

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 616*

*ISSN 1213-418X*

**Petr Kotrbáček**

**OPTIMALIZACE TEPELNÝCH PROCESŮ  
NA ZÁKLADĚ  
EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÝCH  
OKRAJOVÝCH PODMÍNEK**

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta strojního inženýrství**

**Laboratoř přenosu tepla a proudění**

**Ing. Petr Kotrbáček, Ph.D.**

**OPTIMALIZACE TEPELNÝCH PROCESŮ  
NA ZÁKLADĚ EXPERIMENTÁLNĚ  
STANOVENÝCH OKRAJOVÝCH PODMÍNEK**

**OPTIMIZATION OF THERMAL PROCESSES BASED  
ON EXPERIMENTALLY DETERMINED BOUNDARY CONDITIONS**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
V OBORU  
APLIKOVANÁ MECHANIKA**



**BRNO 2018**

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Experiment, přenos tepla, okrajové podmínky, kontinuální lití, válcování, válec, balicita, chlazení, tryska, tváření, kov, polotekutý stav, in-line tepelné zpracování, kolejnice

## **KEYWORDS**

Experiment, heat transfer, boundary conditions, continuous casting, rolling, roll, balicity, cooling, nozzle, forming, metal, mushy state, in-line heat treatment, rails

## **MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE:**

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Petr Kotrbáček, 2018

ISBN 978-80-214-5686-0

ISSN 1213-418X

# OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
ÚVOD .....	5
1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI OCELI V POLOTEKUTÉM STAVU.....	7
1.1 Motivace výzkumu oceli v polotekutém stavu .....	7
1.2 Experimentální plán .....	8
1.3 Popis experimentálního zařízení .....	9
1.4 Metody zkoušení oceli v polotekutém stavu.....	10
1.4.1 Vtlačovací zkouška .....	10
1.4.2 Zkouška s charakterem zpětného protlačování.....	13
1.4.3 Pěchovací zkouška .....	13
1.5 Zevšeobecnění výsledků .....	17
1.6 Závěr .....	18
2 CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ VÁLCOVACÍCH STOLIC .....	20
2.1 Experimentální zařízení .....	21
2.1.1 Postup experimentu.....	21
2.1.2 Zařízení pro provozní měření teplotního profilu válců.....	21
2.2 Publikace – výzkum chlazení rotujících povrchů .....	22
3 IN-LINE TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ .....	23
3.1 Teorie in-line tepelného zpracování.....	23
3.2 Postup při navrhování in-line chladicích sekcí .....	24
3.3 Návrh zařízení na řízené dochlazení kolejnic .....	24
3.3.1 Stacionární testy.....	25
3.3.2 Testy chlazení kolejnic za pohybu.....	28
3.3.3 Návrh poloprovozního zařízení.....	30
3.4 Publikace – tepelné zpracování.....	34
4 ZÁVĚR.....	34
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY – POLOTEKUTÝ STAV OCELI .....	36
6 AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S HABILITAČNÍ PRACÍ.....	36
6.1 Materiálové vlastnosti oceli v polotekutém stavu.....	36
6.2 Chlazení pracovních válců válcovacích stolic .....	38
6.3 In-line tepelné zpracování .....	39
ABSTRACT .....	40

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

V roce 1997 autor absolvoval strojní fakultu VUT v Brně v oboru Materiálové inženýrství. Poté nastoupil doktorandské studium na Leteckém ústavu. V roce 2004 obhájil disertační práci s názvem „Experimentální výzkum a matematické modelování tváření ocelí v polotekutém stavu“.



Od 2001 je zaměstnán v Laboratoři proudění a přenosu tepla Leteckého ústavu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně jako Vědecký pracovník se zaměřením na výpočtové a vyhodnocovací práce včetně experimentální činnosti v oblastech: měření přestupu tepla na pohybujících se površích, hydraulické odstraňování okují, in-line tepelné zpracování, řešení problematiky přenosu tepla v hutnictví, ocelářství a při zpracování kovů za tepla.

Laboratoř přenosu tepla a proudění je více než 20 let zaměřena na aplikovaný výzkum v oblasti hutnictví a strojírenství. Řeší se zde hlavně projekty orientované na návrh a optimalizaci chladicích systémů při plynulém odlévání oceli, válcování a tepelném zpracování. Laboratoř vyvinula metodiku stanovení okrajových podmínek přenosu tepla založenou na experimentu a následném vyhodnocení inverzní úlohou. Znalost okrajových podmínek umožňuje jejich využití v numerických modelech.

Od roku 1997 se autor podílel na 2 kapitolách v knihách a 66 publikací z toho 17 článků uvedených v databázi SCOPUS. H index autora je 4, (62 citací dle SCOPUS). Autor nebo spoluautor: 4 patentů (užitných vzorů), 5 prototypů, 22 funkčních vzorků, 5 ověřených technologií, 1 software. Zapojil se do řešení řady zahraničních i domácích grantů. Mezi nejvýznamnější patří projekty GAČR č. 106/01/0188: Experimentální studium materiálových charakteristik při tváření oceli v polotekutém stavu, COST 526.20 – Apomat: Optimalizace parametrů při tváření kovů v polotekutém stavu, TAČR Vysoce účinné a energeticky úsporné chladicí systémy pro chlazení profilových válců. V současné době je odpovědným řešitelem projektu Aplikace - Progresivní vysokotlaké hydraulické systémy pro těžký průmysl.

Mezi nejvýznamnější partnery, pro které byly řešeny výzkumné a technické úkoly patří firmy LECHLER (SNR), Primetals (AT), DANIELI (IT), ArcelorMittal Ostrava, Trinecké železářny a.s., Železiarne Podbrezová a.s. (SVK), SIEMENS AG (SRN), US Steel Košice (SVK), ACRONI Jesenice (SVN), POSCO (KOR), USIMINAS (BRA), Voestalpine Stahl GmbH (AT), AMAG (AT).

## ÚVOD

Habilitační práce se zabývá výzkumem, jehož cílem je stanovení okrajových podmínek pro numerické modely využitelné k optimalizaci vybraných dějů v oblasti hutnictví. Pro splnění těchto cílů byl vytvořen postup, kdy vstupní informace jsou získávány na základě experimentů, poté je provedeno zpracování experimentálně získaných dat a jsou vytvořeny funkce, které vhodným způsobem popisují okrajové podmínky. Znalost reálných okrajových podmínek umožňuje určení přestupu tepla mezi horkým povrchem a chladicím médiem a tím umožňuje i následnou optimalizaci chladicích a kalicích sekcí. V provozních podmínkách oceláren je velmi komplikované a často nemožné určit okrajové podmínky chlazení přímo na tratích. Proto je nutné navrhnout a realizovat laboratorní měření, které co nejvěrněji simuluje reálné podmínky v provozu. K tomuto účelu jsou využívány unikátní laboratorní zařízení využitelné pro simulaci chlazení v ocelárnách a válcovnách, simulaci tepelného zpracování, hydraulického odstraňování okují a tváření kovů v polotekutém stavu. V práci jsou popsány laboratorní měření a postupy, které lze využít při návrzích nových chladicích a kalicích sekcí. Jsou zde uvedeny příklady optimalizace chlazení pracovních válců válcoven a postup při návrhu in-line tepelného zpracování kovů.

Tváření oceli v polotekutém stavu svým charakterem odpovídá oblasti základního výzkumu a ukazuje výzkum chování ocelových materiálů v polotekutém stavu (kapitola 1). Další dvě ukázky se týkají metodiky výzkumu a vývoje chladicích zařízení od návrhu metodiky až po realizaci v hutních provozech. Zde je jeden případ věnován chlazení hutních válců při válcování oceli za tepla a druhý případ vývoji chladicích sekcí pro tepelné zpracování kovů (kapitola 2 a 3). Výběr oblastí výzkumu, které budou v předkládané habilitační práci popsány, je tedy následující:

- Tváření oceli v polotekutém stavu (kapitola 1)
- Chlazení válců válcovacích stolic (kapitola 2)
- In-line tepelné zpracování (kapitola 3)

Významnou oblastí ocelářského průmyslu, skýtající značný prostor pro optimalizaci chlazení a značné energetické úspory, jsou provozy válcoven tlustých plechů. Dříve byla při návrzích chlazení válců těchto válcoven využívána buď strategie vysokých průtoků, kdy mělo být dosaženo dobrých chladicích účinků zalitím válců vodou, nebo strategie vysokých tlaků, které měly, bez ohledu na energetickou náročnost chladicích systémů, prodloužit životnost válců. Tento postup je však velmi nevhodný a často kontraproduktivní. Silná vrstva vody a vysoká energie vody odražené od chlazeného povrchu brání dynamickému působení vodních paprsků z trysek, a tím i intenzivnímu chlazení. Současně je velmi problematická i regulace takového systému. Zdálo se, že v této oblasti nelze již nic zásadního změnit, což byla i strategie výrobců zařízení a dodavatelů trysek. Moderní výzkumné metody vyvinuté a úspěšně používané v Laboratoři přenosu tepla a proudění však prokázaly, že existuje značný prostor na zlepšení současného stavu. Návrhy nových chladicích systémů válců jsou založeny na optimalizaci procesu. To znamená dosáhnout co nejvhodnější chladicí charakteristiky při minimální energetické náročnosti. Při návrhu nového chlazení se využívá propojení výpočtů teplotního zatížení válců s laboratorním měřením chladicích účinků různých typů a konfigurací vodních trysek. Údaje o přenosu tepla jsou nezbytné pro navrhování a řízení chladicích sekcí. Laboratorní měření je využito ke zjištění průběhu teplot během chlazení. Tyto teploty slouží jako vstupní parametry pro výpočet realistických hodnot

součinitele přestupu tepla, který odpovídá intenzitě chlazení. Celý postup umožňuje optimalizaci i velmi složitých chladicích sekcí. Nasazení optimalizovaných chladicích systémů pak přináší značné úspory z pohledu prodloužení životnosti válců, zvýšení kvality a užitných vlastností provalků a snížení spotřeby chladicí vody o 25 – 80 %. To představuje značné úspory energie, počtu trysek a času nutného na údržbu chladicích systémů.

Další oblastí umožňující dosažení významných energetických úspor je řízené tepelné zpracování. Důraz je kladen na dosažení definované mikrostruktury výrobků, a tím dosažení lepších mechanických vlastností bez nutnosti úpravy chemického složení, tedy bez nutnosti použití drahých legujících prvků. Podstatnou výhodou in-line tepelného zpracování je úspora reohřevu materiálu, kdy je materiál tepelně zpracováván bezprostředně po vyválcování. Speciální experimentální zařízení postavené v Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně, umožňuje nastavování různých režimů chlazení a následné vyhodnocení vlivu těchto režimů na finální strukturu chlazených vzorků. Geometrie chlazení, průběhy teplot a výsledná struktura jsou v jednotlivých krocích optimalizovány. Tento postup se dá s výhodou využít pro výzkum a návrhy tepelného zpracování drátů, profilů, kolejnic a trubek. Tepelně zpracované trubky se například používají v petrochemickém průmyslu, kde je kladen důraz na vysokou pevnost. U tepelně zpracovaných kolejnic je nutné dodržet přísné normy na homogenitu vnitřní struktury materiálu bez fázových a výrazných pevnostních změn. Pro získání požadovaných mechanických vlastností finálního produktu je vždy nezbytné nalézt vhodný chladicí režim. Tento režim se liší v závislosti na typu materiálu a podmínkách výroby. Intenzita chlazení je funkcí několika parametrů, jako je typ trysky, teplota povrchu chlazeného materiálu, průtok a tlak vody, teplota vody, struktura povrchu a rychlost pohybu chlazeného materiálu. Dosud není k dispozici žádná funkce pro predikci chladicí intenzity, která by zahrnovala všechny uvedené parametry. Experimentální měření je tedy jediným způsobem, jak přesně stanovit intenzitu sprchového chlazení a nalézt vhodný chladicí režim. Změřená podpovrchová teplota je použita jako vstup pro inverzní úlohu vedení tepla, jejímž výstupem je časově závislá povrchová teplota a součinitel přestupu tepla. Tyto výstupy lze použít pro návrh optimalizovaného in-line tepelného zpracování umožňujícího významné zvýšení tvrdosti i u materiálu s velmi nízkým obsahem legujících prvků. Uvedená metodika byla například použita pro návrh in-line tepelného zpracování ocelových profilů, jako jsou kolejnice, H-profilu a trubky. Metodika vývoje kalicích sekcí zahrnuje laboratorní měření, numerické modelování a v poslední fázi také realizaci poloprovozních a provozních testů. Tato metodika minimalizuje množství drahých provozních experimentů a minimalizuje možné konstrukční chyby. Příkladem úspěšných realizací je návrh tepelného zpracování trubek pro Třinecké železářny a.s. a návrh tepelného zpracování H-profilu pro firmu Primetals Technologies Itálie. Z oblasti válcoven tlustých plechů lze uvést optimalizaci a rekonstrukci chlazení válců pro firmu voestalpine AG, Linz, Rakousko a U. S. Steel Košice.



# 1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI OCELI V POLOTEKUTÉM STAVU

Tato část habilitační práce je věnována experimentálnímu studiu deformačních vlastností ocelí a má charakter základního výzkumu. Motivací pro výzkum byl nedostatek materiálových dat potřebných pro numerické modely popisující deformační chování oceli při vysokých teplotách, kdy je struktura materiálu tvořena zčásti tuhou a zčásti kapalnou fází. Data podobného druhu byla známa a publikována pro slitiny hliníku a slitiny dalších kovů, které se dostávají do polotekutého stavu při relativně nízkých teplotách. V případě oceli se však jedná o teploty dvakrát až třikrát vyšší a z toho pramení i vysoká náročnost přípravy a provedení laboratorních měření. Autor habilitační práce navrhl metodiku měření a realizoval rozsáhlou skupinu měření. Experimentálně zjištěné charakteristiky byly dále studovány a zevšeobecnovány ve spolupráci s Ústavem mechaniky těles FSI VUT a s profesorem A. A. Tsengem z Arizona State University. Výsledky byly autorem publikovány v sedmi zahraničních publikacích.

## 1.1 MOTIVACE VÝZKUMU OCELI V POLOTEKUTÉM STAVU

První práce týkající se tváření materiálu v polotekutém stavu byly zveřejněny v 70. letech Flemingem a jeho spolupracovníky z Massachusetts Institute of Technology [1]. Danou problematikou se také zabývali Kiuchi a Sugizama z University of Tokio [2], dále Kattamis a Piccone [3] a Worster [4]. Ve svých pracích se uvedení autoři soustředili na stanovení materiálových charakteristik kovů s nízkou teplotou tání, jako jsou hliník, hořčík, cín, olovo a jejich slitiny. Experimenty byly založeny na měření viskozity pomocí Couettova viskozimetru [5]. Neočekávaným výsledkem byla vysoká citlivost viskozity na změnu rychlosti deformace. Materiály v polotekutém stavu do jisté rychlosti deformace dynamicky zpevňují a při jejím překročení naopak dynamicky změkčují. To v praxi znamená, že se vzrůstající rychlostí přetvoření výrobku klesá energetická náročnost na jeho výrobu [6].

Další práce, studující chování kovu v polotekutém stavu, byly motivovány především klasickými postupy tváření jako protlačování a kování. Jedním z prvních autorů popisujících zpracování kovu v polotekutém stavu je Kiuchi (1993) [7]. V experimentech zaměřených na protlačování hliníkové slitiny (Al-7075) autor popisuje chování materiálu a výslednou strukturu po jeho tváření.

