena sadou termočlánků, které jsou zapojeny do měřicí ústředny. Chladicí tryska (nebo skupina trysek) je umístěna v držáku, který se pohybuje společně s rozvodnou komorou a deflektorem na vozíku. Pohon vozíku zabezpečuje krokový motor přes tažná lanka. Řízení pohybu je zajištěno programovatelnou jednotkou. Lze nastavovat rychlosti, reverzace i posloupnosti směrů pohybu. Poloha vozíku je indikována opto-elektronickou jednotkou s výstupem zapojeným do měřicí ústředny. Deflektor je ovládán pneumatickým pístem a slouží k odrazení vodního paprsku při zpětném pohybu vozíku. Ohřev desky před zahájením ostříku je řešen pomocí elektro-radiálního topidla. Chladicí voda je do trysek dodávána čerpadlem ze zásobní nádrže. V případě vodovzdušné trysky je přiváděn i tlakový vzduch.

Postup experimentu:

- Topidlo je zasunuto pod desku a je zahájen ohřev na požadovanou teplotu (obvykle 1250 °C), povrch desky je chráněn přívodem inertního plynu.
- Po ustálení teploty je topidlo odsunuto, do prostoru pod desku zajede vozík s tryskou a je zahájen ostřík.
- V opačném směru se vozík pohybuje při zavřeném deflektoru, nedochází tedy k ostříku desky.
- Signály z termočlánků a údaj o poloze vozíku jsou zaznamenávány měřicí ústřednou.
- Ostříkový cyklus (ostřík a návrat vozíku) trvá po dobu nutnou ke zchlazení desky na požadovanou teplotu (zpravidla několik minut).
- Naměřená data jsou uložena v digitální podobě pro další zpracování.

4.5 Experimentální stand se žhaveným elementem

Tento stand principiálně využívá pro stanovení chladicích účinků stacionární metodu. Měřicí element je žhavený na konstantní teplotu.



Obr. 6 Experimentální stand se žhaveným elementem

Základním prvkem je element vyrobený z kanthalového pásku, který je ohříván průchodem elektrického proudu. Pásek je upnut v čelistech, do kterých je přiváděn proud z transformátoru. Teplosměnná plocha elementu má rozměr 10x15 mm. Ze zadní strany je přivařen termočlánek, který snímá teplotu elementu. Žhavená část je opatřena na bocích žebry trojúhelníkového průřezu s vrcholem uprostřed. Na okrajích elementu je menší průřez, proudová hustota je zde vyšší. Tím dochází ke kompenzaci odvodu tepla do čelistí a celý element má přibližně konstantní teplotu. Informace o teplotě čelistí je získávána z termočlánku zabudovaného v těsné blízkosti elementu a pod teplosměnným povrchem. Žhavený element je společně s čelistmi zalit do žárobetonu tak, aby na ostříkávané straně byl hladký povrch.

Princip měření

Velikost výstupního proudu z transformátoru je řízena tyristorovou jednotkou, která je ovládána regulátorem teploty. Element je ohřát na požadovanou teplotu a je umístěn do určité pozice v chladicím paprsku. Zvýší-li se odvod tepla z aktivní plochy elementu, regulátor zareaguje a zvýšením proudu doreguluje předepsanou teplotu. Po dosažení ustáleného stavu jsou změřeny hodnoty: teplota elementu, teplota upínacích čelistí, procházející proud. Po dokončení měření v jednom místě je sonda přesunuta do jiného místa a postupně je proměřena celá dopadová stopa paprsku.

Vyhodnocení měření

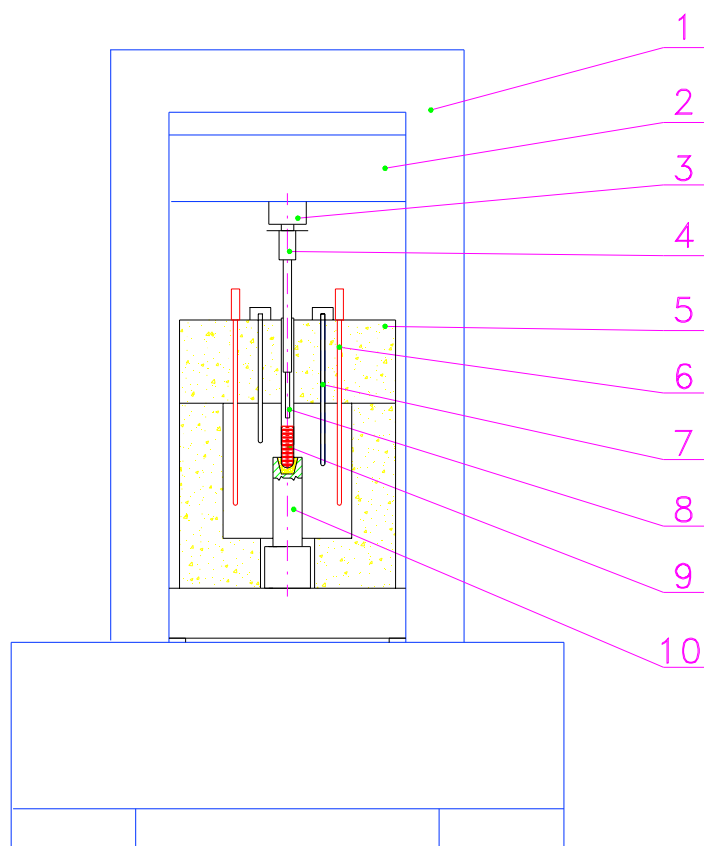
Pro vyhodnocení naměřených hodnot a stanovení velikosti součinitele přestupu tepla na aktivním povrchu elementu byl vytvořen 3D teplotní model. Jedná se o stacionární případ s vnitřním zdrojem tepla vlivem průchodu elektrického proudu. Inverzní úloha pracuje iterativním způsobem a výpočet je ukončen po dosažení požadovaného rozdílu teplot mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Porovnávají se hodnoty naměřených teplot na elementu a čelistech a procházející proud. Požadovaným výsledkem je hodnota součinitele přestupu tepla na elementu a jeho povrchová teplota.

4.6 Stand pro určování přetvárných odporů při tváření kovů za vysokých teplot

Určování přetvárných odporů při tváření kovů za vysokých teplot je experimentálně náročná činnost a dá se provádět pouze na speciálním zařízení. Cílem bylo navrhnout a zrealizovat stand, který by umožňoval provoz při teplotách až 1600 °C.

Technicky se jedná o přesné měření tahových či tlakových sil při pohybu tvářecího nástroje zvolenou rychlostí, přičemž zatěžovaný vzorek je ohřát na vysokou teplotu. Jako základ celého zařízení byl použit rám zkušebního stroje INSTRON, který byl upraven a vybaven dalšími komponenty.

Pro přesné měření polohy příčnicku byl nainstalován opto-elektronický snímač. Do příčnicku je uchycen tenzometrický siloměr. Signály ze snímače polohy a siloměru jsou současně snímány měřicí ústřednou.



