

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 877

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Helena Votavová

**Vývoj nových přístupů v odstraňování okují
při kontinuální výrobě oceli s využitím
vysokotlakého vodního paprsku**



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

**VÝVOJ NOVÝCH PŘÍSTUPŮ V ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ
PŘI KONTINUÁLNÍ VÝROBĚ OCELI S VYUŽITÍM
VYSOKOTLAKÉHO VODNÍHO PAPERSKU**

DEVELOPMENT OF NEW APPROACHES IN DESCALING
IN THE CONTINUOUS PRODUCTION
OF STEEL USING HIGH-PRESSURE WATER JET

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Inženýrská mechanika
AUTOR PRÁCE	Ing. Helena Votavová
ŠKOLITEL	doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.
ŠKOLITEL SPECIALISTA	doc. Ing. Petr Kotrbáček, Ph.D.
OPONENTI	prof. Ing. Sergej Hloch, Ph.D. Ing. Ladislav Čecho
DATUM OBHAJOBY	4. dubna 2019

Brno 2019

Klíčová slova:

okuje, hydraulické odstraňování okují, vysokotlaké trysky, součinitel přestupu tepla, stínografie, impaktní tlak, eroze, válcování za tepla, kvalita povrchu

Keywords:

scales, hydraulic descaling, high-pressure nozzles, heat transfer coefficient, shadowgraphy, impact pressure, erosion, hot rolling, surface quality

Místo uložení rukopisu disertační práce

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

© Helena Votavová, 2019

ISBN 978-80-214-5752-2

ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod	5
1 Okuje a jejich vlastnosti	5
1.1 Vznik okují	5
2 Hydraulické odstraňování okují	6
2.1 Konstrukce trysek	7
2.2 Fixní parametry trysek	7
2.3 Parametry nastavení konfigurace	8
3 Typy experimentů	9
3.1 Focení struktury paprsku	9
3.2 Měření impaktních tlaků	9
3.3 Měření součinitele přestupu tepla	10
3.4 Měření kvality odkujení	11
4 Praktická část	12
4.1 Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení	12
4.1.1 Ocel 54SiCr6	12
4.1.2 Ocel HDT580X	13
4.2 Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku	14
4.3 Obrazová analýza struktury vodního paprsku	14
4.3.1 Obrazová analýza struktury vodního paprsku	14
4.3.2 Součinitel přestupu tepla	16
4.4 Studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků .	18
4.4.1 Impaktní tlak trysek	19
4.4.2 Měření kvality odkujení	19
4.5 Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek pro potlačení nehomogenity odkujení v oblasti překryvu	21
4.5.1 Impaktní tlak trysek	21
4.5.2 Součinitel přestupu tepla	22
4.5.3 Měření kvality odkujení	23
4.6 Studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla	24
Závěr	26
Reference	27

ÚVOD

Ocel je v průmyslu v současné době základním vstupním materiálem pro výrobu. K hlavní roli oceli napomáhá především její všestranné použití, vhodné fyzikální a chemické vlastnosti a cena na světových trzích. Ocelářský průmysl je po ropném průmyslu druhým největším na světě s globálním odhadovaným obratem 900 miliard USD [14].

Z celkové světové výroby oceli je stabilně 15–25 % dále zpracováno válcováním za tepla [14]. Válcováním za tepla lze vyrobit široké spektrum polotovarů i finálních výrobků. Nutnou podmínkou pro válcování za tepla je nahřátí materiálu na příslušnou teplotu (nad teplotu rekrystalizace materiálu), aby materiál snadněji podlehl přetvoření.

Nerozlučně s vysokou teplotou materiálu je spojena i jeho povrchová oxidace v atmosféře a pomalé vytváření vrstvy oxidů železa (okují). Jednou z neúčinnějších a nejvíce používaných metod je hydraulické odstraňování okují pomocí vysokotlakých trysek s plochým vodním paprskem. K odstranění okují dochází před samotným válcováním povrchu oceli a tím vzniká i výrazné chlazení povrchu, které může znesnadnit samotný proces válcování.

K analýze samotného procesu odstranění okují se používají metody jak experimentální, tak metody matematického modelování. Tato práce se zaměřuje převážně na experimentální část a mimo jiné navazuje také na práce [9] a [13], kde jsou již metody matematického modelování podrobně popsány.

1 OKUJE A JEJICH VLASTNOSTI

Nerozlučnou součástí při zpracování oceli za tepla je tvorba oxidů železa a dalších příměsí na jeho povrchu. Tyto sloučeniny se souhrnně v průmyslu nazývají okuje. Při válcování oceli za tepla představují významnou komplikaci, neboť mohou významně ovlivnit kvalitu válcovaného povrchu a výrazně snížit životnost pracovních válců.

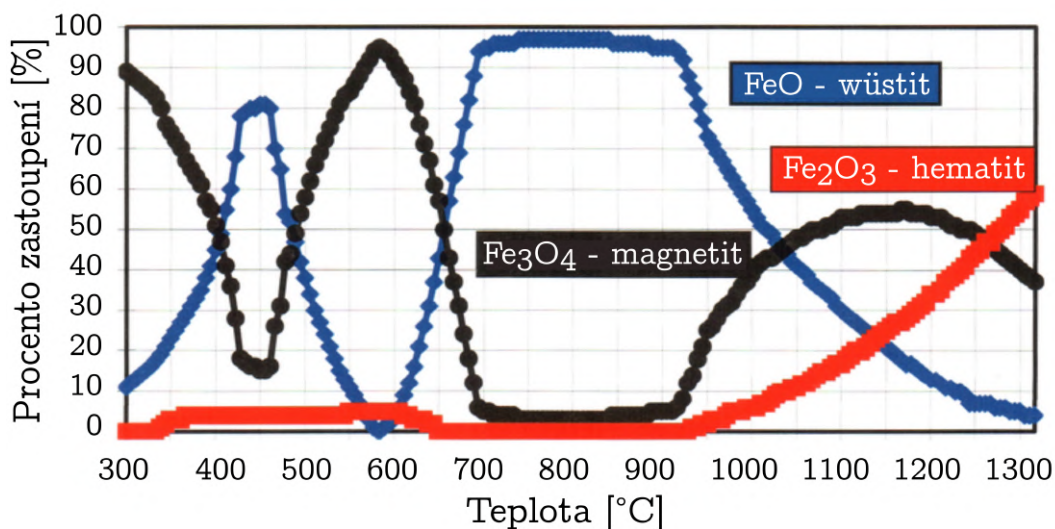
Při válcování za tepla je polotovar ohříván nad teplotu rekrystalizace materiálu. Pro čisté kovy se udává rekrystalizační teplota zhruba v hodnotě 35–45 % teploty tavení T_{tav} (v Kelvinech). V praxi jsou ovšem teploty tváření nad 60–70 % T_{tav} [1]. V provozních podmínkách se tato teplota u různých typů ocelí pohybuje od 900 do 1 200 °C.

1.1 Vznik okují

Okuje je souhrnné označení oxidů, které vznikají za vysokých teplot a přítomnosti okolní atmosféry na povrchu zahřáté oceli. Jedná se především o oxidy železa. V menší míře se vyskytují i oxidy prvků, které tvoří příměsi oceli. Okuje mají většinou vrstevnatou povahu, kde jednotlivé vrstvy mají většinou převahu v konkrétním typu zastoupeného oxidu železa. Mezi hlavní oxidy železa, které se tvoří na povrchu zahřáté oceli, patří oxid železnatý (FeO, wüstit), oxid železnato-železitý (Fe₃O₄, magnetit) a oxid železitý (Fe₂O₃, hematit).

Struktura okují je tedy z velké části ovlivněna koncentrací a tlakem kyslíku v okolní atmosféře. Je ovšem také závislá na teplotě okolí při samotné oxidaci. Důležitou teplotou pro

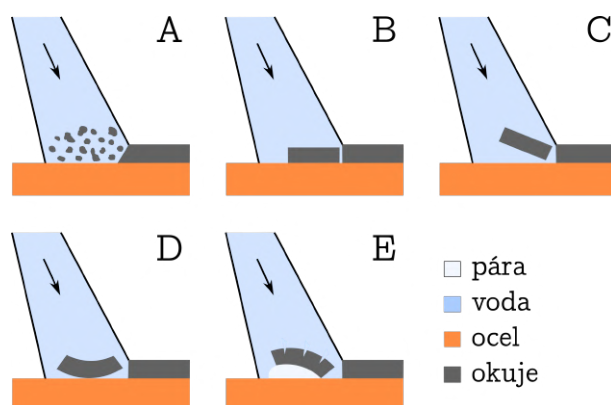
oxidaci je teplota 570 °C. Nad touto teplotou se již vyvíjí všechny základní typy oxidů železa a rychlost růstu okují se zvyšuje [10]. Tyto oxidy se vyvíjejí ve vrstvách i díky postupné klesající koncentraci kyslíku směrem k rozhraní okuje/ocel. Tyto výsledky jsou detailně popsány i v [2], kde jsou uvedeny procentuální podíl tloušťky jednotlivých vrstev okují v závislosti na teplotě. Sám autor knihy [2] však upozorňuje, že se jedná spíše o orientační hodnoty, které ovšem dostatečně vystihují situaci pro velkou škálu případů. Tento vývoj je zachycen na obr. 1.1.



Obrázek 1.1: Podíl tloušťky vrstvy okují v závislosti na teplotě dle [2]

2 HYDRAULICKÉ ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

Při hydraulickém odstraňování okují dochází ke kombinaci několika fyzikálních principů. Tyto principy jsou schematicky znázorněny na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Fyzikální principy odstranění okují [11]

Jedná se o

- (A) porušování a rozměňování okují vlivem mechanického působení vodního paprsku,
- (B) vliv rozdílné tepelné roztažnosti okují a základního materiálu, který působí další odtrhávání vrstvy okují od základního materiálu

- (C) působení smykového napětí mezi materiálem a okujemi, které okuje dále oddělí od základního materiálu,
- (D) vliv samotného teplotního gradientu v okujích, který přispívá k odlupování,
- (E) vypařování vody v puklinách, tzv. teorie parní exploze. [11]

2.1 Konstrukce trysek

K odstraňování okují se nejčastěji používají vysokotlaké trysky s plochým vodním paprskem. Dále se v omezené míře používají i trysky s válcovým vodním paprskem nebo trysky s oscilujícím vodním paprskem. Trysky mohou být upevněny staticky, nebo mohou být upevněny na rotační hlavě a rotovat kolmo vůči odkujovanému povrchu. Trysky s oscilujícím vodním paprskem a trysky s válcovým paprskem mají ovšem problémy v oblasti homogenity odstraňování okují a proto se dále text primárně zaměřuje na technické řešení s tryskami s plochým vodním paprskem.