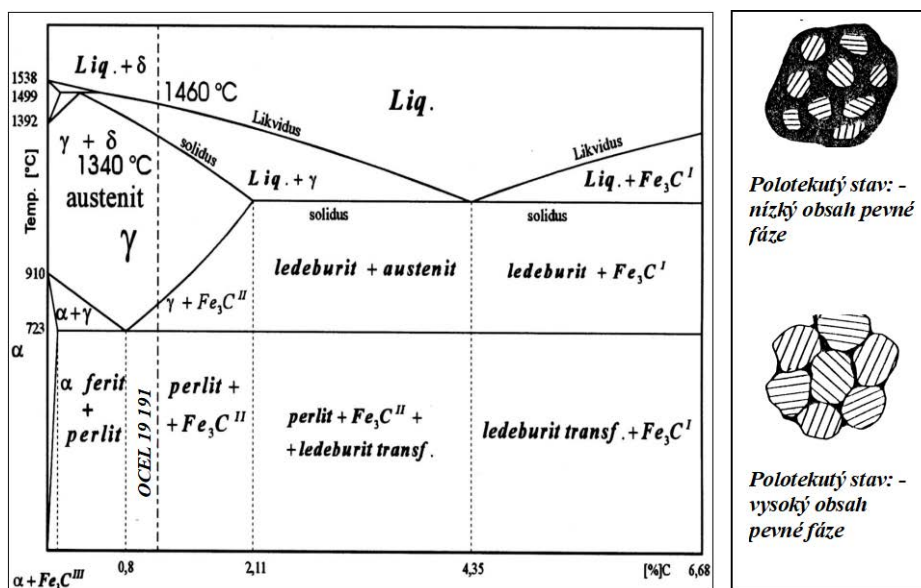
Publikované práce, zabývající se problematikou tváření ocelí v polotekutém stavu, jsou většinou zaměřeny na studium chování ocelí při jednom úzce specializovaném testu. Příkladem toho je práce publikovaná týmem Secordel P. a kol. [6], která popisuje experiment protlačování uhlíkové a rychlořezné oceli. Krystalizační pásmo uhlíkové oceli bylo velmi široké (přibližně 150 °C). Experimentální teplota se pohybovala okolo 1400 °C, čemuž odpovídalo 40-ti procentní zastoupení tekuté fáze. Druhým materiálem použitým v uvedené práci byla rychlořezná ocel. Z ní byly kování vyrobeny zkušební tyče o průměru 35 mm. Teplota použitá v tomto experimentu byla 1320 °C, což odpovídá obsahu tekuté fáze 17 %. U obou materiálů autoři sledovali vliv mikrostruktury a vliv velikosti zrn na chování materiálu. Konstatovali, že velikost zrna jednoznačně ovlivňuje tvářecí proces. Pro jemnější dendritický typ pojmenovali tok polotekutého materiálu při protlačování jako „compaction flow“. V případě dendritických i globulárních zrn



pojmenovali proudění „semi - solid heterogenous flow“. Tyto rozdílné druhy proudění byly významně závislé na dvou parametrech. Na rychlosti protlačování a na velikosti redukce průřezu. Kompaktní proudění nastávalo při nízkých protlačovacích rychlostech nebo za vysokého redukčního poměru. Polotekuté heterogenní proudění bylo pozorováno vždy při vysokých rychlostech protlačování. Překvapivé výsledky, byť získané jen pro dva experimentální případy, byly jednou z motivací pro studium popisované v této habilitační práci. Využití získaných materiálových dat popisujících chování oceli v polotekutém stavu, lze využít pro technologie přímé redukce tloušťky bramb při kontinuálním lití ocelí.

## 1.2 EXPERIMENTÁLNÍ PLÁN

Chování materiálů v polotekutém stavu je ovlivněno řadou veličin. Bylo třeba provést vysoký počet experimentů, které prokázaly vliv jednotlivých parametrů. Pozornost byla zaměřena na objasnění vlivu rychlosti zatěžování a zjištění vlivu teploty (tedy určitého poměru tuhé a kapalné fáze) na odpor oceli v polotekutém stavu. Výsledkem každého měření byly údaje o průběhu sil vznikajících při zatěžování oceli v polotekutém stavu a to pro různé kombinace teplot i rychlosti zatěžování. Dalšími parametry ovlivňující síly potřebné na deformaci materiálu v polotekutém stavu jsou: geometrie nástroje, chemické složení daného materiálu a vliv jeho mikrostruktury.



**Obr. 1** Metastabilní binární diagram Fe-C. Struktury materiálu s různým objemovým podílem tuhé a kapalné složky.

Tak, jak se mění vzájemný poměr tekuté a pevné fáze (Obr. 1), mění se reologie materiálu, a tím i fyzikální zákonitosti, které ho popisují. Chování kovů je možné popsat různými matematicko-fyzikálními vztahy. Rovnice popisující chování materiálů v polotekutém stavu má několik neznámých parametrů, které je třeba identifikovat. Proto byl navržen experimentální program, jehož cílem bylo ověřit vliv následujících faktorů:

- vliv teploty (poměru tuhé a kapalně fáze) na síly potřebné k deformaci oceli v polotekutém stavu,
- vliv rychlosti zatěžování na síly potřebné k deformaci oceli v polotekutém stavu.

Experimenty byly prováděny pro sérii konstantních teplot v oblasti mezi teplotou solidu a teplotou likvidu. Výsledkem každého měření bylo určení závislosti síly  $F$  na poloze nástroje  $x$  při konstantní teplotě  $T$  a rychlosti zatěžování  $v$ :

$$F = f(x); v, T = \text{konst.} \quad (1)$$

Série měření se opakovala při různých teplotách polotekuté oceli a při různých rychlostech zatěžování tohoto vzorku.

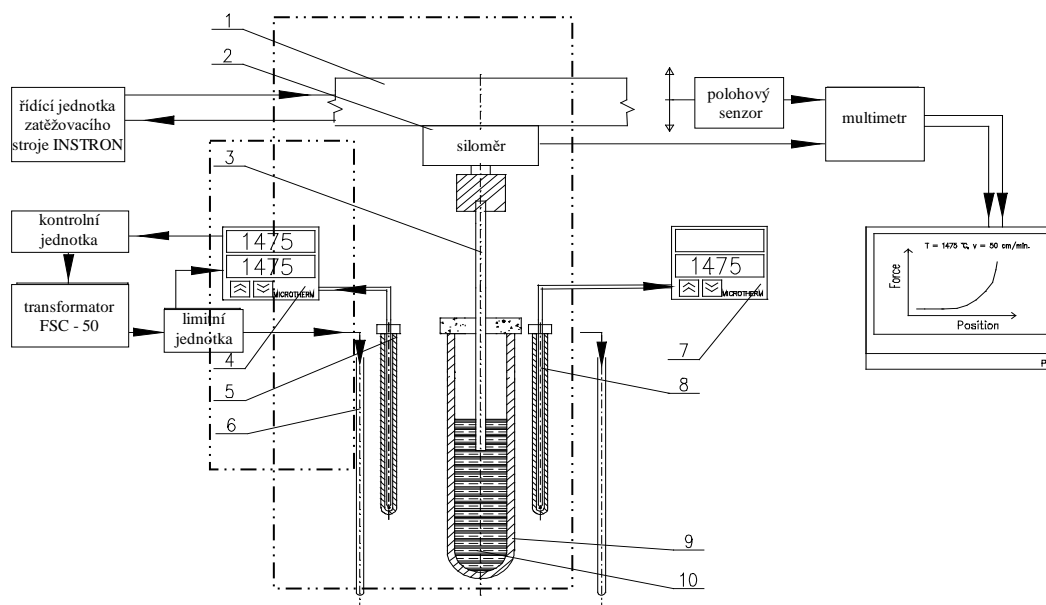
Pro studium vztahu parametrů byly navrženy dvě základní experimentální metody. První metoda - vtlačování tenkého nástroje do oceli v polotekutém stavu („Needle test“), byla dobře použitelná při vyšších teplotách (vyšším zastoupení tekuté fáze ve vzorku). Při použití dostatečně tenkého nástroje lze touto metodou simulovat proces vtlačování do poloprostoru. Při použití nástroje s větším průměrem proces simuluje zpětné protlačování. U zmiňovaných zkoušek hrozí porušení nástroje v důsledku zvětšujícího se podílu tuhé fáze, kdy rychle vzrůstá namáhání nástroje. Z tohoto důvodu byla použita druhá metoda - pēchování válečku za vysokých teplot („Hot upsetting test“). Pēchovací zkouška byla naopak limitována teplotou, při které dosáhne obsah tekuté fáze takové hodnoty, že zkušební váleček není schopen udržet si původní tvar a vlivem gravitace se zhroutl. Použití obou metod umožňuje studium chování oceli v celém teplotním pásmu mezi křivkou likvidu a solidu.

### 1.3 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

Určování odporů oceli při tváření v polotekutém stavu je experimentálně náročná činnost a dá se provádět pouze na speciálním zařízení. Technicky se jedná o přesné měření tahových či tlakových sil při pohybu tvářecího nástroje zvolenou rychlostí, přičemž zatěžovaný vzorek je ohřát na teplotu odpovídající polotekutému stavu kovu. Základ zařízení tvořil zatěžovací stroj INSTRON, který byl upraven a vybaven dalšími komponenty umožňujícími zatěžování natavené oceli. Pro přesné měření polohy příčnicku byl nainstalován opto-elektronický snímač. Do příčnicku byl uchycen tenzometrický siloměr. Signály ze snímače polohy a siloměru byly současně snímány měřicí ústřednou. Uvedený systém umožňoval současný přenos obou údajů do počítače. Detaily zobrazující systém řízení a záznamu dat jsou schematicky zobrazeny na Obr. 2.

Do zatěžovacího rámu byla, speciálně pro tyto účely vyvinuta pec sloužící k ohřátí vzorku. Skládá se ze dvou částí. V dolní části byl otvor umožňující zavážení vzorků, v horní části průchod pro nástroj, výkonové, měřicí a regulační obvody. K izolaci pece byla použita vláknitá keramická vata s maximální provozní teplotou 1600 °C. Vzhledem k požadovaným teplotám bylo nutno použít topné elementy z materiálu SUPERKANTHAL. Šest odporových topných článků bylo napájeno z transformátoru přes tyristorovou regulační jednotku ovládanou programovatelným regulátorem. Teplota v peci byla snímána pomocí dvou termočlánků. Jeden termočlánek se nacházel blízko odporových topných spirál a byl zapojen do řídicího programovatelného regulátoru. Druhý termočlánek byl umístěn v těsné blízkosti ocelového vzorku. Ten se nacházel

v ose pece na bloku ze žarobetonu. Žáruvzdornou keramiku uvnitř pece bylo možné měnit podle zvoleného testu. Sloužila k manipulaci se vzorkem a k jeho zatěžování.



**Obr. 2** Schéma experimentu:

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1) příčnick zatěž. stroje INSTRON,   | 6) odporové topné spirály ( $MoSi_2$ ),            |
| 2) siloměr HOTTINGER,                | 7) kontrolní regulátor,                            |
| 3) nástroj $Al_2O_3$ ,               | 8) kontrolní termočlánek v těsné blízkosti vzorku, |
| 4) řídicí programovatelný regulátor, | 9) uzavřená keramická U-trubice $Al_2O_3$ ,        |
| 5) řídicí termočlánek Pt-PtRh13,     | 10) vzorek.  |

## 1.4 METODY ZKOUŠENÍ OCELI V POLOTEKUTÉM STAVU

### 1.4.1 Vtlačovací zkouška

Principem této zkoušky bylo vtlačování tenkého nástroje do materiálu v polotekutém stavu. Při poměru vnitřního průměru kelímku  $Do$  k průměru nástroje  $d$  větším jak 5, se proces tváření přibližuje vtlačování do poloprostoru. Při volném vtlačování je okolní povrch tělesa volný a výchozí polotovar se přetváří tím víc, čím je poměr  $Do/d$  menší. Při tomto volném vtlačování je v plastickém stavu jen část kovu pod průtláčnickem v tzv. ohnisku přetvoření, které zasahuje do hloubky až  $1/6 d$  [9]. Posuv nástroje směrem do nataveného kovu byl 50 mm.

#### **Postup měření při vtlačovací zkoušce:**

- vzorek byl umístěn do pece a ohřát na teplotu odpovídající roztavenému stavu kovu,
- teplota v peci byla snížena na požadovanou teplotu experimentu a byla homogenizována třicetiminutovou výdrží na teplotě,

- do vzorku byl vtlačován nástroj zvolenou rychlostí a byly snímány údaje o poloze nástroje a síle působící na nástroj. Uvedený systém snímání síly a polohy umožňoval současný přenos obou údajů do počítače,
- po ukončení zatěžování a zastavení nástroje v konečné poloze bylo měřeno odpevnění vzorku,
- poté byl pohyb reverzován a nástroj byl přesunut do výchozí polohy,
- vzorek byl opět ohřát na teplotu odpovídající roztavenému kovu a měření se opakovalo pro jiné teploty materiálu, nebo pro jiné rychlosti zatěžování.

Série experimentů vtlačovací zkoušky začínala při teplotě 10 °C pod křivkou likvidu. Teplota pak byla postupně snižována po 10 °C až do mezních hodnot namáhání nástroje. Z tohoto omezení vyplýval možný teplotní interval experimentu od 1450 °C (což odpovídalo 10 % tuhé fáze) do 1410 °C (což odpovídalo 64 % tuhé fáze), Tab. 1. Procentuální podíly tuhých fází byly odečteny z diagramu Fe-C a byly ověřeny pomocí programu DICTRA. Nad teplotou 1450 °C byly odpory roztaveného kovu na hranici citlivosti měření, při teplotách nižších než 1410 °C hrozilo nebezpečí porušení tenkého nástroje. Hodnoty sil byly měřeny pro tři rychlosti posuvu nástroje 5, 20 a 50 cm/min. Příklad výsledků je znázorněn na Obr. 3.

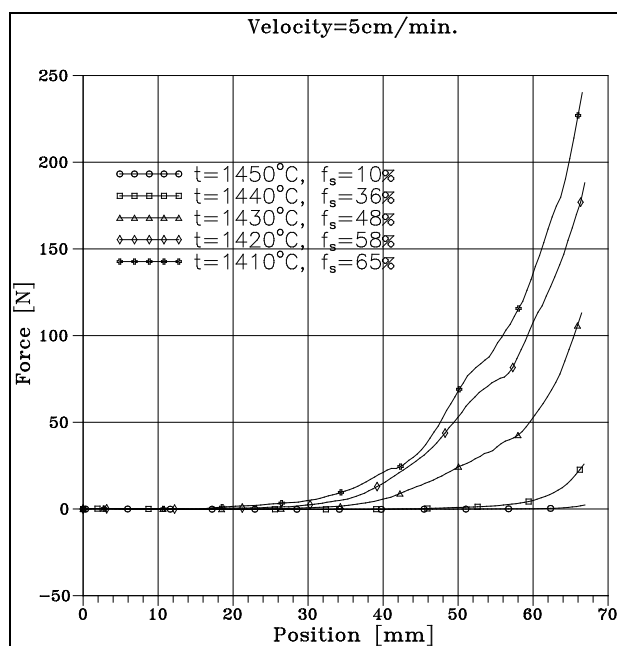
**Tab. 1** Tabulka experimentálních teplot použitých při vtlačovací zkoušce a tomu odpovídající obsahy tuhé fáze ve vzorku.

Teplota [°C]	Obsah solidu [%]
1460 °C	Likvidus
1450 °C	10 %
1440 °C	36 %
1430 °C	48 %
1420 °C	58 %
1410 °C	65 %
1340 °C	Solidus

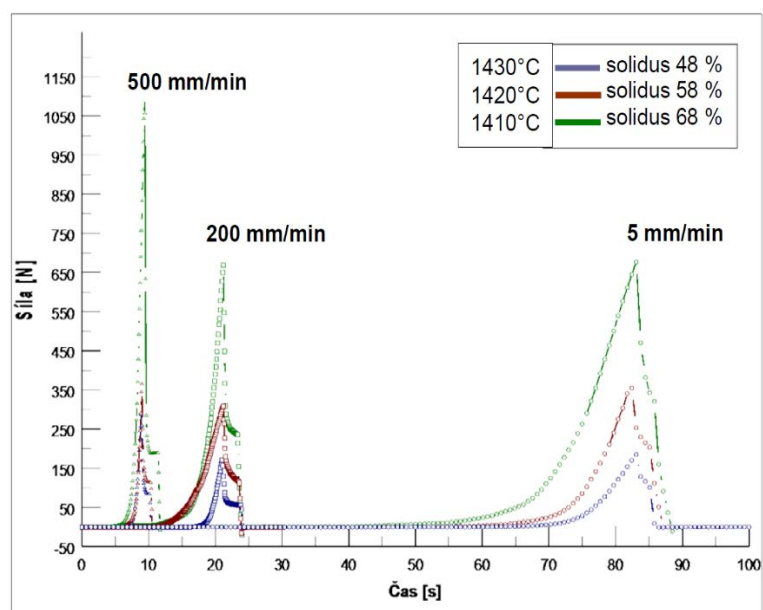
### **Výsledky měření:**

Z naměřených grafů bylo patrné, že odpor oceli proti vtlačení tenkého nástroje roste s klesající teplotou a po překročení určitého podílu tuhé fáze ve vzorku také se vzrůstající rychlostí. Přitom výraznější změny v průběhu sil byly zjištěny při změnách teploty.

