



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

# VLIV ZBYTKOVÉ VODY A DALŠÍCH VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ NA INTENZITU CHLAZENÍ PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ OCELI

THE INFLUENCE OF REMAINING WATER AND OTHER SIGNIFICANT FACTORS ON COOLING INTENSITY  
DURING HEAT TREATMENT OF STEEL

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Resl

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.

BRNO 2022





## ABSTRAKT

Na celém světě se každoročně vyrobí sta miliony tun surové oceli, která se dále zpracovává především válcováním za tepla. Aby koncové produkty dosahovaly požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, je nutné řídit proces chlazení během tepelného zpracování. Chlazení je ovlivněno mnoha faktory a optimální nastavení intenzity chlazení je tudíž velmi komplikované. Pro správné nastavení chlazení je zásadní znalost vlivu jednotlivých faktorů. Tato práce se zabývá studiem vlivu kvality povrchu (drsnost povrchu, přítomnost oxidů) na intenzitu chlazení a problematikou zbytkové vody. Pojmem zbytková voda se rozumí tenká vodní vrstva, která po ostříku zůstává na ochlazovaném povrchu. V rámci práce je experimentálně zkoumán vliv drsnosti a přítomnosti oxidů na chlazení pohyblivých ocelových povrchů při použití různých typů ostříků. K posouzení vlivu těchto parametrů je chlazení zkoumáno na třech typech povrchů (válcovaný, broušený, zoxidovaný) a výsledky jsou následně analyzovány. Experimentálně je také zkoumán vliv zbytkové vody na chlazení. I v tomto případě jsou použity různé typy ostříků a povrchů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelné zpracování oceli, zbytková voda, sprchové chlazení, laminární chlazení, drsnost povrchu, oxidy, součinitel přestupu tepla, hustota tepelného toku

## ABSTRACT

Hundreds of millions tons of crude steel are produced worldwide every year. The crude steel is further processed mainly by hot rolling. It is necessary to control cooling process during heat treatment to achieve the required mechanical and physical properties of final products. Cooling is influenced by many parameters and that is the reason why optimal cooling intensity setting is very complicated. Knowledge of the influence of individual factors is crucial for proper cooling. This work deals with the study of the influence of surface quality (surface roughness, presence of oxides) on cooling intensity and the issue of remaining water. The term remaining water means thin water layer that remains on the cooled surface after cooling. As part of the work the influence of surface roughness and oxide presence on cooling of the moving steel surfaces is experimentally investigated using different types of water cooling. To assess the impact of these parameters, cooling is investigated on three different types of surfaces (rolled, grinded, oxidized) and the results are analysed. The influence of the remaining water on cooling is also experimentally investigated. Again, the different types of water cooling and surfaces are used.

## KEYWORDS

Heat treatment of steel, remaining water, spray cooling, laminar cooling, surface roughness, oxides, heat transfer coefficient, heat flux density

RESL, Ondřej. *Vliv zbytkové vody a dalších významných faktorů na intenzitu chlazení při tepelném zpracování oceli*. Brno, 2022. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění. Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma „Vliv zbytkové vody a dalších významných faktorů na intenzitu chlazení při tepelném zpracování oceli“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele dizertační práce a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

Brno .....

.....

podpis autora



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Michalu Pohankovi, Ph.D. za užitečné rady, ochotu, trpělivost a pomoc nejen při vedení mé dizertační práce. Dále bych chtěl poděkovat celému kolektivu Laboratoře přenosu tepla a proudění, zvláště pak kolegům Ing. Janu Komínkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Chabičovskému, Ph.D. za přínosné konzultace a pomoc během celého mého studia. Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a mé nejmilejší Tereze za tvarohové koláče, ze kterých na mě nikdy moc nezbylo.

Ondřej Resl



# OBSAH

Vymezení cílů dizertační práce	11
Úvod	13
<b>1 Přenos tepla během tepelného zpracování oceli</b>	<b>15</b>
1.1 Vedení . . . . .	15
1.2 Konvekce . . . . .	16
1.3 Záření . . . . .	16
1.4 Var . . . . .	17
<b>2 Válcování za tepla</b>	<b>19</b>
2.1 Chlazení . . . . .	19
2.1.1 Laminární chlazení . . . . .	20
2.1.2 Sprchové chlazení . . . . .	21
2.1.3 Chlazení vodní clonou . . . . .	22
<b>3 Faktory ovlivňující chlazení při tepelném zpracování oceli</b>	<b>23</b>
<b>4 Popis provedených laboratorních měření chlazení</b>	<b>31</b>
<b>5 Vliv kvality povrchu na chlazení</b>	<b>35</b>
5.1 Stanovení drsnosti povrchu . . . . .	36
5.2 Sprchové chlazení . . . . .	37
5.3 Laminární chlazení . . . . .	50
5.4 Shrnutí získaných výsledků . . . . .	53
<b>6 Zbytková voda</b>	<b>55</b>
6.1 Úvod do problematiky . . . . .	55
6.2 Korelace pro porovnání s varem ve velkém objemu . . . . .	58
6.3 Experimentální měření . . . . .	59
6.3.1 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	60
6.3.2 Spodní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	68
6.3.3 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, broušený povrch . . . . .	74
6.3.4 Vrchní chlazení: tryska s plochým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	78
6.3.5 Porovnání vrchního a spodního chlazení . . . . .	82
6.3.6 Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu . . . . .	83
6.3.7 Porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem . . . . .	85
6.3.8 Chyby měření . . . . .	87
6.4 Shrnutí získaných výsledků . . . . .	89
<b>Závěr</b>	<b>91</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>93</b>
<b>Vlastní publikace</b>	<b>97</b>

Seznam použitých zkratek a symbolů	99
Seznam obrázků	101
Seznam tabulek	105
Seznam příloh	107
A Koefficienty z nelineární regrese při určování chladicích oblastí	109
B Rozložení tlaku dopadající vody trysek pro studium zbytkové vody	111



# VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cíle dizertační práce je možné na základě státní doktorské zkoušky formulovat do hlavních bodů následovně:

- Experimentální stanovení vlivu faktorů na intenzitu chlazení oceli, jejich analýza a zobecnění.
- Stanovení vlivu zbytkové vody na ochlazovaném povrchu na chlazení ocelových povrchů.



# ÚVOD

Každý rok se na celém světě vyrobí stovky milionů tun surové oceli, která se následně zpracovává válcováním za tepla, válcováním za studena, kalením a dalšími způsoby na požadované výrobky. S ocelovými produkty se setkáváme každý den všude kolem nás. Hojně se ocel využívá ve strojním či stavebním průmyslu, automobilovém průmyslu, ale využití nachází například také ve zdravotnictví. Mezi nejrozšířenější způsoby zpracování oceli patří válcování za tepla, při kterém je ocel zahřáta nad teplotu rekrytalizace a tudíž nedochází ke zpevnování materiálu během přetvoření. Finálními produkty jsou v tomto případě především plechy, tyče a trubky, kolejnice či profily různých tvarů.

Jestliže chceme, aby koncové produkty disponovaly požadovanými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, je nezbytné účinně řídit proces chlazení během tepelného zpracování. Vhodným chlazením lze navíc snížit spotřebu drahých přísad do oceli a vody, což snižuje výsledné náklady a rovněž přispívá k ochraně životního prostředí.

Chlazení je ovlivněno mnoha faktory. K nejvýznamnější patří zejména druh použitých trysek, množství dopadající vody, tlak vody, teplota ochlazovaného povrchu, teplota vody a rychlost ocelového pásu. Mezi další faktory, které rovněž ovlivňují průběh chlazení, se řadí například drsnost povrchu, přítomnost oxidů na ochlazovaném povrchu či zbytková voda, která po ostřiku zůstává na povrchu. Velké množství parametrů, které působí na průběh chlazení, způsobuje, že optimální nastavení intenzity chlazení je velmi komplikované. Z tohoto důvodu se i v dnešní době stále vyskytují problémy, které mohou vést k nežádoucím změnám v mechanických a fyzikálních vlastnostech koncových produktů. Aby bylo možné dosáhnout správného nastavení chlazení, je nutné znát vliv jednotlivých faktorů, které do procesu vstupují.

O nejvýznamnějších faktorech lze najít poměrně velké množství publikací, které zkoumají jejich vliv na intenzitu chlazení. Dalším faktorům však v literatuře není věnováno tolik pozornosti, ačkoli znalost jejich vlivu je rovněž důležitá pro správné nastavení chlazení. Tato práce se proto zabývá problematikou zbytkové vody a rovněž studiem vlivu drsnosti povrchu a přítomnosti oxidů na intenzitu chlazení.

V rámci práce je v laboratorních podmínkách experimentálně zkoumán vliv drsnosti a přítomnosti oxidů na chlazení při použití různých typů ostřiků (laminární proudy, spreje), které se dnes běžně využívají pro chlazení během válcování. K posouzení vlivu těchto parametrů je chlazení experimentálně zkoumáno na třech typech povrchů (válcovaný, broušený, zoxidovaný) a výsledky jsou následně analyzovány. Problematickou drsnosti povrchu a přítomností oxidů se již jiní autoři zabývali, nicméně prací na toto téma není mnoho a často se zabývají chlazením na stacionárním vzorku a nereflektují tak možný vliv rychlosti.

Další a velmi významnou částí práce je studium zbytkové vody a její vliv na chlazení. Pojmem zbytková voda se rozumí tenká vodní vrstva, která po ostřiku zůstává na ochlazovaném povrchu. Protože jde o velmi tenkou vrstvu, vyskytuje se nejen na vrchním povrchu, ale v důsledku povrchového napětí rovněž na spodním povrchu při chlazení zespodu. Zbytková voda může významně ovlivnit finální teplotu válcovaného povrchu pokud je požadovaná koncová teplota nižší než 500 °C. To potvrzují i výrobci oceli a jedná se tak o aktuální problém. I přes tato fakta relevantní publikace zabývající se touto problematikou zcela chybí. Cílem práce je proto rovněž posouzení vlivu zbytkové vody na chlazení ocelových povrchů.



# 1 PŘENOS TEPLA BĚHEM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELI

K přenosu tepla dochází vždy, existuje-li v prostředí nebo mezi prostředími teplotní rozdíl. Při válcování oceli za tepla dosahuje ochlazovaný povrch vysokých teplot a přenos tepla je zde realizován vedením, konvekcí, varem a zářením [13].

## 1.1 Vedení

Vedení tepla můžeme popsat jako přenos energie mezi částicemi vyvolaný interakcemi, ke kterým mezi jednotlivými částicemi dochází. Přenos je vždy realizován od částic s vyšší energií k částicím s nižší energií. V případě pevných látek dochází k přenosu vedením vlivem pohybu elektronů, které se pohybují mezi nehybnými molekulami. U kapalných a plynných látek je vedení realizováno pohybem molekul [13, 16].

Základní zákon popisující vedení tepla se nazývá Fourierův zákon a může být vyjádřen vztahem:

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T, \quad (1.1)$$

kde  $\dot{q}$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] je hustota tepelného toku,  $\lambda$  [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] je součinitel tepelné vodivosti a  $\nabla T$  je teplotní gradient. Fourierův zákon tedy říká, že hustota tepelného toku  $\dot{q}$  je přímo úměrná teplotnímu gradientu  $\nabla T$  ve směru toku tepla, přičemž konstanta úměrnosti je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [13, 16].

Hlavním cílem analýzy vedení tepla je určit rozložení teploty ve zkoumaném materiálu (tělese). Výsledné teplotní pole se odvíjí od podmínek na hranicích materiálu a případného generovaného tepla. V případě homogenního materiálu bez vnitřního pohybu a rozložení teploty  $T(x, y, z)$ , které je vyjádřeno v kartézských souřadnicích, je vedení tepla popsáno rovnicí:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.2)$$

kde  $T$  [K] je teplota,  $\dot{Q}$  [ $\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ] je teplo generované v materiálu,  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je hustota materiálu,  $c_p$  [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita materiálu za konstantního tlaku a  $t$  [s] je čas. Vyřešíme-li rovnici (1.2), obdržíme rozložení teploty  $T(x, y, z)$  v závislosti na čase. Rovnice vedení tepla je parciální diferenciální rovnice druhého řádu vzhledem k prostorovým souřadnicím  $x, y, z$  a prvního řádu vzhledem k času. Pro získání řešení je tudíž nutné zadat jednu počáteční podmínku a dvě okrajové podmínky pro každou prostorovou souřadnici. Omezíme-li se na jednodimenzionální případ, má počáteční podmínka tvar:

$$T(x, t_0) = T_0, \quad (1.3)$$

kde  $t_0$  je počáteční čas a  $T_0$  je předepsaná teplota. Okrajové podmínky (vztahované k bodu  $x = 0$ ) jsou některého z následujících tří typů:

- Dirichletova podmínka – předepisuje v bodě  $x$  teplotu:

$$T(0, t) = T_s. \quad (1.4)$$

- Neumannova podmínka – předepisuje v bodě  $x$  hustotu tepelného toku:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = \dot{q}. \quad (1.5)$$

- Newtonova podmínka – kombinace předchozích dvou podmínek:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = \alpha (T_\infty - T(0, t)), \quad (1.6)$$

kde  $\alpha$  [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] je součinitel přestupu tepla a  $T_\infty$  je okolní teplota [9, 13, 16, 28].

## 1.2 Konvekce

Přenos tepla konvekcí je důsledkem pohybu tekutiny a skládá se ze dvou mechanismů – náhodného pohybu molekul (difúze) a objemového (makroskopického) pohybu tekutiny nazývaného též advekce. Výsledný přenos tepla je dán superpozicí těchto mechanismů. Typicky se přenos tepla konvekcí objevuje mezi proudící tekutinou a tělesem o různých teplotách [13].

Konvektivní přenos tepla můžeme dále dělit podle povahy proudění na:

- Nucenou konvekci – Přenos tepla je způsoben uměle vyvolaným pohybem tekutiny (chlazení elektroniky pomocí větráku).
- Přírozenou konvekci – Přenos tepla je způsoben pohybem vyvolaným objemovými změnami, ke kterým dochází v důsledku teplotních rozdílů v tekutině, a gravitačním zrychlením [13, 16].

Bez ohledu na povahu proudění lze přenos tepla konvekcí popsat vztahem:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_\infty), \quad (1.7)$$

kde  $T_s$  je povrchová teplota tělesa a  $T_\infty$  je teplota proudící tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu. Tento vztah je znám jako Newtonův ochlazovací zákon a určení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  je v mnoha odvětvích stěžejním úkolem [13, 16].

## 1.3 Záření

Z každého povrchu o teplotě větší než 0 K je emitována energie. Tento proces přenosu energie se nazývá tepelné záření. Tepelné záření je projev elektromagnetického záření a energie je tedy přenášena pomocí fotonů. Z tohoto důvodu není k přenosu tepla zářením potřeba přítomnost zprostředkující látky a k přenosu tepla tak dochází například i ve vakuu, což v případě vedení či konvekce není možné. Množství energie, kterou tělesa vyzařují, závisí na teplotě a vlastnostech povrchu těles. Nejvyšší energii emituje tzv. černé těleso (ideální zářič), které pohlcuje veškerou dopadající energii a energie emitovaná tímto tělesem se řídí Stefan–Boltzmannovým zákonem:

$$E = \sigma T_s^4, \quad (1.8)$$

kde  $E$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] je zářivost tělesa a  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$  je Stefan–Boltzmannova konstanta. Naprostá většina reálných těles v praxi pohlcuje a vyzařuje méně energie než černé těleso. Z tohoto důvodu se zavádí poměrná emisivita  $\varepsilon$  [–], což je poměr mezi zářivostí reálného tělesa a černého tělesa o identické teplotě. Pro reálná tělesa platí vztah:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4. \quad (1.9)$$

Protože nejvyšší možná emitovaná energie je určena Stefan–Boltzmannovým zákonem, nabývá poměrná emisivita hodnot z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  [13, 16].