Každá konstrukce trysky s plochým vodním paprskem se skládá z několika základních částí, které jsou uceleně zobrazeny na obr. 2.2. Jedná se o tělo samotné trysky, stabilizátor vodního proudu, upevňující držák, pojistný měděný kroužek a pojistnou matici. V těle trysky se nachází karbidová vložka, která určuje základní charakteristiky vycházejícího vodního proudu, jakými je například úhel rozstříku, rovnoměrnost vodního proudu a podobně. Detaily designu každé konstrukce se dále liší dle příslušného výrobce.

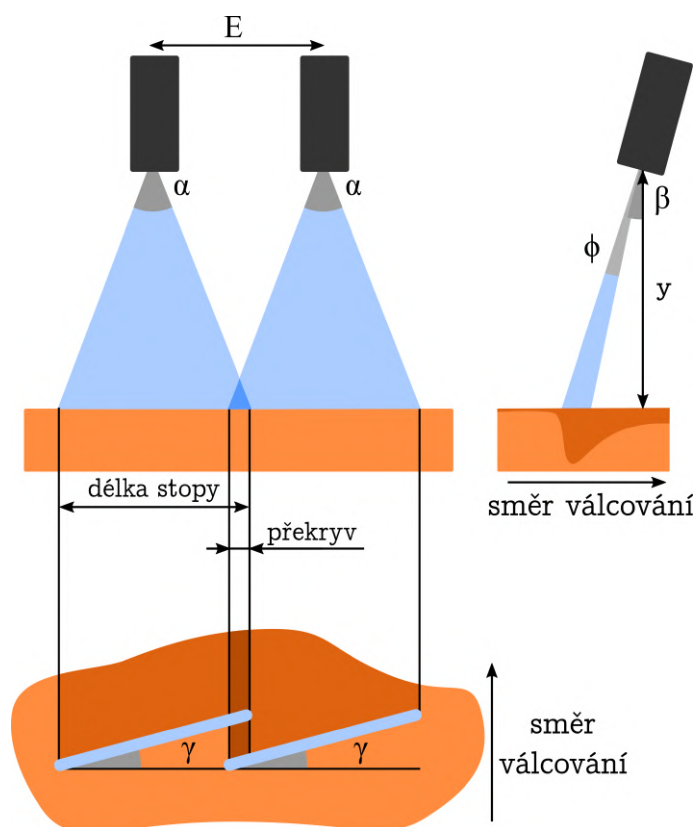


Obrázek 2.2: Konstrukce trysky [8]

2.2 Fixní parametry trysek

Parametry trysek jsou parametry pevně určené designem a výrobou daného typu trysky. Mezi hlavní parametry patří úhel rozstříku α , úhel hloubky paprsku ϕ a hodnota průtoku

tryskou Q_{ref} při daném referenčním tlaku p_{ref} . Díky tomu lze jednoduše trysky mezi sebou porovnávat v jejich energetické náročnosti. Výrobci obvykle dodávají trysky ve výrobních řadách, kde zákazník může nezávisle zvolit pro daný průtok několik variant úhlu rozstříku. Některé z těchto parametrů jsou zobrazeny na ilustračním obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Schéma nastavení trysek

2.3 Parametry nastavení konfigurace

Mezi parametry nastavení konfigurace řadíme především úhel náklonu trysky β , úhel natočení trysky γ , výšku trysky nad povrchem y , rozteč trysek E , pracovní tlak a průtok tryskou.

Úhel náklonu trysky β pomáhá směřovat proud vody proti pohybu válcování a přispívá tedy ke směrovému odlupování okujů a jejich lepšímu sběru a odvodu z povrchu společně s vodou a vodními parami.

Úhel natočení trysky γ přispívá k lepšímu směrovému odlupování okujů a posunuje okuje směrem ven ze středu odkujovaného povrchu. Tento úhel se pohybuje v průmyslové praxi od 0 až po 15°. Má velký vliv na homogenitu intenzity chlazení po šířce, neboť prodlužuje významně dobu chlazení v oblasti překryvu.

Pracovní tlak trysky je primárně dán možnostmi čerpadel, která trysku nebo systém trysek napájí. V Laboratoři přenosu tepla a proudění je schopno čerpadlo dosáhnout až 45 MPa a průtoku až 120 l/min. Přepočet průtoku tryskou při experimentálně nastaveném tlaku p_{exp} se

provádí dle vzorce 2.1 z referenčních katalogových hodnot průtoku Q_{ref} a tlaku p_{ref} .

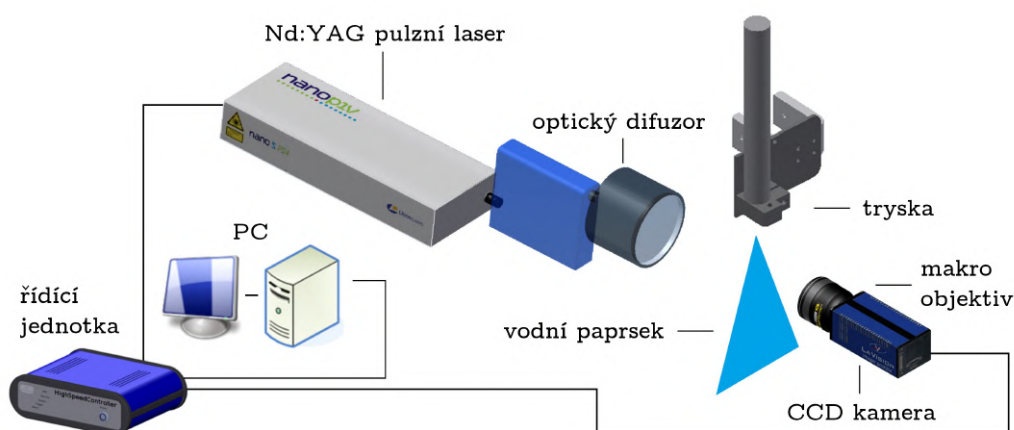
$$Q_{exp} = \sqrt{\frac{p_{exp}}{p_{ref}}} Q_{ref} \quad (2.1)$$

Provozní a experimentální tlaky pro odkujování se pohybují od 10 MPa až po vysoce výkonných 40 MPa. Při vyšších tlacích je přitom třeba zohlednit i doporučené maximální tlakové zatížení trysky.

3 TYPY EXPERIMENTŮ

3.1 Focení struktury paprsku

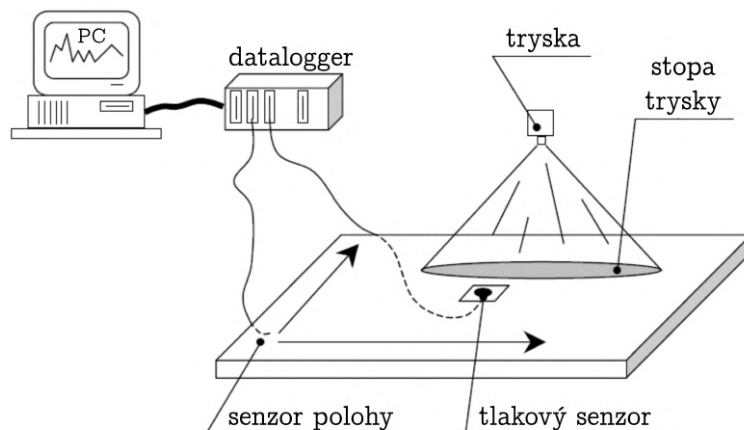
Focení struktury paprsku je provedeno stínografickou metodou. Tato metoda využívá prosvětlování vodního paprsku zezadu velice intenzivními krátkými záblesky laseru. Měřicí zařízení je znázorněno na obr. 3.1. Článek [6] ilustruje, jak lze tuto metodu použít pro široké spektrum typů kapek a proudění. Nejčastěji se ovšem tato metoda používá pro analýzu struktury vodního paprsku u malých průtoků.



Obrázek 3.1: Princip pořizování fotografií stínografickou metodou [12]

3.2 Měření impaktních tlaků

Měření impaktního tlaku je jedním ze základních standardních typů měření. Provádí se pomocí tlakového senzoru o měřicím rozsahu do 10 MPa, novější senzor pak až do 40 MPa. Schéma měřicí aparatury je zakresleno na obr. 3.2. Zakalená deska o tvrdosti 800 HV se pohybuje ve vodorovném směru v souřadné soustavě X/Y. Uprostřed desky se nachází otvor, pod kterým je umístěn tlakový senzor, který snímá aktuální hodnotu tlaku. Datalogger, zařízení



Obrázek 3.2: Měřicí aparatura pro měření impaktního tlaku

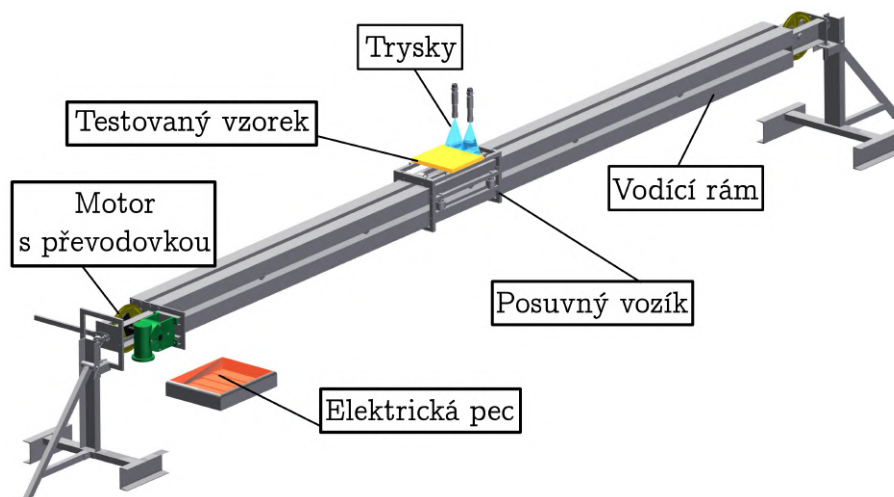
pro sběr dat, shromažďuje informace o aktuálním tlaku a aktuálně dané poloze desky a předává tyto data dál do počítače.

3.3 Měření součinitele přestupu tepla

Měření součinitele přestupu tepla se provádí na experimentálním zařízení (viz obr. 3.3) při jediném průjezdu nahřátého vzorku pod tryskou. Vzorek – deska korozivzdorné oceli – je vybaven sérií zabudovaných podpovrchových termočlánků typu K, které jsou schopny snímat teploty v rozsahu od -200 do $1\,250$ °C. Termočlánky jsou zabudovány pod povrchem v hloubce několika desetin milimetrů až milimetrů [7]. Deska se nahřívá v elektrické peci, dokud teplota vzorku nedosáhne požadované předepsané teploty. Především se dbá na to, aby byla deska dostatečně rovnoměrně prohřátá. Po dosažení požadované teploty je deska vyjmuta z pece a neprodleně projíždí na posuvném vozíku skrz sekci se stříkajícími odkujovacími tryskami. Termočlánky tedy zaznamenají patřičný pokles teplot a tato data později slouží společně se záznamem polohy vozíku jako surový vstup pro inverzní úlohu výpočtu součinitele přestupu tepla.