Vliv rychlosti zatěžování na průběh sil na nástroji je patrný z grafu tří rychlosti zatěžování, kde je vynesena závislost síly na čase Obr. 4. Průměr nástroje byl 5 mm. Vliv rychlosti byl sledován pro teploty 1440 °C, 1430 °C, 1420 °C. Na těchto závislostech vidíme, že při podílu tuhé fáze do 58 % není vliv rychlosti tak výrazný jako vliv teploty. Na zmíněném grafu lze také pozorovat odpevnění materiálu po skončení zatěžování. Tento efekt byl také dobře měřitelný u pýchovací zkoušky, která bude popsána dále. Z grafu vyplývá, že síla, na kterou materiál v polotekutém stavu relaxuje, je závislá na teplotě (tedy na poměru pevné a tekuté fáze). Není závislá na historii zatěžování. Tohoto jevu bylo využito při sestavování matematického modelu.



**Obr. 3** Vtlačovací zkouška. Graf závislosti sil na poloze nástroje pro různé teploty. Rychlost zatěžování 5 cm/min.



**Obr. 4** Vtlačovací zkouška. Závislost síla-čas: průměr nástroje 5 mm, rychlosti zatěžování 5; 20 a 50 cm/min. Teploty 1430°C ~ 48 % solidu, 1420°C ~ 58 % solidu a 1410°C ~ 65 % solidu.

Po zhodnocení všech experimentů bylo možné konstatovat, že charakter průběhu sil u jednotlivých závislostí je totožný pro všechna měření, tedy všechny teploty měření a rychlosti zatěžování. Grafy závislosti síla – poloha můžeme rozdělit na několik charakteristických úseků. V prvním úseku se může projevit zapnutí zatěžovacího stroje a malé kolísání síly při posuvu nástroje k povrchu vzorku. Zde dochází k naměření velice malých sil - asi 0,2 N. Další úsek je charakteristický pozvolným nárůstem síly projevujícím se po kontaktu nástroje s povrchem

vzorku. Síla v dalším průběhu testu neustále roste a v posledním úseku je její nárůst velmi prudký. Zde pak síla dosahuje svého maxima.

Z literatury je znám efekt dynamického změkčování materiálů v polotekutém stavu [6]. Materiál do jisté úrovně rychlosti deformace dynamicky zpevňuje a po překročení této meze naopak dynamicky změkčuje. Podobné chování materiálu je možné sledovat i na při teplotách 1420 °C, 1430 °C a 1440 °C. Experimentálně bylo potvrzeno chování materiálu, kdy síly potřebné na vtlačení nástroje do polotekutého kovu pro rychlosti 5 a 20 cm/min byly téměř shodné, zatím co síly naměřené pro rychlost zatěžování 50 cm/min byly pro stejné teploty menší.

#### 1.4.2 Zkouška s charakterem zpětného protlačování

Princip zkoušky byl stejný jako při vtlačování tenkého nástroje. Liší se pouze průměr použitého nástroje, který byl 10,25 mm. Poměr průměru kelímku ( $D_0 = 27$  mm) k průměru nástroje byl tedy  $D_0/d < 5$ . Z toho vyplývá, že se proces přetváření přibližuje svým charakterem zpětnému protlačování. [8] Posuv nástroje byl 50 mm. Délka dráhy nástroje v natavené oceli byla větší o objem materiálu, který byl vytlačen nástrojem. To v tomto případě činilo 8,3 mm. V takto uspořádaném testu byly proměřeny závislosti pro dvě rychlosti zatěžování 5 a 50 cm/min. a tři teploty 1450 °C (10 % solidu), 1440 °C (36 % solidu) a 1430 °C (48 % solidu).

Z grafů na je patrné, že charakter závislostí je shodný se závislostmi získanými při vtlačovacím testu. S klesající teplotou můžeme opět pozorovat nárůst síly s tím rozdílem, že při protlačovací zkoušce byly měřeny vyšší síly při nižších hodnotách solidové fáze ve vzorku. Závislosti síla-poloha se také rychleji posouvaly k vyšším hodnotám sil. Maximální dosažené síly byly vyšší. To je způsobeno zvětšením plochy čela nástroje ze zhruba 2 mm<sup>2</sup> na 20 mm<sup>2</sup>. Pro rychlost 5 cm/min. je nárůst síly působící na nástroj s dvojnásobným průměrem zhruba 100 %. Opět se zde objevuje mezní teplota, resp. mezní poměr tuhé a kapalné fáze, po jehož překročení se začne odpor materiálu se vzrůstající rychlostí výrazně zvyšovat. U vtlačovacích experimentů se překročení této hranice projevovalo při teplotě 1410 °C, tj. při 65 % obsahu tuhé fáze ve vzorku. U nástroje s dvojnásobným průměrem simulujícím zpětné protlačování se tato hranice projevila při teplotě 1430 °C, tj. při 48 % tuhé fáze ve vzorku.

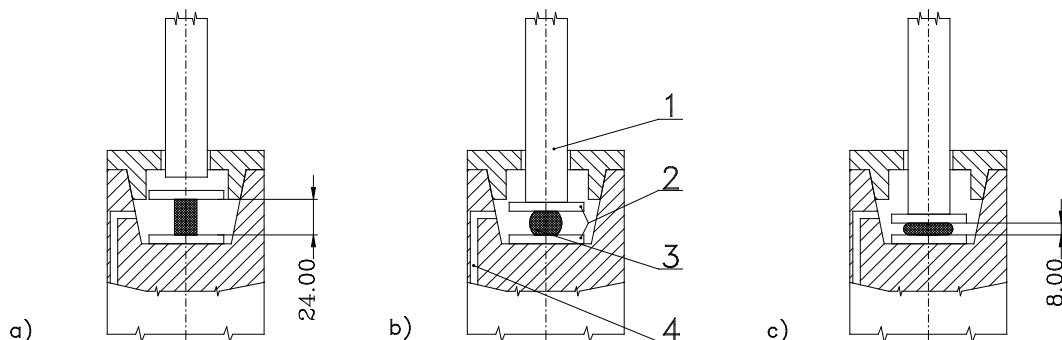
#### 1.4.3 Pěchovací zkouška

Pěchovací zkouška byla použita v teplotním pásmu, ve kterém byl obsah pevné fáze natolik velký, že nebylo možné použít vtlačovací zkoušku, nebo zkoušku zpětného protlačování. Nástroje používané při těchto dvou zkouškách nebyly schopny přenášet zatížení vznikající při zatěžování oceli obsahující více jak 50 - 70 % pevné fáze. Tyto dva typy experimentálních zkoušek na sebe navazují v oblasti, kde je zastoupení likvidu a solidu přibližně 50 %.

Omezením použitelnosti pěchovací zkoušky byl kritický obsah kapalné fáze ve vzorku, při kterém se ocelový váleček hroutlí vlivem gravitace. U použité uhlíkové oceli bylo možné bez rizika ztráty stability nastavovat teplotu odpovídající 40 % kapalné fáze ve vzorku.

Zkušebním vzorkem pro pěchovací zkoušku za vysokých teplot byl ocelový váleček. Průměr válečku byl 15 mm a jeho výška byla 24 mm. Zkušební váleček byl umístěn na korundové destičce s broušeným povrchem. Masivní podpěra pod vzorkem byla vyrobena ze žárobetonu. Ochranná

atmosféra byla přiváděna vedením v žárobetonovém válci přímo ke vzorku oceli. Nástroj byl vyroben také ze žárobetonu a zatěžoval zkušební váleček přes druhou korundovou destičku (Obr. 5 a Obr. 6).



**Obr. 5** Pěchovací zkouška:

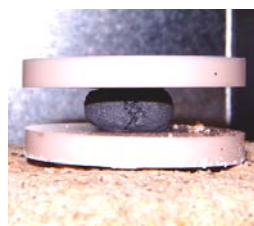
- |                            |  |                           |
|----------------------------|--|---------------------------|
| a) výchozí poloha nástroje | ( $T = \text{konst.}; v = 0$ )             | 1) žárobetonový nástroj   |
| b) pěchování zk. válečku   | ( $T = \text{konst.}; v = \text{konst.}$ ) | 2) keramické destičky     |
| c) konečná poloha nástroje | ( $T = \text{konst.}; v = 0$ )             | 3) zkušební váleček       |
|                            |  | 4) přívod inertního plynu |

**Postup měření při pěchovací zkoušce:**

- zkušební váleček byl umístěn do pece a v inertní atmosféře ohřát na požadovanou teplotu (Obr. 5a),
- byla nastavena rychlost pohybu nástroje a byl spuštěn posuv,
- zkušební váleček byl pěchován zvolenou rychlostí a byly snímány údaje o okamžité poloze nástroje a okamžité síle působící na nástroj,
- vzorek byl zdeformován na 1/3 původní délky a po vypnutí posuvu nástroje bylo měřeno odpevnění zkušebního válečku (Obr. 5b),
- pohyb byl reverzován a nástroj přesunut do výchozí polohy,
- měření bylo opakováno pro jinou pěchovací rychlost nebo jinou teplotu.



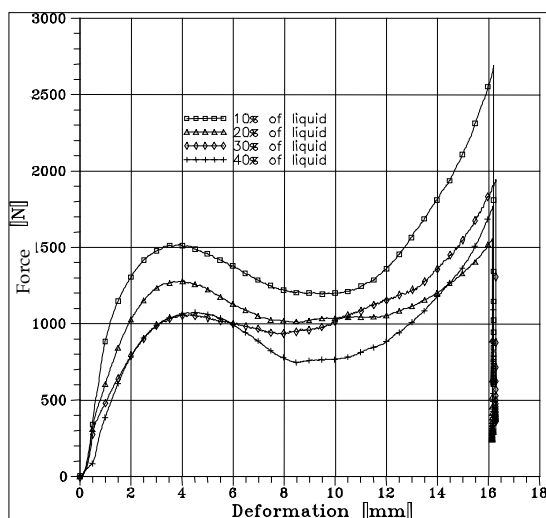
a) Zkušební vzorek mezi korundovými disky.



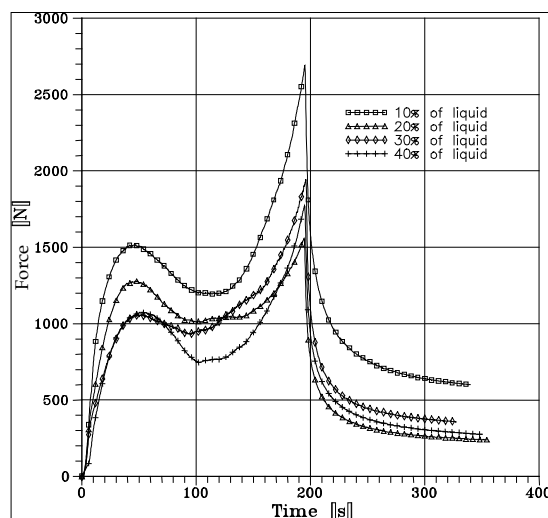
b) Zkušební vzorek po pěchovací zkoušce  $T=1405\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Obr. 6** Foto zkušebního válečku.





**Obr. 7** Graf závislosti pýchovacích sil na poloze nástroje pro různé teploty. Rychlost zatěžování 0,5 cm/min.



**Obr. 8** Graf závislosti pýchovacích sil na čase zatěžování pro různé teploty. Rychlost zatěžování 0,5 cm/min.

### Výsledky měření:

Popsaným způsobem byly provedeny dvě série experimentů. První série experimentů byla zaměřena na objasnění vlivu teploty na pýchovací sílu. Byly provedeny pýchovací testy za různých teplotních podmínek, 1369 °C (10 % likvidu), 1388 °C (20 % likvidu), 1405 °C (30 % likvidu) a 1418 °C (40 % likvidu). Rychlost pýchování byla pro všechna měření v této sérii konstantní a to 0,5 cm/min, viz Tab. 2. Na Obr. 7 je vynesena závislost pýchovací síly na poloze nástroje. Křivku můžeme rozdělit do několika charakteristických úseků. V první fázi, tedy ihned po kontaktu nástroje s ocelovým válečkem, síla rychle narůstá. Poté se rychlost nárůstu síly snižuje a postupně se dostáváme do další fáze, ve které síla, i přes pokračující deformaci, klesá. Tento výrazný pokles síly se projevuje při všech teplotách měření. Je to charakteristický jev, který je způsoben vznikem a šířením trhlin v zatěžovaném materiálu. To potvrzuje i tvar vzorku po zkoušce, kdy hlavně při vysokých teplotách experimentu, je porušení vzorku dobře patrné viz Obr. 9. Podle teorie křehkého lomu za vysokých teplot, dochází při teplotách blízkých teplotě tavení, ke křehkému mezikrystalickému lomu. K tomu dochází překročením kohezivní pevnosti hranic zrn. Čím je rychlost deformace větší, tím je nižší teplota, při níž dochází ke křehkému porušení [9]. V našem případě by po vytlačení kapalné fáze ze vzorku mohlo dojít ke kontaktu tuhých částí, a dále k jejich vzájemné deformaci a k porušování po hranicích zrn.

Dalším zajímavým efektem je odpevnění materiálu projevující se bezprostředně po ukončení zatěžování, kdy síla velmi rychle klesá z maximální hodnoty na přibližně pětinu. Tento jev je patrný na Obr. 8. Zde je vynesena závislost pýchovací síly na čase. Využití tohoto efektu v praxi by mohlo vést ke značnému snížení deformační energie ve srovnání se stávajícími postupy tváření.

**Tab. 2** Tabulka experimentálních teplot a rychlostí zatěžování použitých u první série pēchovacích experimentů zaměřených na zjištění vlivu teploty.

Teplota [°C]	Obsah likvidu [%]	Rychlost zatěžování [cm/min.]
1460 °C	Likvidus	
1418 °C	40 %	0,5
1405 °C	30 %	
1388 °C	20 %	
1369 °C	10 %	
1340 °C	Solidus	



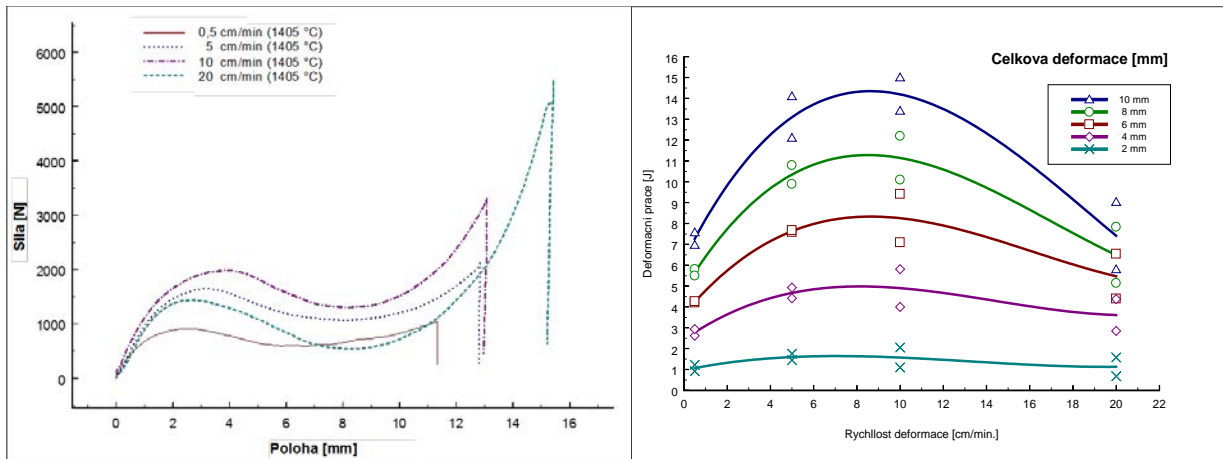
**Obr. 9** Válcové vzorky pēchované za různých teplot mezi likvidem a solidem. Původní rozměry vzorku:  $\varnothing D = 15 \text{ mm}$ , výška  $H = 24 \text{ mm}$ .