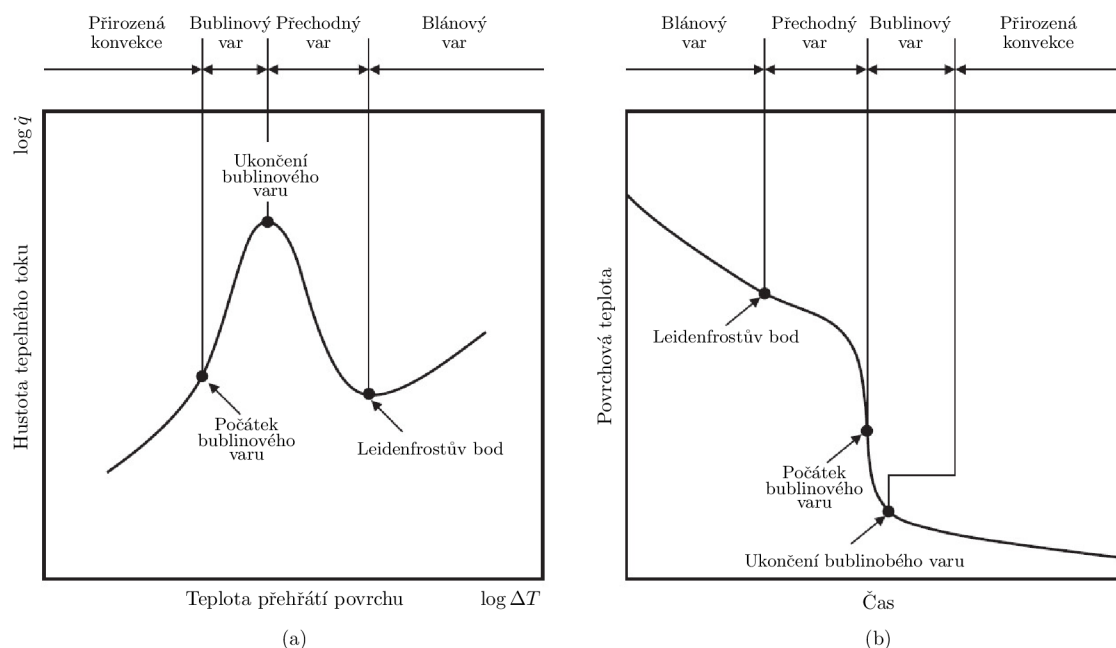
## 1.4 Var

K přenosu tepla varem dochází mezi horkým povrchem pevné látky a kapalinou přesáhne-li teplota horkého povrchu teplotu saturace (teplota, při které kapalina a její pára existuje v rovnováze) odpovídající tlaku kapaliny. Var je typický tvorbou bublin, které vznikají ve štěrbinách na rozhraní pevné látky a kapaliny, a je spojen s fázovou přeměnou, díky čemuž je možné dosáhnout velkého přenosu tepla při malém teplotním rozdílu. Dynamika tvorby bublin působí na pohyb tekutiny v blízkosti povrchu a významně tak ovlivňuje součinitel přestupu tepla. Přenos tepla může být vyjádřen Newtonovým ochlazovacím zákonem ve tvaru:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_{sat}) = \alpha\Delta T, \quad (1.10)$$

kde  $T_{sat}$  je teplota saturace a  $\Delta T$  je teplota přehřátí povrchu [13, 16, 28].

Na obrázku 1.1 (a) je znázorněna závislost hustoty tepelného toku na teplotě přehřátí povrchu. Tato závislost byla pojmenována jako Nukiyamiho křivka podle japonského vědce Nukiyamiho, který zkoumal var ve velkém objemu (pohyb kapaliny je vyvolán jen konvekčními proudy kapaliny a páry [16]) a jako první identifikoval různé režimy varu: přirozenou konvekci, bublinový var, přechodný var a blánový var. Jednotlivé režimy varu jsou také vyznačeny na obrázku 1.1 (b), na kterém je znázorněna ochlazovací křivka, a schématicky jsou znázorněny na obrázku 1.2. Mezi těmito režimy se vyskytují tři důležité přechodové body: počátek bublinového varu, ukončení bublinového varu a Leidenfrostův bod. Každý režim je pro var ve velkém objemu charakterizován níže [13, 16, 28].



Obr. 1.1: Nukiyamiho křivka varu a ochlazovací křivka [21]

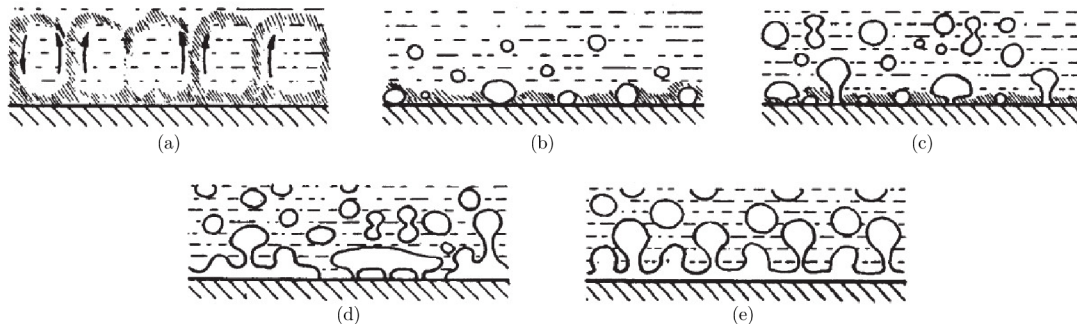
Přirozená konvekce nastává pro nízké hodnoty teploty přehřátí povrchu ( $\Delta T \lesssim 5^\circ\text{C}$ ), přičemž kapalina nedosahuje v celém svém objemu teploty saturace. Teplota kapaliny postupně roste a přenos tepla (realizován přirozenou konvekcí) lze popsat vztahy pro přirozenou konvekci [13, 16, 28].

Bublinový var lze rozdělit na dvě podoblasti:

- Oblast izolovaných bublin – S touto oblastí jsou spojeny nižší hodnoty teploty přehřátí povrchu. Dochází zde ke vzniku izolovaných bublin, které se následně odtrhávají od povrchu. S rostoucí teplotou přehřátí povrchu narůstá množství nově vytvořených bublin. Většina výměny tepla probíhá mezi horkým povrchem a kapalinou a ne prostřednictvím bublin odtrhávajících se od povrchu.
- Oblast shluků bublin – Zvýšená tvorba bublin má za následek interferenci mezi bublinami. Dochází ke spojování bublin a vzniku parních sloupců. V tomto režimu dosáhne hustota tepelného toku své maximální hodnoty, čímž je ukončen bublinový var [13, 16, 28].

Přechodný var nastává tehdy, dochází-li, poté co bylo dosaženo maximální hustoty tepelného toku, k dalšímu nárůstu teploty přehřátí povrchu. V tomto režimu varu s rostoucí teplotou přehřátí povrchu klesá hustota tepelného toku. Pokles je způsoben tím, že vzniká velké množství bublin a klesá účinnost jejich odtrhávání od povrchu, což má za následek, že na částech povrchu dochází k tvorbě parní vrstvy (součinitel tepelné vodivosti páry je značně nižší než kapaliny). Parní vrstva s rostoucí teplotou přehřátí povrchu pokrývá stále více povrchu, až dojde k vytvoření souvislé vrstvy, která pokryje celý povrch. V tomto momentě dosahuje hustota tepelného toku své minimální hodnoty. Na křivce varu je tento bod označován jako Leidenfrostův bod a teplota, která mu odpovídá, se nazývá Leidenfrostova teplota [13, 16, 28].

Blánový var se objevuje, dosahuje-li teplota přehřátí povrchu vyšších hodnot, než je Leidenfrostova teplota. Povrch je pokrytý souvislou parní vrstvou a přenos tepla mezi povrchem a kapalinou je realizován vedením a zářením přes parní vrstvu. S rostoucí teplotou přehřátí povrchu dochází opět k nárůstu hustoty tepelného toku v důsledku rostoucího přenosu tepla zářením a vyššího rozdílu mezi povrchovou teplotou a teplotou tekutiny [13, 16, 28].



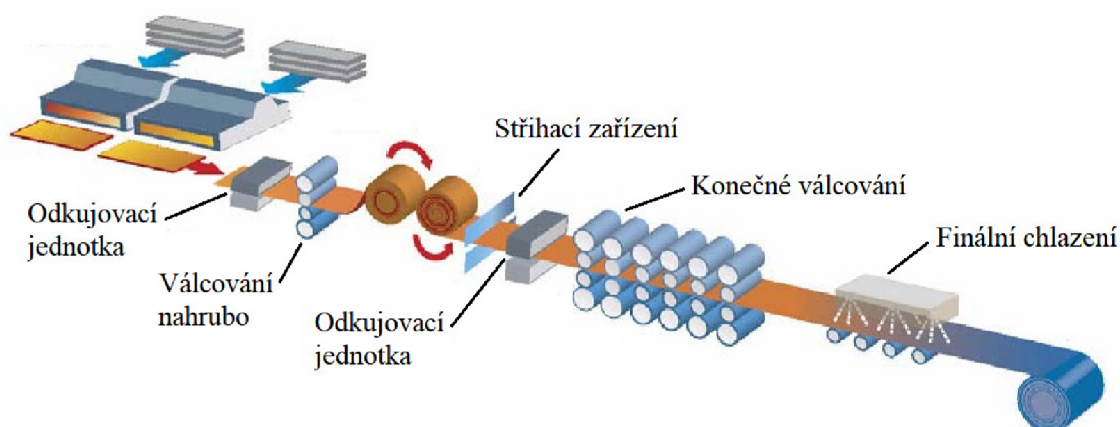
Obr. 1.2: Režimy varu: (a) přirozená konvekce, (b) bublinový var (oblast izolovaných bublin), (c) bublinový var (oblast shluků bublin), (d) přechodný var, (e) blánový var [2]



## 2 VÁLCOVÁNÍ ZA TEPLA

Výrobky z oceli dnes nacházejí uplatnění v širokém spektru lidské činnosti. Aby bylo možné dosáhnout kvalitní oceli s požadovanými vlastnostmi s co nejnižšími náklady, je důležité zabývat se procesem výroby a zpracováním oceli. Velmi využívaným způsobem zpracování oceli je válcování za tepla, které se používá k výrobě polotovarů či finálních produktů jako jsou například ocelové plechy, dráty, kolejnice atd.

Proces válcování za tepla (obrázek 2.1) začíná ohřátím ocelové desky v peci. Poté, co je deska zahřata na požadovanou teplotu, opustí pec a projde odkujovací jednotkou. Ta má za úkol pomocí vysokotlakých odkujovacích trysek odstranit z povrchu oceli oxidy vzniklé během ohřevu. Následně ocelová deska prochází válcovacími stolicemi (válcování nahrubo, konečné válcování), kde dochází k jejímu zúžení na požadovanou hodnotu. Před zahájením konečného válcování je rozvalek na stříhacím zařízení zkrácen na požadovanou délku a dochází k odstranění oxidů vzniklých v průběhu válcování. Poté co rozvalek opustí poslední válcovací stolicu, dochází k chlazení na finální teplotu (na výběhovém úseku) a navinutí na cívku. Kromě chlazení na výběhovém úseku může být dalším příkladem chlazení v CAL (continuous annealing line, kontinuální žíhací linka) [23].



Obr. 2.1: Válcování za tepla [23]

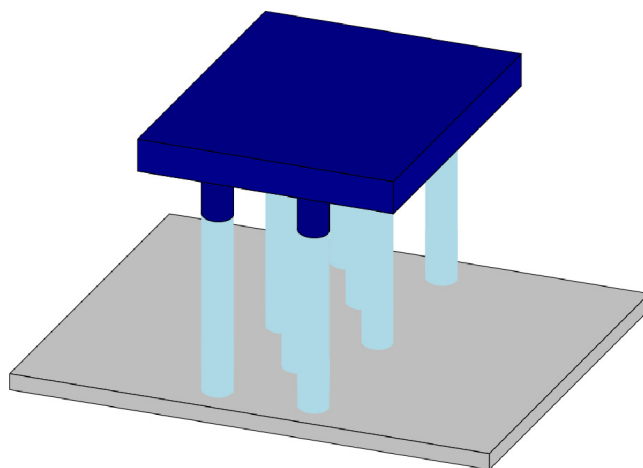
### 2.1 Chlazení

Aby bylo dosaženo požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností oceli, je nutné po válcování kontrolovat proces chlazení oceli na výběhovém úseku či v CAL. Chlazení je v dnešní době zajištěno převážně laminárními tryskami a vodními spreji a je realizováno jak svrchu tak zespu ocelového pásu. Dosáhnout vhodného nastavení chlazení je složitý proces, protože chlazení ovlivňuje mnoho faktorů, jako například typy použitých trysek, rychlost ocelového pásu, teplota vody, teplota povrchu oceli, zbytková voda na povrchu oceli, drsnost povrchu či oxidy na povrchu oceli [12, 19, 3]. Zlepšením procesu chlazení se zabývalo již mnoho autorů, avšak stále se vyskytují problémy jako jsou malá účinnost chlazení či nerovnoměrnost chlazení a zejména přesná koncová teplota, pokud je požadována v rozmezí 200–500 °C [37].

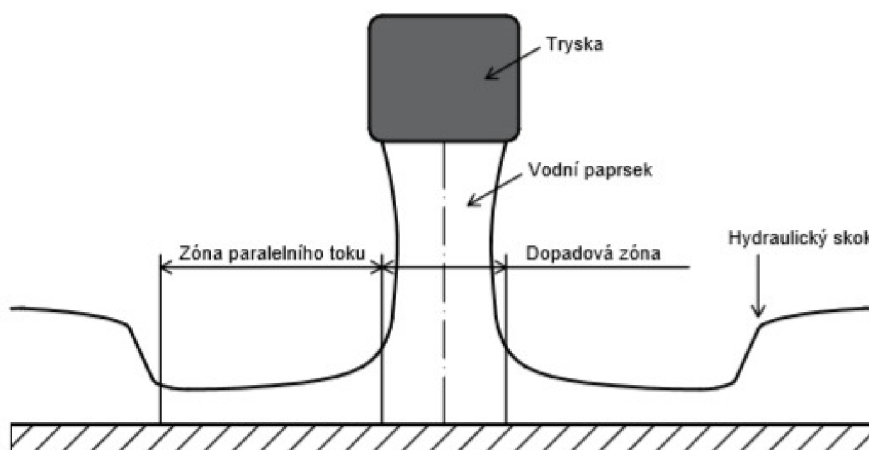
### 2.1.1 Laminární chlazení

Laminární chlazení (chlazení laminárními proudy) je v dnešní době hojně využíváno při tepelném válcování oceli. Chladicí sekce se obvykle skládá z velkého počtu trysek s válcovým paprskem (obrázek 2.2) a celý proces chlazení je realizován několika chladicími sekcemi. Laminárním chlazením lze zajistit vysoký lokální součinitel přestupu tepla mezi kapalinou a ocelí [38], a proto se využívá tam, kde je potřeba ocel rychle ochladit.