- | | | | |
|---|--------------------|----|----------------|
| 1 | zatěžovací rám | 6 | teplotní čidlo |
| 2 | příčnick | 7 | topný element |
| 3 | siloměr | 8 | nástroj |
| 4 | upínací hlava | 9 | vzorek kovu |
| 5 | vysokoteplotní pec | 10 | opěrný blok |

Obr. 8 Zkušební stand pro určování přetvárných odporů za vysokých teplot

Do prostoru rámu je vložena vysokoteplotní pec. Ta byla vyvinuta speciálně pro tyto účely. Skládá se ze dvou základních částí. V dolní části je otvor umožňující závážení vzorků při pracovní teplotě, v horní části je průchod pro nástroj, výkonové, měřicí a regulační obvody. Tepelná izolace je vyrobena z minerální rohože. Topné elementy jsou superkanthalové vlásenky s maximální provozní teplotou 1650 °C. Napájecí výkonový zdroj je regulovaný tyristorovou jednotkou, která je řízena PID regulátorem. V peci je umístěno jedno regulační a jedno kontrolní teplotní čidlo.

Tvářecí nástroj se fixuje v upínací hlavě, která je spojena se siloměrem. Vzorek je umístěn uprostřed pece. Reakční síly při tlakovém zatěžování jsou zachycovány opěrným blokem vyrobeným ze žárobetonu.

Na standu lze realizovat dva základní testy. První je klasická pěchovací zkouška (hot upsetting test), kdy zkušebním tělesem je váleček deformovaný mezi dvěma rovnoběžnými povrchy. Druhý test využívá tenký nástroj (needle test), který je vtlačován do materiálu.

Pěchovací zkoušku lze použít až pro teploty odpovídající polotekutému stavu s obsahem tekuté fáze do 40%. Pro vyšší obsahy vzorek ztrácí tvarovou stabilitu. Vpichovací zkouška je naopak vhodná pro vyšší obsahy tekuté fáze ve vzorku, kdy přetvárné odpory jsou nízké a tenký nástroj pevnostně vyhovuje.

5 Teplotní snímače

Teplotní snímače mohou zásadním způsobem ovlivnit kvalitu informace získanou při experimentu. Základem teplotního snímače je kontaktní teplotní čidlo. Principiálně lze použít tři základní typy čidel s elektrickým výstupem. Jsou to termočlánek, odporový teploměr a termistor. Vzhledem k požadovanému teplotnímu rozsahu měření, rozměrům a mechanickým vlastnostem se osvědčilo používání plášťových termočláneků. Ty se dají pořídit v nejrůznějších kvalitách a provedeních.

5.1 Konstrukce teplotních snímačů

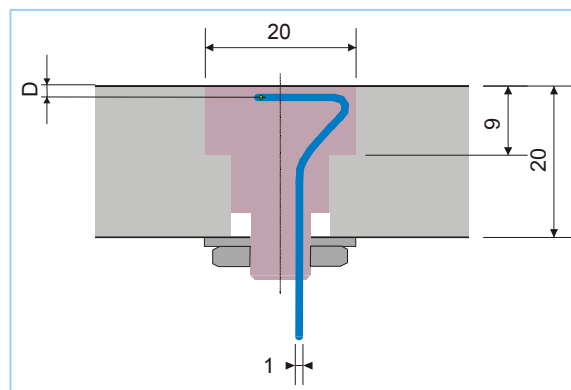
Teplotní snímač vznikne po zabudování teplotního čidla do tělesa, ve kterém má být měřena teplota. Z hlediska jednoduchosti dalšího vyhodnocení experimentálně získaných podkladů při stanovení intenzity přenosu tepla mezi stěnou a tekutinou by bylo nejvýhodnější měřit povrchovou teplotu. Na trhu existuje celá řada výrobců, kteří dodávají snímače pro měření „povrchové“ teploty. Některé z těchto produktů byly testovány (např. tzv. koaxiální termočlánek), ale pro rychlé a periodické změny nevyhovovaly. Výhodnější se ukázal vývoj vlastního snímače, který měří teplotu v určité hloubce pod povrchem a má známé dynamické vlastnosti. Snímač byl navržen tak, aby splňoval následující požadavky:

- Nesmí narušovat obtékaný povrch ani homogenitu materiálu.
- Je snadno montovatelný a demontovatelný.
- Je možno jej cejchovat a dají se stanovit dynamické vlastnosti.
- Má dostatečnou teplotní odolnost a životnost.
- Charakteristiky se po celou dobu životnosti nemění.
- Dá se vyrobit běžně dostupnými technologiemi.

Na základě těchto požadavků vznikly dva typy snímačů. Základ obou je tvořen osazeným válcem z antikorozi oceli, který se pomocí závitového dřívku a matice fixuje do osazeného otvoru.

První typ má teplotní odolnost do 550 °C, je osazen plášťovým termočlánkem typu K o průměru 0.5 mm v izolovaném provedení. Měřicí konec termočlánku je zapájen do povrchové drážky pájkou a vyveden otvorem na opačnou stranu. V místě nižší teploty je pak napojeno kompenzační vedení, které přivádí napětí na měřicí svorky. Tento typ indikuje teplotu v hloubce 0.45 mm pod povrchem a má velmi dobrou časovou odezvu. Používá se pro rychlé a periodické děje. V současné době je tímto typem osazena měřicí deska rotačního standu.

Druhý typ má teplotní odolnost do 950 °C, je osazen plášťovým termočlánkem typu K o průměru 1 mm s izolovaným měřicím koncem. V základním tělese je vyvrtán otvor s osou 1 mm pod povrchem. Do tohoto otvoru je vakuově zapájen termočlánek, který je dále vyveden drážkou a napojen na kompenzační vedení. Měří teplotu v hloubce 1 mm pod povrchem.



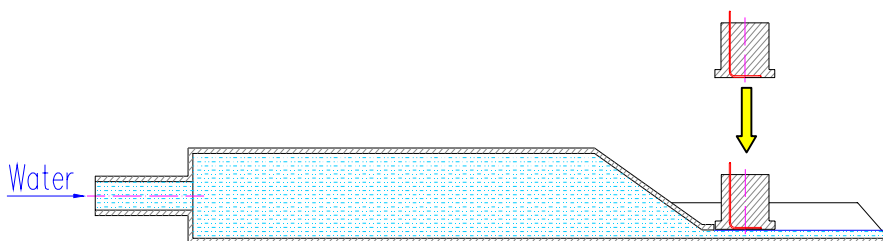
Obr. 9 Teplotní snímač s odolností 950 °C

Tento typ se používá pro případy, kde je vyžadována vyšší teplotní a mechanická odolnost. Není příliš vhodný pro periodicky se opakující děje. Typickou aplikací je měření chladicích účinků trysek při vysokotlakém ostříku okují.

5.2 Cejchování snímačů

Každý nově vyrobený snímač je cejchován. Ověřuje se výrobcem deklarovaná cejchovní křivka termoelektrické napětí – teplota a dále se stanovují dynamické charakteristiky.

Rychlost reakce snímače na skokovou změnu teploty je dána především polohou měřícího spoje termočlánekových drátů. Ta nemusí být u všech čidel totožná. Důvodem jsou výrobní tolerance v provedení základního tělesa snímače a dále ne zcela přesně definovaná poloha měřícího spoje uvnitř pláště termočlánku. Dynamické charakteristiky jsou ověřovány na zařízení, které umožňuje simulovat skokovou změnu teploty prostředí (obr. 10).