Druhá série pēchovacích experimentů byla zaměřená na objasnění vlivu rychlosti zatěžování. Průměr experimentálního válečku pro tuto sérii byl 12 mm a jeho výška 19,2 mm. Byla provedena měření pro čtyři různé rychlosti pēchování (0,5; 5; 10 a 20 cm/min). Teplota všech experimentů byla konstantní a to 1405 °C, což odpovídá 30 % likvidu ve vzorku Tab. 3. Se změnou rychlosti se měnila síla potřebná na pēchování válečku. Do rychlosti 10 cm/min. se závislosti sil na poloze posouvaly k vyšším hodnotám. Oproti očekávání, při rychlosti 20 cm/min., nebyly síly potřebné k pēchování válečku nejvyšší. Naopak ve střední části zatěžovací křivky dosáhly nejnižších hodnot Obr. 10. Podobný efekt je v literatuře, pojednávající o deformačním chování ocelí za vysokých teplot (1300 °C), popsán jako dynamické odpevnění. Podle [9] se toto odpevnění při velmi vysokých teplotách může projevat i při relativně nízké rychlosti deformace.

**Tab. 3** Tabulka experimentálních teplot a rychlostí zatěžování použitých u druhé série pēchovacích experimentů zaměřených na vliv rychlosti.

Teplota [°C]	Obsah likvidu [%]	Rychlost zatěžování [cm/min.]
1460 °C	Likvikus	
1405 °C	30 %	0,5
		5,0
		10,0
		20,0
1340 °C	Solidus	

Vhodnou charakteristikou pro posouzení vlivu rychlosti zatěžování na přetvárné odpory je deformační práce, určená jako integrál zátěžné síly na určité dráze. V tomto případě byly zvoleny hodnoty 2, 4, 6, 8, 10 mm deformace zkušební válečku. Vypočtené hodnoty deformační práce jsou vyneseny na Obr. 11. Deformační práce vzrůstá se zvyšující se rychlostí zatěžování oceli až po určitou hranici. Za touto hranicí deformační práce klesá a při rychlosti 20 cm/min. jsou hodnoty srovnatelné s rychlostí 0,5 cm/min. Tohoto výrazného efektu dynamického odpevnění lze využít v aplikacích tváření kovů za vysokých teplot



**Obr. 10** Závislost zatěžovací síly na poloze nástroje během pýchovacího testu. Konstantní teplota 1405 °C, rychlost zatěžování 0,5; 5; 10; a 20 cm/min.

**Obr. 11** Deformační práce v závislosti na rychlosti deformace pro různé hodnoty celkové deformace.

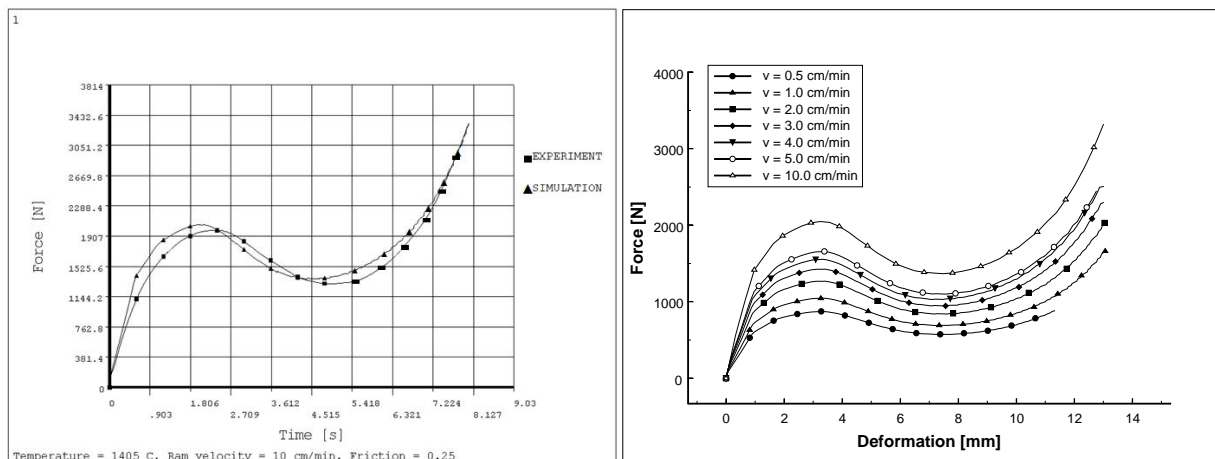
## 1.5 ZEVŠEOBECNĚNÍ VÝSLEDKŮ

V předchozích kapitolách byla popsána cesta od návrhu metodiky experimentů, volby materiálu, přípravy experimentálního zařízení, provedení experimentů po rozbor výsledků. Získaná experimentální data byla využita pro nalezení matematického modelu chování oceli v polotekutém stavu. Tyto práce probíhaly ve spolupráci s Ústavem mechaniky těles FSI VUT v Brně a některá data byla vyhodnocována s polskou Univerzitou hornictví a hutnictví v Krakově. (AGH, University of Science and Technology, Department of Computer Methods in Metalurgy). Na těchto pracích se podílel habilitant práce jako spoluautor. Z tohoto důvodu není celý proces identifikace neznámých materiálových parametrů uváděn jako součást práce a čtenáře je zde možné odkázat na publikace autora habilitační práce viz kapitola 6.1 - Autorovy publikace související s habilitační prací, Materiálové vlastnosti oceli v polotekutém stavu a konkrétně na Disertační práci autora. [10]

Jako ukázka je v této práci uveden výsledek srovnání naměřených dat s numerickou simulací experimentu, kdy byl použitý viskoplastický materiálový model Perzyna s konstantami získanými identifikačními metodami z experimentálních dat. Na Obr. 12 je vidět změřený a vypočtený průběh síly při pýchovacím testu s rychlostí posuvu čelistí 10 cm/min pro ocelový váleček o teplotě 1405 °C, což odpovídá 70 % tuhé fáze ve vzorku. Matematická simulace pýchovací zkoušky

uhlíkové nástrojové oceli ukazuje typickou křivku vznikající při zatěžování materiálu v polotekutém stavu. Její průběh charakterizuje počáteční rychlé dosažení maxima zatěžovací síly, po kterém následuje pokles a materiál v polotekutém stavu relaxuje. Relaxace je patrná ve střední části zatěžovací křivky.

Další obrázek (Obr. 13) ukazuje chování modelu při výpočtu zatěžování ocelového polotekutého válečku (70 % tuhé fáze) při různých rychlostech deformace.



**Obr. 12** Porovnání výsledných naměřených a vypočítaných sil  $F(t)$  při pěchovací zkoušce. Rychlost zatěžování 10 cm/min.

**Obr. 13** Výsledky sil  $F(d)$  pro zatěžovací rychlosti 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 a 10 cm/min při konstantní teplotě oceli 1405°C.

## 1.6 ZÁVĚR

- Bylo zkonstruováno speciální experimentální zařízení umožňující ohřev a zatěžování materiálů v polotekutém stavu. Zařízení umožnilo přesnou a rychlou regulaci teploty nezbytnou pro tento druh experimentů. Podařilo se vyřešit problémy s oxidací zkoumaného materiálu a s volbou vhodné žáruvzdorné keramiky sloužící k zatěžování vzorků.
- Pro uhlíkovou nástrojovou ocel byly pomocí výpočtu a termické analýzy stanoveny přesné teploty likvidu a solidu. Dále byly pro jednotlivé teploty mezi likvidem a solidem určeny obsahy tuhé a kapalné fáze v oceli, což umožnilo plánování dalších měření a následné matematické modelování celého procesu tváření.
- Bylo navrženo a realizováno několik rozdílných typů zkoušek polotekutého kovu. Kombinací těchto zkoušek bylo možné měřit mechanické vlastnosti oceli v celém teplotním intervalu likvidus-solidus. U jednotlivých typů testů bylo realizováno několik sérií měření. Některé byly zaměřeny na objasnění vlivu změn teplot na odpory oceli v polotekutém stavu. Jiné sledovaly vliv změny zatěžovacích rychlostí na průběhy zatěžovacích sil.
- Pěchovací testy prokázaly, že průběhy změřených závislostí sil na poloze nástroje se velmi dobře shodují s výsledky publikovanými v odborné literatuře. Charakter závislostí síla-položka, změřených v pokusech pro uhlíkovou ocel, se shodují s již publikovanými zatěžovacími křivkami jiných nízkotavitelných kovů a slitin. Také v případě oceli byl při

pěchování nalezen charakteristický průběh zpevnění-odpevnění-zpevnění. Dalším zajímavým jevem pozorovaným a popsáným v práci bylo odpevnění materiálu. Projevilo se především při pěchovacích zkouškách bezprostředně po ukončení zatěžování, kdy síla velmi rychle klesala z maximální hodnoty zhruba na pětinu. Využití tohoto efektu v praxi by mohlo vést ke značnému snížení deformační energie ve srovnání se stávajícími postupy. Rovněž efekt dynamického odpevnění, pozorovatelný při měření s vysokými rychlostmi pěchování, by mohl v nových technologiích tváření nalézt praktické uplatnění.

- Po úspěšném zvládnutí základních testů (vtlačovací a pěchovací test) byl realizován experiment s cílem zhotovit výrobek jednoduchého tvaru. Metodou zpětného protlačování byla vyrobena tenkostěnná U-trubice. Při její výrobě bylo využito předchozích zkušeností se zatěžováním oceli v polotekutém stavu. To umožnilo nastavit takové parametry tváření (teplotu a rychlost), při kterých byla ocel přetvořena do požadovaného tvaru. I při nízkých tvářecích tlacích bylo dosaženo velké přetvoření oceli a byla dosažena dobrá kvalita výrobku.
- Matematické modelování bylo provedeno v programových systémech ANSYS a LS-DYNA. Zvládnutí postupu numerické simulace pěchovací zkoušky je prvním důležitým krokem pro vytvoření dalších modelů popisujících chování oceli v celém teplotním pásmu polotekutého kovu. Předchozí zkušenosti a rešerše prováděné v odborné literatuře naznačují, že nebude možné popsat toto teplotní pásmo jedním matematickým modelem. Bude pravděpodobně nutné vytvořit několik modelů pro různé podmínky zatěžování a ověřit jejich platnost pomocí realizovaných experimentů. Následná simulace chování oceli v celém teplotním pásmu polotekutého kovu bude pravděpodobně využívat kombinace všech těchto modelů.

Přínosem je především získání experimentálně získaných údajů popisujících deformační vlastnosti oceli tvářené v polotekutém stavu. Zpracování kovů mezi solidem a likvidem, zejména v případě ocelí a jiných slitin s vysokou teplotou tavení, značně vybočuje z běžných poznatků nauky o materiálu, tváření, slévárenství a ostatních příbuzných oborů. I přes nedostatek základních dat z této oblasti a vysoké náklady spojené s jejich experimentálním získáváním, je však velmi pravděpodobné, že zmíněná technologie bude v blízké budoucnosti prakticky využívána. Její rozvoj urychlí vývoj nových materiálů odolávajících mechanickému zatížení za velmi vysokých teplot. Příkladem těchto materiálů jsou některé druhy konstrukční keramiky. Ta může být využita pro výrobu forem a tvářecích nástrojů. Pro dimenzování forem a nástrojů se znalost materiálových charakteristik ocelí za teplot mezi solidem a likvidem stane nepostradatelná.

Získané výsledky mohou být použity při technologiích válcování, odlévání, a kontinuálního lití. Umožní modelování procesu tváření ocelových součástí při vysokých teplotách. Pro numerické modely procesu tuhnutí, při současné deformaci, je nutná znalost tepelně-deformačních charakteristik daného materiálu. Získané experimentální výsledky umožnily tvorbu a další vývoj matematického modelu popisujícího tváření oceli v polotekutém stavu. Byly tak vytvořeny podklady pro tvorbu realistických výpočtových modelů. Pomocí nich bude možné optimalizovat proces tváření ocelí v polotekutém stavu ještě před jeho zahájením.

## 2 CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ VÁLCOVACÍCH STOLIC

S rostoucími požadavky na výkony válcovacích tratí a na kvalitu válcovaného materiálu rostou i požadavky na chlazení pracovních válců válcovacích stolic. Vhodně navržený systém chlazení musí zabezpečit dostatečně intenzivní odvod tepla z pracovních válců. Teplota válců má podstatný vliv na kvalitu jejich povrchu, celkovou životnost a hlavně teplotní balicitu válců. Teplotní balicita je jedním z parametrů ovlivňujícím rozměrovou přesnost provalku. Ta se projevuje především při válcování úzkého sortimentu na širokých válcovacích tratích. V místě kontaktu provalku s válcem dochází k ohřátí 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 a neumožňuje kompenzovat velké teplotní zatížení válců. Proto je nutné kombinovat předohyb válců s vhodnou kadencí válcování a 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. Teplotní profil pracovních válců vytváří jejich tepelnou balicitu, která má zásadní vliv na rovinnost válcovaných pásů. Teplotní profil a zejména dosažená maximální teplota na pracovních válcích vypovídají rovněž o efektivitě chladicího systému válců.

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

- Typové označení trysky
- Úhly rozstříku (případně také změnu úhlu rozstříku v závislosti na tlaku)
- Ekvivalentní průměr otvoru trysky
- Průtokovou charakteristiku trysky
- Hustotu rozložení vody po šířce paprsku

Na základě těchto údajů však není možné spolehlivě stanovit chladicí účinky. V literatuře lze nalézt vztahy, kde 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 a nemožnost spolehlivě popsat jejich vzájemné ovlivnění.

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

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

## 2.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení s rotujícím válcem bylo navrženo pro studium chladicích účinků trysek na válcovém rotujícím povrchu, simulující podmínky ve válcovnách. Výsledky, získané na tomto experimentálním zařízení, jsou aplikovatelné především na pracovní válce válcovacích stolic na ploché provalky. Rozměry a výkonové parametry byly voleny tak, aby experimentální zařízení co nejlépe napodobovalo provozní podmínky.

### 2.1.1 Postup experimentu

Popsané experimentální zařízení je využíváno pro proměření stávajících chladicích sekcí (např. používaných ve válcovnách) a k následné optimalizaci chlazení. Na základě optimalizace je proveden návrh nových sekcí.

Postup při proměření jednotlivých trysek, nebo celých sekcí je následující:

- měřicí deska s teplotními čidly je zahřáta na počáteční teplotu externí elektrickou pecí,
- po ustálení teplot je pec odejmuta a experimentální válec je roztočen na požadované otáčky,
- je nastavena chladicí sekce a po ustálení tlaků je otevřena klapka a je zahájen ostřik válce,
- po ochlazení válce je rotace zastavena a data jsou z vnitřní paměti dataloggeru přenesena do počítače.

Do výpočtových programů vedení tepla jsou zadávány materiálové charakteristiky, počáteční a okrajové podmínky. Materiálové charakteristiky a počáteční podmínky zpravidla nebývá obtížné specifikovat. Obtížné je stanovit realistické okrajové podmínky mezi pevným povrchem a tekutinou. Proto byla zvolena metoda vlastního, experimentálně podloženého, výzkumu. Pro tyto případy je nejvhodnější okrajovou podmínkou hodnota součinitele přestupu tepla. Tato charakteristika je obecně teplotně a prostorově závislá. Z toho vyplývá potřeba provedení velkého počtu experimentálních měření, nutných pro zjištění vlivu všech proměnných parametrů na součinitel přestupu tepla.