Vodní trysky používané pro laminární chlazení tvoří na horkém povrchu různé chladicí zóny (obrázek 2.3). „Dopadová zóna“ (impingement zone) se nachází v blízkosti osy trysky a dochází v ní k účinnějšímu chlazení oproti „zóně paralelního toku“ (parallel flow zone), která se nachází ve větší vzdálenosti od trysky. Místo, kde dochází k prudkému růstu výšky vodní vrstvy, se nazývá hydraulický skok. V těchto třech oblastech se vyskytují všechny druhy varu od nucené konvekce přes bublinový var až po přechodový a blánový var [24, 7, 17]. Nevýhodou laminárního chlazení je voda, která se z důvodu velkých průtoků akumuluje na horkém povrchu. Tato vrstva vody pak ovlivňuje intenzitu chlazení.



Obr. 2.2: Laminární chlazení

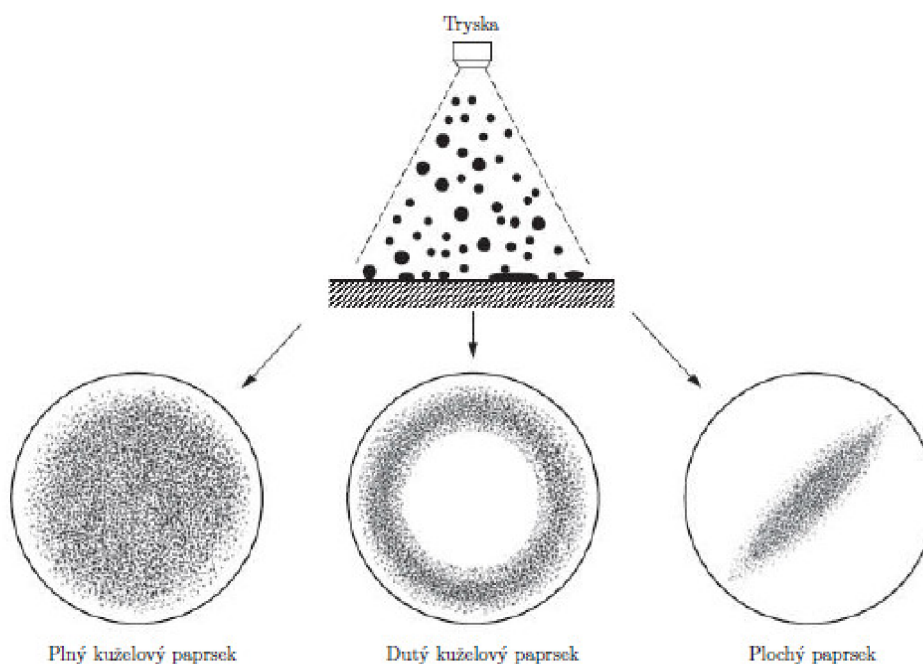


Obr. 2.3: Chladicí zóny při laminárním chlazení, překresleno dle [5]

## 2.1.2 Sprchové chlazení

Sprchové chlazení se dnes běžně používá v oblasti metalurgického průmyslu. Kromě využití při válcování za tepla se využívá například při kontinuálním odlévání. Chladicí kapalina (převážně voda) je vedena do trysek. Následně proud kapaliny opouští ústí trysky a vlivem jeho vysoké rychlosti a odporu vzduchu dochází k rozpadu na jednotlivé kapky, které dopadají na horký povrch a realizují chlazení. K výhodám sprchového chlazení patří dobrá regulovatelnost množství vody, které prochází tryskami, a tudíž dobrá regulovatelnost intenzity chlazení či schopnost ochladit relativně velkou plochu pomocí jedné trysky [28, 9, 21, 22].

Trysky používané pro sprchové chlazení můžeme dělit na vodní a vodo-vzdušné. Vodo-vzdušné trysky využívají k atomizaci proudu mimo speciálně tvarovaného ústí trysky také plyn (vzduch), který se mísí s kapalinou uvnitř trysky. Dále můžeme trysky dělit na základě tvaru (vodního/vodo-vzdušného) paprsku na trysky s plochým paprskem, plným kuželovým paprskem či dutým kuželovým paprskem (obrázek 2.4). Trysky s plochým paprskem se nejčastěji používají při intenzivním chlazení a trysky s kuželovým paprskem naopak spíše při mírnějším chlazení [28, 9, 21, 22].

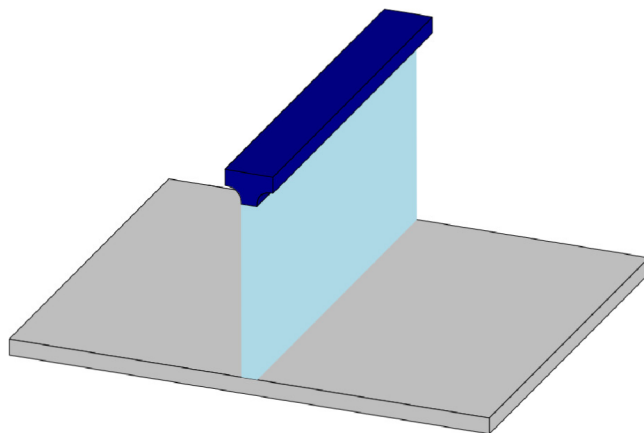


Obr. 2.4: Trysky s různým tvarem paprsku [21]

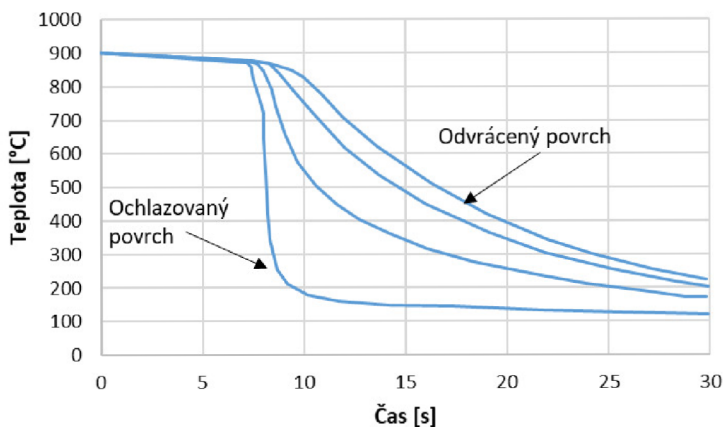
Při válcování za tepla se sprchové chlazení často používá pro chlazení horkého povrchu zespodu, protože dobře pokrývá plochu mezi dopravníkovými válci. V tomto případě dochází ke snížení dopadové rychlosti kapek vlivem tíhové síly, avšak v důsledku vysoké rychlosti kapek není tento vliv významný. Významným vlivem tíhové síly je naopak absence vodní vrstvy na ochlazovaném povrchu, která se v případě intenzivního chlazení shora může vytvořit a ovlivňovat tak průběh chlazení.

### 2.1.3 Chlazení vodní clonou

Chlazení tohoto typu využívá planární trysky s úzkou a dlouhou štěrbinou (viz obrázek 2.5). Chlazení dosahuje velkých odvodů tepla, avšak vrchní a spodní povrch ochlazovaného pásu nejsou chlazeny rovnoměrně, což je patrné z obrázku 2.6 . Nevýhodou je také velká spotřeba vody, která je nutná pro efektivní chlazení [8, 38].



Obr. 2.5: Chlazení vodní clonou, překresleno dle [38]

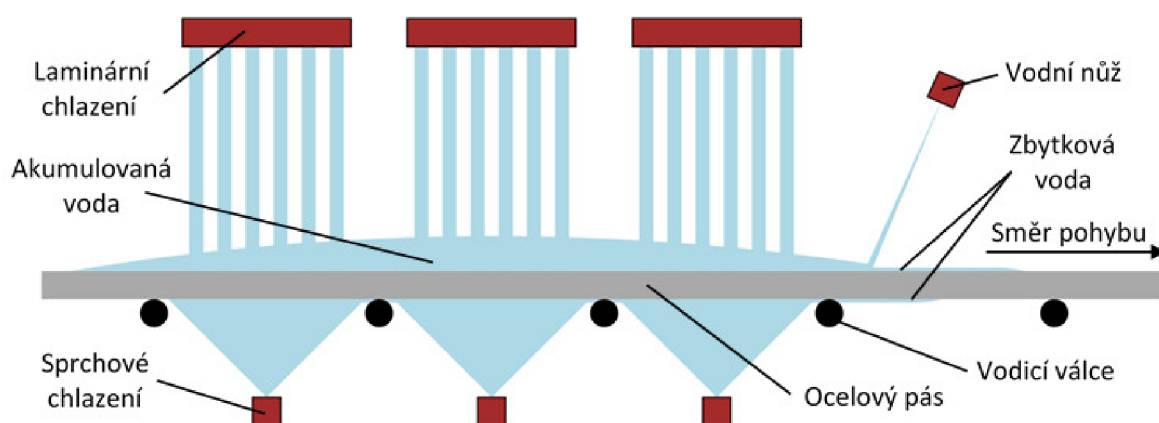


Obr. 2.6: Průběh teploty podél tloušťky ochlazovaného vzorku, překresleno dle [8]

### 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CHLAZENÍ PŘI TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ OCELI

Chlazení oceli na výběhovém úseku při válcování za tepla je velmi komplikovaný proces, který je ovlivňován mnoha faktory. Mezi faktory, které nejvíce ovlivňují chlazení oceli na výběhovém úseku, patří především průtok vody (hustota dopadající vody), teplota ochlazovaného povrchu, teplota vody a rychlost posuvu ocelového pásu. Dále pak chlazení ovlivňuje zbytková voda, která po ostříku zůstává na ochlazovaném povrchu, přítomnost oxidů či drsnost ochlazovaného povrchu. K dosažení požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností válcovaného produktu je nutné proces chlazení řídit a tedy znát vliv jednotlivých faktorů.

Méně významným faktorům jako je drsnost povrchu či přítomnost oxidů není v literatuře věnováno tolik pozornosti, a proto se tato dizertační práce zaměřuje právě na tyto faktory v kombinaci s průtokem vody. Samostatnou kapitolou je vliv zbytkové vody, která po ostříku zůstává na ochlazovaném povrchu, kde relevantní publikace zcela chybí. Tato tenká vodní vrstva se vyskytuje nejen na vrchním povrchu, ale v důsledku povrchového napětí rovněž na spodním povrchu při chlazení zesodu (obrázek 3.1). Pozorována může být i v případě velmi slabého ostříku a může významně ovlivnit finální teplotu ocelových produktů.

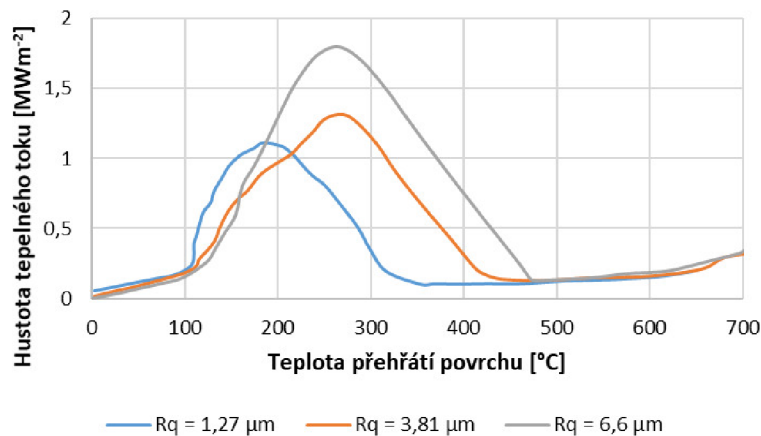


Obr. 3.1: Zbytková voda při chlazení [31]

Vliv drsnosti povrchu na proces chlazení se odvíjí od typu varu. V případě blánového varu není vzhledem k přítomnosti parní vrstvy na ochlazovaném povrchu vliv drsnosti tolik významný. V případě přechodného a bublinového varu dochází s vyšší drsností k vyšší tvorbě bublin v mikroskopických nerovnostech, což má za následek intenzivnější chlazení [9, 32]. To je dobře patrné na obrázku 3.2, na kterém můžeme vidět, že s rostoucí drsností povrchu dochází k nárůstu kritické hustoty tepelného toku a rovněž k posunu Leidenfrostovy teploty k vyšším hodnotám. Obrázek 3.2 zachycuje chlazení vnořením do vodní lázně. Drsnost povrchu je zde charakterizována pomocí parametru  $R_q$  (průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu).

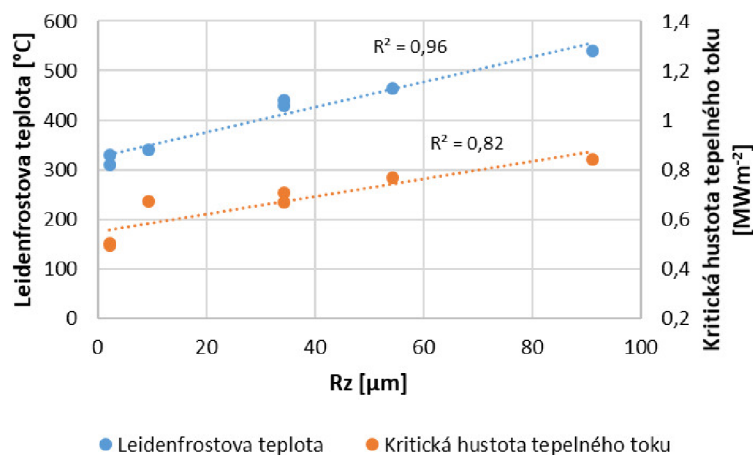
Vlivem drsnosti povrchu na sprchové chlazení se zabývali například Brožová a kol. v [3]. Na vzorcích z nerezové oceli s frézovaným, válcovaným a broušeným povrchem





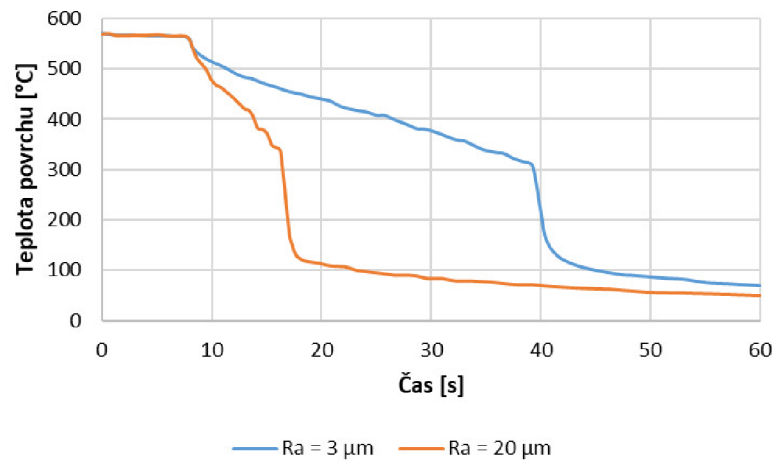
Obr. 3.2: Závislost hustoty tepelného toku na teplotě přehřátí povrchu pro různé drsnosti povrchu, překresleno dle [32]

o drsnostech od  $Rz = 2,2 \mu\text{m}$  do  $Rz = 91,2 \mu\text{m}$  zkoumali autoři vliv drsnosti povrchu na kritickou hustotu tepelného toku a na Leidenfrostovu teplotu. K chlazení byla použita tryska s plochým paprskem. Získané výsledky z experimentů jsou na obrázku 3.3. Z obrázku je patrné, že s rostoucí drsností povrchu dochází k růstu Leidenfrostovy teploty a také kritické hustoty tepelného toku. Oproti případu chlazení vnořením do lázně [32] není nárůst kritické hustoty tepelného toku tak výrazný. Koeficient  $R^2$  na obrázku 3.3 je koeficient determinace.