Součinitel přestupu tepla slouží k popsání složité teplotní dynamiky procesů, které se dějí vlivem konvekce (proudění) podél povrchů obtékaných tekutinou. V našem případě se jedná o interakci vodního paprsku s velmi horkým povrchem oceli. V české literatuře se setkáme s označením α , v zahraniční pak s h či zkratkou HTC od slovního spojení *heat transfer coefficient*.¹ Měření a následný výpočet součinitele přenosu tepla probíhá přes tzv. inverzní úlohu přenosu tepla.

¹V dizertační práci je využita anglická notace, neboť písmeny řecké abecedy jsou označovány úhly. V případě α se jedná o úhel rozstříku trysky.



Obrázek 3.3: Linear – experimentální zařízení určené pro měření součinitele přestupu tepla a měření homogenity chlazení

3.4 Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení je jedním z posledních experimentů, na kterém se reálně ověří efektivita dané konfigurace.

Vzorek dané oceli je nahřát v peci na příslušnou teplotu a po příslušnou dobu. Složení vzorku a doba oxidace je určena tak, aby se na povrchu vzorku vytvořily příslušné typy okují v požadovaném složení a tloušťce. K tomu je nutné samozřejmě znát složení vzorku a rychlost vyvíjení tloušťky okují v závislosti na čase. Tyto informace je nutné předem také ověřit experimentem.

K samotnému měření je opět využíváno experimentální zařízení ilustrované na obr. 3.3. Vzorek projede odkujovací sekcí a poté je zchlazen v ochranné atmosféře. Na vzorku se následně hodnotí tloušťka vytvořených okují v místě ostříku vodních paprsků a mimo něj. Měření se provádí pomocí elektromagnetické sondy Fischer Technology Dualscope MP20, která pracuje na principu magnetické indukce a vířivých proudů v materiálu.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se skládá ze 6 sekcí, které odpovídají 6 výzkumným cílům, a zpracovává více než 350 měření 7 různých typů. Aby bylo pro čtenáře jednodušší se v těchto měřeních orientovat, jsou měření pojmenována jednotnou strukturou. Každý experiment je označen příslušným písmenem typu experimentu následovaný číslem, které udává, ke kterému výzkumnému cíli se výsledek váže. Následují dvě číslice specifikující pořadí měření dle toho, jak je uvedeno v hlavním textu práce. Podrobněji jsou pak všechny výsledky uvedeny v dizertační práci.

Tabulka 4.1 dále uvádí seznam odkujovacích trysek, které byly použity při zpracování dizertační práce a jsou prezentovány v rámci této teze. Jedná se o 6 párů trysek od 3 různých výrobců. Výrobci jsou označeni pouze kódem A, B nebo C.

Tabulka 4.1: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku α_{nom} uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 1	A	40	12	17	24	0,43
Tryska 2	B	52	12,3	17,3	24,5	0,33
Tryska 4	A	30	18	25,46	36	0,84
Tryska 5	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 6	A	40	28	39,6	56	0,99
Tryska 8	A	22	36	50,9	72	2,31

4.1 Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení

První cíl dizertační práce mapuje vývoj výšky a struktury okují u vybraných typů ocelí, které byly na Laboratoři tepla a proudění k dispozici.

4.1.1 Ocel 54SiCr6

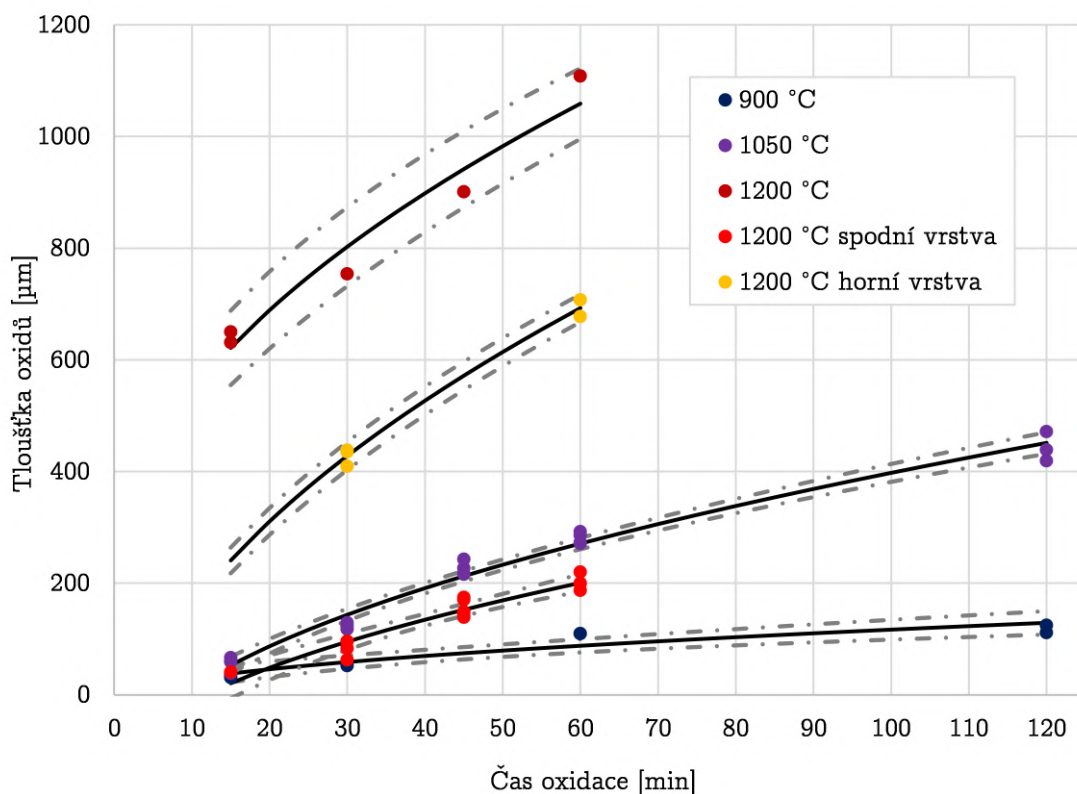
Jako první materiál pro analýzu zvolena křemíková pružinová ocel 54SiCr6 (ČSN EN 1.7102; ČSN 14 260). Přestože se později tato ocel ukázala jako vhodná pro porovnávání efektivity odstraňování okují pouze ve specifických případech, je v této části dizertační práce uvedena celá analýza vzorků, která byla realizována ještě před samotnými měřeními kvality odkujení.

Analýza pro podobný typ oceli nebyla totiž v žádné dostupné literatuře nalezena. Chemické složení oceli 54SiCr6 uvádí tabulka 4.2.

Tabulka 4.2: Chemické složení zkoumané oceli 54SiCr6 [4] [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr
Složení [hm. %]	0,51–0,59	1,2–1,6	0,5–0,8	max 0,025	max 0,025	0,5–0,8

Souhrnné výsledky růstu okují jsou uvedeny v grafu na obrázku 4.1. Kolem každé regresní křivky je naznačen i 95% konfidenční interval. Se zvyšující se teplotou značně roste rychlost růstu okují i jejich tloušťka. Výsledky experimentů při teplotě 1 200 °C vykazují širší konfidenční interval, který je způsoben změnou struktury okují. Při této teplotě dochází k postupnému rozdělování vrstvy okují na dvě podvrstvy, horní a spodní. V případě horní vrstvy nebyl k dispozici dostatek fotografií k analýze a výsledky je proto třeba brát s rezervou. Lze předpokládat, že horní vrstva nebude klást při procesu odkujení výraznější odpor. Spodní vrstva okují ovšem bohužel vrůstá do materiálu oceli a může tedy představovat problém.



Obrázek 4.1: Graf regresních funkcí pro všechny měřené teploty s naznačeným konfidenčním intervalem (95%)

4.1.2 Ocel HDT580X

Pro měření kvality odkujení konfigurací byla dále analyzována dvoufázová ocel HDT580X

Tabulka 4.3: Chemické složení zkoumané oceli HDT580X [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	V	Al	B	Cr + Mo
Složení [hm. %]	max 0,17	max 0,8	max 2,2	max 0,08	max 0,015	max 0.2	max 2	max 0,005	<1

(ČSN EN 1.0936; ČSN 11 140). Chemické složení této oceli uvádí tabulka 4.3.

Tato ocel se ukázala jako vhodná pro měření kvality odkujení. Všechna měření kvality odkujení byla realizována pro teplotu 1 200 °C a čas oxidace 120 minut. Vzorky pro potřebnou analýzu struktury okují byly odebrány přímo z okraje měřené desky a bylo vyhodnoceno několik oblastí na vzorku. Bylo ukázáno, že okuje se částečně odlupují. Vyšší část okují dosahovala v průměru tloušťky 132 μm , redukována 38 μm .

4.2 Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku

Druhý cíl dizertační práce navazuje na již dříve vzniklou dizertační práci [9] na Laboratoři přenosu tepla a proudění. Práce [9] zpracovávala vliv kolektoru a typu stabilizátoru na rozložení impaktního tlaku. Tento cíl rozšiřuje tuto problematiku o parametr délky stabilizátoru. Byly provedeny 4 experimenty dle postupu uvedeném v kapitole . Pro všechny experimenty byl zvolen jednotný tlak 20 MPa, který odpovídá obvyklé hodnotě užívané v průmyslu.

U trysek 2 a 4 byla v rámci porovnávaných experimentů téměř totožná síla působící na měřící podložku, což potvrdilo předpoklad, že delší stabilizátory přispívají k lepší fokusaci vodního paprsku a tím i k lepší mechanické efektivitě odstraňování okují.

U Trysky 2 se jednalo o zlepšení z průměrné hodnoty 0,63 MPa na 0,7 MPa, tedy o 11 %. Došlo zároveň k mírnému rozšíření šířky stopy trysky. U Trysky 4 se jednalo o zlepšení z průměrné hodnoty 1,96 MPa na 2,04 MPa, tedy o 4 %. Delší stabilizátor dokonce vyrovnal pokles tlaku ve středu stopy. Z hlediska hloubky stopy paprsku došlo ke zlepšení z 1,75 mm na 1,68 mm. Detaily těchto experimentů jsou uvedeny v dizertační práci.

4.3 Obrazová analýza struktury vodního paprsku

Třetí cíl dizertační práce se zabývá analýzou struktury vodního paprsku pomocí stínografické metody. Na základě simulací v článku [3] lze předpokládat, že velikost a struktura kapek může mít výrazný vliv na mechanický i teplotní aspekt při odstraňování okují.