Obr. 10 Zařízení pro ověřování dynamických charakteristik teplotních snímačů

Snímač je umístěn do držáku a ohřát v peci na teplotu 210 °C. Po homogenizaci teplot uvnitř tělesa je vyjmut z pece a rychle přemístěn do přípravku, kde je chlazen proudem vody, která omývá čelo snímače. Usměrněný proud vody je vytvářen kanálem obdélníkového průřezu s vestavěnými překážkami a výstupní štěrbinou. Průtok vody je nastavován přetlakem na vstupu. Termočlánekový signál je snímán měřicí ústřednou se vzorkovací frekvencí 40 Hz. Poté je v interaktivním grafickém prostředí vyhodnocen pokles teploty za určitý počet časových kroků. Jestliže je dosaženo při opakovaných pokusech statisticky uspokojivých výsledků, je snímač považován za vyhovující. V případě, že poklesy teplot jsou nižší než požadované (snímač je „pomalý“), lze odbroušením povrchové vrstvy provést korekce, až do vyhovujícího stavu. Další korekce lze provádět v matematickém modelu teplotního snímače, kdy změnou geometrie lze v určitém rozsahu měnit polohu měřicího spoje termočlánekových vedení.

5.3 Matematický model teplotního snímače

Matematický model byl navržen tak, aby co nejpřesněji respektoval geometrické a materiálové charakteristiky snímače. I když jsou použité termočlánky ve snímači malých průměrů, nelze je pokládat za termodynamicky tenké těleso a pro přesný model je nutno uvažovat jejich vnitřní strukturu. Potřebné informace o geometrických poměrech uvnitř termočláneku byly získány z mikroskopických fotografií příčného řezu a z rentgenových snímků.

Na základě těchto informací bylo možno sestavit výpočtový model snímače se zabudovaným plášťovým termočlánekem. Běžně je používán 2D model, který z hlediska vzniklých chyb neuvažováním třetího rozměru vyhovuje. Dominantní teplotní gradient je vždy od chlazeného povrchu po tloušťce snímače. Vedení tepla ve směru kolmém je zanedbatelné, termočlánek tedy délkou minimálně deseti průměrů leží prakticky v izotermě. Srovnávací výpočtové testy na 3D modelu tuto skutečnost potvrdily.

6 Inverzní úloha

Inverzní úloha je v tomto případě chápána jako nalezení součinitele přestupu tepla na povrchu tělesa při znalosti experimentálně zjištěného průběhu teplot v jednom nebo několika bodech uvnitř tělesa. Pro řešení inverzní úlohy je nutná znalost počátečního rozložení teplot, teploty okolí a termofyzikální vlastnosti materiálů tělesa. Dále je předpokládána znalost metody řešení přímé úlohy – tedy výpočtu nestacionárního teplotního pole v tělese.

Pro hledání součinitele přestupu tepla byla zkoušena řada metod. Jednak to byly metody „klasické“, založené na přímém řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla a jednak

metody „netradiční“, založené na metodách umělé inteligence. Porovnání obou přístupů by vyžadovalo delších rozborů, některé závěry lze nalézt v publikacích zabývajících se touto problematikou. Pro vyhodnocení experimentů se ukázalo jednoznačně vhodnější použití „klasických“ metod s vhodným algoritmem pro inverzní výpočet součinitele přestupu tepla a s využitím přesné a rychlé přímé metody. Inverzní úlohy založené na metodách umělé inteligence (genetické algoritmy, neuronové sítě) patří zatím spíše do oblasti akademického výzkumu.

Praktický postup při řešení inverzní úlohy je v současné době založen na minimalizačním principu. Důležitým pojmem jak v oblasti plánování experimentu, tak při řešení inverzní tepelné úlohy je koeficient citlivosti. Je to derivace měřeného parametru podle hledaného parametru. Podle velikosti koeficientu citlivosti můžeme usoudit na potřebnou přesnost měření při zadaném požadavku na přesnost hledaného parametru.

V našem případě měříme teplotu a hledáme součinitel přestupu tepla. Derivace D je tedy

$$\text{definována jako } D^i = \frac{\partial T_h^i}{\partial h},$$

kde horní index i je pro časový krok. Stabilizace numerického výpočtu vyžaduje zahrnout do výpočtu hodnoty součinitele přestupu tepla v dalším časovém kroku i hodnoty několika dalších měření. Proto je při výpočtu hledané hodnoty h^* v bodě M použito i hodnot z bodů $M+1$ a $M+2$. Provedou se přímé výpočty z počátečního bodu v čase $M-1$ pro odhadnuté hodnoty h_j , $j = 1, 2, \dots, r$, kde r je počet dopředných kroků. Výsledkem výpočtu je teplota $T_{h_j}^i$, kde horní index značí časový krok a dolní index značí součinitel přestupu tepla. Teploty z experimentu jsou označeny T_{exp} . Hodnota součinitele přestupu tepla h^* minimalizuje střední kvadratickou odchylku mezi vypočtenou $T_{h_1}^i$ a experimentálně zjištěnou teplotou T_{exp}^i .

$$F = \sum_{i=1}^r (T_{\text{exp}}^i - T_{h_1}^i)^2 \quad (1)$$

Derivace funkce F podle h_j se položí rovna nule, hodnota h_j se nahradí hledanou hodnotou h^* .

$$0 = \sum_{i=1}^r (T_{\text{exp}}^i - T_{h^*}^i) D^i \quad (2)$$

Numerické testy ukázaly, že nejjednodušší postup náhrady derivace diferencí, využívající

výpočet pouze dvou větví, je dostatečně přesný: $D^i = \frac{T_{h_1}^i - T_{h_2}^i}{h_1 - h_2}$.

Teplotní pole v časovém kroku i může být charakterizováno Taylorovým rozvojem okolo hodnoty h_j . Dosazením prvních dvou členů Taylorova rozvoje, a s uvažováním pouze jedné hodnoty odhadu h a další úpravou dostáváme rovnici pro výpočet požadované hodnoty součinitele přestupu tepla h^*

$$h^* = \frac{\sum_{i=1}^r h_1 D^{i^2} + \sum_{i=1}^r (T_{\text{exp}}^i - T_{h_1}^i) D^i}{\sum_{i=1}^r D^{i^2}} \quad (3)$$

6.1 Volba výpočtové metody

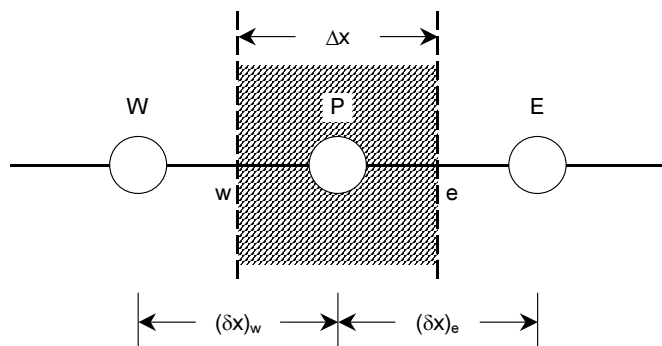
Teplotní pole v tělese je popsáno parciální diferenciální rovnicí vedení tepla, kterou lze analyticky řešit pouze pro jednoduché případy. Úspěšné řešení jak přímé, tak i inverzní úlohy předpokládá výběr vhodné numerické metody, která bude splňovat celou řadu často protichůdných požadavků. K těm základním patří:

- Aplikovatelnost na 1D, 2D i 3D nelineární stacionární i nestacionární případy v různých souřadných systémech.
- Možnost zadávání libovolných okrajových podmínek a vnitřních zdrojů.
- Jednoduchá formulace diskretizačních rovnic, která umožní vytvoření efektivního programu.
- Numerická stabilita a „robustnost“ řešení, které musí být vždy fyzikálně reálné (nesmí například docházet k nežádoucím překmitům vlivem numerických nestabilit).
- Dostatečně přesné a rychlé řešení.