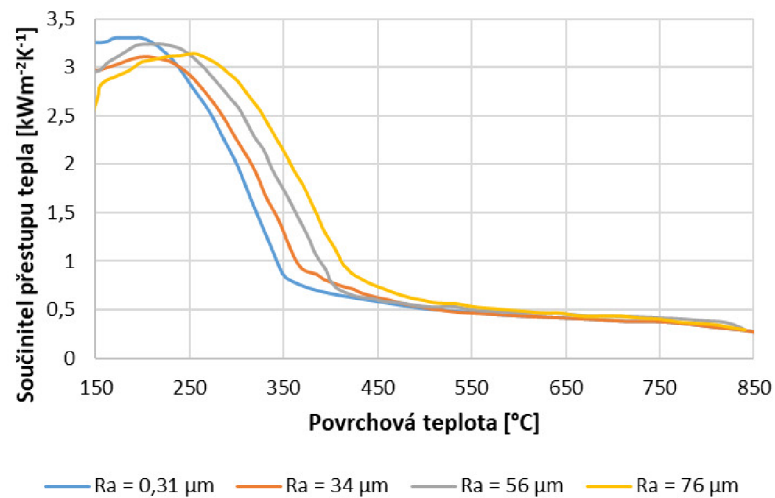
Obr. 3.3: Vliv drsnosti povrchu na kritickou hustotu tepelného toku a Leidenfrostovu teplotu [3]

Vliv drsnosti povrchu na sprchové chlazení zkoumali také Fukuda a kol. v [6]. Využity byly vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 s drsností povrchů  $Ra = 3 \mu\text{m}$  a  $Ra = 20 \mu\text{m}$ . Na obrázku 3.4 můžeme vidět závislost povrchové teploty na čase pro různé hodnoty drsnosti povrchu. Z obrázku je vidět, že s rostoucí drsností povrchu dojde dříve k prudkému poklesu povrchové teploty. To odpovídá posunu Leidenfrostovy teploty k vyšším hodnotám, což je v souladu s výsledky zjištěnými v [3] a [32].



Obr. 3.4: Vliv drsnosti povrchu na průběh sprchového chlazení, překresleno dle [6]

K obdobným závěrům došel i Lee v [20], kde autor rovněž studoval, jak drsnost povrchu ovlivňuje sprchové chlazení. Chlazení bylo zkoumáno na vzorcích z nerezové oceli X5CrNi18-10 s drsností povrchu od  $Ra = 0,31 \mu\text{m}$  do  $Ra = 76 \mu\text{m}$ . Na obrázku 3.5 můžeme vidět výsledky z měření v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě. Z obrázku je vidět, že s rostoucí drsností povrchu dochází k růstu teploty, při které dojde k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla.



Obr. 3.5: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro různě drsné povrchy, překresleno dle [20]

Chlazení je rovněž ovlivňováno přítomností oxidů, které se vlivem reakce mezi horkým povrchem oceli a kyslíkem z okolní atmosféry tvoří na povrchu oceli. Vrstva oxidů je tvořena různými oxidy včetně třech oxidů železa: wüstitu ( $\text{FeO}$ ), magnetitu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a hematitu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Oxidy narostlé na legovaných ocelích s legujícími prvky jako například křemík, chrom či nikl obsahují další oxidy ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , ...). Množství a struktura vzniklých oxidů jsou ovlivňovány chemickým složením oceli, teplotou při oxi-

daci a atmosférou během oxidace. Vrstva oxidů ( $\lambda \approx 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), která může být značně porézní, má oproti oceli ( $\lambda \approx 40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) mnohem menší součinitel tepelné vodivosti a chová se jako izolant, čímž ovlivňuje proces chlazení a výslednou kvalitu oceli [29]. Chlazení je také ovlivňováno drsností povrchu pokrytého vrstvou oxidů. Ta je oproti drsnosti povrchu před oxidací odlišná, jak zmiňují Sun a kol. v [33]. V tomto článku se autoři rovněž zabývají závislostí tloušťky vrstvy oxidů na čase a teplotě oxidace. S rostoucí teplotou oxidace roste tloušťka vrstvy oxidů a k růstu tloušťky vrstvy oxidů dochází rovněž s rostoucím časem oxidace, přičemž z počátku je nárůst značný a poté se řídí parabolickým zákonem. Časy oxidace jsou zde pouze do 160 sekund, avšak parabolický zákon platí i pro delší oxidační časy [28].

Studiem vlivu vrstvy oxidů na chlazení se zabývají Chabičovský a kol. a Wendelstorf a kol. v článkách [11, 35]. K popisu izolačního vlivu vrstvy oxidů na chlazení využívají koncept efektivního součinitele přestupu tepla zavedený v [18, 35]. Efektivní součinitel přestupu tepla  $\alpha_{ef}$  v sobě zahrnuje izolační vlivy vrstvy oxidů a umožňuje tak snadnější modelování chlazení [35]. Efektivní součinitel přestupu tepla pro zoxidovaný ocelový povrch je definovaný jako:

$$\alpha_{ef} = \frac{\dot{q}_s}{T_s - T_\infty}, \quad (3.1)$$

kde  $\dot{q}_s$  je hustota tepelného toku z čistého (nezoxidovaného) povrchu o teplotě  $T_s$  do okolí o teplotě  $T_\infty$ . Hustota tepelného toku ze zoxidovaného povrchu ( $\dot{q}_p$ ) o teplotě  $T_p$  do okolí o teplotě  $T_\infty$  může být vyjádřena pomocí Newtonova ochlazovacího zákona jako:

$$\dot{q}_p = \alpha(T_p - T_\infty), \quad (3.2)$$

viz obrázek 3.6 (a). Uvažujeme-li pouze tenkou vrstvou oxidů, ve které zanedbáme akumulované teplo, je hustota tepelného toku nezoxidovaného povrchu rovna hustotě tepelného toku ze zoxidovaného povrchu ( $\dot{q}_s = \dot{q}_p$ ). Na základě Fourierova zákona můžeme hustotu tepelného toku ze zoxidovaného povrchu vyjádřit jako:

$$\dot{q}_p \approx \frac{\lambda}{\delta}(T_s - T_p), \quad (3.3)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti vrstvy oxidů a  $\delta$  je tloušťka vrstvy oxidů [11]. Z rovnic 3.1 až 3.3 a na základě předpokladu  $\dot{q}_s = \dot{q}_p$  můžeme efektivní součinitel přestupu tepla zapsat ve tvaru [35]:

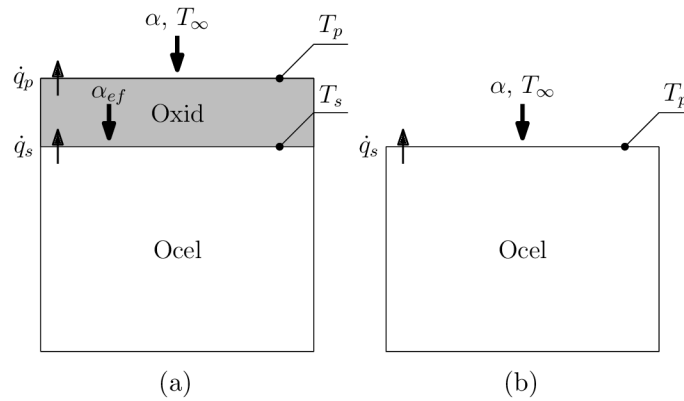
$$\alpha_{ef} = \left( \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)^{-1}. \quad (3.4)$$

Ze znalosti tloušťky vrstvy oxidů  $\delta$ , tepelné vodivosti vrstvy oxidů  $\lambda$  a součinitele přestupu tepla z nezoxidovaného povrchu  $\alpha$  o teplotě  $T_p$  (obrázek 3.6 (b)) můžeme tedy přibližně určit hodnotu efektivního součinitele přestupu tepla  $\alpha_{ef}$  při teplotě  $T_s$  [11] (předpokládá se stejná drsnost u nezoxidovaného a zoxidovaného povrchu). Teplotu  $T_s$  můžeme pomocí rovnic 3.2 a 3.3 vyjádřit jako funkci teploty  $T_p$ :

$$T_s = T_p + \frac{\delta\alpha(T_p - T_\infty)}{\lambda}. \quad (3.5)$$

Při odvození vztahů (3.4) a (3.5) pro efektivní součinitel přestupu tepla  $\alpha_{ef}$  a teplotu  $T_s$  bylo zanedbáno teplo naakumulované ve vrstvě oxidů. Z tohoto důvodu je dobré využívat





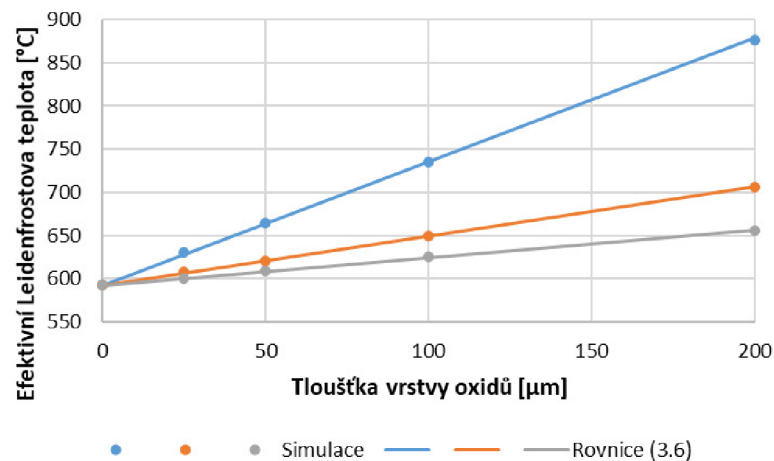
Obr. 3.6: Přenos tepla z povrchu po oxidaci [11]

tyto vztahy pouze pro malé tloušťky vrstvy oxidů a teploty neklesající pod Leidenfrostovu teplotu, jinak dojde k výrazné chybě.

V článku [11] Chabičovský a kol. rovněž zavádějí efektivní Leidenfrostovu teplotu  $T_{Lef}$ , která vychází ze vztahu (3.5), přičemž za teplotu  $T_p$  je dosazena Leidenfrostova teplota  $T_L$ :

$$T_{Lef} = T_L + \frac{\delta\alpha_{\min}(T_p - T_{\infty})}{\lambda}, \quad (3.6)$$

kde  $\alpha_{\min}$  je součinitel přestupu tepla z nezoxidovaného povrchu o Leidenfrostově teplotě  $T_L$ . Efektivní Leidenfrostova teplota stejně jako efektivní součinitel přestupu tepla zahrnuje izolační vlivy vrstvy oxidů. Na obrázku 3.7 je zachycena závislost efektivní Leidenfrostovy teploty na tloušťce vrstvy oxidů zjištěná v [11] analyticky z rovnice (3.6) a rovněž numerickou simulací. Z obrázku je vidět, že s rostoucí tloušťkou vrstvy oxidů lineárně roste efektivní Leidenfrostova teplota. Uvažované součinitele tepelné vodivosti nebyly teplotně závislé.



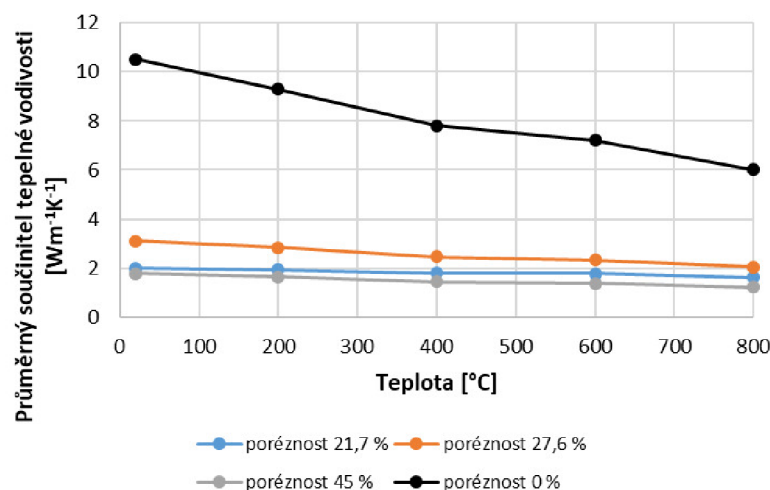
Obr. 3.7: Vliv tloušťky vrstvy oxidů na efektivní Leidenfrostovu teplotu [11]; modře  $\lambda = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , oranžově  $\lambda = 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , šedě  $\lambda = 0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

V [35] Wendelstorf a kol. pozorovali pro vyšší hodnoty tloušťky vrstvy oxidů značný vliv na průběh chlazení a to hlavně v oblasti přechodného varu. To potvrzuje rostoucí průběh efektivní Leidenfrostovy teploty v závislosti na tloušťce vrstvy okují zjištěný v článku [11].

Nárůst efektivní Leidenfrostovy teploty s rostoucí tloušťkou vrstvy oxidů pozorovali rovněž Fukuda a kol. v [6], kde zkoumali vliv uměle vytvořené vrstvy oxidů pomocí tepelného nanesení prášku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na sprchové chlazení. Tloušťka uměle vytvořené oxidické vrstvy se pohybovala od  $50\ \mu\text{m}$  do  $210\ \mu\text{m}$ .

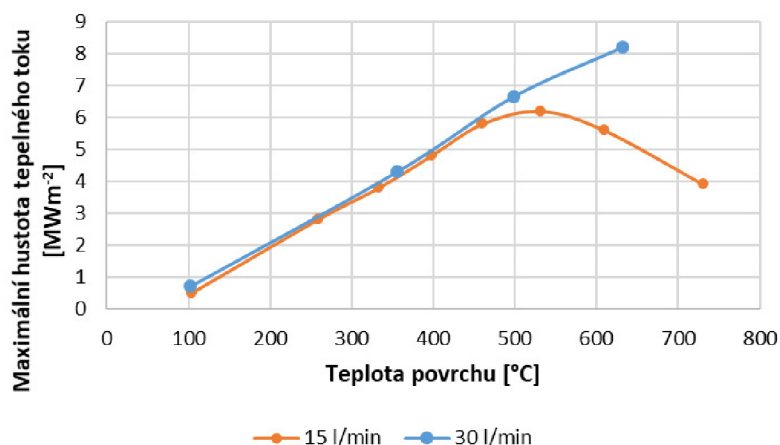
Vrstva oxidů může být značně porézní, což ovlivňuje její termofyzikální vlastnosti, protože vzduchové póry obsažené ve vrstvě oxidů mají v porovnání s oxidy výrazně nižší tepelnou vodivost. Znalost termofyzikálních vlastností vrstvy oxidů je však důležitá pro numerické simulace chlazení. Hlavní parametry, které ovlivňují přenos tepla skrz vrstvu oxidů, jsou tloušťka vrstvy oxidů a součinitel tepelné vodivosti vrstvy oxidů [11]. Součinitel tepelné vodivosti vrstvy oxidů závisí na typech oxidů, které se v dané vrstvě vyskytují, a rovněž na zmiňované míře poréznosti vrstvy oxidů. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro porézní vrstvu oxidů se v literatuře příliš nevyskytují. Endo a kol. v [4] pro vrstvu oxidů vytvořenou na nízkouhlíkové oceli uvádějí součinitel tepelné vodivosti při pokojové teplotě  $\lambda = 3,8\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ . Míra poréznosti zkoumané vrstvy oxidů však není uvedena. V [26] Pohanka a kol. uvádějí součinitel tepelné vodivosti porézní vrstvy oxidů (narostlé na vzorcích z oceli 54SiCr6) při teplotě  $T = 800\ \text{°C}$   $\lambda = 1,2\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ , přičemž uvažují poréznost 37%.