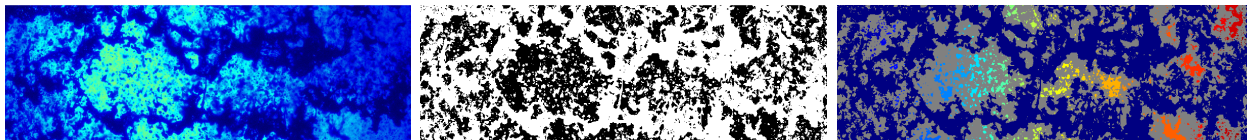
4.3.1 Obrazová analýza struktury vodního paprsku

Stínografické fotografie struktury vodního paprsku byly pořízeny v rámci spolupráce s Ústavem Geoniky AV ČR. Bylo pořízeno 89 fotografií struktur vodního paprsku dle postupu uvedeném v kapitole .

Protože zařízení pro pořizování stínografických fotografií mělo omezený průměr vstupního otvoru pro zachytávání vody, byla omezena i možnost snímání u řady trysek s širokým úhlem

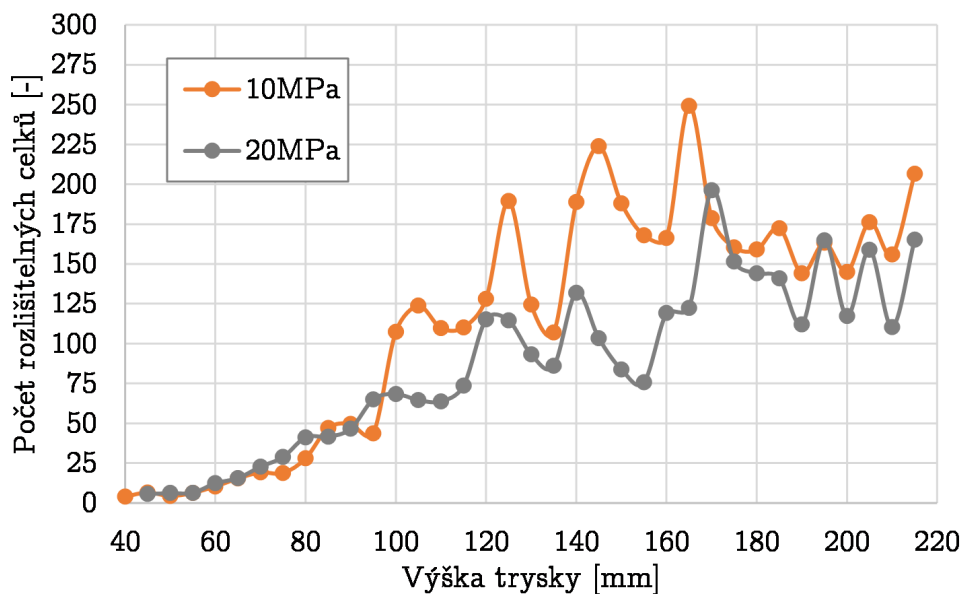
rozstříku. Tryska 8 byla vybrána pro kompletní scanování struktury vodního paprsku od výšky 40 mm až po výšku 222 mm.

Fotografie byly zpracovány pomocí skriptu, který byl vyvinut v rámci dizertační práce. Fotografie je převedena do binární podoby pomocí metody adaptivního prahování. Bylo určeno, kolik procent obrazu bylo zabráno vodními celky. V binárním obraze byly následně identifikovány jednotlivé samostatně rozlišitelné celky a jejich okolní hranice. Graficky jsou pak ve výstupu jednotlivé celky odděleny barevně. Celý postup ilustruje graficky i obrázek 4.2. Počet identifikovaných celků byl podělen příslušnou velikostí analyzované části v milimetrech. Tímto parametrem je pak možné porovnat různě velké analyzované sekce.



Obrázek 4.2: Postup při zpracování obrazu: původní obraz, binární obraz, obraz s barevně rozlišenými vodními celky

Výsledky analýzy pro Trysku 8 jsou uvedeny v grafu na obrázku 4.3. Fotografie jsou analyzovány ve výřezech o výšce 5 mm.



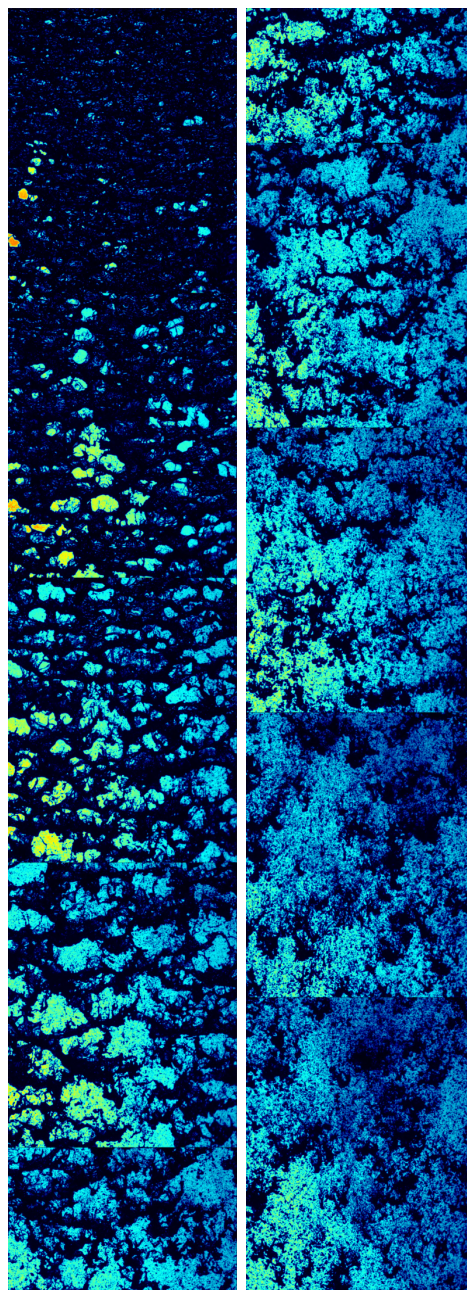
Obrázek 4.3: Závislost průměrného počtu rozlišitelných celků v 1 milimetru výšky obrazu na výšce trysky u Trysky 8

Průměrný počet rozlišitelných celků v obraze s výškou postupně roste. Od určité výšky lze pozorovat nárůst překryvů vodních celků a algoritmus již nedokáže oddělit některé překrývající se vodní celky. Tím dochází ke značné rozkolísanosti parametru průměrného počtu rozlišitelných celků. Vodní paprsek se rozpadá na velmi drobné kapky.

Tuto komplexní strukturu ukazuje obrázek 4.4 složený ze stínografických fotografií F315. Obrázek je složen z 9 samostatných fotografií, které jsou seřazeny dle výšky nad sebou. Z důvodu velkého poměru šířky a výšky je celý obrázek rozdělen na dva na sebe navazující celky. Levá část ukazuje strukturu paprsku v úseku 40–131 mm. Pravá část ukazuje strukturu paprsku v úseku 132–222 mm. K rozpadu vodních celků na velmi drobné kapky dochází právě v oblasti 110–130 mm. Při nižší tlaku 10 MPa k tomuto rozpadu dochází již v oblasti 90–110 mm. Toto pozorování odpovídá i náhlé změně v počtu rozlišitelných celků v grafu 4.3. Strukturu paprsku v závislosti na výšce tedy lze tedy rozdělit na 3 úseky

1. úsek kompaktní struktury (do 100 vodních celků v 1 milimetru výšky obrazu),
2. úsek postupného rozpadu této struktury,
3. úsek vodního paprsku tvořeného drobným kapičkami.

Z dat lze soudit, že výška úseku, kde se kompaktní struktura rozpadá, může záviset na pracovním tlaku trysky (resp. na velikosti průtoku vody tryskou). Pro obecný závěr je však třeba realizovat více pozorování.

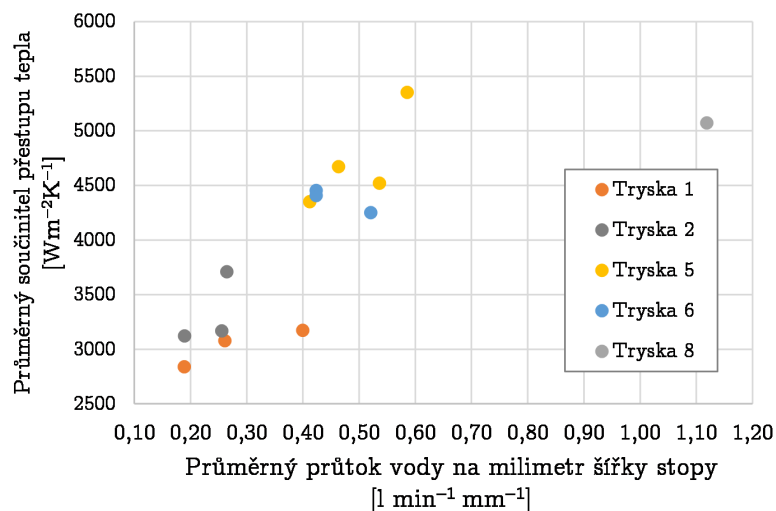


Obrázek 4.4: Složené sténografické fotografie vodního paprsku Trysky 8 od výšky 40 mm do 222 mm při tlaku 20 MPa; fotografie rozdělena na poloviny z důvodu velké délky

4.3.2 Součinitel přestupu tepla

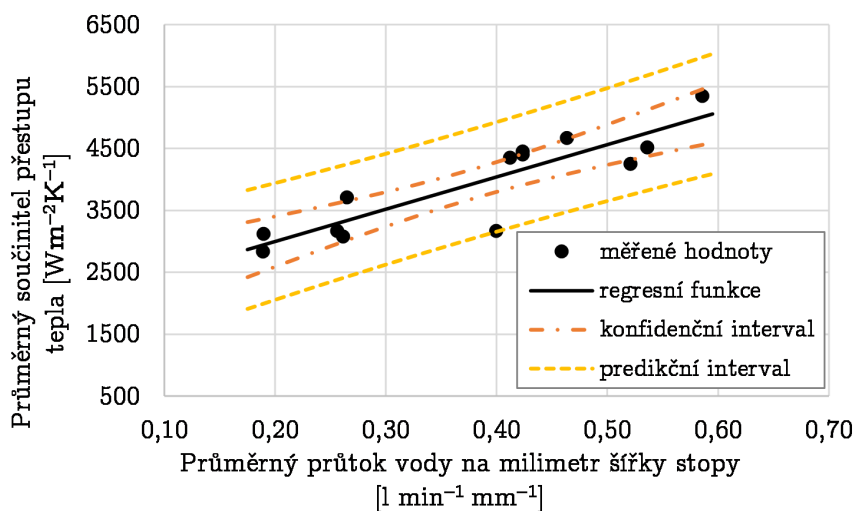
V návaznosti na předchozí experimenty bylo realizováno 14 experimentů určujících průběh součinitele přestupu tepla pro jednotlivé vybrané konfigurace. Při výpočtu průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy trysky byl použit odhad průtoku vody dle katalogového listu trysky. Šířka stopy trysky byla stanovena experimentálně z měření impaktního tlaku.