Využití znalosti součinitele přestupu tepla pro optimalizaci chladicích sekcí a matematické modelování je dále popsáno v publikovaných článcích, viz kapitola 6.2.

### 2.1.2 Zařízení pro provozní měření teplotního profilu válců

V Laboratoři přenosu tepla a proudění vzniklo speciální zařízení na měření teplotního profilu válců přímo na válcovacích tratích. Přenosné zařízení umožňuje provádět měření v provozních podmínkách, bezprostředně po vybudování válců ze stolice. Vlastní měření teploty probíhá pomocí velkého počtu kalibrovaných kontaktních čidel přitlačovaných definovanou silou na povrch válce. Změřené teploty mohou sloužit k dlouhodobému sledování teplot válců, nebo mohou být využity pro verifikace numerických simulací teplotních polí ve válcích. Díky vysokému počtu čidel lze získat v rámci jednoho měření průběh teplot po celé šířce válce. Na Obr. 14 je zobrazena měřicí lišta osazená 8 senzory, rozmístěnými asymetricky po šířce válce.

Popsané měřicí zařízení je v současné době využíváno ve firmě voestalpine Stahl, Linz, Rakousko pro dlouhodobé sledování teplot válců. Zařízení bylo dále využito ve firmě U.S. Steel Košice, kdy po rekonstrukci a optimalizaci chlazení pracovních válců byly monitorovány teploty válců po válcovacích kampaních. Teploty válců, chlazených novým optimalizovaným chlazením,



byly srovnávány s teplotami dosaženými pomocí původního chlazení. Srovnání prokázalo totožné teplotní profily válců dosažené novým a původním chlazením. Dále byla prokázána dostatečná účinnost chlazení a to i při 40 % úspoře chladicí vody nového chlazení, nasazeného na válcovací trati hotovného pořadí (HP 1700).



**Obr. 14** Měřicí lišta s magnetickými senzory pro měření povrchových teplot válců v provozních podmínkách

## 2.2 PUBLIKACE – VÝZKUM CHLAZENÍ ROTUJÍCÍCH POVRCHŮ

Příklady využití znalosti součinitele přestupu tepla pro návrhy chladicích sekcí a numerické simulace válcování dobře dokladují následující články publikované na konferencích a v časopisech:

- KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; LUKS, T.; POHANKA, M., Numerical simulation and verification of roll, temperature history during rolling campaign, Roll5 2015. London, United Kingdom: IOM Communicatiins Ltd, 2015. s. 1-11.
- 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. s. 1-11. ISBN: 9788885298958.

První zmiňovaný článek popisuje výstupy laboratorních experimentů, které se využívají pro návrhy a optimalizaci chlazení pracovních válců válcovacích stolic. Chlazení velkým počtem trysek nelze simulovat bez znalosti distribuce součinitele přestupu tepla na povrchu. Experiment je jediný způsob, jak toto rozložení získat.

V publikaci s názvem „Optimization of working roll cooling in hot rolling,“ je popsán postup, kdy bylo pomocí optimalizace chlazení pracovních válců teplé válcovny, dosaženo významných úspor chladicí vody při zachování účinnosti chlazení a kvality povrchu válců. Projekt byl realizován v rakouské firmě voestalpine Stahl., Linz, a úspory na chladicí vodě a údržbě válců

byly zadavatelem vyčísleny na 600 tis. EUR za rok. Další úspěšná optimalizace chlazení pracovních válců válcovacích stolic hotovního pořadí (HP 1700) proběhla v letech 2014 a 2015 ve firmě U. S. Steel Košice a.s. Opět bylo dosaženo zlepšení chlazení válců a současné úspory chladicí vody o 42 %. Další výhodou nového chlazení byla úspora použitých trysek, kdy byl jejich počet snížen z původních 1230 kusů na 868 kusů. Jedná se tedy o úsporu 362 trysek na celé hotovní pořadí, tj. na šest válcovacích stolic.

Tyto příklady úspěšných realizací dokládají velký potenciál optimalizace chlazení válců válcoven teplých plechů.

### **3 IN-LINE TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ**

#### **3.1 TEORIE IN-LINE TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ**

Na výstupu z válcovací tratě musí dojít ke 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 instalují chladicí systémy. Ty mohou být různého konstrukčního provedení. Dříve se často používaly tzv. laminární stěny. V tomto případě voda stéká z přepadových žlabů, vytváří vodní stěnu a dopadá na chlazený povrch. Výhodou tohoto uspořádání je relativně jednoduchá konstrukce, odolná proti mechanickému poškození a ucpávání. 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. Výhodami tohoto uspořádání je poměrně široký regulační rozsah a možnosti chladit libovolně orientovaný povrch. Toho se dá využít při chlazení jak rovinných, tak i profilových provalků.

Moderní technologie vyžadují nejen ochlazení provalku na výběhovém úseku z válcovací tratě nutném pro další technologie zpracování, ale i kontinuální tepelné zpracování, které ovlivní výslednou strukturu materiálu a tím i jeho mechanické vlastnosti. In-line tepelné zpracování přináší zvýšení užitné hodnoty výrobků, kdy vzhledem ke zlepšeným mechanickým vlastnostem, je možné redukovat hmotnost ocelových konstrukcí, či prodloužit životnost exponovaných částí kolejových tratí. Současně lze používat oceli s nižším obsahem legujících prvků. Výhodný je postup, kdy dostatečně intenzivním ochlazením povrchové vrstvy dojde k jejímu zakalení a poté k popuštění využitím vnitřního tepla 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 chladicímu rozsahu jsou pro tyto účely vhodné vodní trysky.

Hlavní přínosy technologie in-line tepelného zpracování:

- zvýšení užitných vlastností výrobků,
- úspory legujících prvků,
- přímá návaznost na tvářecí proces bez nutnosti re-ohřevu,
- univerzálnost řešení s možností modifikace pro celou řadu vyráběného sortimentu,

- použití vodního chlazení, které nezatěžuje životní prostředí,
- relativně snadné propojení s vodním hospodářstvím a řídicími systémy na trati.

### 3.2 POSTUP PŘI NAVRHOVÁNÍ IN-LINE CHLADICÍCH SEKCI

V následujících kapitolách bude popsán vývoj a praktické ověření technologie tepelného zpracování za tepla válcovaných profilů přímo na výstupu z válcovací tratě (in-line). Nalezení vhodného režimu ochlazování vede ke zvýšení hodnot mechanických vlastností vybraných profilů použitelných v konstrukci strojů, kolejové dopravě a stavebnictví. Technologický proces tepelného zpracování lze navrhnout tak, aby bylo dosaženo vyšších užitečných vlastností válcovaných materiálů při značné úspoře legujících prvků a bez zvýšených energetických nároků spojených s re-ohřevem. Chladicí sekce tepelného zpracování jsou navrhovány s ohledem na požadovanou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti vybraných značek materiálů.

V rámci projektů realizovaných v Laboratoři přenosu tepla a proudění (LPTP) byl navržen a v praxi odzkoušen systém tepelného zpracování. V laboratorních podmínkách bylo testováno různé nastavení chladicích sekcí a na základě výsledků experimentů bylo vyvinuto a navrženo poloprovozní zařízení. Poloprovozní zkoušky byly provedeny na výběhovém úseku kolejnicové trati Třineckých železáren a.s. (TŽ). Bylo vybudováno poloprovozní zařízení umožňující tepelné zpracování kolejnic až do délky 25 m. Dosažené tvrdosti, i ostatní požadované vlastnosti kolejnic, byly testovány dle příslušných norem.

Je nutné uvést, že využití rozpadových diagramů (ARA, IRA) a využití znalostí o intenzitě chlazení získaných na základě literárních údajů nevede k úspěšnému zvládnutí problematiky. Metodika vyvinutá a používaná v LPTP je kombinací teoretických znalostí a znalostí získaných z laboratorních experimentů. Práce teoretické a laboratorní jsou navrženy tak, aby rozsah znalostí byl použitelný pro velké spektrum aplikací. Poté jsou získány informace o strategii chlazení pro jednotlivé druhy materiálů s ohledem na požadované parametry. V laboratorních podmínkách jsou testovány charakteristiky jednotlivých typů ostříků. Z těchto testů jsou vybrány ty charakteristiky, které umožní návrh chladicí sekce v provozních podmínkách.

Tepelné zpracování kolejnic lze označit za jednu z nejnáročnějších aplikací, neboť požadavky na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti kolejnic jsou velmi přísné a komplexní. V následujících kapitolách bude autorem popsán celý proces vývoje chladicí sekce pro vybrané značky kolejnic od zadání projektu a určení omezujících faktorů definovaných zadavatelem, přes výběr vhodných typů trysek, až po testy chladicí sekce v poloprovozních podmínkách.

### 3.3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ NA ŘÍZENÉ DOCHLAZENÍ KOLEJNIC

Cílem experimentálního výzkumu a laboratorních testů prováděných v LPTP bylo získání poznatků pro návrh poloprovozního zařízení pro řízené dochlazování kolejnic, které bude splňovat podmínky na dosažení výsledné jakosti produktu, tj. jemné perlitické struktury s definovaným gradientem tvrdosti dle požadavků norem ČSN EN 13674-1 a CN 12-16D. Výzkumné práce byly realizovány v následujících etapách:

- Stacionární testy - nejprve byl proveden výběr vhodného typu trysek a byly změřeny jejich chladicí charakteristiky. Poté byla realizována série testů na vzorcích, kdy byl zkoumán vliv

různých ochlazovacích režimů (různých geometrii ostříku) na výslednou strukturu vzorků kolejnic.

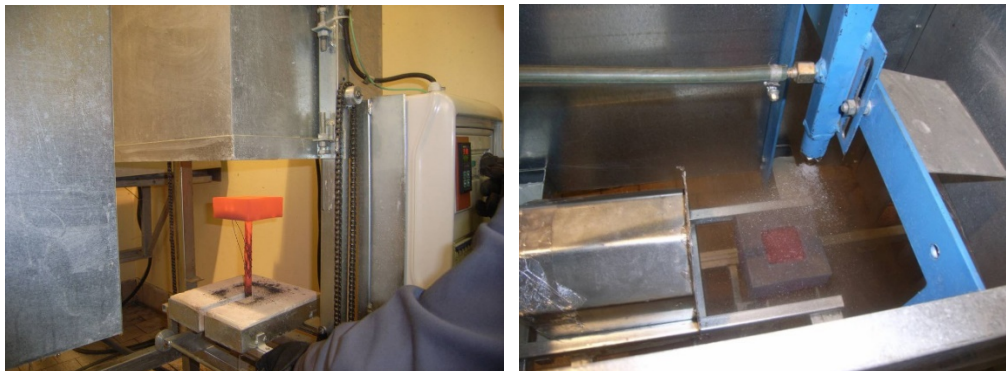
- Testy za pohybu vzorku - v laboratorních podmínkách byla sestavena ostříková sekce délky 3 m, kde byly řízeně chlazeny vzorky za různých podmínek. Byl zkoumán vliv různých parametrů: konfigurace trysek (rozteč, vzdálenost, úhel natočení), tlak vody, rychlost pohybu vzorku na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti kolejnice.
- Návrh poloprovozního zařízení - na základě získaných poznatků, ze stacionárních testů a testů za pohybu, bylo navrženo chladicí zařízení, které respektuje prostorové možnosti ve výběhovém úseku tratě zadavatele.

### 3.3.1 Stacionární testy

Experimenty byly prováděny na laboratorním zařízení vyvinutém v LPTP. Základ tvoří rám, ve kterém je umístěna pec sloužící k ohřevu vzorků. V peci lze částečně vytvořit inertní atmosféru mírným přetlakem dusíku nebo argonu. Po ohřevu je vzorek chlazen tryskou. Vodní proud může být přerušen pneumaticky ovládanou klapkou řízenou programem. Vhodnou časovou posloupností polohy deflektoru lze dosáhnout různých chladicích režimů.

#### *Výběr vhodného typu trysky a stanovení chladicích charakteristik, austenitická ocel, stacionární testy*

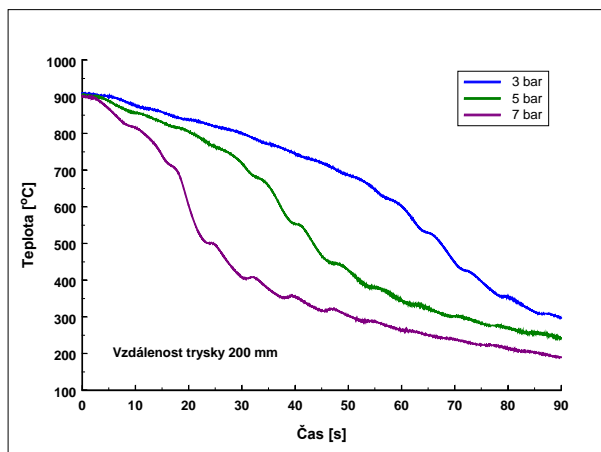
Na základě předcházejících zkušeností a provedených testů byly vybrány vodní trysky s plným kuželem a vrcholovým úhlem paprsku 45°. Ekvivalentní průměr trysek se pohyboval v rozsahu od 2,5 do 4 mm. Byly popsány chladicí charakteristiky trysek a byl stanoven součinitel přestupu tepla v závislosti na různých parametrech ostříku. V této fázi byl zkoumán vliv tlaku vody a vliv vzdálenosti trysky od povrchu vzorku. Vzorek byl vyroben z austenitické oceli a byl osazen termočládky. Na Obr. 15 je zachycen nahřátý (60x60x25 mm) vzorek, který byl v následujícím kroku přesunut pod chladicí trysku. Chlazení bylo přerušováno pomocí počítačem řízené klapky.



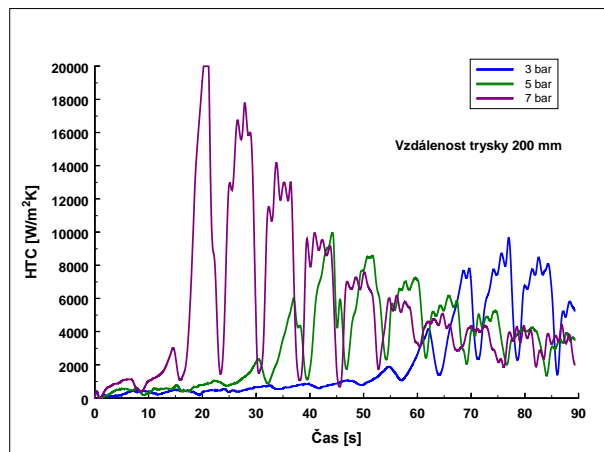
**Obr. 15** Vlevo: vzorek po vyjmutí z pece. Vpravo: chlazení vzorku vodní kuželovou tryskou.

Příklad teplotního záznamu a výsledky výpočtů součinitele přestupu tepla jsou uvedeny na následujících grafech, Obr. 16 a Obr. 17. Byla provedena série testů zaměřená na zjištění vlivu vzdálenosti (170 a 200 mm) a vlivu tlaku (3, 5, 7 bar) na součinitel přestupu tepla. Uvedené

výsledky slouží jako okrajová podmínka využitelná v numerických modelech a simulacích, které umožňují provedení předběžných návrhů chladicích režimů kolejnic.