Součinitelem tepelné vodivosti porézní vrstvy oxidů se zabývali také Resl a kol. v [29]. U vzorků z oceli 54SiCr6 oxidovaných za různých podmínek byla s využitím mikroskopu a obrazové analýzy stanovena procentuální poréznost vrstvy oxidů pro jednotlivé režimy oxidace a dále byl pomocí 2D úlohy stacionárního vedení tepla určen průměrný součinitel tepelné vodivosti porézní vrstvy oxidů pro různé režimy oxidace (viz obrázek 3.8). Z obrázku je zřejmé, že poréznost značně ovlivňuje průměrný součinitel tepelné vodivosti vrstvy okují. S rostoucí porézností nemusí však nutně průměrný součinitel tepelné vodivosti klesat. Důležitou roli hraje rovněž rozložení vzduchových pórů ve vrstvě oxidů.

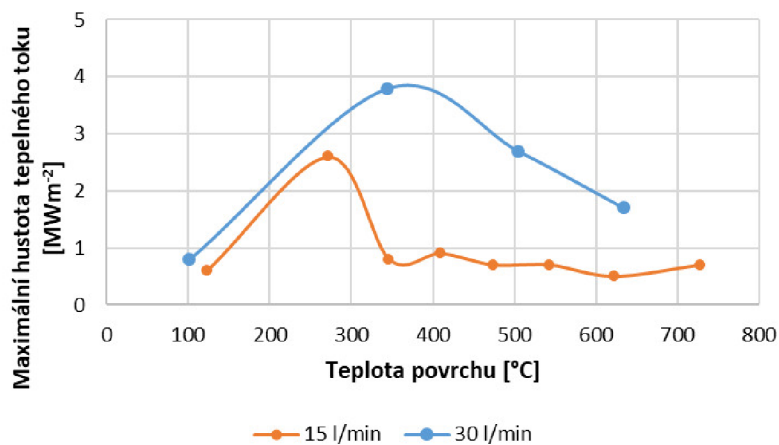


Obr. 3.8: Závislost průměrného součinitele tepelné vodivosti porézní vrstvy oxidů na teplotě [29]

Vlivem změny velikosti průtoku vody na přenos tepla při laminárním chlazení se zabývali například Jondhale a kol. v [17]. K experimentu byl použit vzorek z nízkolegované oceli a zkoumané průtoky vody byly  $15 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$  a  $30 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ . Na obrázku 3.9 a obrázku 3.10 je zobrazena závislost maximální hustoty tepelného toku na povrchové teplotě pro různé průtoky vody. Z obrázku je vidět, že průtok vody má na hustotu tepelného toku značný vliv a to jak pod tryskou, tak i v oblasti mezi tryskami. Tento vliv se více projevuje v oblasti blánového a přechodného varu, v případě bublinového varu není tak značný.



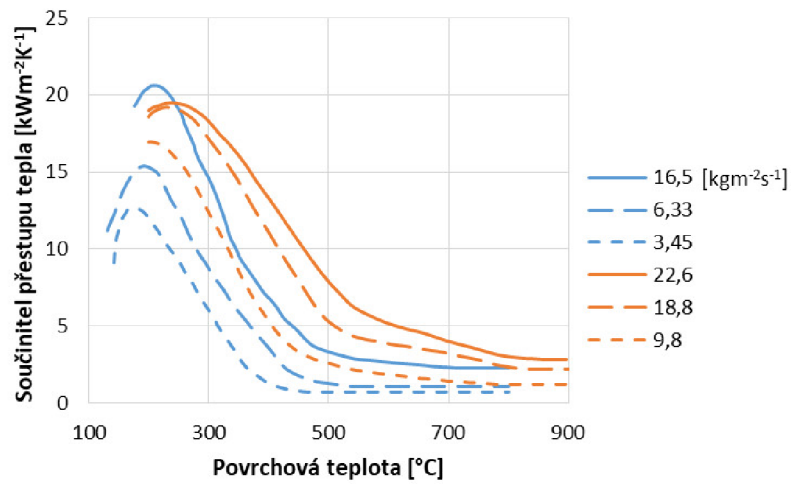
Obr. 3.9: Vliv průtoku vody na maximální hustotu tepelného toku; pozice pod tryskou, překresleno dle [17]



Obr. 3.10: Vliv průtoku vody na maximální hustotu tepelného toku; pozice 38,1 mm od středu trysky (střed mezi dvěma sousedními tryskami), překresleno dle [17]

V případě sprchového chlazení je hustota dopadající vody klíčovým faktorem a zásadně ovlivňuje součinitel přestupu tepla [9]. Chabičovský a Raudenský v [10] a Jeschar a kol. v [15] zkoumali vliv hustoty dopadající vody na součinitel přestupu tepla na vzorcích z niklu a nerezové oceli při sprchovém chlazení. Jak je patrné z obrázku 3.11, s rostoucí hustotou dopadající vody roste součinitel přestupu tepla a to jak v případě vzorku z niklu,

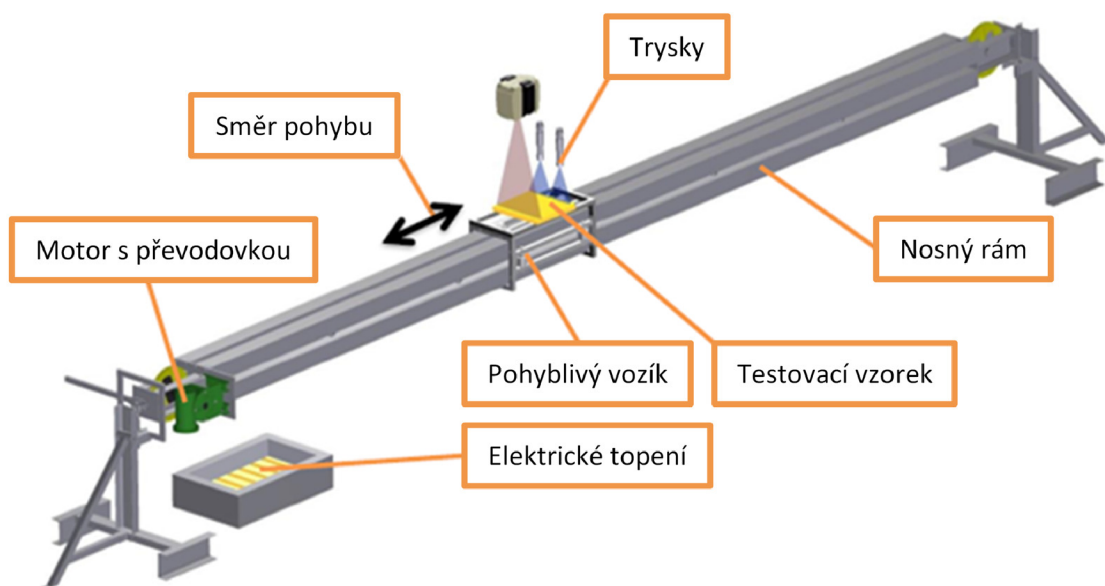
tak i v případě použití nerezové oceli. Pozorován byl i nárůst Leidenfrostovy teploty. Zjištěné závislosti jsou spjaty s použitými tryskami a podmínkami experimentů. Odlišné trysky a experimentální podmínky povedou ke změně výsledků.



Obr. 3.11: Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro různé hodnoty hustoty dopadající vody; modře – vzorek z niklu, překresleno dle [15], oranžově – vzorek z nerezové oceli, překresleno dle [10]

## 4 POPIS PROVEDENÝCH LABORATORNÍCH MĚŘENÍ CHLAZENÍ

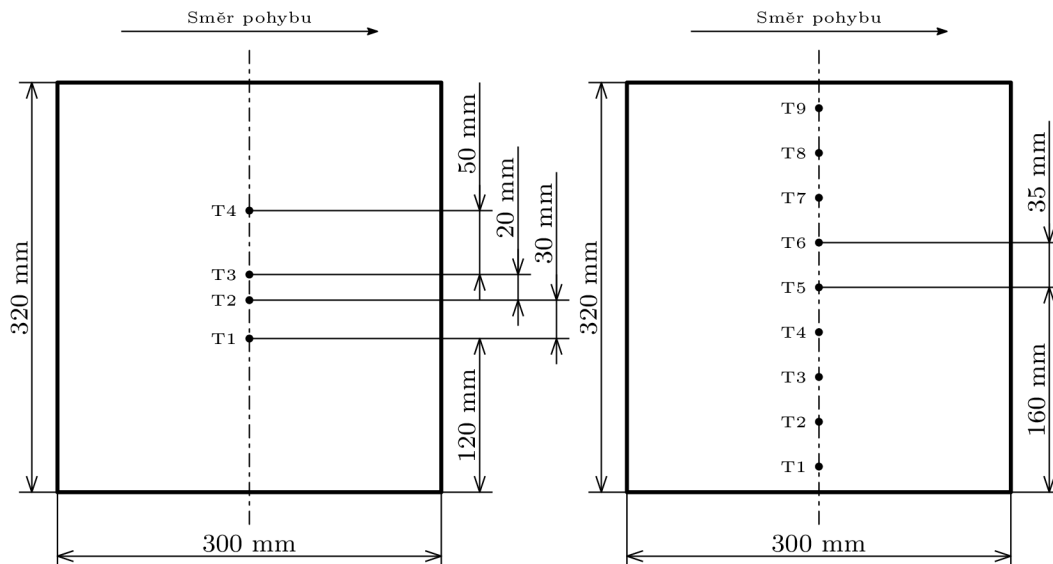
Všechna měření pro stanovení vlivu jednotlivých faktorů ovlivňujících chlazení při tepelném zpracování oceli provedená v rámci této práce byla realizována v Laboratoři přenosu tepla a proudění. K měření bylo využito experimentální zařízení umožňující horizontální pohyb zkušební vzorku (obrázek 4.1). Toto zařízení umožňuje rotaci nosného rámu kolem své podélné osy a je tak možné zkoumat nejen vrchní chlazení, ale například i spodní chlazení.



Obr. 4.1: Schéma využitého experimentálního zařízení [31]

K experimentálním měřením byly použity testovací desky z austenitické oceli o rozměrech 320 mm × 300 mm × 25 mm, které byly osazeny termočlánky typu K umístěnými 0,8 mm pod ochlazovaným povrchem. Počet a rozmístění termočlánků závisely na použité testovací desce. Testovací desky s broušeným a válcovaným povrchem byly vybaveny čtyřmi termočlánky stejně jako deska se zoxidovaným povrchem použitá ke studiu vlivu kvality povrchu na chlazení (obrázek 4.2 vlevo). Deska se zoxidovaným povrchem pro studium zbytkové vody byla vybavena devíti termočlánky (obrázek 4.2 vpravo). Před každým experimentem byla testovací deska připojená k pohyblivému vozíku umístěna do elektrické pece a nahřáta na požadovanou počáteční teplotu. Poté byla deska vyjmuta z pece a ustanovena do startovací polohy. Následně se vozík s testovací deskou opakovaně pohyboval skrze chladicí sekci předepsanou rychlostí. Po dosažení koncové teploty desky byl experiment ukončen. Během celého měření byly na dataloger zaznamenávány průběhy teplot z jednotlivých termočlánků a rovněž informace o poloze testovací desky. Po ukončení měření byla tato data stažena do počítače k dalšímu zpracování.

Z naměřených průběhů teplot byly pomocí inverzní úlohy získány časově závislé součinitel přestupu tepla a časově závislá povrchová teplota. Inverzní úloha (IHCP – Inverse



Obr. 4.2: Rozmístění termočlánků na testovacích deskách; vlevo – deska s broušeným a válcovaným povrchem a deska se zoxidovaným povrchem použitá ke studiu vlivu kvality povrchu na chlazení, vpravo – deska se zoxidovaným povrchem pro studium zbytkové vody

Heat Conduction Problem [1]) je úloha, kde neznáme okrajové podmínky, ale časově závislé teploty měřené ve vnitřních bodech tělesa, což jsou v našem případě záznamy teplot z jednotlivých termočlánků [25]. Základní inverzní úlohu pro jednodimenzionální případ (1D) můžeme zapsat ve tvaru [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \\ T(x, 0) &= T_0(x), \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \text{ pro } x = L, \\ T(x_1, t_i) &= T_i^*, \end{aligned} \quad (4.1)$$

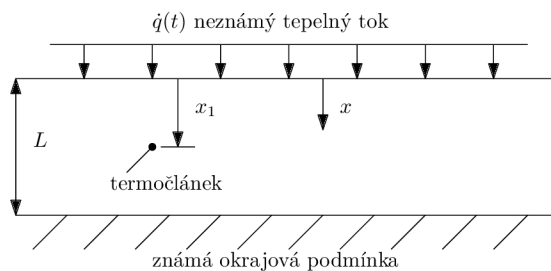
kde rovnice (4.1) je parciální diferenciální rovnice vedení tepla v 1D,  $T_0(x)$  je počáteční rozložení teploty ve vzorku,  $L$  je tloušťka vzorku,  $x_1$  je vzdálenost termočlánku od povrchu a  $T_i^*$  jsou naměřené teploty termočlánkem v časech  $t_i$  (obrázek 4.3). Cílem je určit hustotu tepelného toku (součinitel přestupu tepla, teplotu) na povrchu v časech  $t_i$ :

$$\dot{q}(t_i) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (4.2)$$

K výpočtům inverzních úloh v této práci byla využita metoda sekvenční identifikace vyvinutá Pohankou [27], která počítá „krokově“ součinitel přestupu tepla na povrchu na základě naměřených teplot z termočlánků. Metoda využívá sekvenční odhad časově proměnných okrajových podmínek a dopředné časové kroky pro stabilizaci inverzní úlohy. Nejprve jsou pomocí přímé metody vypočteny teploty v místě termočlánku  $T_i$  pro odhad součinitele přestupu tepla  $\alpha_i$ . Tyto vypočtené teploty jsou následně porovnány s naměřenými teplotami  $T_i^*$  a je využito  $r$  dopředných kroků:

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+r} (T_i^* - T_i(\alpha_i))^2. \quad (4.3)$$

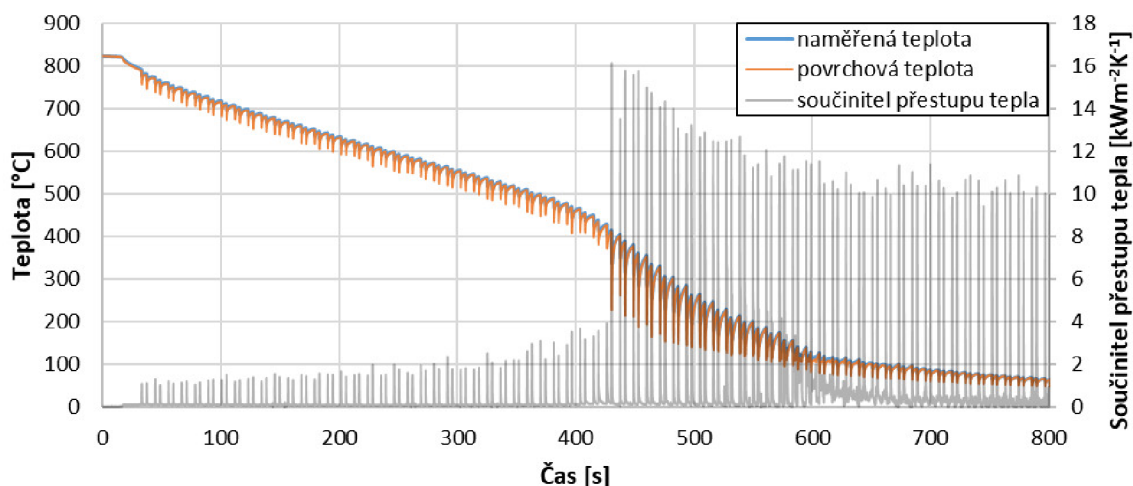




Obr. 4.3: Znázornění základní inverzní úlohy [1]

Součinitel přestupu tepla v čase  $m$  se získá minimalizací rovnice 4.3 (stejně rovnice jako v případě klasického Beckova přístupu [1]). Metoda sekvenční identifikace vyvinutá Pohankou byla zvolena, protože umožňuje počítat součinitel přestupu tepla i v případech, kdy je homogenita povrchové teploty narušena zabudovanými termočlánky. Řešení inverzní úlohy není předmětem této práce. Více informací lze najít v [27].