Graf 4.5 ukazuje závislost průměrného součinitele přestupu tepla na průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy vodního paprsku. Tento parametr mimo výšku trysky zohledňuje i úhel rozstříku a průtok trysky a umožňuje výsledky jednotlivých experimentů porovnávat mezi sebou. Trysky 1, 2, 5 a 6 popisují oblast průtoků od 0,17 do 0,60 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Tryska 8 reprezentuje průtoky vyšší, průměrný součinitel přestupu tepla je ovšem nižší, než by se dalo předpokládat s ostatních experimentů.



Obrázek 4.5: Graf závislosti průměrného součinitele přestupu tepla na průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy vodního paprsku

Pro případ rozpadu struktury na drobné vodní kapičky lze výsledky 13 experimentů Trysek 1, 2, 5 a 6 vzájemně korelovat. Graf na obrázku 4.6 ukazuje výsledky regresní analýzy této skupiny experimentů. Černou barvou jsou označeny jednotlivá měření a příslušná regresní funkce.



Obrázek 4.6: Graf regresní závislosti průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky

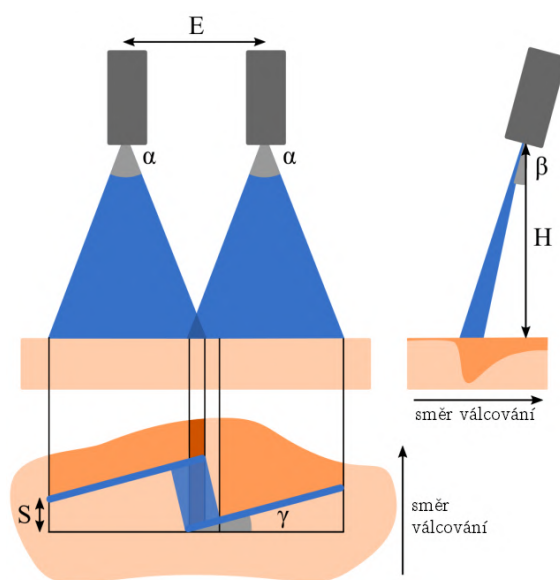
Průměrný součinitel přestupu tepla pro tuto skupinu měření lze vyjádřit v závislosti na průtoku a šířce stopy trysky následující regresní rovnicí

$$h_p = 5\,215,9 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 1\,954,8 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right],$$

kde Q_{exp} označuje vypočítaný průtok tryskou při experimentálně nastaveném tlaku p_{exp} a l_{exp} označuje experimentálně změřenou šířku stopy vodního paprsku. Tato regresní rovnice popisuje přibližně 75 % variability této skupiny 13 experimentů.

4.4 Studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků

Čtvrtý cíl práce se zaměřuje především na oblast překryvu trysek a tvorbu tzv. washoutu¹, kde dochází k redukci tlaku z důvodu interference trysek. Jako hlavní faktory ovlivňující tuto oblast jsou vybrány tlak trysky a tzv. přesazení trysek. Obrázek 4.7 ilustruje zcela obecnou konfiguraci trysek, parametr přesazení trysek je označen S . Tlak, při kterém pracují trysky, je tou nejnáze měnitelnou veličinou, kterou lze v rámci optimalizace celého procesu měnit, a je proto důležité analyzovat, zda se změnou tlaku zároveň nerozšiřuje i oblast tzv. washoutu. Přesazení trysek ve směru válcování je čistě laboratorní koncept, který usnadňuje rozšíření či redukování části washoutu a vytvoří tak lineární nárůst tlaku na dostatečně dlouhém úseku, který bude vhodný pro verifikaci, zda na tomto úseku může docházet i k horší odkujitelnosti povrchu.



Obrázek 4.7: Standardní označení konfigurace trysek

¹Tento termín byl převzat z angličtiny, kde se běžně v zahraniční literatuře vyskytuje. V textu dizertace je toto označení ponecháno, neboť český ekvivalent tohoto termínu neexistuje a český překlad tohoto slova by byl více než jednoslovný a jeho použití by výrazně snížilo srozumitelnost práce.

4.4.1 Impaktní tlak trysek

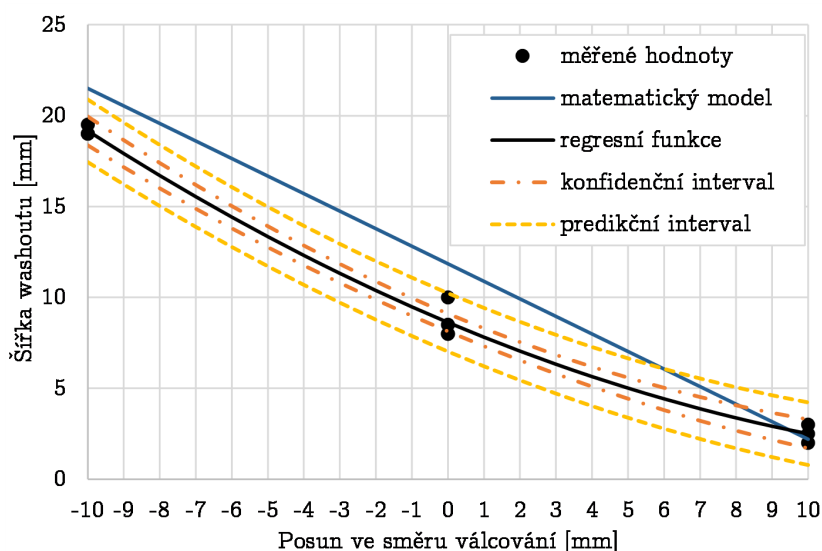
Série experimentů impaktních tlaků byla určena dle měření. Plán se odvíjel od tzv. základní konfigurace. Všechny konfigurace trysek mají společnou rozteč, výšku trysky i úhly natočení. Základní (středová) konfigurace má nulové přesazení, obě trysky jsou tedy umístěny vedle sebe v řadě, a operuje s tlakem 20 MPa. Další experimenty zkoumají variaci tlaku při 10 MPa a 40 MPa a variaci přesazení trysek ± 10 mm.

Vliv tlaku na šířku libovolného měřeného úseku nebyl statisticky prokázán. P hodnota pro tento parametr se v modelech zahrnujících kvadratickou i lineární složku pohybovala v rozmezí 0,15 až 0,8. Pokud bychom i přesto tuto závislost chtěli modelovat, byl by vliv tlaku na výslednou šířku úseků v řádech jednotek procent. Lze tedy předpokládat, že tlak nehraje statisticky významnou roli a dále se budeme zabývat pouze vlivem přesazení trysek.

Při konfiguracích bez přesazení se šířka washoutu pohybovala mezi 8 až 10 mm. Přesazení o -10 mm způsobilo zkrácení šířky na 2 až 3 mm, zvětšení přesazení na 10 mm naopak rozšířilo washout až na 19 až 19,5 mm. Regresní model potvrdil, že přesazení má vliv na šířku washoutu a to jak lineárně, tak kvadraticky. Lineární i kvadratický člen regresní rovnice byly shledány jako statisticky významné. Regresní rovnici lze vyjádřit následovně

$$W_{exp} = 0,02208 \cdot S^2 - 0,8333 \cdot S + 8,625; \quad [\text{mm}]$$

kde S označuje přesazení trysky v milimetrech. Koeficient determinace byl 0,99. Výsledná regresní funkce je na obrázku 4.8. Regresní funkce je zobrazena černě. Modře je označen odhad geometrického modelu.



Obrázek 4.8: Regresní funkce washoutu v závislosti na přesazení a odhad geometrického modelu

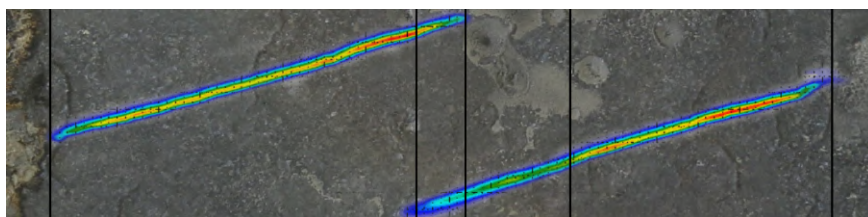
4.4.2 Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení měly za cíl prokázat, že může dojít ke kvalitativnímu rozdílu mezi

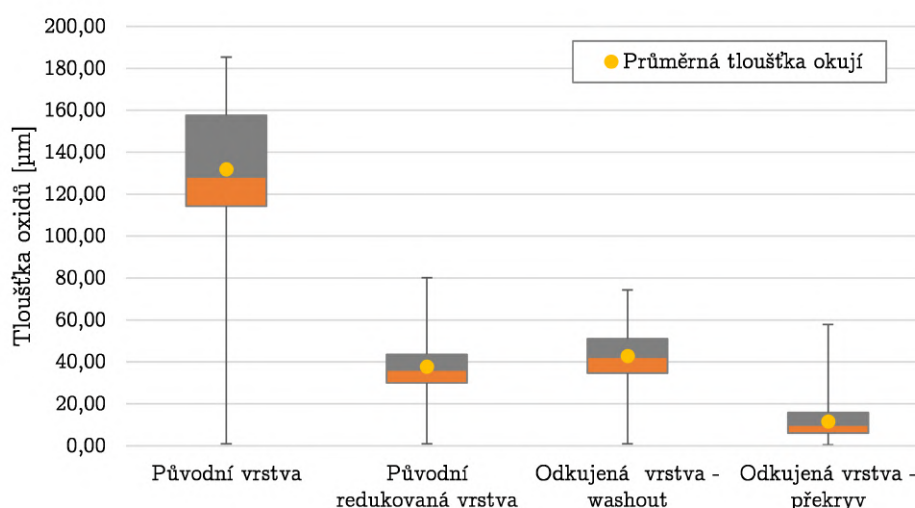
oblastí washoutu, překryvu a povrchu, který je standardně ostříkovaný pouze jednou tryskou. Byla vybrána konfigurace trysek s přesazením –10 mm šířka washoutu byla nejširší.

Při experimentu Q406 s ocelí HDT580X (1.0936) docházelo k rozbíjení vrchní vrstvy okují na menší kusy. Díky tomuto rozdrobení bylo možné vyhodnotit vliv v jednotlivých částech ostříkávaného povrchu. V oblasti washoutu zde docházelo k redukci tlaku a větší část z okují, které vznikaly na povrchu, zde nebyla odstraněna. Nejvýraznějšího efektu bylo docíleno v experimentu Q406. Obrázek 4.9 ukazuje výsledek experimentu s naznačenými stopami impaktního tlaku v dolní části obrázku. Změna povrchu byla pozorovatelná pouhým okem. Deska byla následně rozříznuta a výsledný rozdíl tloušťky zbývajících okují byl analyzován na mikroskopu.