**Obr. 16** Teplotní záznam na vzorku z austenitické oceli pro vzdálenost trysky 200 mm a tlaky 3, 5, 7 bar



**Obr. 17** Vypočtený průběh součinitele přestupu tepla, vzdálenost 200 mm, tlaky 3, 5, 7 bar

### Zhodnocení výsledků, austenitická ocel, stacionární testy

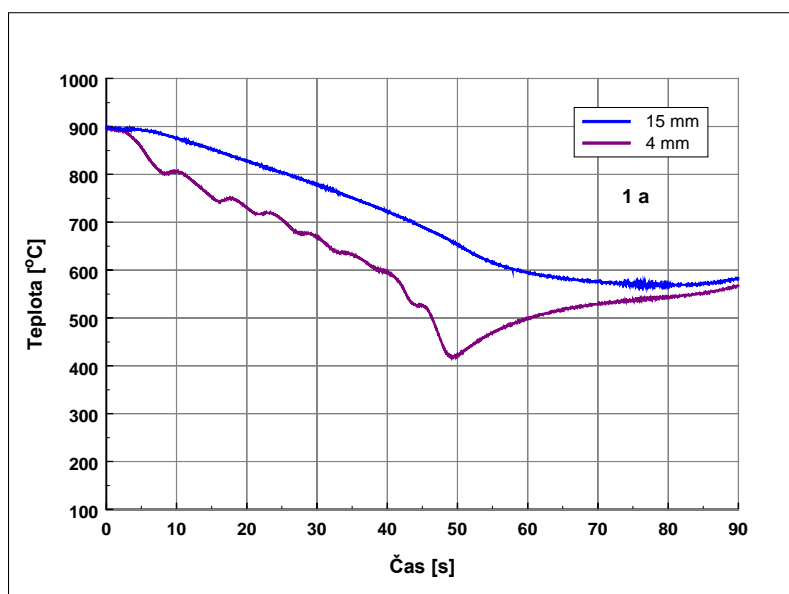
Provedené experimenty a následné vyhodnocení inverzní úlohou (nalezení průběhu součinitele přestupu tepla na povrchu vzorku) umožňuje zhodnocení vlivu tlaku vody a vzdálenosti trysky na intenzitu chlazení. Zcela jednoznačně je zde vidět vliv teploty smáčivosti povrchu (tzv. Leidenfrostova teplota) na hodnotu součinitele přestupu tepla. Zejména pro nižší tlak vody (3 bar) jsou na grafu Obr. 17 patrné dvě zcela odlišné úrovně součinitele přestupu tepla. První pro vysokoteplotní oblast, s hodnotami kolem  $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ , zaznamenanými pro začátek experimentu v časech 0 - 50 sekund. Druhá oblast s hodnotami od  $8000$  do  $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$  byla změřena pro nižší povrchové teploty vzorku, ke konci experimentu. Tento režim je zcela nevhodný pro tepelné zpracování materiálů, protože v průběhu ochlazování může být dosaženo dvou výrazně odlišných úrovní intenzity chlazení, a to pouze vlivem změny povrchové teploty materiálu. V praxi to může znamenat výrazné nehomogenity na ochlazovaném povrchu a nestabilitu znemožňující regulaci intenzity chlazení změnou tlaku. Výhodnější je proto použití vyššího tlaku, kdy je dosaženo smáčení povrchu i za vysokých teplot. Intenzitu odvodu tepla lze pak regulovat dobou působení vodního paprsku na povrch (tzv. pulzní chlazení).

### Testy na vzorcích kolejnic, stacionární testy

Následně bylo přistoupeno k testům na vzorcích kolejnic. Vzorky byly připraveny z kolejnic dodaných zadavatelem projektu, tedy Třineckými železárnami a.s. Kompletní chemické složení vzorků není možné uvést v této práci. Jednalo se o 10 vzorků kolejnic s nízkým obsahem legujících prvků. Rozsah legujících prvků byl následující: Mn 0,98 – 1,18 %, Cr 0 – 0,23 %.

Obsah uhlíku se pohyboval od 0,78 do 1,18 %. Velmi důležitý byl i obsah křemíku, který zásadním způsobem ovlivňoval intenzitu chlazení a pohyboval se v rozsahu od 0,276 do 0,624 %.

Vzorky kolejnic byly osazeny teplotními čidly pro záznam teploty ve zvolených místech. Signály z termočlánků byly snímány měřicí ústřednou. Příklad výsledku měření je uveden na Obr. 18. U vybraných vzorků byla také provedena detailnější analýza – proměření tvrdosti HV<sub>0,3</sub> po výšce vzorku a v případě uspokojivých hodnot tvrdostí také rozboru mikrostruktury.



**Obr. 18** Teplotní záznam stacionárního experimentu, hlava kolejnice, pulzní chlazení. Hloubka teplotních čidel 4 a 15 mm.

### **Zhodnocení výsledků, testy na vzorcích kolejnic, stacionární testy**

Stacionární experimenty byly navrženy a provedeny s cílem získat základní informace o chování vybraných typů materiálu při různých režimech řízeného chlazení. Celkově bylo provedeno a vyhodnoceno více než 70 experimentů, na základě kterých bylo možné formulovat následující závěry:

- Použité materiály lze rozdělit do dvou skupin. První s nižším obsahem křemíku, do 0,4 % a druhá s vyšším obsahem křemíku, nad 0,4 %. Lepších výsledků bylo dosaženo u vzorků s nižším obsahem křemíku. Byla pozorována výborná opakovatelnost experimentů, stabilní vlastnosti povrchových vrstev oxidů a snadnější odstranění okují. U těchto vzorků bylo snazší dosáhnout jemné perlitické mikrostruktury materiálu bez strukturních pásů a lokálních nehomogenit. Bylo tedy experimentálně prokázáno, že jakost R260 dle EN 13674-1 vyhovuje pro účely tepelného zpracování lépe než „americké“ jakosti kolejnic.
- Chlazení založené na pulzním principu je výhodnější než použití kontinuálního chlazení s nižší intenzitou. Parametry ostříku jsou nastaveny tak, aby hodnota součinitele přestupu tepla byla stabilní v celém teplotním rozsahu a neprojevoval se vliv Leidenfrostovy teploty.
- Uspokojivých výsledků bylo dosaženo při počáteční teplotě vzorku v rozsahu od 800 °C do 900 °C. Pod touto teplotou není možné garantovat dosažení dostatečného nárůstu teploty.



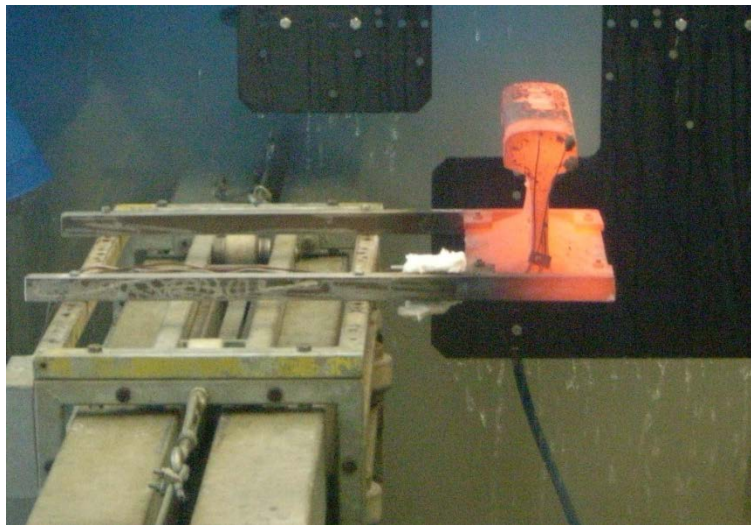
Vhodné rychlosti ochlazování jsou 20-30 °C/s pro teplotní rozsah nad 650 °C a 10-20 °C/s pro teploty pod 650 °C.

- Nejnižší teploty dosažené v průběhu ochlazování by neměly poklesnout pod 250 °C.
- Teplota po zotavení vzorku by neměla být vyšší než 550 °C.
- Pro další zkoušky byl vybrán materiál R260 s obsahem křemíku menším než 0,4 %.

### 3.3.2 Testy chlazení kolejnic za pohybu

Hlavním cílem laboratorních testů za pohybu bylo ověření poznatků získaných při stacionárních testech v podmínkách, které se blíží k reálnému provozu. Laboratorní zařízení, vhodné pro tyto účely, bylo vyvinuto v LPTP a umožňuje ohřev vzorku na požadovanou počáteční teplotu, pohyb vzorku předepsanou rychlostí v ostříkové sekci a vytvoření požadované sekvence průjezdů.

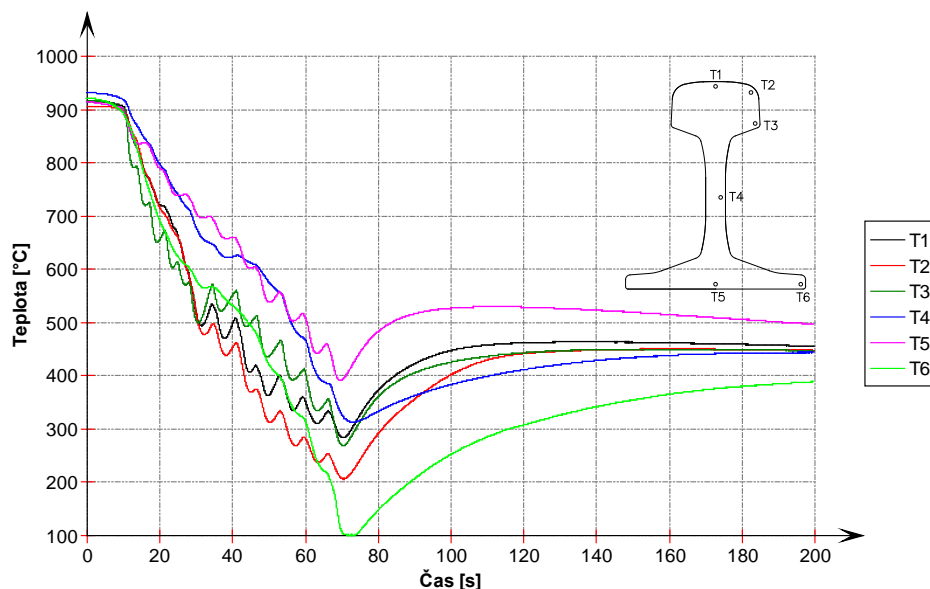
Ostříková sekce v délce 3 m byla sestavena ze čtyř kolektorů – horní, dolní, levý a pravý. Všechny kolektory byly osazeny kuželovými tryskami. Vzdálenost trysek od povrchu kolejnice a pozici kolektoru lze modifikovat tak, aby bylo dosaženo optimálních chladicích účinků. V jednotlivých kolektorech lze nezávisle na sobě regulovat tlak vody. Instrumentovaný vzorek byl ohřát na počáteční teplotu a projížděl několikrát zvolenou rychlostí pohybu chladicí sekcí Obr. 19. Chladicí sekce musela být symetrická, aby bylo možné přenést reverzní pohyb vzorku do provozních podmínek. Při průjezdech vzorku kolejnice byly zaznamenávány údaje o teplotě ve vybraných místech kolejnice a o poloze kolejnice v chladicí sekci.



*Obr. 19 Ohřátá kolejnice před vstupem do laboratorní chladicí sekce*

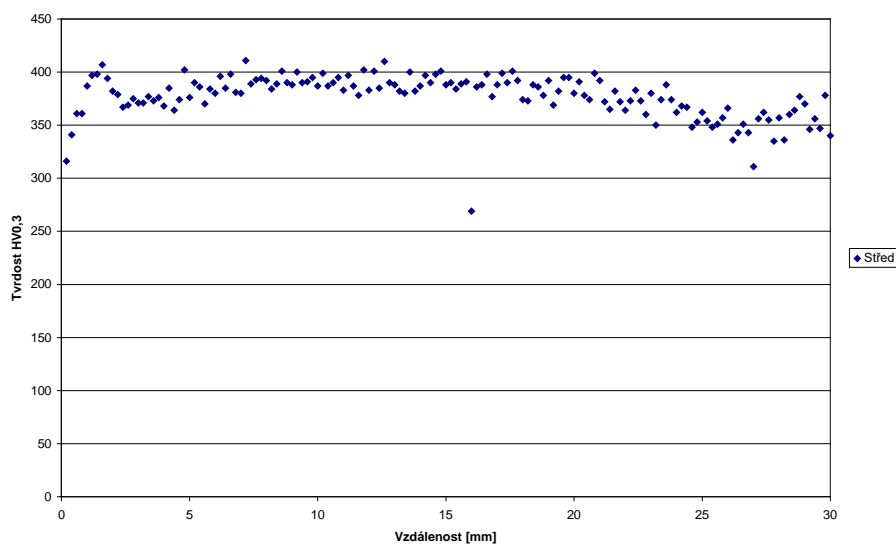
Příklad výsledků chlazení kolejnice 60 E2, je uveden na Obr. 20. V tomto experimentu byl použit relativně vysoký tlak chladicí vody 14 bar. Vzdálenost horních trysek byla 140 mm a vzdálenost ostatních trysek se pohybovala od 150 do 120 mm. Rychlost pohybu kolejnice byla 0.3 m/s z důvodu omezení rychlostí zadavatelem, neboť výběhový úsek válcovny kolejnic neumožňoval použití vyšších rychlostí.





**Obr. 20** Záznam teplot při řízeném dochlazení kolejnic, laboratorní testy za pohybu

Celkově bylo v této fázi výzkumu provedeno několik desítek experimentů pro různé parametry chlazení. Rychlost byla nastavována v rozsahu 0,3 – 0,5 m/s a tlak vody od 10 do 16 bar. Vhodným uspořádáním spodního a bočních chladicích kolektorů se předcházelo možnému podchlazení relativně tenké paty kolejnice. U vzorků, které vykázaly dostatečnou tvrdost měřenou pomocí metody HB (zkouška tvrdosti podle Brinella), byla proměřena i mikrotvrdost HV0.3 (zkouška tvrdosti podle Vickerse) a byl proveden metalografický výbrus. Mikrotvrdost byla proměřena v ose hlavy kolejnice do hloubky 30 mm. Výsledky měření tvrdosti jsou vyneseny v grafu na Obr. 21. Nárůst tvrdosti splňoval očekávání a pohyboval se těsně pod hranicí 400 HV0.3. Tato tvrdost odpovídá jemné perlitické struktuře a požadovaná struktura byla následně potvrzena i metalografickými rozbory.