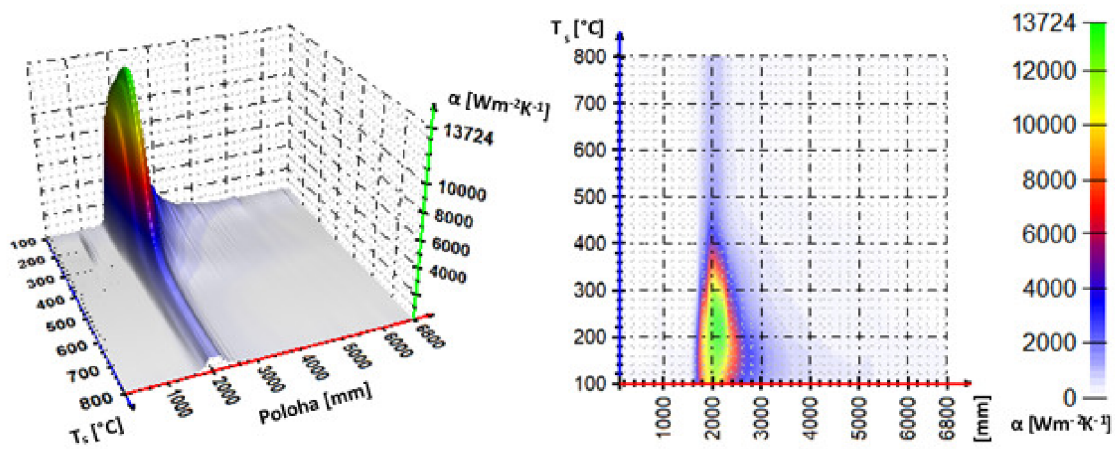
Výstupem inverzní úlohy jsou časově závislé okrajové podmínky – součinitel přestupu tepla a povrchová teplota (4.4). Jelikož během celého experimentálního měření se zaznamenává poloha testovací desky, lze součinitel přestupu tepla vyjádřit v závislosti na povrchové teplotě a poloze (obrázek 4.5)



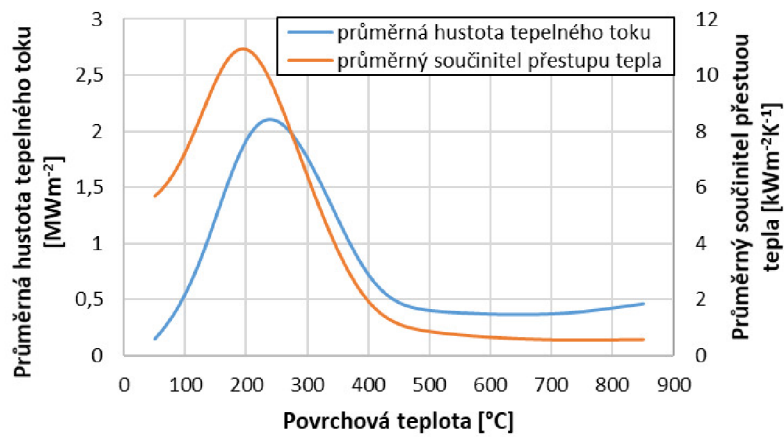
Obr. 4.4: Závislost naměřené a povrchové teploty a součinitele přestupu tepla na čase

Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze je velmi dobrou okrajovou podmínkou pro simulaci chlazení. Kromě změny součinitele přestupu tepla s povrchovou teplotou zahrnuje i změnu chlazení v důsledku změny polohy testovací desky vůči chladicí sekci. Vzhledem k složité interpretaci a implementaci do komerčních softwarů se však často využívá součinitel přestupu tepla v závislosti pouze na povrchové teplotě, popřípadě pozici [9].

Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě (obrázek 4.6) se získá zprůměrováním přes interval polohy, na kterém chceme zkoumat intenzitu chlazení. Z takto určeného součinitele přestupu tepla můžeme pomocí Newtonova ochlazovacího zákona (1.7) vypočítat hustotu tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě.



Obr. 4.5: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze



Obr. 4.6: Hustota tepelného toku a součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě



## 5 VLIV KVALITY POVRCHU NA CHLAZENÍ

Tato kapitola se zabývá studiem vlivu drsnosti povrchu a přítomnosti oxidů na povrchu na chlazení při zpracování oceli. Protože těmto faktorům není v literatuře věnováno tolik pozornosti, je zde rozebrán jejich vliv. Pro zkoumání vlivu kvality povrchu na chlazení byly použity tři testovací desky s různými druhy povrchů:

- testovací deska s broušeným povrchem (obrázek 5.1),
- testovací deska s válcovaným povrchem (obrázek 5.2),
- testovací deska se zoxidovaným povrchem (obrázek 5.3).



Obr. 5.1: Testovací deska s broušeným povrchem (broušená je pouze středová oblast desky, kde se nacházejí termočlánky)



Obr. 5.2: Testovací deska s válcovaným povrchem

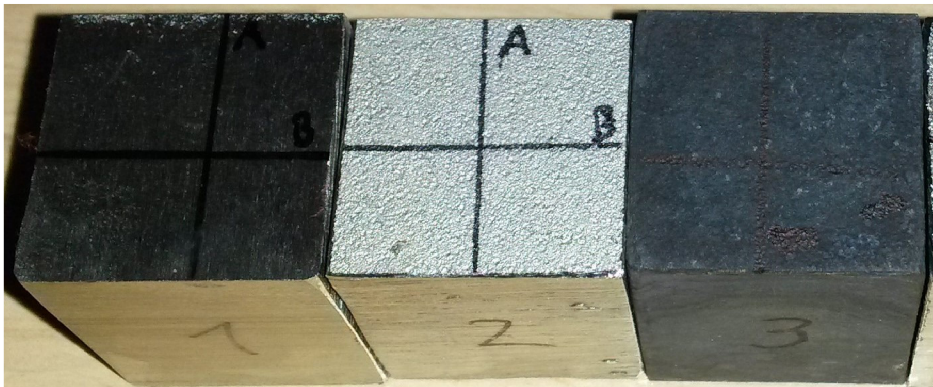


Obr. 5.3: Testovací deska se zoxidovaným povrchem

V případě zoxidovaného povrchu dosahovala tloušťka vrstvy oxidů  $27 \pm 8 \mu\text{m}$ . Všechny tři typy povrchů byly podrobeny sprchovému a rovněž laminárnímu chlazení. Průběh chlazení na jednotlivých površích byl následně porovnán a byl posouzen vliv zkoumaných faktorů.

## 5.1 Stanovení drsnosti povrchu

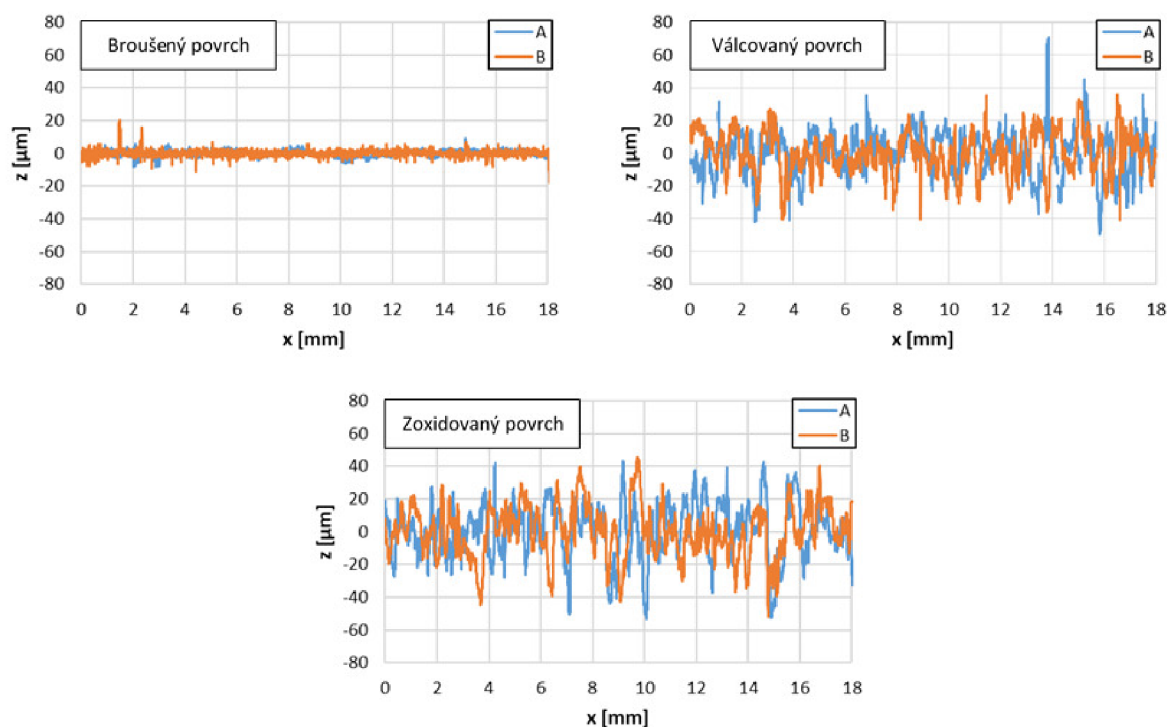
Na všech třech zkoumaných površích bylo provedeno měření drsnosti povrchu. K tomuto účelu byly vytvořeny vzorky se stejnou povrchovou úpravou jako u testovacích desek (obrázek 5.4).



Obr. 5.4: Vzorky pro měření drsnosti povrchu (1 – broušený povrch, 2 – válcovaný povrch, 3 – zoxidovaný povrch)

U každého vzorku byla provedena dvě měření profilu drsnosti podél navzájem kolmých úsečků A a B znázorněných na obrázku 5.4. Získané profily jsou zobrazeny na obrázku 5.5. Výškové parametry  $R_a$  a  $R_z$  jsou shrnuty v tabulce 5.1. Z uvedených profilů a stanovených

parametrů drsnosti je zřejmé, že broušený povrch se od válcovaného a zoxidovaného značně liší.



Obr. 5.5: Profily drsnosti pro jednotlivé typy povrchů

Tab. 5.1: Parametry  $R_a$  a  $R_z$  pro zkoumané povrchy

Úsek	Broušený povrch		Válcovaný povrch		Zoxidovaný povrch	
	A	B	A	B	A	B
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,636	1,146	3,201	2,821	3,296	2,931
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	8,665	21,216	67,998	34,790	39,539	27,335

Průměrná hodnota parametru  $R_a$  byla pro broušený povrch  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$ , pro válcovaný povrch  $R_a = 3,0 \mu\text{m}$  a pro zoxidovaný povrch  $R_a = 3,1 \mu\text{m}$ .

## 5.2 Sprchové chlazení

K sprchovému chlazení byly vybrány tři druhy trysek. Dvě trysky s plochým paprskem P2525 a P2572 a jedna kuželová tryska K1551. Trysky s plochým paprskem měly úhel rozstříku  $25^\circ$  a lišily se ve velikosti ústí. Kuželová tryska měla úhel rozstříku  $15^\circ$ . Chlazení bylo vždy realizováno třemi tryškami stejného typu, přičemž osa prostřední tryšky procházela středem testovací desky (obrázek 5.6). Rozteč mezi tryškami byla 200 mm. Vzdálenost od ochlazovaného povrchu byla 1900 mm (typická pro výběhový úsek na válcovací trati). Rychlost testovací desky byla vždy  $5 \text{ m s}^{-1}$  a počáteční teplota  $500^\circ\text{C}$ . Další parametry měření jsou uvedeny v tabulce 5.2.