Metoda kontrolních objemů (FVM)

Tato metoda se ukázala jako nejvhodnější pro řešení přímých i inverzních úloh v praktických aplikacích, neboť nejlépe z výše uvedených případů splňuje vytyčené požadavky.

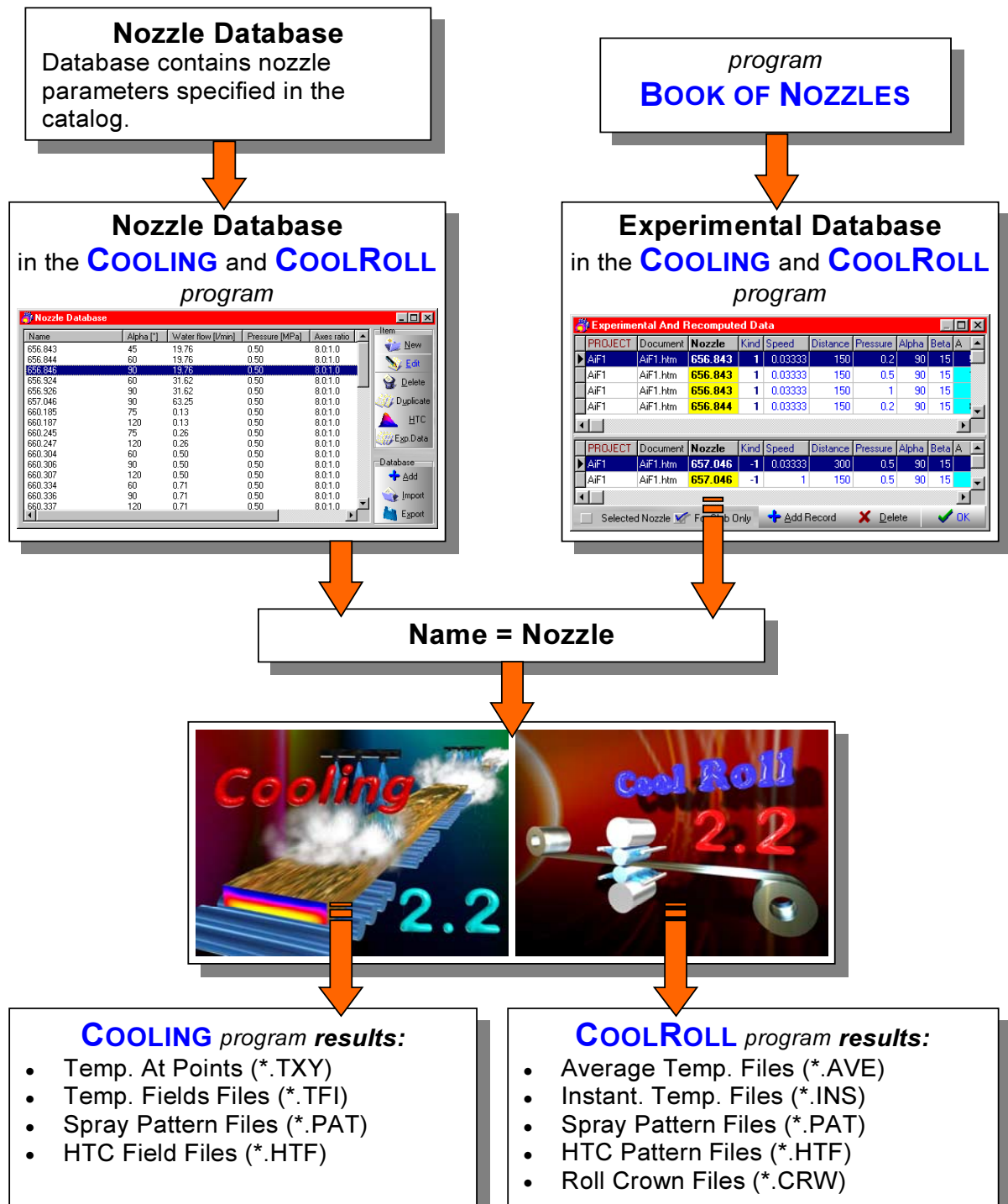
Těleso je rozděleno na jednotlivé kontrolní objemy (obr. 11). Ve středu každého objemu je definován vztažný bod - uzel. K jednotlivým uzlům jsou vztaženy proměnné jako je teplota a materiálové vlastnosti. Pro každý uzel je nutné zapsat rovnice zachování energie, které umožní výpočet rozložení teploty v tělese.



Obr. 11 Obecný jednorozměrný případ FVM

7 Programové systémy CoolRoll a Cooling

Tyto programové systémy byly vytvořeny tak, aby umožňovaly návrh a optimalizaci chladicích sekcí pro chlazení válců, provalků a bramy při kontilitě. Okrajové podmínky do obou výpočtových programů jsou zpravidla zadávány na základě provedených a vyhodnocených experimentů.



Obr. 12 Vstupy a výstupy programů Cooling a CoolRoll

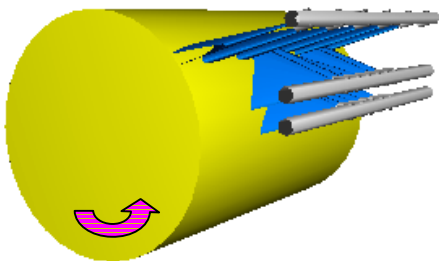
8 Optimalizace chlazení pracovních válců válcovací stolice

Projekt byl zaměřen na optimalizaci chlazení pracovních válců konkrétní válcovací stolice. Cílem bylo stanovení chladicích účinků současného řešení a návrh alternativního, účinnějšího způsobu chlazení.

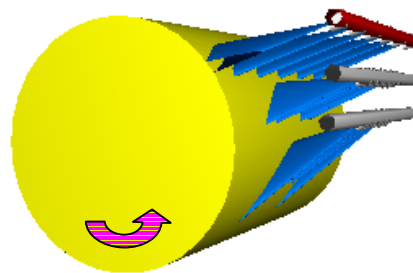
Řešení bylo rozvrženo do dvou částí – experimentální a výpočtové.

Experimentální část

Připravený experiment se blíží z hlediska chlazení reálným podmínkám a je označován jako „full scale“. Motivací pro přípravu tohoto typu experimentu byla skutečnost, že charakteristiky získané na jedné trysce nebo jedné řadě trysek jsou obtížně zobecnitelné pro více trysek a více řad. Vzájemné ovlivňování trysek a řad trysek je značné a celkový chladicí účinek nelze stanovit pouhým sečtením dílčích chladicích účinků. Pro experiment byl využit rotační stand, který byl osazen potřebným počtem trysek a rozvodných kolektorů. Původní řešení výstupní strany horního válce je zobrazeno na obr. 13 a nové řešení je na obr. 14.



Obr. 13 Původní řešení



Obr. 14 Nově navržené řešení

Průběh experimentu je ilustrativně zobrazen na fotografiích 1 a 2. Na fotografii 1 se jedná o přípravnou fázi experimentu – ohřívání teplosměnného povrchu, na fotografii 2 je již zobrazen vlastní ostřík válce skupinou trysek.