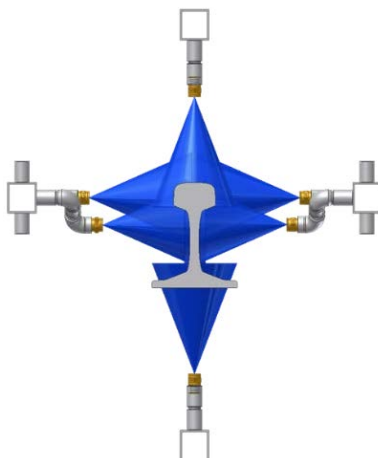
**Obr. 21** Dosažená tvrdost HV0.3 po průjezdu laboratorní chladicí sekci

### **Zhodnocení výsledků - testy za pohybu vzorku**

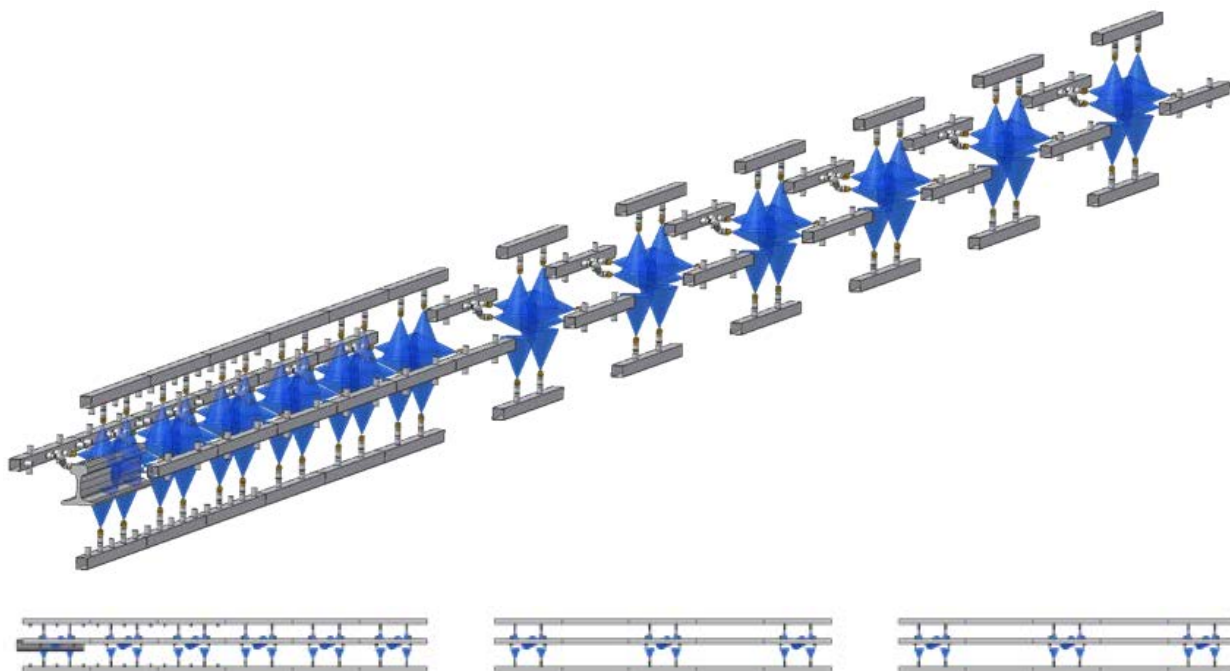
Cílem provedených laboratorních testů za pohybu vzorku bylo získání potřebných podkladů pro návrh poloprovozního zařízení. Celkově bylo provedeno více než 30 experimentů poskytujících informace o vlivu sledovaných parametrů (rychlost pohybu, geometrické nastavení a tlaku v kolektorech) na výslednou tvrdost a mikrostrukturu. Vybrané vzorky byly poté hodnoceny standardním testovacím postupem v laboratořích Třineckých železáren a.s. Díky laboratorním testům bylo možné nastavit chladicí sekce tak, aby umožňovaly tepelné zpracování zvolené jakosti kolejnice (v tomto případě R260) za daných prostorových možností. Optimální rychlost pro in-line tepelné zpracování by byla rychlost okolo 1 m/s. Z důvodu omezených prostorových možností na výběhovém úseku válcovny kolejnic bylo nutné navrhnout rozmístění trysek tak, aby umožňovaly tepelné zpracování daného typu kolejnice při rychlosti 0,3 m/s. To znamená dosažení jemné perlitické struktury s definovaným gradientem tvrdosti dle požadavků norem.

#### **3.3.3 Návrh poloprovozního zařízení**

Poloprovozní zařízení bylo konstruováno a nastaveno tak, aby umožňovalo dosažení srovnatelných chladicích charakteristik, které byly zkoušeny v laboratorních podmínkách. Cílem této části řešení projektu bylo poskytnout potřebné konstrukční podklady pro zpracování dokumentace, dle které bude možné vyrobit poloprovozní chladicí zařízení. Návrh zařízení musel respektovat všechny omezující faktory, hlavně pak délku výběhového úseku navazující na válcovnu kolejnic TŽ. Základní uspořádání trysek v poloprovozním zařízení je zřejmé z Obr. 22 a Obr. 23. Poloprovozní sekce vyvinutá pro tepelné zpracování kolejnic byla 18 m dlouhá a byla rozdělena do tří částí. První šestimetrový úsek sloužil k intenzivnímu zchlazení projíždějící kolejnice, další dva pětimetrové úseky zajišťovaly dochlazení menší intenzitou. V sekci byly dvě metrové mezery, které oddělovaly jednotlivé části chlazení. Ostřík kolejnice byl realizován pomocí čtyř kolektorů, H-horní, D-dolní, P-levý, L-pravý. Ve směru pohybu byly sekce rozděleny do tří samostatných okruhů s tím, že první sekce chlazení byla osazena tryskami s malou roztečí a průtokově odpovídala 50 % spotřebě chladicí vody. Další dvě sekce byly osazeny s větší roztečí a odpovídaly 25 % chladicí vody.



**Obr. 22** Rozmístění trysek po obvodu kolejnice včetně chlazení stojiny a paty kolejnice.



**Obr. 23** Celkové uspořádání osmnáctimetrové poloprovozní chladicí sekce

V rámci návrhu tepelného zpracování hlavy kolejnice bylo nutné vyřešit chlazení stojiny kolejnice. Odvedením tepla ze stojiny mělo zabránit výraznému zotavení teploty v hlavě kolejnice po průjezdu chladicí sekci, a tím zabránit ztrátě jejich mechanických vlastností. Další důležitou součástí chladicí sekce bylo chlazení paty kolejnice. Ta musela být chlazená hlavně z důvodu možných teplotních deformací. Chlazení paty kolejnice muselo být postupné bez vzniku tvrdých nebo křehkých fází ve struktuře.

Z hlediska použitých trysek bylo zařízení konstruováno na základě vodních trysek s kuželovým paprskem a vrcholovým úhlem  $45^\circ$ . Při návrhu byly použity trysky pouze jedné velikosti. To usnadňuje údržbu chladicího zařízení a předchází případným záměnám trysek při přestavbách. Celkový průtok chladicího zařízení se pohyboval okolo  $35 \text{ l/s}$  při tlaku na kolektorech  $15 \text{ bar}$ . Konfigurace při plném osazení tryskami obsahovala 96 kusů kuželových trysek.

### **Poloprovozní zkoušky**

V roce 2009 byly provedeny poloprovozní zkoušky tepelného zpracování kolejnic. In-line tepelné zpracování bylo realizováno na provozu válcovny kolejnic TŽ na výběhovém úseku. Délka využitelného úseku pro nabudování poloprovozní sekce byla výchozím omezujícím parametrem pro určení rychlosti průjezdu kolejnice touto sekci. Použitá rychlost byla  $0,3 \text{ m/s}$ , což přibližně odpovídá jedné minutě tepelného zpracování. Chladicí sekce byly navrženy na základě laboratorních zkoušek provedených v roce 2008.

Z důvodu značné finanční náročnosti poloprovozních testů byl zvolen postup minimalizující počet neúspěšných pokusů. V LPTP byl vyroben  $200 \text{ mm}$  dlouhý segment kolejnice z austenitické

oceli. Segment byl osazený termočlánky zabudovanými těsně pod povrchem. Pomocí termočlánků bylo možné s dostatečnou přesností monitorovat podmínky chlazení v laboratoři a tyto podmínky přenést do poloprovozu. V laboratoři byly vybrány ty režimy, které vedly k požadovaným průběhům tvrdosti a k požadované mikrostruktúře materiálu. Poloprovozní zařízení bylo pomocí segmentu austenitické kolejnice kontrolováno a nastavováno tak, aby křivky chlazení v poloprovozu a v laboratorních podmínkách byly totožné.

V laboratoři bylo provedeno a vyhodnoceno více než 100 experimentů. Po úspěšném testování a nastavení laboratorních chladicích sekcí bylo přikročeno k poloprovozním zkouškám, které měly prokázat přenositelnost výsledků do provozu. Pro verifikaci nastavení poloprovozní sekce byla použita metodika, popsaná v úvodu kapitoly, která umožňovala kontrolu jejího nastavení. I přes slibné testy chladicího zařízení v laboratorních podmínkách zůstal neznámý vliv originální deformované struktury vyválnčováných kolejnic na výsledné tvrdosti a mikrostruktúry kolejnic po tepelném zpracování. Laboratorní testy byly prováděny na vzorcích kolejnic, které musely projít asi hodinovým re-ohřevem na 900 °C v laboratorní peci. To znamená, že struktura materiálu po ohřevu nevykazovala stejnou míru deformace.

Poloprovozní zkoušky byly prováděny v pěti etapách (v pěti dnech). V každé etapě bylo provedeno několik zkoušek. Úspěšnou zkouškou se rozumí zkouška, která končila průjezdem kolejnice chladicí sekcí a po celou dobu chlazení byly tlaky ve všech ostříkových kolektorech stabilní.

První zkoušky byly provedeny na segmentu kolejnice z austenitické oceli osazené teplotními čidly. Takto osazený vzorek kolejnice byl ohřát na teplotu 900 °C a přes spojovací segment uchycen ke dlouhé vodící kolejnici Obr. 24. Celek byl pomocí tažného lana protažen chladicí sekcí Obr. 25. Byly zaznamenávány podpovrchové teploty v šesti místech obvodu kolejnice



**Obr. 24** Segment z austenitické oceli osazený termočlánky napojenými do datalogeru. Poloprovozní měření, vstup do chladicí sekce.



*Obr. 25 Segment z austenitické oceli osazený termočlánky napojenými do datalogeru. Poloprovozní měření, výstup z chladicí sekce.*

### **Závěry z výsledků poloprovozních zkoušek**

První etapy poloprovozních zkoušek byly prováděny na zařízení, které neumožňovalo dosažení potřebné přesnosti vedení kolejnic. Tolerance vedení v horizontální směru byla  $\pm 25$  mm. Tato tolerance byla nastavena z důvodu obavy ze vzpříčení kolejnice v chladicí sekci. Zkoušky prokázaly, že velká tolerance způsobuje střídavé podchlazování levého a pravého boku kolejnice. Kolejnice se poté zvlí a jen s obtížemi prochází chladicí sekci. Dalším problémem byl nerovnoměrný pohyb kolejnice v chladicí sekci.

Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto snížit toleranci vedení kolejnice z  $\pm 25$  mm na  $\pm 15$  mm. Po této úpravě se plynulost průjezdu kolejnice chladicí sekci výrazně zlepšila. V průběhu pěti etap poloprovozních zkoušek bylo zaznamenáno zlepšení plynulosti průjezdu kolejnice chladicí sekci a zlepšení výsledného tvaru kolejnice po tepelném zpracování. Lze usuzovat, že toto zlepšení nastalo v důsledku zpřesnění vedení kolejnice u průběhu chlazení.

Počáteční teploty a teplotní pole jsou nejdůležitější parametry zásadně ovlivňující výsledek tepelného zpracování. Počáteční teploty byly kontrolovány pomocí pyrometru. Teploty byly měřeny na hlavách kolejnic ihned poté, co byly ručně hraněny. Teploty se pohybovaly v rozmezí  $858 - 887$  °C. Doválcovací teploty kolejnic, vstupujících do poloprovozní chladicí sekce, se dají označit jako hraniční pro úspěšné tepelné zpracování. Pro úspěšné zvládnutí tepelného zpracování bude nutné dodržet minimální počáteční teplotu a v případě nízké doválcovací teploty, nebo v případě velkých teplotních rozdílů po délce, bude nutné zajistit ohřev kolejnic.

Lze konstatovat, že poloprovozní zkoušky potvrdily přenositelnost laboratorních výsledků do provozu, ale zároveň zkoušky upozornily na několik důležitých podmínek, které je pro úspěšné zvládnutí tepelného zpracování kolejnic nutné dodržet. Jedná se hlavně o dodržení potřebné počáteční teploty a rovnoměrného teplotního pole jak po průřezu, tak i po celé délce kolejnice. Další zásadní podmínkou úspěšného tepelného zpracování je homogenita chemického složení v



celém průřezu kolejnice. Homogenita chemického složení je výsledkem celého procesu výroby kolejnic od kontinuálního odlévání sochorů přes blokovnu až po válcovnu kolejnic. Po splnění těchto zásadních podmínek je možné navrhnout kalící sekci postavenou na vodních tryskách. Sekce by měla splňovat následující parametry. Délka sekce (výběhového úseku válcovny) by měla umožňovat nastavení rychlosti okolo 1 m/s. Rychlost by měla být konstantní po celou dobu průjezdu kolejnice chladicí sekci. Přesnost vedení kolejnice v chladicí sekci (hlavně pak ve vertikálním směru) by měla být s maximální tolerancí +/- 5 mm s tím, že přesné vedení kolejnice musí být zajištěno i před vstupem do chladicí sekce. Lze předpokládat, že technologie in-line tepelného zpracování kolejnic je aplikovatelná v provozních podmínkách, což potvrzují i výsledky poloprovozních zkoušek, kdy bylo (i při nedodržení všech podmínek) dosaženo v některých řezech kolejnic vysoké úspěšnosti v hodnocení mikrostruktury a tvrdosti kolejnic.

### 3.4 PUBLIKACE – TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Na základě systematického výzkumu tepelného zpracování vzniklo několik článků a publikací. Zde je uveden výběr publikovaných příspěvků:

- POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P. Design of cooling units for heat treatment. In Heat treatment conventional and applications. Rijeka, Croatia, InTech. 2012. p. 1 - 20. ISBN 978-953-51-0768-2.
- RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M. In-Line Heat Treatment and Hot Rolling. In International conference on advances in materials and processing technologies (AMPT2010). 1. 2010. s. 563-568. ISBN: 978-0-7354-0871- 5.
- HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P. In-line heat treatment of long products. In METAL 2014, 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. Ostrava, Tanger Ltd. 2014. p. 1 - 6. ISBN 978-80-87294-52-9

Kapitola v knize s názvem „Design of cooling units for heat treatment“ je publikací, popisující celý postup navrhování chladicích sekcí od laboratorního měření chladicích účinků jednotlivých trysek, přes návrhy složitějších chladicích celků a jejich optimalizaci v laboratorních podmínkách, až po finální návrh chladicí sekce v provozních podmínkách. Nedílnou součástí tohoto procesu je zvládnutí inverzní úlohy pro výpočet součinitele přestupu tepla a následné využití reálné okrajové podmínky pro numerické simulace. Autor habilitační práce se společně se spoluautory zaměřuje na experimentální část výzkumu, která zahrnuje návrh a provedení laboratorních experimentů, vyhodnocení výsledků měření a tepelného zpracování, návrhy a optimalizaci chladicích sekcí. Kolega a spoluautor Michal Pohanka se zaměřuje na problematiku inverzní úlohy, návrh a modelování teplotních čidel a numerické simulace chlazení.

## 4 ZÁVĚR

Předložená habilitační práce je shrnutím výzkumných aktivit autora v oblasti přenosu tepla a tváření kovů v polotekutém stavu. V předkládané práci je popsáno vytvoření metodiky a následné praktické použití této metodiky při stanovení okrajových podmínek v procesech: a) chlazení válců válcovacích stolic a b) chlazení provalků při válcování za tepla (in-line tepelném zpracování). Výstupem tohoto procesu jsou jednak funkce popisující okrajové podmínky těchto dějů ve tvaru

vhodném pro použití v numerických modelech, ale také optimalizované, vysoce účinné chladičí systémy a kalící zařízení pro in-line tepelné zpracování. Samostatnou kapitolou předkládané práce je stanovování vhodného materiálového modelu pro popis chování oceli v polotekutém stavu.

Veškerá data jsou získávána na základě experimentů, v některých případech i v průmyslových podmínkách. Pro tyto účely byla vyvinuta celá řada experimentálních zařízení. Ty byly navrženy tak, aby umožňovaly co nejuvěrnější simulaci sledovaných dějů a umožňovaly zkoumání vlivů různých faktorů na tyto děje. U chlazení horkých povrchů tryskami se ukázal významný vliv rychlosti povrchu na chladičí charakteristiky. Proto experimentální zařízení 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. Pro úspěšné zvládnutí celé aplikace jsou velmi často využívány pracně získané poznatky. To se týká především vyřešení problematiky přenosu a měření mnohakanálových nízkoúrovňových signálů, konstrukce a zabudování teplotních čidel. Další nezbytnou podmínkou identifikace okrajových podmínek přenosu tepla je provedení přesného výpočtu inverzní úlohy. Naměřená a vypočítaná data jsou dále zpracována s využitím několika specializovaných programů, které zpracovávají data do podoby vhodné pro numerické modely. Postup vyhodnocení závisí na typu řešené úlohy a na kvalitě vstupních dat. Okrajové podmínky jsou specifikovány buď ve formě datových souborů, nebo hodnotami koeficientů vhodných interpolačních funkcí a jsou ukládány do databáze okrajových podmínek. Posledním krokem je využití získaných dat pro numerické simulace, ať už v komerčně dostupných programových systémech (jako je například PROCAS a jiné) nebo v simulačních softwarech vyvinutých v LPTP a naprogramovaných kolegou Michalem Pohankou (SimCool, SimRoll).