Obr. 5.6: Ukázka sprchového chlazení

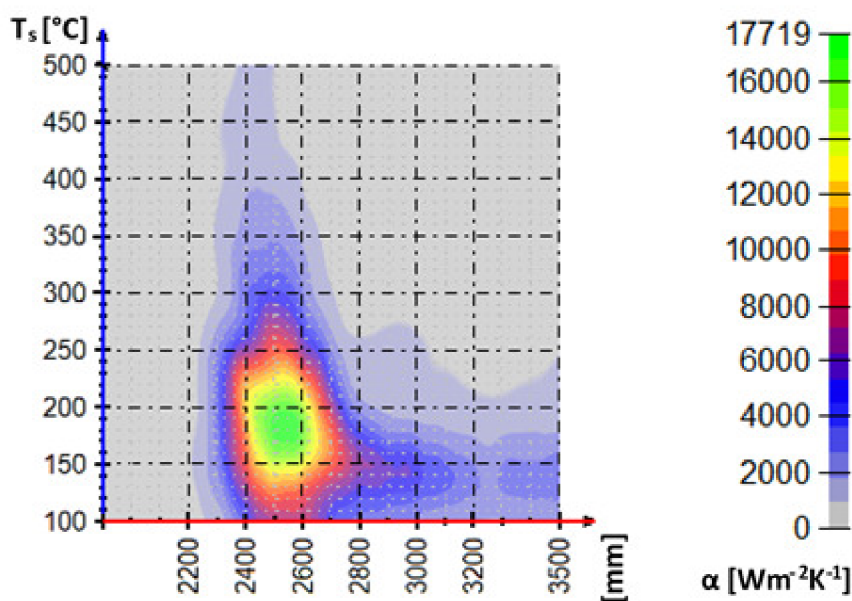
Tab. 5.2: Parametry měření – sprchové chlazení

Experiment	Tryska	Tlak vody [bar]	Hustota dopadající vody [ $\text{l min}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]	Povrch
E01	P2525	1,5	10	válcovaný
E02	P2525	4	16	válcovaný
E03	P2525	10	25	válcovaný
E04	P2572	1,5	28	válcovaný
E05	P2572	4	46	válcovaný
E06	P2572	10	72	válcovaný
E07	K1551	1,5	20	válcovaný
E08	K1551	4	32	válcovaný
E09	K1551	10	51	válcovaný
E11	P2525	1,5	10	zoxidovaný
E12	P2525	4	16	zoxidovaný
E13	P2525	10	25	zoxidovaný
E14	P2572	1,5	28	zoxidovaný
E15	P2572	4	46	zoxidovaný
E16	P2572	10	72	zoxidovaný
E17	K1551	1,5	20	zoxidovaný
E18	K1551	4	32	zoxidovaný
E19	K1551	10	51	zoxidovaný

Tab. 5.2: Parametry měření – sprchové chlazení (pokračování)

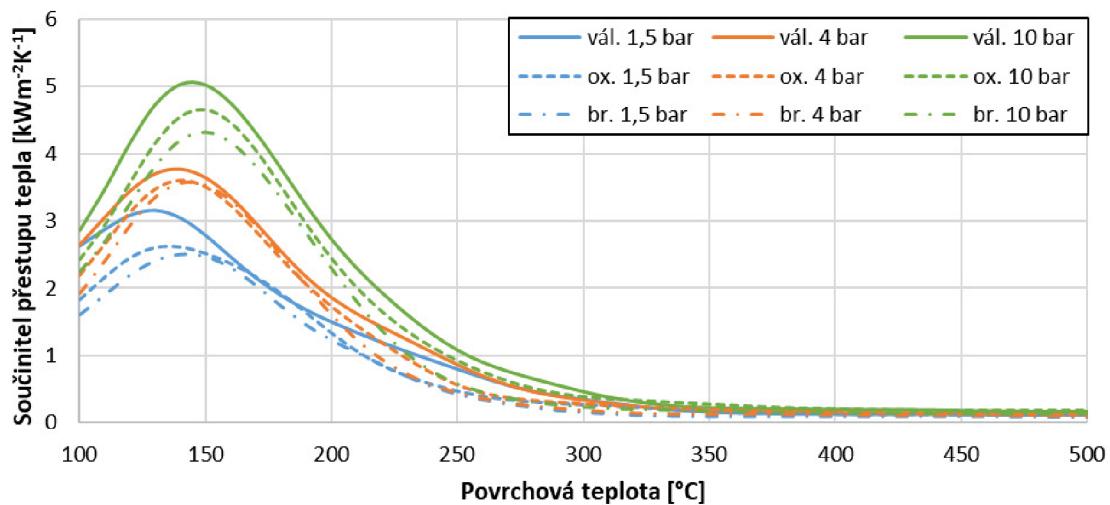
Experiment	Tryska	Tlak vody [bar]	Hustota dopadající vody [ $\text{l min}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]	Povrch
E21	P2525	1,5	10	broušený
E22	P2525	4	16	broušený
E23	P2525	10	25	broušený
E24	P2572	1,5	28	broušený
E25	P2572	4	46	broušený
E26	P2572	10	72	broušený
E27	K1551	1,5	20	broušený
E28	K1551	4	32	broušený
E29	K1551	10	51	broušený

Na obrázku 5.7 je pro ukázkou zobrazen výsledek měření z experimentu E09 v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze. Poloha 2400 mm odpovídá pozici přímo pod tryskami. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data ze všech čtyř termočlánků. Na obrázku 5.7 je tak průměrná hodnota součinitele přestupu tepla z termočlánků T1–T4.

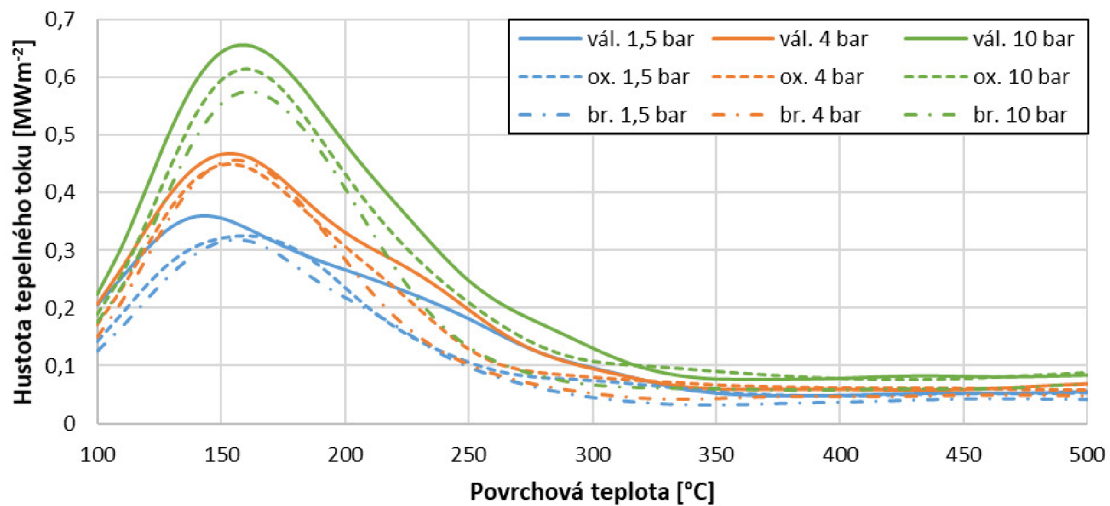


Obr. 5.7: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze – průměrná hodnota z termočlánků T1–T4; experiment E09

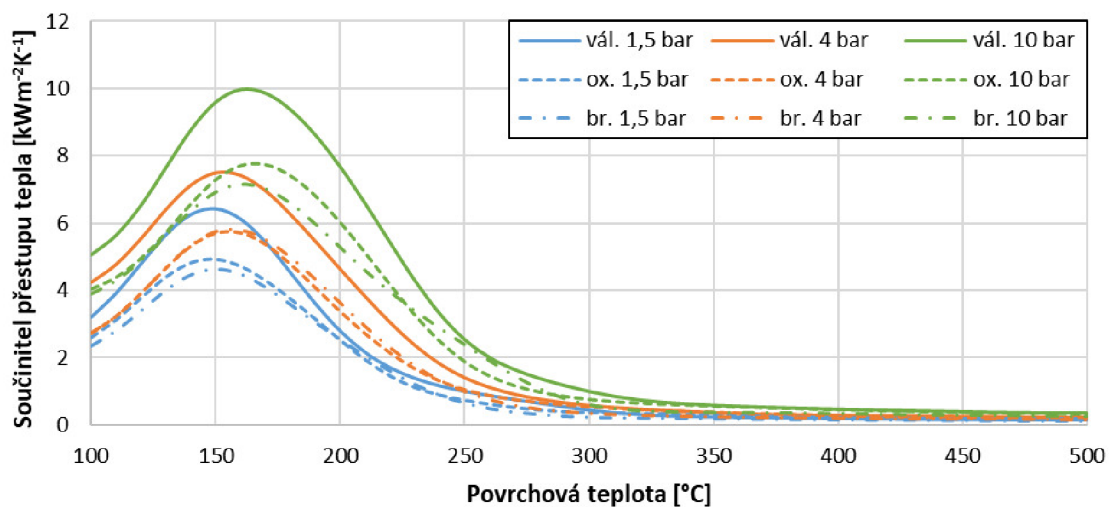
Pro další analýzu je využíván součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě. K získání těchto dat byl součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze zprůměrován přes interval polohy  $\langle 2250, 3250 \rangle$  o délce jeden metr. Výsledky ze všech experimentů jsou pro jednotlivé druhy trysek uvedeny na obrázcích 5.8 až 5.13.



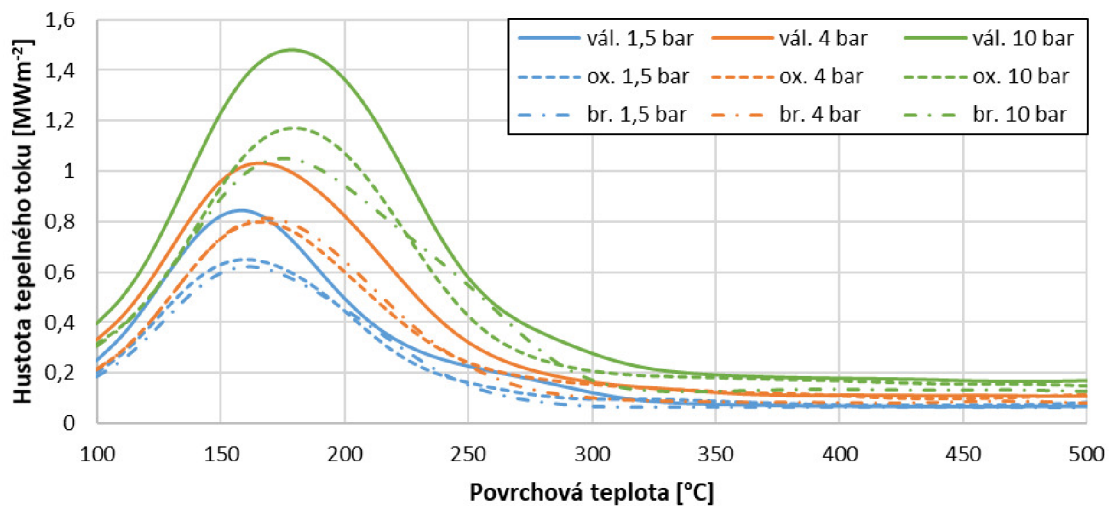
Obr. 5.8: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2525 (malá tryska s plochým paprskem, experimenty E01–E03, E11–E13, E21–E23)



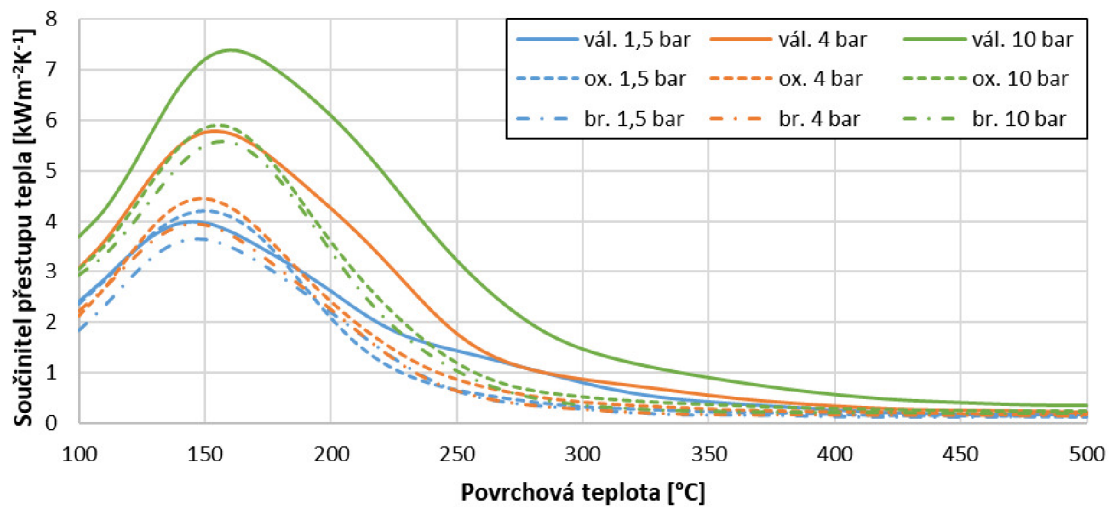
Obr. 5.9: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2525 (malá tryska s plochým paprskem, experimenty E01–E03, E11–E13, E21–E23)



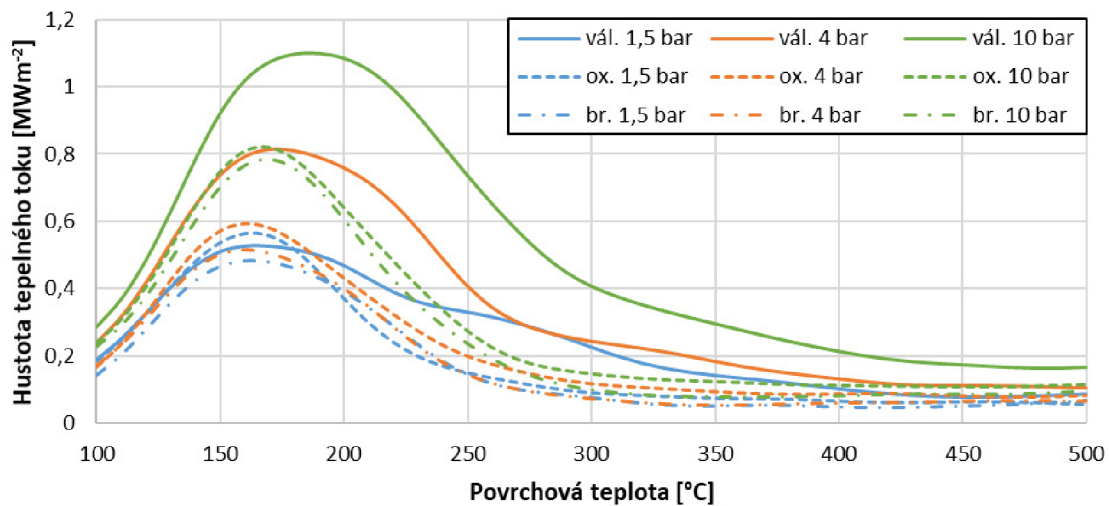
Obr. 5.10: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2572 (velká tryska s plochým paprskem, experimenty E04–E06, E14–E16, E24–E26)



Obr. 5.11: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2572 (velká tryska s plochým paprskem, experimenty E04–E06, E14–E16, E24–E26)



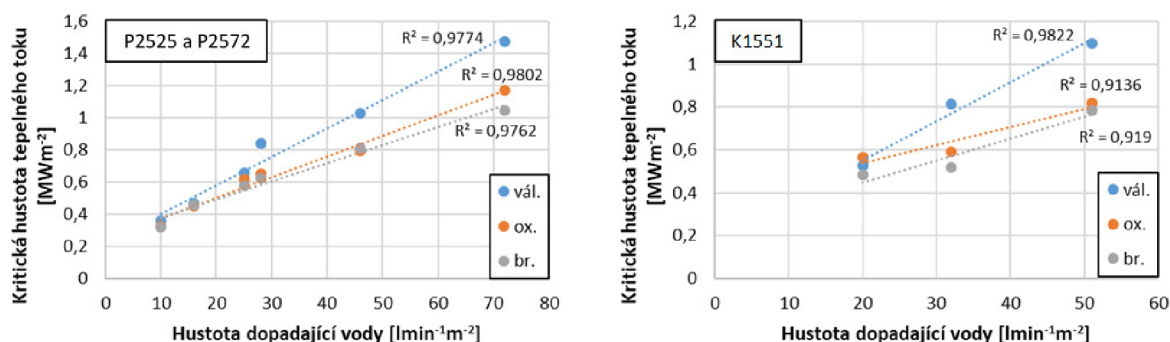
Obr. 5.12: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska K1551 (kuželová tryska, experimenty E07–E09, E17–E19, E27–E29)



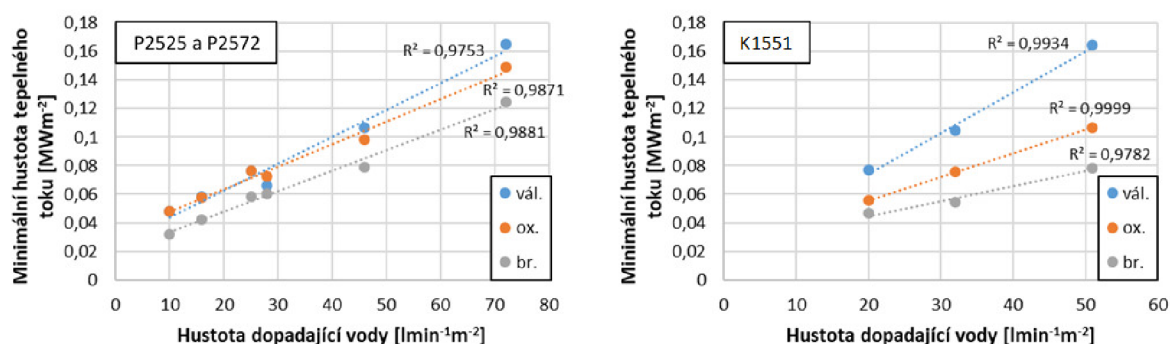
Obr. 5.13: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska K1551 (kuželová tryska, experimenty E07–E09, E17–E19, E27–E29)



Ze závislosti hustoty tepelného toku na povrchové teplotě byly určeny kritická (maximální) a minimální hustota tepelného toku. Tyto veličiny jsou v závislosti na hustotě dopadající vody zobrazeny na obrázcích 5.14 a 5.15.