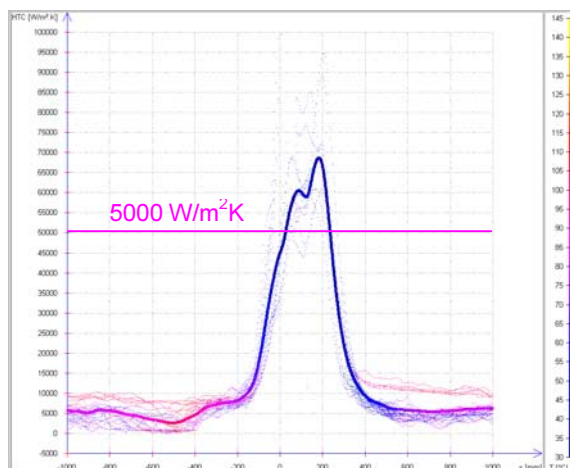
Foto 1 Přípravná fáze experimentu-ohřev



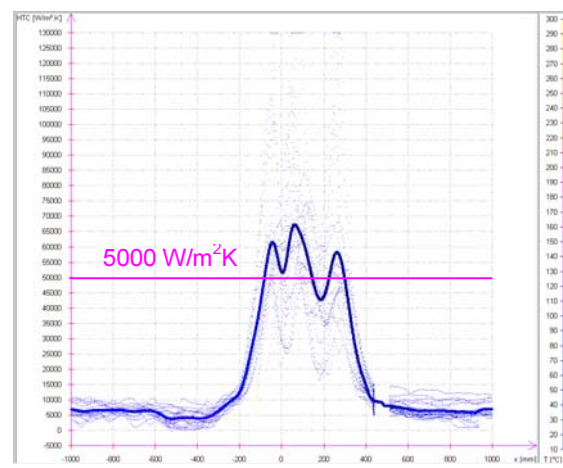
Foto 2 Ostřík válce tryskami

Zásadní poznatek, který byl uplatněn při novém návrhu, vyplývá ze skutečnosti, že nejúčinněji může chladit pouze první řada trysek, která přijde do kontaktu s horkým povrchem. Teplotní rozdíl mezi povrchem a chladicí vodou je zde největší a pokud bude vysoká i hodnota součinitele přestupu tepla, dojde k odvedení značného tepelného toku a tím i snížení průměrné teploty válce. Další řada trysek by měla následovat až v místě, kde dojde k „tepelnému zotavení“ povrchu a nárůstu teploty. Jinak by bylo chlazení neúčinné vzhledem k malému tepelnému spádu. Podmínky pro optimalizaci první řady jsou většinou velmi omezené vzhledem ke geometrickým možnostem v prostoru válců a stojanů. Měnit se dá zpravidla pouze typ trysky a úhel natočení chladicích kolektorů. V duchu těchto zásad byla navržena nová varianta a porovnána s původním řešením.

Naměřená data byla vyhodnocena inverzní úlohou a zpracována dalšími programy. Výsledkem je vektor součinitele přestupu tepla na obvodu válce. Porovnání původní a nové varianty řešení je na obr. 15 a 16.



Obr. 15 Vektor součinitele přestupu tepla, původní řešení nové řešení

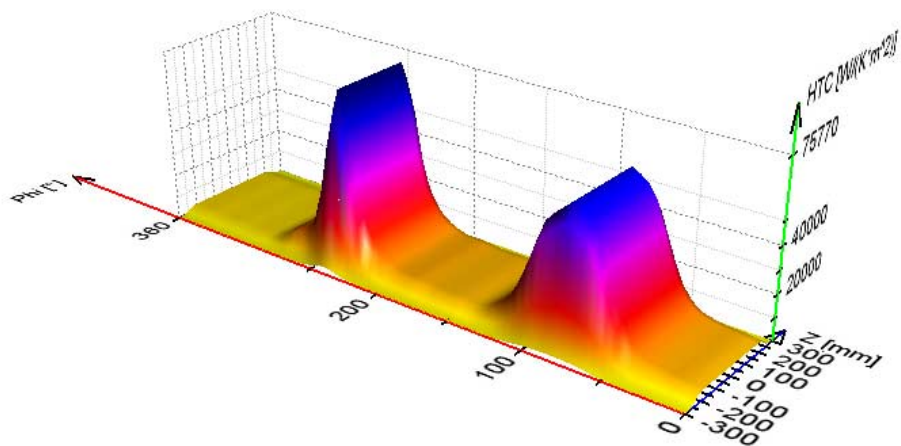


Obr. 16 Vektor součinitele přestupu tepla,

Takto zpracovaná data jsou dále využita jako okrajové podmínky ve výpočtovém programu CoolRoll, který umožňuje porovnání obou variant.

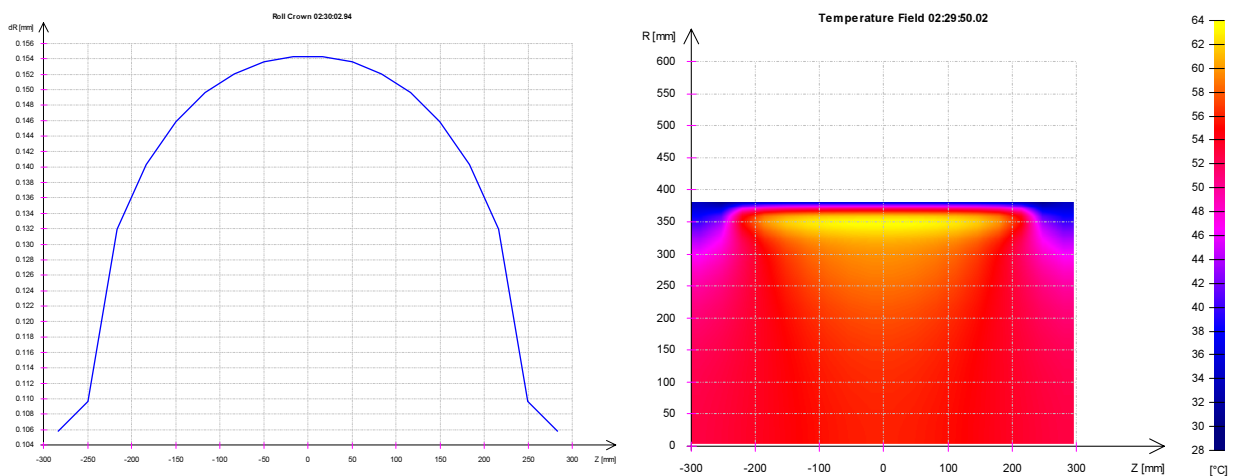
Výpočtová část

Na základě předcházející experimentální části bylo možno využít vyvinutý výpočtový program CoolRoll pro simulaci reálné válcovací kampaně. Průběh součinitele přestupu tepla musí být zadán po celém obvodu (na vstupní i výstupní straně) a šířce válce. Příklad je uveden na obrázku 17. Jako další vstupní parametry byly použity informace o geometrii, materiálových charakteristikách válců a teplotách chladicí vody a okolního prostředí. Z hlediska válcování byly zadány úběrové plány a časový harmonogram kampaně. Výpočty byly provedeny pro stejné konfigurace trysek jako u realizovaných „full scale“ experimentů.