Tváření oceli v polotekutém stavu svým charakterem odpovídá oblasti základního výzkumu a popisuje postup při výzkumu chování materiálů v polotekutém stavu. V období výzkumu nebyly v odborné literatuře dostupné žádné publikace popisující chování oceli ve stavu částečného natavení. Nebyla zvládnutá ani metodika zkoušení oceli za takto vysokých teplot, které vedou až k úplnému roztavení vzorku. Z tohoto důvodu musely být veškeré použité materiály a postupy nejprve testovány, než byla vybrána metoda poskytující požadované výstupy. Na experimentální část navazovalo hledání vhodného materiálového modelu a matematické modelování experimentálně získaných závislostí. Tato část není uvedena v předkládané práci s tím, že podrobný postup při zpracování výsledků a postup při hledání vhodných materiálových modelů a identifikaci neznámých materiálových konstant lze nalézt v disertační práci autora [10].

Relativně samostatné části předkládané práce tvoří příklady řešených projektů. Jsou zde uvedeny postupy zvolené při řešeních konkrétních projektů jako je optimalizace chlazení pracovních válců válcovacích stolic a in-line tepelné zpracování kolejnic. Na konci těchto kapitol jsou uvedeny publikované články a příspěvky konferencí, které doplňují informace o řešených projektech.

Uvedená práce by nemohla vzniknout bez spolupráce, podpory a zkušeností kolegů a spolupracovníků. Na závěr bych rád vyjádřil poděkování alespoň nejbližším z nich. Jsou to:

Prof. Miroslav Raudenský, CSc., Prof. Jaroslav Horský, CSc., paní Zuzana Vetešníková, Ing. Michal Pohanka, Ph.D. a pan Antonín Dobšák.



## 5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY – POLOTEKUTÝ STAV OCELI

- [1] Laxmanan, V., Flemings, M. C.: Deformation of Semi-solid Sn-15 %Pb Alloy, *Metalurgical Transaction*, Vol 11A, 1980.
- [2] Kiuchi, M., Sugizama, S.: A new Process to Manufacture Semi-Solid Metals, *Proceedings of the Second Int. Conf.*, Eds Brown and Flemings, 1992, 43-65.
- [3] Kattamis, T., Piccone, Z.: T. J. Rheology of Semisolid Al-4,5%Cu-1,5 %Mg Alloy, *Material Science and Engineering*, pp., 265-273, 1991.
- [4] Worster, M. G.: Convection in Mushy Layers, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 29, pp. 91-122, 1997.
- [5] Joly, P. A., Mehribian, R.: The Rheology of a partially Solid Alloy, *Journal of Material Science*, Vol 11, 1976 1393-1418. gassant, J. F., Avenas, P., Sergent, J. Ph.: *La Mise en Forme des Matières Plastique*, Eds. Lavosier, 1986.
- [6] Secordel P., Valette E., Leroy F.: Experimental Extrusion Test to Study the Rheological Behaviour of Semi-Solid Steels, *Proceedings of the Second Int. Conf.*, Eds Brown and Flemings, 1992, 306-315.
- [7] Kiuchi, M.: Mushy-State Processing of Metals, Alloys and Composites, *Proceeding of the Fourth Int. Conf. on Technology of Plasticity*, 1993, 122-133.
- [8] Forejt, M.: *Teorie tváření*, Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992.
- [9] Elfmark, J. a kol., *Tváření kovů*, SNTL – Nakaldatelství technické literatury, Praha, 1992, první vydání.
- [10] Kotrbáček, Petr. Experimentální výzkum a matematické modelování tváření ocelí v polotekutém stavu. Praha, 2005. Disertační práce (Ph.D.), Vysoké učení technické, Fakulta strojího inženýrství, Letecký ústav, 2004.

## 6 AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S HABILITAČNÍ PRACÍ

### 6.1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI OCELI V POLOTEKUTÉM STAVU

- 1. KOTRBÁČEK P., HORSKÝ J., RAUDENSKÝ M.: : Odpory oceli 19 191 v polotekutém stavu proti vtlačování nástroje - (in Czech), 3rd International Conference Akademická Dubnica 97, Slovenská technologická univerzita, Dubnica, Slovakia, proc. pp. 117-121, 1997.
- 2. KOTRBÁČEK P., HORSKÝ J., RAUDENSKÝ M.: Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation, *International Conference Continuous Casting of Billets*, Trinec, ČR, p. 92 –106, 21 - 22 Oct. 1997
- 3. HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M., KOTRBÁČEK,P., ŠARLER, B: Experimental Study Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation - *Kovine, zlitine, tehnologije* 32 No. 6, ISSN 1318-0010, 1998.
- 4. HORSKÝ J., KOTRBÁČEK P.: Computer Aided Process Simulation of Iron Muschy State Forging, *Technical Report*, Technical University of Brno, Institute of Aerospace Engineering, CIPA-CT94-0117, April 1998.

5. HORSKÝ, J. - RAUDENSKÝ, M. - KOTRBÁČEK, P.: Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation, The 6 -th International Conference on Materials and Technology, Convention Centre GH Emona, Portorož, Slovenia, November 3-5, 1998.
6. KOTRBÁČEK P., HORSKÝ J., RAUDENSKÝ M., ŘÍDKÝ, R.: Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation, The 8-th International Conference Metal Forming 2000, Kraków, Poland. ISBN: 90 5809 1570, September 3-7 2000.
7. Řídký R., KOTRBÁČEK P.: Identification of Carbon Steel Constitutive Equations in the Semi-solid State, International Conference Engineering Mechanics 2000, Svratka, Czech Republic, 15-18 May 2000.
8. HORSKÝ, J, RAUDENSKÝ, M., KOTRBÁČEK, P., TSENG, A., A.: Deformation Behavior of Steel in Mushy State, Dept. Mechanical Engineering, 2144 Engineering Bldg. Detroit, MI 48202, May 28, 2000.
9. TSENG,A. A., HORSKÝ, J.,RAUDENSKÝ, M., KOTRBÁČEK, P.: Deformation Behavior of Steels in Mushy State, Euromech Colloquium 408, Interactive Dynamics of Convection and Solidification, Chamonix, France, 18-22 March 2000.
10. ŘÍDKÝ, R., KOTRBÁČEK, P.: Identification of Carbon Steel Constitutive Equations in the Semi-solid State, International Conference Engineering Mechanics 2000, Svratka, Czech Republic, 15-18 May 2000.
11. ŘÍDKÝ, R., KOTRBÁČEK, P.: Studium materiálových vlastností uhlíkových ocelí při tváření v polotekutém stavu,VUT-FS, 2000.
12. KOTRBÁČEK, P., HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M.: Deformation Characteristics of Semi-Solid Steel, The 4-th international conference on Continuous Casting of Billets - Třinec, Czech Republic, October31 – November1, 2001.
13. HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M., P. Kotrbáček, A.A. Tseng: Deformation Behavior Of Steels In Mushy State - Symposium on Thermo Mechanical Processing of Materials, ASME-MED, 2000 – International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE).
14. TSENG,A. A., HORSKÝ, J.,RAUDENSKÝ, M., KOTRBÁČEK, P.: Deformation Behavior of Steel in Mushy State - Materials and Designs 22,, 2000 Elsevier Science Ltd., p. 83-92, S0261-306900058-3, 2001.
15. TSENG,A. A., HORSKÝ, J.,RAUDENSKÝ, M., KOTRBÁČEK, P.: Mechanical Characteristics of Semi-Solid Steels - Interactive Dynamics of Convection and Solidification, Kluwer Academic Publishers, p. 99-112, 2001.
16. Řídký, R., Petruška, J., Horský, J., Kotrbáček, P.: Experimental Study of Semi-solid Steel Deformation, Engineering Mechanics 2003, May 12-15, Svratka, Czech Republic, ISBN:80-86246-18-3.
17. Petruška, J., Řídký, R., Horský, J., Kotrbáček, P.: Identification of Semisolid Steel Behaviour, 20-th Danubia Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, September 24-27, Győr, Hungary, ISBN: 963-9058-20-3.
18. HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M., P. Kotrbáček, A.A. Tseng: Indentation and Piercing of Steel in Mushy State – Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.24, No.3 pp. 187-195.
19. Horský, J., Kotrbáček, P., Petruška, J., Řídký, R.: Experimental Study of Semi-solid steel deformation, International Journal of Forming Processes.

## 6.2 CHLAZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCŮ VÁLCOVACÍCH STOLIC

20. KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; LUKS, T.; POHANKA, M. Numerical simulation and verification of roll, temperature history during rolling campaign. Roll5 2015. London, United Kingdom: IOM Communicatiins Ltd, 2015. s. 1-11.
21. KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; Parilák, L.; Ma'tas, P.; Zalaba, D. Vysoce účinné a energeticky úsporné chladicí systémy pro chlazení, profilových válců. Zváranie - Svařování, 2015, roč. 5- 6, č. 64, s. 135-139. ISSN: 0044- 5525.
22. KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; Parilák, L.; Ma'tas, P.; Zalaba, D. Vysoce účinné a energeticky úsporné chladicí systémy pro chlazení, profilových válců. In Odborná konferencia ŽP VVC 2015. 1. Brezno: HLP grafik s.r.o., 2015. s. 91-97. ISBN: 9788097209155.
23. 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. s. 1-11. ISBN: 9788885298958.
24. HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; HRABOVSKÝ, J. Strategy of energy saving and high efficiecy roll cooling systems design. The Netherlands: IOM Communications Ltd, 2014.
25. HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; KVAPIL, J.; SCHOERKHUBER, K. Optimization of working roll cooling in hot rolling. 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 1. Malta: HEFAT, 2012. s. 685-690. ISBN: 978-1-86854-986- 3.
26. RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J. In-Line Heat Treatment and Hot Rolling. In International conference on advances in materials and processing technologies (AMPT2010). 1. 2010. s. 563-568. ISBN: 978-0-7354-0871- 5.
27. KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M. Modelling of Cooling and Thermal Load of Rolls in Hot Rolling. In Proceeding 3rd SteelSim 2009. Leoben, Austria: ASMET, 2009. s. 1-8.
28. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P.; BOHÁČEK, J. Měření charakteristik přestupu tepla při chlazení válců vodními tryskami. 2009. s. 1-32.
29. VAN STEDEN, H.; BOHÁČEK, J.; RAUDENSKÝ, M.; KOTRBÁČEK, P. Intensification of roll cooling in hot rolling with a roll wiper. Research Disclosure Journal, 2009, roč. 2009, č. 546003, s. 1-8. ISSN: 0374- 4353.
30. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P. Optimisation of Roll Cooling at Stand No. 18 in Cogne. 2008. s. 1-22.
31. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P. Optimisation of Roll Cooling at Stand No. 18 in Cogne. 2008.
32. RAUDENSKÝ, M.; KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; POHANKA, M. Preparation of boundary conditions and experiments conucted within the EU project " Advanced method to improve work roll life time and surface quality of hot rolled strip by new coupled oil free lubrication and chilling". 2008.
33. HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; BOHÁČEK, J.; BELLEROVÁ, H. Improvement of cooling and related lubrication effects in cold rolling of carbon and stainless steel grades - roll. 2007. s. 1-10.
34. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M. Cooling of Rolls Used in Hot Rolling of Long Products. Birmingham: IOM Communications, 2007. s. 1-11.

35. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; BOHÁČEK, J.; BELLEROVÁ, H. Effective Roll Cooling - final report. 2007. s. 1-14.
36. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P. Spray Cooling of Rotating Roll. In CD. Sydney, Australia: Begell House Inc., 2006. s. 1-9. ISBN: 1-56700-226- 9.
37. RAUDENSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P. Intensification and Control of Roll Cooling. Paříž: 2006. s. 1-8.
38. RAUDENSKÝ, M.; HORÁK, A.; KOTRBÁČEK, P. Optimisation of Controlled Cooling in Continuous Casting. In Steelsim 2005. Brno: T-print s.r.o., 2005. s. 317-331. ISBN: 80-239-5005- 3.
39. KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M. Experimental Study of Heat Transfer in Hot Rolling. In 26 Journées Siderurgiques Internationales. Paris: ATS, 2005. s. 1-2. ISBN: 2-911212-05- 3

### 6.3 IN-LINE TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

40. KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J. Energeticky úsporné systémy pro chlazení horkých povrchů a tepelné zpracování kovů, Sborník anotací semináře efektivní energetika XVIII. VŠB-Technická univerzita Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2017. s. 5-7.
41. HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P. Heat treatment of rails. Materiali in tehnologije, 2017, roč. 51, č. 2, s. 329-332. ISSN: 1580-2949.
42. HORSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; CHABIČOVSKÝ, M.; KOTRBÁČEK, P. In- line heat treatment of flat products. In Proceedings European Conference on Heat Treatment 2016 and 3rd International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications, 11 – 13 May 2016, Prague, Czech Republic. Čerčany: Asociace pro tepelné zpracování kovů, 2016. s. 1-8. ISBN: 978-80-904462-9- 8.
43. CHABIČOVSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P. DESIGN OF QUENCHING UNITS FOR HEAT TREATMENT OF TUBES. La Metallurgia Italiana, 2016, vol. 2016, no. 1, p. 23-28. ISSN: 0026- 0843.
44. CHABIČOVSKÝ, M.; HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P. DESIGN OF QUENCHING UNITS FOR HEAT TREATMENT OF TUBES. In European conference on Heat treatment 2015 a 22nd IFHTSE congress. Miláno: Associazione Italiana di metallurgia, 2015. p. 1-9. ISBN: 978-88-98990-03- 0.
45. HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P. IN- LINE HEAT TREATMENT OF LONG PRODUCTS. In METAL 2014, 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. Ostrava: Tanger Ltd., 2014. p. 1-6. ISBN: 978-80-87294-54- 3.
46. POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P. Design of cooling units for heat treatment. In Heat treatment conventional and applications. In Tech. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. s. 1-20. ISBN: 978-953-51-0768- 2.
47. RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; HNÍZDIL, M.; KOTRBÁČEK, P.; HORSKÝ, J. In-Line Heat Treatment and Hot Rolling. In International conference on advances in materials and processing technologies (AMPT2010). 1. 2010. s. 563-568. ISBN: 978-0-7354-0871- 5.

## ABSTRACT

The work is focused on the experimental research of the boundary conditions. Real boundary conditions are necessary for numerical simulation and can be used for the cooling optimization process, especially in heavy industry applications. Typical applications are continuous casting, hydraulic descaling, roll cooling, interstand cooling, product cooling and heat treatment. For this purpose a special methodology was developed. Input data for the inverse task are obtained from laboratory experiments. For the operating conditions of steel plant, it is very complicated and often impossible to measure cooling conditions directly on the lines. Therefore, it is necessary to design and implement laboratory measurements. Laboratory stands simulate the real plant conditions as accurately as possible. For this purpose, unique laboratory equipment for cooling simulation in steel works is used.

The aim of the basic research is to describe material properties of steel in semi-solid state (i.e. between solidus and liquids). Two experimental techniques are used: measuring the steel resistance of a partially melted cylindrical steel sample against upsetting and also measuring the steel resistance to the tool indentation in semi-solid state in dependence on the tool position. The influence of the temperature and that of the rate of loading in the process of forces acting on the tool were evaluated.

A very interesting phenomenon of an expressive decrease of force at loading is evident while seeing measured dependency force – deformation. Further interesting phenomenon is the relaxation stress of the material. It appears immediately after the end of a loading period while force is falling very quickly from the maximum value to approx. 1/5 of the maximum value.

The hot upsetting tests of tool carbon steel were conducted. Typical resisting force curves were obtained with a local maximum at the beginning, decreasing in the central part and finally increasing in the last stage of the upsetting process. This time period of resisting force has been until now only observed in studies dealing with relatively low-melting temperature materials at mushy states, including lead-tin alloys.

To simulate the experimental results by a relative simple numerical model, a viscoplastic constitutive equation according to Perzyna was applied. A procedure how to identify the material parameters was suggested, based on minimization of difference between the numerical and experimental results of resisting force. Within the research an efficient correspondence between the measured and simulated behaviour of the tested specimens was achieved.