Mikroskop potvrdil, že mezi oblastí washoutu a povrchem standardně ostříkovaným pouze jednou tryskou může dojít k rozdílné kvalitě odstraňování okují. V oblasti washoutu se tloušťka vrstvy okují pohybovala mezi 0 až 74 μm , průměrná hodnota tloušťky vrstvy byla 43 μm . V oblasti, kde tlak trysky nebyl negativně ovlivněn, se tloušťka vrstvy pohybovala mezi 0 až 58 μm , průměrná hodnota tloušťky vrstvy byla 12 μm . Tyto výsledky shrnuje krabicový graf na obrázku 4.10. Nebyl shledán statisticky významný rozdíl mezi oblastí, kde byla původní vrstva redukována prostým odloupením, a oblastí washoutu trysek.



Obrázek 4.9: Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I406 na oceli HDT580X při době oxidace 120 minut



Obrázek 4.10: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují oceli HDT580X po 120 minutách oxidace při teplotě 1200°C při experimentu Q406

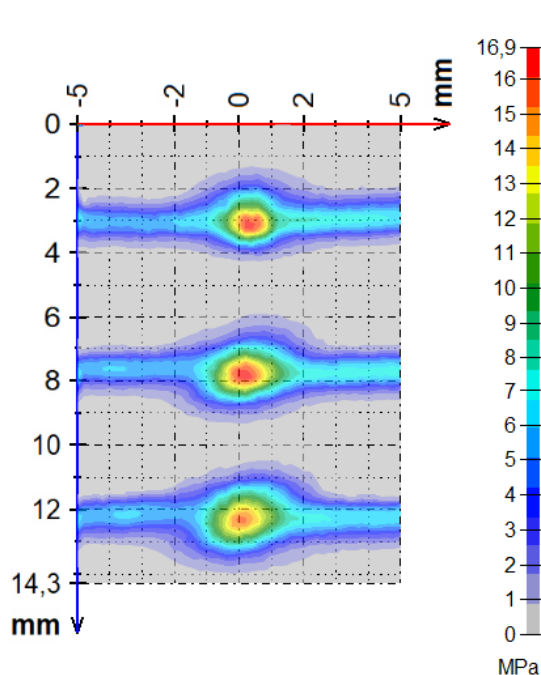
4.5 Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek pro potlačení nehomogenity odkujení v oblasti překryvu

Pátý cíl dizertační práce navazuje na cíl předchozí, tentokrát se ale zaměřuje přímo na pás překryvu vodních paprsků, tedy místo, které je ostříkáváno oběma vodními paprsky současně. Tento pás je velmi úzký, ale může zde docházet k největší nehomogenitě při odkujování. Základní konfigurace tohoto cíle pokládá úhel γ roven nule a zkoumá vliv malých variací tohoto úhlu.

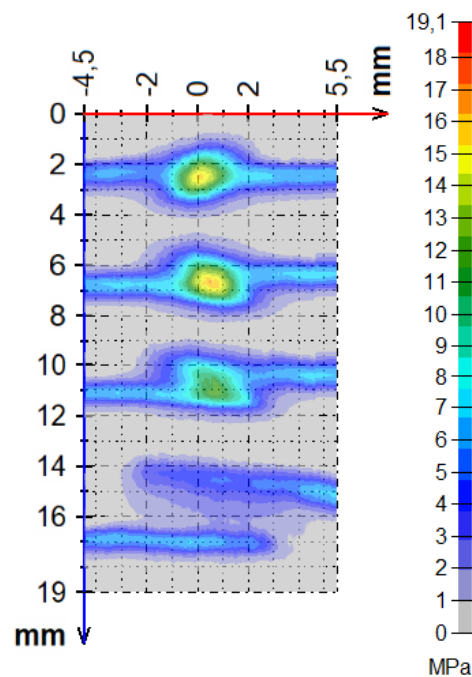
4.5.1 Impaktní tlak trysek

S Tryskou 5 bylo realizováno široké spektrum experimentů. Všechny experimenty mají nastavenou jednotnou výšku trysky 55 mm a jednotný úhel náklonu 15° .

Lze porovnat vliv změny rozteče trysek na rozložení impaktního tlaku v překryvu. Trojice experimentů na obrázku 4.11 se liší pouze roztečí. Mezi experimenty lze pozorovat jen minimální rozdíly, přestože by vypočtená oblast překryvu měla být 5,4 mm (resp. 2,4 mm a $-0,6$ mm). Toto pozorování lze vysvětlit povahou srážky paprsků v překryvu. Tato srážka je dynamická a výsledek tedy nemůže být pouhým algebraickým součtem tlaků, dochází zde naopak k deformaci vodního paprsku již nad povrchem.



Obrázek 4.11: Vliv rozteče 43 mm (nahore), 46 mm (uprostřed) a 49 mm (dole) na rozložení impaktního tlaku



Obrázek 4.12: Vliv úhlu natočení na rozložení impaktního tlaku. Odshora 0° ; $0,4^\circ$; $1,25^\circ$ a $2,5^\circ$

Pokud u základní konfigurace naopak budeme měnit úhel natočení, bude docházet k postupné redukci tohoto maxima. Obrázek 4.12 ukazuje rozložení impaktních tlaků u jednotlivých experimentů. Při zvyšujícím se úhlu natočení dochází k postupnému míjení paprsků. Při úhlu

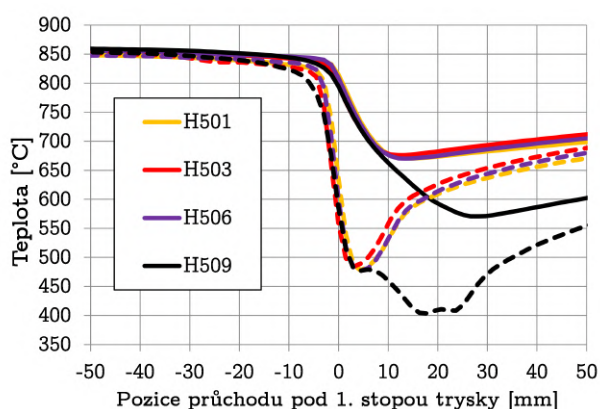
natočení $2,5^\circ$ se pak paprsky zcela minou a je názorně vidět teoreticky vypočtená šířka oblasti překryvu trysek. V tomto případě se i impaktní profil konfigurace stane v této oblasti téměř konstantním.

4.5.2 Součinitel přestupu tepla

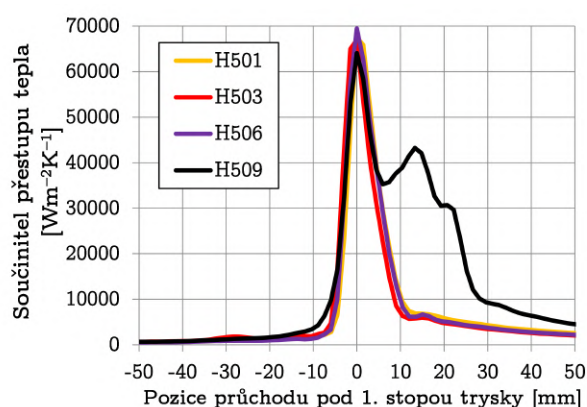
Byly realizovány čtyři experimenty zkoumající součinitel přestupu tepla jednotlivých konfigurací. Opět byla testována základní konfigurace trysek. Dále byla doplněna o experiment, který zkoumal vliv zvětšení rozteče trysek na součinitel přestupu tepla v oblasti překryvu. Třetí experiment naopak u původní základní konfigurace upravil úhel natočení na $2,5^\circ$. Poslední experiment zkoumal konfiguraci s úhlem natočení 15° . Všem experimentům byla nastavená společná rychlost posuvu $0,5$ m/s.

Teploty měřené termočlánkem a vypočítané teploty na povrchu vzorku jsou v závislosti na pozici vzorku zobrazeny v grafu 4.13. Teploty změřené termočlánkem jsou vykresleny plnou čarou, teploty vypočtené inverzním algoritmem čarou přerušovanou. Každému experimentu je pro přehlednost přiřazena jednotná barva. Odpovídající hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici vzorku jsou uvedeny v grafu 4.14.

První tři experimenty vykazovaly téměř identický průběh. Neprokázal se žádný významný vliv malé změny rozteče či malého úhlu natočení na průměrnou hodnotu součinitele přestupu tepla. Naopak došlo k výraznému nárůstu této hodnoty, pokud byl úhel natočení konfigurace nastaven na 15° . Na grafu 4.14 je tento experiment zcela odlišný od ostatních díky dvěma výrazným maximům. Tato maxima jsou od sebe vzdálena 13 mm, což odpovídá vzdálenosti stop vodního paprsku. První maximum dosahuje až $64\ 000$ W/(m²·K), přestože odpovídá redukovánému impaktnímu tlaku. Vlivem odrazu vody v překryvu dochází k intenzivnímu chlazení v celém tomto úseku. Následně dochází k postupnému poklesu součinitele přestupu tepla na minimální hodnoty.



Obrázek 4.13: Průběh teploty měřené termočlánkem (plná čára) a vypočítané teploty na povrchu (přerušovaná čára) v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky



Obrázek 4.14: Průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky.

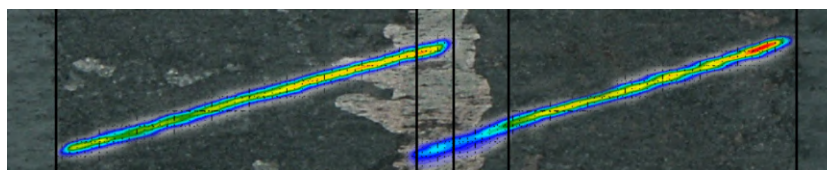
4.5.3 Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení měly za cíl prokázat, že může dojít ke kvalitativnímu rozdílu mezi oblastí překryvu a povrchu, který je standardně ostříkáváný pouze jednou tryskou. Hlavní parametry prezentovaných experimentů jsou shrnuty v tabulce 4.4.