Obr. 17 Průběh součinitele přestupu tepla, použitý při výpočtech programem CoolRoll

Program umožňuje realizaci řady výstupních parametrů. Z hlediska posouzení účinnosti chlazení je vhodné sledovat okamžité a průměrné teploty válce na povrchu a v několika dalších vybraných bodech. Důležitý údaj, který může zásadním způsobem ovlivnit rozměrovou přesnost provalku je teplotní balicita válců (obr. 18).



Obr. 18 Teplotní balicita válce (vlevo) a teplotní pole (vpravo) v průřezu válce po válcovací kampani v trvání dvě a půl hodiny

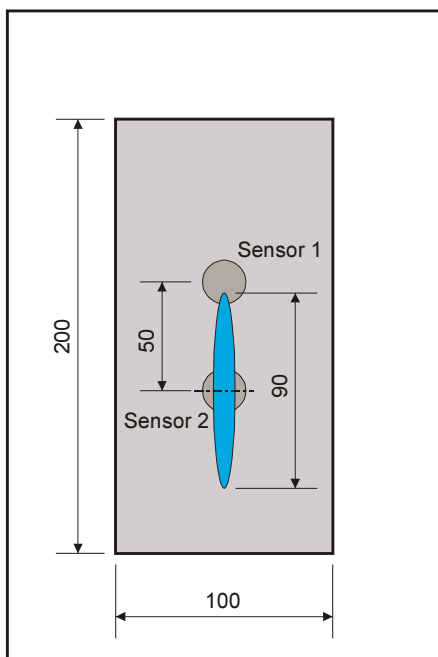
Výpočty prokázaly, že volbou jiného typu trysky se dá dosáhnout vyšší účinnosti chlazení i při mírné úspoře vody. Směrování trysek přispěje také ke zlepšení chlazení.

Intenzivnější chlazení vždy nemusí znamenat zlepšení teplotní balicity. Účinnějšího efektu by se dalo dosáhnout použitím zónového chlazení, kdy intenzita chlazení je regulována po šířce válce. Zónové chlazení však nebylo v rámci tohoto projektu aplikováno.

9 Stanovení chladicích účinků při ostříku okují

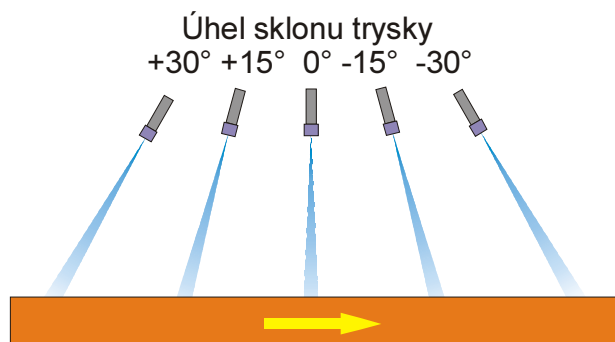
Při odstraňování okují vysokotlakým vodním paprskem dochází k porušení oxydické vrstvy jednak mechanickým působením paprsku a také teplotním pnutím, které vzniká při prudkém ochlazení povrchové vrstvy. Vliv těchto faktorů není zatím uspokojivě vysvětlen. Předpokládá se, že bude vyvinut numerický model ostříku okují, který zohlední jak mechanické, tak i tepelné působení a podaří se tak objasnit vliv obou faktorů. Model bude vyžadovat zadávání okrajových podmínek. Z hlediska tepelného je vyžadována specifikace součinitele přestupu tepla.

S využitím lineárního standu se dají simulovat podmínky z hlediska rychlosti pohybu ostříkávaného povrchu. V laboratorních podmínkách lze tedy zrealizovat experimentální výzkum pro stanovení chladicích účinků při vysokotlakém ostříku. Měřicí deska o rozměrech 200x100 x 20 mm byla osazena dvěma teplotními čidly. Jedno bylo umístěno v ose trysky, druhé mimo oblast přímého ostříku (obr. 19). Pro ostřík byly použity standardně dodávané trysky firmy Lechler a Spraying Systems, instalované v různých konfiguracích (obr. 20).



Cílem

Obr. 19 Měřicí deska



Obr. 20 Konfigurace trysek

bylo objasnit vliv velikosti trysky, tlaku vody a úhlu sklonu trysky na velikost součinitele přestupu tepla. Jako vedlejší parametry byl sledován pokles teploty při jednom průchodu pod tryskou a doba, po kterou trval chladicí puls.

Ilustrativní fotografie 4 dokumentuje počátek experimentu, kdy je deska otočena z nahřívací polohy do pracovní. Počáteční teplota je 950 °C. Fotografie 5 zachycuje průchod zahřáté desky pod vodním paprskem

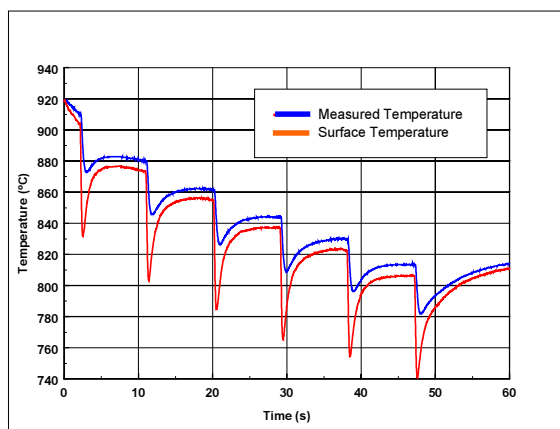


Foto 4 Počátek experimentu

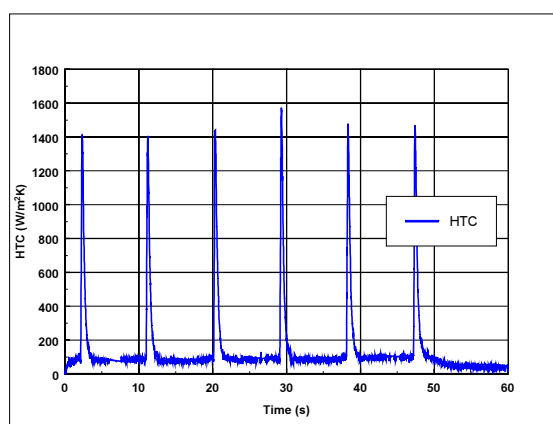


Foto 5 Průchod pod tryskou

Údaje z teplotních čidel a polohového čidla jsou snímány dataloggerem a poté zpracovány inverzním výpočtem a dalšími navazujícími programy. Příklad naměřených dat je na obr. 21, kde je zachyceno šest průchodů pod tryskou. Výsledkem inverzní úlohy je průběh povrchové teploty (obr. 21) a průběh součinitele přestupu tepla (obr. 22)



Obr. 21 Průběh naměřené a povrchové teploty



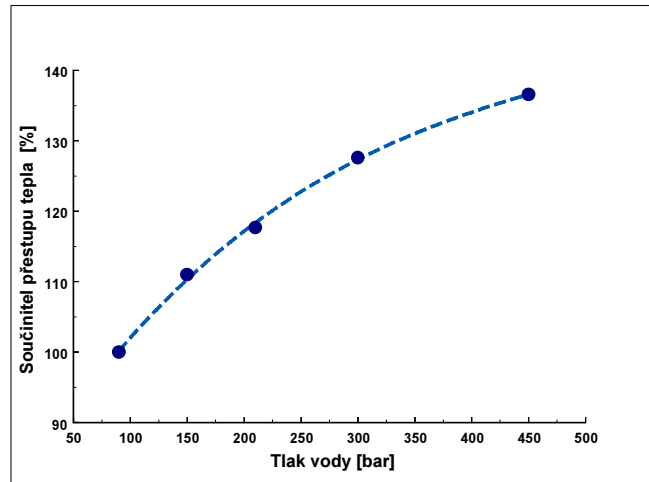
Obr. 22 Průběh součinitele přestupu tepla

Z těchto průběhů jsou integrací na určitém úseku dráhy získány integrální hodnoty součinitele přestupu tepla, které jsou vhodné pro ocenění vlivu zkoumaných faktorů. Prvním důležitým sledovaným faktorem je úhel sklonu trysky. Výsledky dokumentující tento vliv jsou shrnuty v tabulce 1.

Úhel sklonu trysky [°]	-30	-15	0	+15	+30
Součinitel přestupu tepla [%]	105.1	99.1	100	99.1	97.5

Tab. 1 Vliv úhlu sklonu trysky na relativní velikost součinitele přestupu tepla

Úhel sklonu trysky se výrazněji projeví na velikosti součinitele přestupu tepla až při větších hodnotách. Pokud je nastaven v rozsahu $+15^\circ$ až -15° , naměřené charakteristiky jsou téměř shodné. Při úhlu 30° bylo dosaženo vyšší intenzity chlazení při negativním sklonu. Velikost trysky ovlivňuje intenzitu chlazení. Při použití trysky s větším průtokem došlo k nárůstu integrální hodnoty součinitele přestupu tepla. S rostoucím tlakem rostou u sledovaných typů trysek i hodnoty součinitele přestupu tepla (obr. 23). Nárůst je výraznější v oblasti nižších tlaků (100-150 bar). Pro vyšší tlaky pak dochází již jen k malému relativnímu nárůstu.



Obr. 23 Vliv tlaku vody na relativní velikost součinitele přestupu tepla

V rámci tohoto projektu byla navržena metodika zpracování „tepelných testů“ při vysokotlakém ostříku, která byla akceptována i spolupracujícími pracovišti (IRSID-Francie, Lechler-SRN).

10 Závěr

Předložená práce je shrnutím výzkumných aktivit autora v oblasti přenosu tepla s aplikacemi v hutnictví a při tváření kovů za posledních několik let. Cílem bylo vytvoření metodiky a následné praktické použití této metodiky při objasnění významných přenosových jevů a stanovení okrajových podmínek v procesech chlazení válců válcovacích stolic, chlazení provalků při válcování za tepla, odstraňování okují, sekundárního chlazení při kontinuálním lití oceli a tváření oceli v polotekutém stavu. Výstupem tohoto procesu jsou funkce popisující okrajové podmínky těchto dějů ve tvaru vhodném pro použití v numerických modelech.

Veškerá data jsou získávána na základě laboratorních experimentů, v některých případech i v průmyslových podmínkách. Pro tyto účely byla vyvinuta celá řada experimentálních standů. Byly navrženy tak, aby umožňovaly co nejuvěrnější simulaci sledovaných dějů a zkoumání vlivů různých faktorů na tyto děje. U chlazení horkých povrchů tryškami se ukázal významný vliv rychlosti na chladicí charakteristiky. Proto všechny experimentální standy pro toto použití umožňují pohyb vzorků rychlostmi běžně používanými v reálných procesech.

Zásadní význam na kvalitu výsledků má způsob měření teplot ve sledovaném tělese. Zde musí mít požadované vlastnosti celý měřicí řetězec. Samostatná kapitola je věnována teplotním snímačům, které tvoří začátek celého řetězce.

Veškerá naměřená data jsou získávána v digitální podobě a dále zpracována. Zde nastupuje několik na sebe navazujících programů. V případě hledání okrajových podmínek přenosu tepla je nezbytné provedení přesného výpočtu inverzní úlohy. Problematika inverzní úlohy a volby vhodné výpočtové metody je zpracována v samostatné kapitole. Další navazující programy upraví data do podoby vhodné do numerických modelů. Postup zde nelze jednoznačně specifikovat, neboť závisí na kvalitě vstupních dat. Okrajové podmínky jsou specifikovány buď ve formě datových souborů nebo hodnotami koeficientů vhodných interpolačních funkcí. Jsou ukládány do databáze okrajových podmínek.

Jen velmi stručně jsou zmíněny programové systémy CoolRooll a Cooling, které byly současně vyvíjeny a využívají okrajové podmínky z vytvořené databáze.

Relativně samostatné části tvoří příklady projektů řešených v poslední době. Tyto projekty většinou byly řešeny pro partnery z průmyslu. Výsledky byly bezprostředně aplikovány v praxi s velmi dobrými ohlasy.

Do řešení většiny výzkumných projektů jsou zapojeni studenti jak denního, tak i doktorandského studia. Je využívána možnost použití vyvinutých experimentálních standů a pracovišť pro praktické, experimentálně podložené studentské projekty. Bylo zpracováno několik diplomových prací z oblasti tváření kovů v polotekutém stavu. V současné době je na stejné téma dokončována doktorandská práce. Další doktorandi, působící v laboratoři, jsou zapojeni do provádění experimentů i vyhodnocování dat a tvorby výpočtových programů.

11 Literatura

- [1] Bamberger, M. - Prinz, B.: Determination of heat transfer coefficient during water cooling of metals, *Materials Science and Technology*, vol.2, pp. 410-415, April 1986.
- [2] Beck, J. V. - Blacwell, B. – Clair, C. R.: *Inverse Heat Conduction*, Wiley, New York 1985
- [3] Hatta, N. at all.: Numerical analysis of gas-particle two-phase subsonic free jets, *Trans. ASME, Journal of fluids engineering*, Vol.114, 19922, pp. 42000—428.
- [4] Holman, J. P.: *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, Inc. 1978
- [5] Horský, J. - Raudenský, M. - Bendig, L.: Experimental Study of Water Jets Cooling Effect, 11th Int. Congress CHISA 93, Prague.
- [6] Horský, J - Raudenský, M. - Dumeck, V. – Bendig, L.: Experimental Study of Heat Transfer in Process of Cooling by Twin Fluid Nozzle, ICLASS 94, 6th Int. Conf. on Liquid Atomisation and Spray Systems, Rouen 1994, proc. pp. 1055-1061.