Tabulka 4.4: Seznam experimentů Q5XX

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Přesazení [mm]	Rozteč [mm]	Výška trysky [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Rychlost vzorku [m/s]	Materiál	Čas oxidace [min]	Předehřev [°C]	Teplota oxidace [°C]
Q509a	5	15	0	43	55	15	15	2	54SiCr6	80	990	950
Q511	4	40	0	43	75	0	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200
Q512	4	40	0	43	75	2,5	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200

U experimentu Q509a byla zvolena nižší teplota oxidace za účelem větší drobitosti okují a také aby docházelo k pomalejšímu nárůstu okují a bylo zamezeno vzniku fayalitu. Výsledek experimentu ukazuje obr. 4.15. V tomto případě došlo k odstranění okují v oblasti překryvu trysek. Průměrná výška zbytkových okují byla 1 μm . Oblast, která byla ostříkána pouze jednou tryskou ovšem vykazovala průměrnou výšku okují 32 μm (resp. 31 μm v druhé polovině oblasti). Mimo oblast ostříku byla průměrná výška okují pro jednotlivé oblasti mezi 36 až 49 μm . V oblasti tzv. washoutu docházelo k odstranění okují ve zhruba polovině této oblasti, přestože zde byl tlak vodního paprsku redukováný. Tento fakt byl způsoben především tím, že se vytvořené okuje odlupovaly z povrchu v malých lupíncích, které z oblasti překryvu trysek zasahovaly i do sousední oblasti washoutu.



Obrázek 4.15: Výsledek experimentu Q509a na oceli křemíkové 54SiCr6 při úhlu natočení 15°

Experiment Q511 byl proveden s Tryskou 4 a konfigurací s úhlem natočení 0°. Byla použita ocel HDT580X, pro kterou se při stejných parametrech oxidace potvrdil rozdílný vliv na okuje v oblasti washoutu v rámci experimentu Q406. Tato ocel a parametry oxidace měly tedy i zde poměrně dobrý předpoklad pro prokázání vlivu úhlu natočení kvalitu odkujení. Experiment nepotvrdil, že by v oblasti překryvu trysek docházelo k odlišné kvalitě odkujení. V celé ostříkávané ploše byla průměrná výška zbytkových okují 7 μm . Směrodatná odchylka měření byla 3,9 μm .

Experiment Q512 navázal na experiment Q511. V konfiguraci došlo pouze ke změně úhlu natočení na $2,5^\circ$ tak, aby nedošlo ke srážce vodních paprsků nad povrchem vzorku. I jako v případě předchozího experimentu, nebyl pozorován rozdíl v kvalitě odkujení mezi jednotlivými oblastmi. Průměrná výška zbytkových okujů byla $6,8 \mu\text{m}$. Směrodatná odchylka měření byla $3,3 \mu\text{m}$.

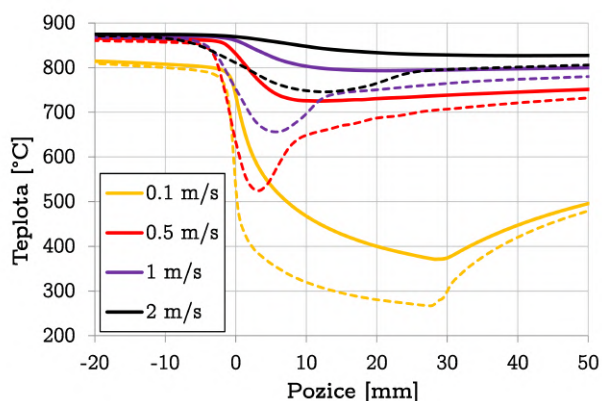
4.6 Studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla

Poslední bod dizertační práce zkoumá vliv rychlosti posuvu válcované oceli na součinitel přestupu tepla. V rámci dizertační práce bylo realizováno 14 experimentů. Pro všechny experimenty byla nastavena jednotná teplota ohřevu $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Trysky 1,2,5 a 6 byly testovány při rychlostech, které se mohou v běžném provozu vyskytnout na trati. Konkrétně se jednalo o rychlosti $0,5 \text{ m/s}$, 1 m/s a 2 m/s .

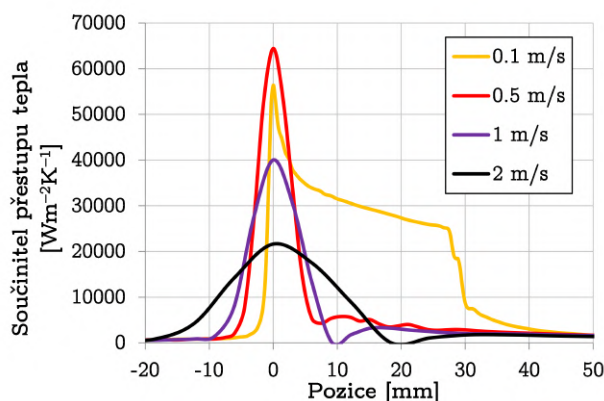
Výška trysek byla stanovena tak, aby vypočítaný průtok vody na 1 mm šířky stopy trysky byl přibližně stejný a aby v rámci měření trysek mohlo dojít vždy k porovnání páru mezi sebou. Při výpočtu průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky byl použit odhad průtoku vody dle katalogového listu trysky. Pro přehlednou prezentaci výsledků byla vybrána pouze Tryska 5.

Tryska 5 byla měřena při rychlostech $0,1 \text{ m/s}$, $0,5 \text{ m/s}$, 1 m/s a 2 m/s . Průběh teploty, závislé na pozici vzorku, měřené termočlánkem je zobrazen na obrázku 4.16.

Na obrázku je dále zobrazena i teplota na povrchu vzorku, vypočtená pomocí inverzního algoritmu. Každé rychlosti je přiřazena jedna odpovídající barva. Teplota měřená termočlánkem je označena plnou čarou. Vypočtená teplota na povrchu je označena čárkovaně. Příslušný součinitel přestupu tepla je zobrazen v grafu na obrázku 4.17.



Obrázek 4.16: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5



Obrázek 4.17: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5

V důsledku různých rychlostí pohybu vzorku dochází v rámci měření a výpočtů k různé míře tzv. rozmazání dat, což má za následek, že nelze porovnávat jednotlivé průběhy chlazení pomocí maxima daných křivek v grafu. Lze nicméně konstatovat, že z měření pro všechny měřené

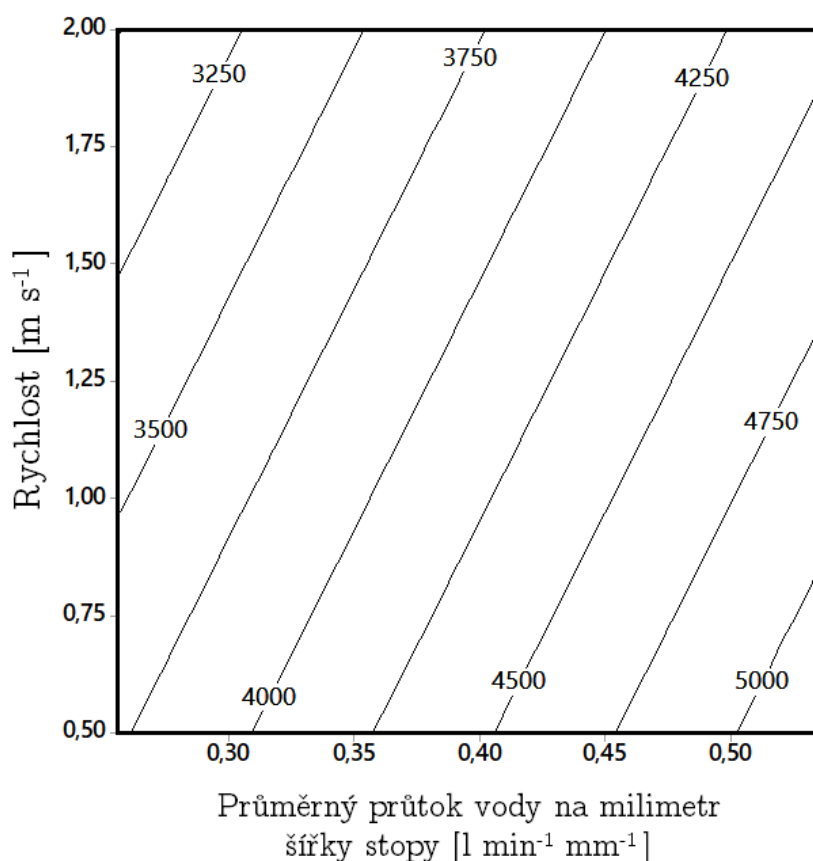
typy trysek a rychlosti 0,5 m/s, 1 m/s a 2 m/s lze charakterizovat průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici jako funkci s jedním výrazným maximem. Na obou stranách tohoto maxima pak dochází k rychlému poklesu na hodnoty řádově nižší.

Pro lepší porovnatelnost měření je dále zavedena veličina tzv. průměrného součinitele přestupu tepla, která se vypočítá jako průměrná hodnota úseku mezi pozicí -50 a 50 mm.

Z výsledků experimentů lze regresní analýzou určit i společnou závislost průměrného součinitele přestupu tepla na rychlosti posuvu a na průměrném průtoku vody na milimetr šířky stopy. Analýza ukázala, že koeficienty příslušející členům druhého řádu v rovnici nejsou statisticky významné. Závislost lze tedy kvalitně modelovat jako plochu

$$h_p = 5180 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} - 487v + 2643 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right].$$

Koeficient determinace byl 0,94. Graf kontur regresní plochy je na obr. 4.18.



Obrázek 4.18: Graf kontur regresní plochy určující závislost průměrného součinitele přestupu tepla $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky a rychlosti posuvu

ZÁVĚR

Z výše uvedených výsledků práce lze pro průmyslovou praxi doporučit zavedení následujících opatření:

1. Při výběru trysek určených pro odkujovací sekci zvolit nejdelší možné stabilizátory, které výrobce dodává a které technicky vyhoví příslušnému řešení instalovaných trysek. Stabilizátory kontrolovat v pravidelných intervalech. Stabilizátory, které byly v provozu po dobu 6 měsíců snížily maximální průměrný impaktní tlak až o 32 %, je proto vhodné dělat kontroly častější. V případě poškození postačí vyměnit pouze stabilizátor. U samotného těla trysky nebylo v experimentech ani po 6 měsících zaznamenáno výrazné poškození.
2. Úhel natočení trysek γ volit v intervalu od 0° do 5°. Toto nastavení zajistí proces blízky homogennímu odkujení po celé šířce odkujovací sekce. Vzhledem k přesnosti nastavení tohoto úhlu v průmyslu stačí mít tento úhel přibližně pro všechny trysky stejný. Tímto nastavením se značně redukuje šířka oblasti tzv. washoutu.
3. Rozteč trysek volit tak, aby oblasti na povrchu, které jsou současně ostříkávány dvěma tryskami, představovaly do 10 % celé ostříkované šířky. Vzhledem k parabolickému tvaru vodního paprsku a tlakové ztrátě na okrajích paprsku není vhodné toto procento volit ani příliš nízké.

Autorka se podílela na tvorbě třinácti publikací, z nichž nejvýznamnější je publikace v časopise *Thermal science* (IF(2017)=1,431):

POHANKA, Michal, VOTAVOVÁ, Helena, RAUDENSKÝ, Miroslav, HWANG, J. Y., YOU, J. W., LEE, S. H. The effect of water temperature on cooling during high pressure water descaling. *Thermal Science*. 2017. No. 00, pp. 163–173. ISSN: 0354-9836. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI160209163P>

REFERENCE

- [1] BENEŠOVÁ, Soňa a BERNÁŠEK, Vladimír. *Technologie tváření, slévání a svařování*. Fakulta strojní ZČU v Plzni, 2014. ISBN 978-80-261-0449-0.
- [2] BLAZEVIC, D. T. *Hot strip mill operations, Volume V, Scale*. Sun Lakes, Arizona, USA, 2005.
- [3] BOHÁČEK, Jan a HORÁK, Aleš. Numerical study of droplet dynamics impinging onto steel plate covered with scale layer. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. 2010. Vol. 5, No. 4, pp. 389–398.
- [4] *Bohdan Bolzano*. Technické listy oceli 54SiCr6 Bohdan Bolzano [online] Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN%2010089/MOP_54SiCr6_1.pdf.
- [5] BRESLAVKSY, D. European Steel and Alloy Grades [online] Dostupné z: <http://www.steelnumber.com>.
- [6] CASTREJÓN-GARCÍA, R., et al. The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops. *Revista mexicana de física*. 2011. Vol. 57, pp. 266–275.
- [7] ČARNOGURSKÁ M., PŘÍHODA M., HAJKR Z., PYSZKO R. a TOMAN Z. THERMAL EFFECTS OF A HIGHPRESSURE SPRAY DESCALING PROCESS. In: *Materiali in tehnologije = Materials and technology / Institut za Kovinske Materiale in Tehnologije*. 2014. Vol. 48, No. 3, pp. 389–394.
- [8] FRICK, Jürgen W. Optimisation of Nozzle Arrangements on Descaling Headers. In: *4th International Conference on Hydraulic Descaling*, London. 2003.
- [9] HRABOVSKÝ, Jozef. *Kvantifikace mechanismů hydraulického odstranění okují*. Brno: VUT v Brně 2013. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [10] CHEN, R. Y., YEUN, W. Y. D. Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen. *Oxidation of metals*. 2003. Vol. 59, No. 5–6, pp. 433–468.
- [11] RAUDENSKÝ, Miroslav. *Hydraulické odstranění okují = Hydraulic descaling*. Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3621-3.
- [12] ŠČUČKA, Jiří, ZELENÁK, Michal, FOLDYNA, Josef, LEHOČKÁ, Dominika a VOTAVOVÁ, Helena. Visualisation and quantitative analysis of flat continuous water jet structure. In: *Vodní Paprsek 2015 – Výzkum, vývoj, aplikace, Water Jet 2015 – Research, Development, Application*. Prešov: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2015. pp. 195–205. ISBN: 978-80-86407-56-2.
- [13] VAVŘEČKA, Lukáš. *Vliv parametrů vysokotlakého ostříku na kvalitu odkujení*. Brno: VUT v Brně 2011. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [14] *World Steel in Figures [online]*. World Steel Association, 2018. ISBN 978-2-930069-89-0. [vid. 13.1.2019] Dostupné z: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje

Datum narození: 2.9.1989
Místo narození: Brno
Trvalé bydliště: Berkova 57, Brno, 612 00
E-mail: Helena.Votavova@vut.cz
Rodinný stav: vdaná

Vzdělání

2014–2019 **VUT v Brně**, Fakulta strojíního inženýrství, Obor Inženýrská mechanika (postgraduální studium)
2018 **IGIP**, Certifikát Mezinárodního učitele technických předmětů
2015–2016 **VUT v Brně**, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Doplňující pedagogické studium (zakončeno SZZ)
2012–2014 **VUT v Brně**, Fakulta strojíního inženýrství, Obor Matematické inženýrství (Cena rektora VUT v Brně)
2012–2014 **Universtà degli Studi dell’Aquila**, Italy, Department of Information Engineering, Computer Science and Mathematics (Double Diploma), ukončeno s vyznamenáním 110/110
2009–2012 **VUT v Brně**, Fakulta strojíního inženýrství, Obor Matematické inženýrství (Cena Josefa Hlávky, Cena děkana FSI VUT v Brně)

Studijní pobyty

9/2012–7/2013 **Universtà degli Studi dell’Aquila**, Italy, Department of Information Engineering, Computer Science and Mathematics

Pracovní zkušenosti

2014–2018 **FSI VUT v Brně**, Laboratoř přenosu tepla a proudění, technik (od 2016 MD/RD)
2015 **SC&C Partners, spol. s r.o.**, Externí přednášející na workshopech o statistice
2014 **CDV v.v.i.**, statistické zpracování a modelování dat
2011–2017 **FSI VUT v Brně**, Senátor ve Studentské komoře AS FSI
2009–2018 **FSI VUT v Brně**, Organizátor a spoluautor Internetové matematické olympiády

Další schopnosti a dovednosti

Jazykové znalosti: Angličtina C1; Němčina B1; Italština A2
Řidičské oprávnění: skupina B
PC dovednosti: MATLAB, R, Minitab, python, L^AT_EX, MS Office

ABSTRAKT

Práce shrnuje základní a aktuální poznatky v oblasti odstraňování okují při kontinuální výrobě oceli za tepla s využitím vysokotlakého vodního paprsku a navrhuje další zefektivnění tohoto procesu v průmyslové výrobě.

První část práce se zabývá vznikem, strukturou a fyzikálními vlastnostmi okují. Druhá část popisuje samotné principy odstraňování okují s využitím vysokotlakého vodního paprsku. Třetí část se věnuje popisu konkrétních typů experimentů, sloužících ke studiu vysokotlakého vodního paprsku. Čtvrtá část se věnuje popisu provedených experimentů a jejich vyhodnocení a představuje tak těžiště dizertační práce. Je rozdělena na šest sekcí, které samostatně řeší předem definované cíle dizertační práce.

První sekce praktické části se zaměřuje na vývoj výšky a struktury okují u ocelí 54SiCr6 a HDT580X. Bylo prokázáno, že výška vytvářených okují roste s časem a teplotou oxidace. Zároveň byla ověřena vrstevnatá povaha vytvářených okují.

Druhá sekce zkoumá vliv změny stabilizátoru trysky na fokusaci a rozložení impaktního tlaku trysky. Bylo prokázáno, že lze dosáhnout zvýšení průměrného maximálního tlaku trysky až o 11 %, v závislosti na typu trysky a délce stabilizátoru.

Třetí sekce se zabývá analýzou stínografických fotografií struktur vodních paprsků u odkujovacích trysek. V rámci dizertační práce byl vyvinut skript pro analýzu těchto fotografií pomocí adaptivního prahování. Zjištěné poznatky jsou korelovány pomocí regresní analýzy s průměrným součinitelem přestupu tepla. U většiny navržených standardních konfigurací trysek dochází ve výšce válcovaného povrchu k rozpadu vodního proudu na drobné kapky.

Čtvrtá sekce se věnuje oblasti překryvu vodních paprsků, především pak oblasti tzv. washoutu, kde je impaktní tlak jedné trysky redukován proudem trysky druhé. Je zkoumán vliv změny tlaku a vzájemného přesazení odkujovacích trysek. Analýza prokázala, že změna tlaku nemá statisticky vliv na procentuální redukci impaktního tlaku v oblasti washoutu. Bylo prokázáno, že pokud je oblast washoutu široká, může docházet ke snížení efektivity odstraňování okují v této oblasti.

Pátá sekce navazuje na sekci předchozí a zaměřuje se přímo na oblasti překryvu vodních paprsků. Je zkoumán vliv změny natočení a rozteče páru odkujovacích trysek. Experimenty ukázaly, že malé změny rozteče trysek nemají významný vliv na impaktní tlak a součinitel přestupu tepla. Vliv natočení trysek naopak představoval významný faktor pro efektivitu a homogenitu odkujení povrchu.

Poslední sekce se zabývá vlivem rychlosti válcovací tratě na součinitel přestupu tepla při procesu odstraňování okují. S využitím regresního modelu bylo prokázáno, že s vyšší rychlostí válcování dochází ke snížení průměrného součinitele přestupu tepla.

Závěr práce shrnuje konkrétní výsledky dizertační práce a jsou navrženy kroky, kterými lze v průmyslu zefektivnit proces odstraňování okují

ABSTRACT

The thesis summarizes general and up-to-date knowledge of descaling during the continuous production of the hot-rolled steel and proposes further streamlining of this process in industrial production.

The first chapter of the thesis deals with the origin, structure and physical properties of the scales. The second chapter describes the principles of descaling by using a high pressure flat water jet. The third chapter introduces the principles of the experimental methods and describes the used laboratory equipment. The fourth chapter summarizes the description of the particular experiments and their evaluation, and thus represents the focus of the dissertation. It is divided into six sections which independently solve predefined objectives of the dissertation.

The first section focuses on the height and structure development of the scales on 54SiCr6 and HDT580X steels. It has been proven that the height of the formed scales increases with the time and temperature of the oxidation. The layered nature of the scales was verified at the same time.

The second section examines the effect of the nozzle stabilizer on the focussing and distribution of the impact pressure of the nozzle. Experiments have shown that increase of 11 % of an average maximum nozzle pressure can be achieved, depending on the type of nozzle and the length of the stabilizer.

The third section deals with the analysis of shadowgraphy images of water jet structures of the nozzles. A script was developed for analysis of these shadowgraphy photos by an adaptive thresholding. The findings are correlated using a regression analysis with an average heat transfer coefficient. It has been reported that most of the standard nozzle configurations produced disintegrated stream of little droplets at the height of the rolled surface.

The fourth section focuses on the area of water jet overlap, especially the area of the so-called washout, where the impact pressure of one nozzle is reduced by the nozzle stream of the other. The influence of the pressure change and the mutual displacement of the nozzles is investigated. The analysis showed that the change of pressure did not have any effect on the percentage of reduction of the impact pressure in the area of the washout. It has been shown that if the area of the washout is wide the descaling efficiency in this area may be reduced.

The fifth section builds on the previous section and focuses directly on the areas of waterjet overlaps. The influence of the change of rotation and pitch of the nozzles is studied. Experiments have shown that small changes in nozzle pitch do not have a significant impact on impact pressure and heat transfer coefficient. The effect of nozzle rotation, on the other hand, was a significant factor for the efficiency and homogeneity of the descaling of the surface.

The last section deals with the effect of the rolling speed on the heat transfer coefficient in the descaling process. The regression model has shown that with a higher rolling speed there is a reduction in the average heat transfer coefficient.

Conclusion summarizes the results of the dissertation and proposes which findings can be used in the industry to make the descaling process more effective.