- [7] Horský, J. - Raudenský, M. – Sauer, W.: Experimental Study of Cooling Characteristics in Hot Rolling, *J. Mater. Process. Technol.* 45, 1994, pp. 131-135.
- [8] Horský, J. – Raudenský, M.: Vliv tlaku vody na intenzitu ochlazování rotujícího válce při ostříku vodní tryskou (Influence of Water Pressure on Cooling Intensity in Process of Quenching of Rotating Roll by Water Nozzle), *Strojnícky časopis*, 46, 1995, č. 4, str. 223-228.
- [9] Horský, J. – Raudenský, M.: Mathematical Modelling and Experimental Study of Heat Transfer on Roll Cooled by Water Nozzles, 2nd. Int. Conf. Modelling of Metal Rolling Processes, London 1996, Proc. pp. 288-298.
- [10] Horský, J. - Raudenský, M. – Sláma, L.: Chlazení pohybujících se povrchů s vysokými teplotami vodovzdušnými tryskami (Cooling of High Temperature Moving Surfaces by Mist Nozzles), *Conf. Inženýrská mechanika* 96, Svratka, pp. 23-28.
- [11] Horský, J. – Raudenský, M.: Chlazení a tepelné deformace válců (Cooling and Thermal Deformations of Rolls) , 32. konference „Kalibrace válců“, Ostravice, Czech Rep., 1997, proc. pp. 40-45.
- [12] Horský, J. – Raudenský, M.: Dynamic Quenching Tests of Steels and their Evaluation by Inverse Task, Computational Methods and Experimental Measurements VIII, Conf. May 1997, Grece, Computational Mechanics Publication, Southampton, pp. 611-622,
- [13] Horský, J. – Raudenský, M.: Experimental Study of Nozzle Cooling in Continuous Casting, 2nd International Conference Continuous Casting of Billets, Třinec, 1997, proc. pp. 107-116.
- [14] Horský, J. - Kotrbáček, P. – Raudenský, M.: Odpory oceli 19 191 v polotekutém stavu proti vtlačování nástroje (in Czech), 3rd Int. Conf. Akademická Dubnica 97, Slov. Tech. University, Dubnica, Slovakia, 1997, proc. pp. 117-121.
- [15] Horský, J. - Raudenský, M. – Kotrbáček, P.: Experimental Study of Long Product Cooling in Hot Rolling, *Journal of Material Processing Technology* 80-81, (1998), pp. 337-340.
- [16] Horský, J. - Raudenský, M. – Zela, L.: Experimental Study of Heat Transfer with Reference to Numerical Simulations in Hot Rolling, The 7th International Conference on Steel Rolling, Makuhari, Chiba, Japan, proc. published by The Iron and Steel Institute of Japan, pp. 216-220
- [17] Horský, J. - Raudenský, M. - Kotrbáček, P. – Šarler, B.: Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation, *Kovine Zlitine, Tehnologije* 32, 1998, p. 497-502.
- [18] Horský, J. - Raudenský, M. - Kotrbáček, P. – Tseng, A.: Deformation Behavior Of Steels In Mushy State, Symposium on Thermo- Mechanical Processing of Materials, ASME-MED, 2000 – International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE).
- [19] Horský, J. – Raudenský, M.: Experimentální výzkum chlazení válců a provalků při válcování za tepla, vědecko-technická konference Valcovanie plechov za tepla, Vysoké Tatry – Stará Lesná, 9. - 11. října 2000, Slovensko.
- [20] Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, American Society for Testing and Materials 1981.

- [21] Laxmanan, V. – Flemings, M. C.: Deformation of Semi-Solid Sn-15%Pb alloy, *Metalurgical Transactions* 11A, 1980.
- [22] Mueller, H. - Jescher, R.: Heat transfer during water spray cooling of non-ferrous metals, *Z. Metallkunde*, vol.74, No 5, pp. 257-264, 1983.
- [23] Parker, J.: Spray quenching of aluminium plate, Ms. thesis, The University of Alabama, 1992.
- [24] Patankar, S. V.: *Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer*, Innovative Research, Inc. 1991.
- [25] Raudenský, M. – Dumek, V.: Inverzní úloha pro stanovení součinitele přestupu tepla, *Strojnický časopis* 1992.
- [26] Raudenský, M. - Horský, J.: Chlazení horkých povrchů tryskami, *Hutnické listy* 1-2/1991, str. 21-25.
- [27] Raudenský, M. - Horský, J.: Experimental Study of Water Jet Cooling of Hot Steel Surfaces, Fifth Annual Inverse Problems in Engineering Seminar, Michigan State University, Lansing 1992.
- [28] Raudenský, M. - Horský, J.: Thermal model of Rolls and Sheets Improvement by Experimental Study of Cooling, *Journal of Materials Processing Technology*, 34, 1992, pp. 247-253.
- [29] Raudenský, M. - Bendig, L. - Horský, J.: Experimental Study of Heat Transfer in Process of Rolls Cooling in Rolling Mills by Water Jets, *Steel Research* 65, 1994, No 1, pp. 29-35.
- [30] Raudenský, M. – Horský, J. – Tseng, A. – Weng, C.: Heat Transfer Evaluation of Impingement Cooling in Hot Rolling of Shaped Steels, *Int. Congress Manufacturing Science and Engineering* 1994, Chicago.
- [31] Raudenský, M. - Horský, J. – Krejsa, J.: Usage of Neural Network for Coupled Parameter and function Specification of Inverse Heat Conduction Problem, *HTD-Vol. 312*, 1995 National Heat Transfer Conference, Vol. 10, Portland, ASME 1995, pp. 123-131.
- [32] Raudenský, M. – Horský, J. – Krejsa, J. – Tseng, A.: Experimental Study of Heat Transfer on Rotating Roll Cooled by Water Nozzles, *Symposium on Transport Phenomena and Dynamic of Rotating Machinery*, Honolulu, 1996
- [33] Raudenský, M. – Horský, J.: Experimental Study of Thermal Processes in Hydraulic Descaling, 3rd International Conference on Hydraulic Descaling, 14 –15 September 2000, The Society of Chemical Industry, London, UK
- [34] Šarler, B. – Filipič, B. – Raudenský, M. – Horský, J.: An interdisciplinary approach towards optimum continuous casting of steel, *Materials Processing in the Computer Age III*, TMS, Warrendale, 2000, pp. 27 – 36.
- [35] Truillo, D. M. – Busby, H. R.: *Practical Inverse Analysis in Engineering*, CRC Press LLC, New York 1997.
- [36] Woodbury, K.: Determination of surface heat fluxes during spray quenching of aluminium using an inverse technique, Paper WA-HT-91-12, ASME, 1991.

Abstract

Experimental analysis of boundary conditions for cooling and hot metal forming numerical models

This thesis for habilitation presents several-year research activities of the author in the field of heat transfer, and their industrial applications in metallurgy and metal rolling.

The research was aimed at creating an appropriate methodology and its practical utilization at significant transfer feature clarification and boundary condition setting during roll-mill roll cooling, product cooling at hot rolling, descaling, secondary cooling at continuous casting, and during steel forming at mushy state.

The experiments' output are expressed mathematically through functions which define the boundary conditions of the above-mentioned states in a form suitable for numerical models.

All data necessary for calculations were obtained from laboratory experiments, and sometimes directly from industry. The experimental stands were developed to simulate the industrial processes and to enable the analysis of different factor impact on these processes. Thus, for example, the influence of cooling velocity was revealed as a significant factor during hot surface nozzle cooling. That is why experimental stands were designed in such a way to enable the movement of the tested sample at velocities common in real industrial processes.

The quality of results is significantly impacted by the applied method of temperature measurement of the particular object of experiment. All data obtained from measurements are in a digital form and can be further processed in several steps. A very exact inverse task calculation is necessary to set the boundary conditions of heat transfer. At the next step data are transformed into numerical models through further computer calculations. This procedure is strongly influenced by the input data quality. Boundary conditions are specified either in the form of data files or as coefficient values of interpolation functions. Both are stored in boundary conditions database.

Software systems CoolRoll and Cooling, which were developed during the research, are utilize data from boundary conditions database.

There are examples of recent projects presented in the thesis. These were projects made to the order from industrial partners. The results of the projects have been successfully applied in industry with positive results.

Vast majority of scientific projects run by the author were carried out with the active involvement and participation of both regular and postgrad students. The experimental stands in the lab are also available for students' projects. There have been several regular students' theses submitted from the field of mushy state forming. Postgrad students from the department participate at running experiments as well as at data evaluation and computer program development.