Obr. 5.14: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy (vál. – válcovaný, ox. – zoxidovaný, br. – broušený);



Obr. 5.15: Minimální hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy

Z obrázků je patrné, že jak kritická, tak i minimální hustota tepelného toku lineárně roste se zvyšující se hustotou dopadající vody. Dobře viditelný je také vliv povrchu. Kritická hustota tepelného toku dosahuje nejvyšších hodnot na válcovaném povrchu. Oproti broušenému povrchu můžeme pozorovat hodnoty vyšší v průměru o cca 37 % v případě chlazení kuželovou tryskou. U trysek s plochým paprskem je rozdíl průměrně 28 %, přičemž při nejvyšší hustotě dopadající vody ( $721\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$ ) dosahuje 46 %. Zoxidovaný povrch rovněž vykazuje vyšší hodnoty kritické hustoty tepelného toku v porovnání s broušeným povrchem. Rozdíl však není tak značný (v průměru 5 % a 11 % pro ploché trysky, respektive kuželovou trysku). V případě minimální hustoty tepelného toku vidíme odlišné chování pro trysky s plochým paprskem a pro kuželovou trysku. U trysek s plochým paprskem je rozdíl mezi válcovaným a zoxidovaným povrchem velmi malý a to především při nižších hodnotách hustoty dopadající vody. Při porovnání válcovaného povrchu s broušeným dosahuje minimální hustota tepelného toku na válcovaném povrchu vyšších hodnot v průměru zhruba o 31 %. V případě kuželové trysky se minimální hustota tepelného toku značně mění v závislosti na povrchové úpravě. Zoxidovaný povrch vykazuje hodnoty

v průměru o cca 33 % vyšší oproti broušenému povrchu. Válcovaný povrch pak dokonce o více než 90 %.

Interpretovat vliv hustoty dopadající vody společně s vlivem kvality povrchu na kritickou hustotu tepelného toku lze s pomocí parametru drsnosti  $Rz$  (tabulka 5.1). V [9] bylo experimentálně zjištěno, že kritická hustota tepelného toku lineárně roste se zvyšujícím se parametrem drsnosti  $Rz$ . Lineární vztah je i mezi kritickou hustotou tepelného toku a hustotou dopadající vody (obrázek 5.14). Kritickou hustotu tepelného toku v závislosti na parametru drsnosti  $Rz$  a na hustotě dopadající vody lze tedy popsat rovnicí

$$y(Rz, H_v) = k_1 + k_2Rz + k_3H_v, \quad (5.1)$$

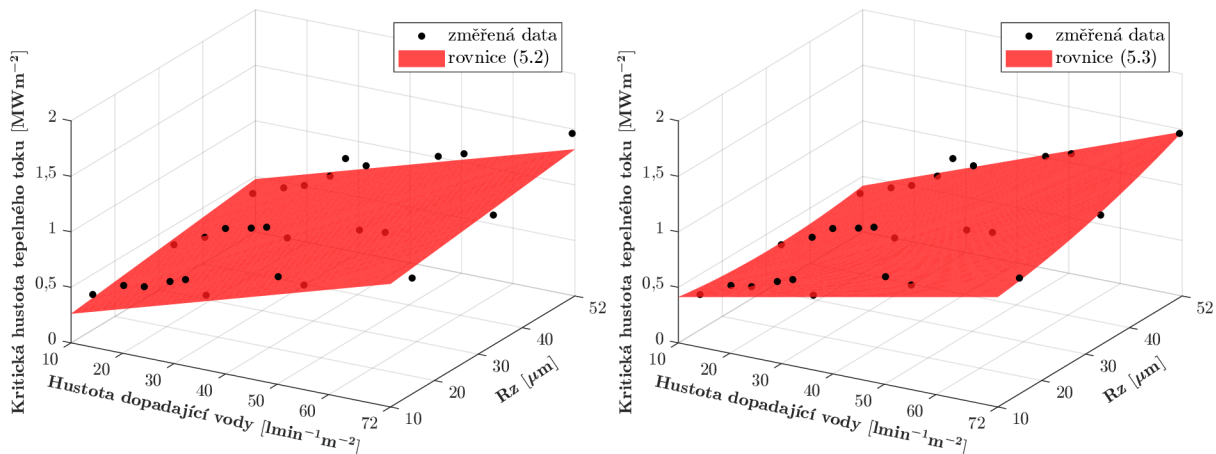
kde  $Rz$  je parametr drsnosti povrchu,  $H_v$  je hustota dopadající vody a  $k_1$ – $k_3$  jsou neznámé koeficienty. Pro data zjištěná v této práci (trysky s plochým i kuželovým paprskem,  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ],  $H_v$  [ $\text{lmin}^{-1}\text{m}^{-2}$ ]) dostáváme rovnici ve tvaru

$$y_l(Rz, H_v) = 75470 + 5054Rz + 13650H_v, \quad (5.2)$$

jejíž grafická interpretace je na obrázku 5.16 (vlevo). Lineární vztah mezi parametrem drsnosti  $Rz$  a kritickou hustotou tepelného toku však nepopisuje data příliš vhodně a proto byl vytvořen druhý model, ve kterém se parametr drsnosti  $Rz$  vyskytuje i v druhé mocnině. Tento model je popsán rovnicí

$$y_k(Rz, H_v) = 420400 - 11610Rz + 7450H_v + 157,8Rz^2 + 186,5RzH_v. \quad (5.3)$$

Její grafická interpretace je na obrázku 5.16 (vpravo). Druhý model popisuje experimentální data vhodněji, což je patrné při porovnání modelů pomocí koeficientu determinace  $R^2$  a směrodatné odchylky chyb  $RMSE$  (tabulka 5.3).



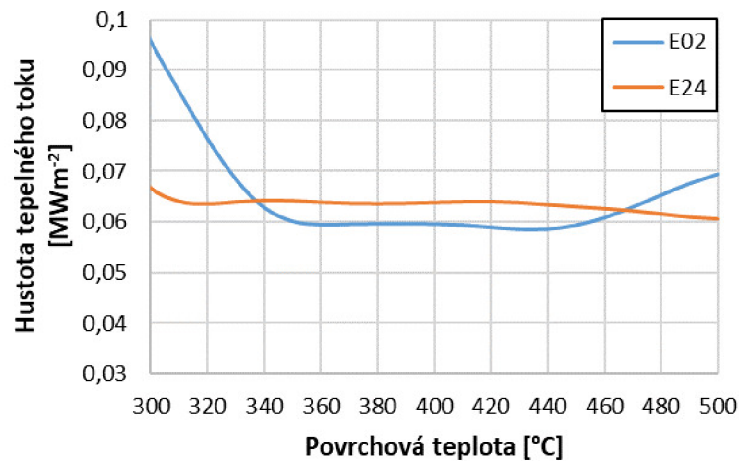
Obr. 5.16: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody a drsnosti povrchu; data z experimentů E01–E29

Dalším významným parametrem popisujícím chlazení je Leidenfrostova teplota, která je spjata s minimální hustotou tepelného toku. Při poklesu teploty povrchu pod Leidenfrostovu teplotu začne docházet k postupnému rozpadu parní vrstvy, která pokrývá horký povrch. Blánový var se mění na přechodný a dochází k značnému nárůstu hustoty tepelného toku. Charakter chlazení se tak značně mění a Leidenfrostova teplota je proto

Tab. 5.3: Porovnání modelů pro predikci kritické hustoty tepelného toku

Model	$R^2$ [-]	$RMSE$ [ $W\ m^{-2}$ ]
1. model (rovnice 5.2)	0,920	82 440
2. model (rovnice 5.3)	0,963	58 470

důležitým bodem na křivce varu. Leidenfrostova teplota je výrazně závislá na parametrech chlazení a vlastnostech ochlazovaného povrchu, mezi které patří také právě drsnost povrchu a přítomnost oxidů. Její určení však může být zejména při slabším ostříku komplikované. Na obrázku 5.17 je zobrazena hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě pro vybrané experimenty E02 a E24. V případě experimentu E02 můžeme pozorovat nárůst hustoty tepelného toku od teploty cca 350 °C, minimální hodnoty však hustota tepelného toku dosahuje při teplotě 430 °C. Mezi těmito teplotami je hustota tepelného toku téměř konstantní a určit Leidenfrostovu teplotu je tak v podstatě nemožné. Obdobná situace nastává i u experimentu E24. V tomto případě se Leidenfrostova teplota může pohybovat v rozmezí teplot 310–500 °C.

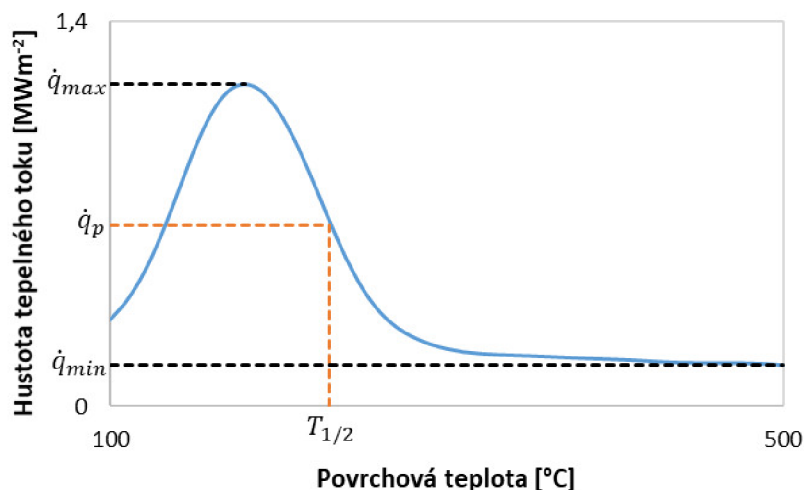


Obr. 5.17: Problematika stanovení Leidenfrostovy teploty

Z tohoto důvodu je v této práci zavedena teplota  $T_{1/2}$ . Tato teplota odpovídá hustotě tepelného toku  $\dot{q}_p$  definované jako:

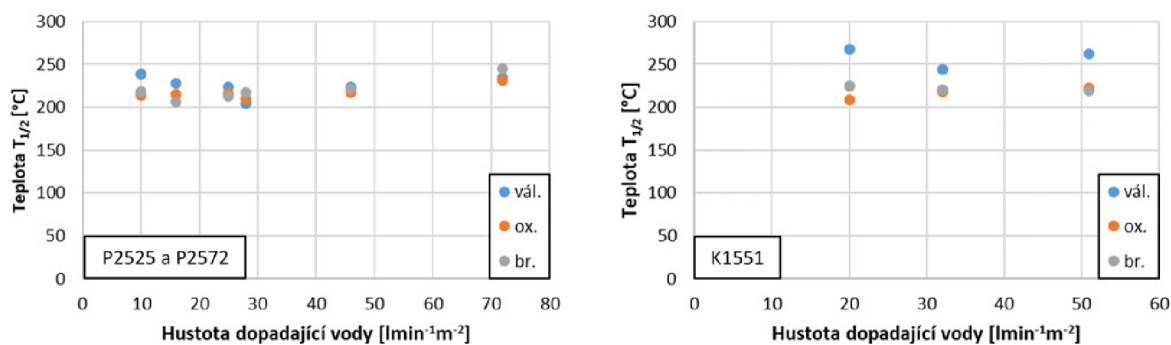
$$\dot{q}_p = \frac{\dot{q}_{max} + \dot{q}_{min}}{2}, \quad (5.4)$$

kde  $\dot{q}_{max}$  je kritická hustota tepelného toku a  $\dot{q}_{min}$  je minimální hustota tepelného toku. Jedná se tedy o teplotu, která odpovídá průměrné hustotě tepelného toku vypočtené z maximální a minimální hustoty tepelného toku (obrázek 5.18). Tato teplota se nachází v přechodném varu a intenzita chlazení se v jejím okolí velmi rychle mění. Pro teploty nad hodnotou  $T_{1/2}$  je chlazení mírné a naopak při teplotách pod hodnotou  $T_{1/2}$  intenzivní. Jde tedy o důležitý bod z hlediska regulace chlazení.



Obr. 5.18: Stanovení teploty  $T_{1/2}$

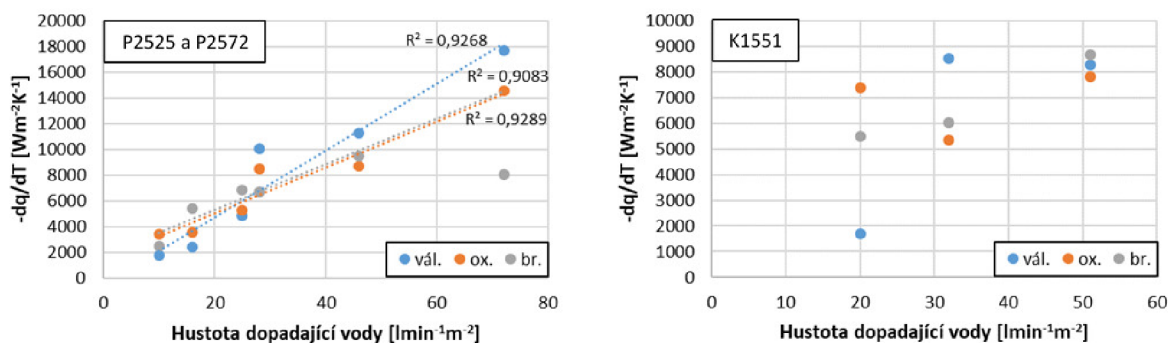
Vypočtené hodnoty teploty  $T_{1/2}$  jsou v závislosti na hustotě dopadající vody zobrazeny na obrázku 5.19. Z obrázku je vidět, že jak v případě trysek s plochým paprskem, tak i v případě trysky s kuželovým paprskem není pozorovatelný žádný trend s rostoucí hustotou dopadající vody. Rozdíly mezi jednotlivými povrchy jsou velmi malé. Pouze v případě trysky s kuželovým paprskem válcovaný povrch vykazuje mírně vyšší hodnoty teploty  $T_{1/2}$  oproti ostatním povrchům. Vyšší hodnoty teploty  $T_{1/2}$  pro válcovaný povrch by mohly být způsobeny větší drsností povrchu. Zoxidovaný povrch s podobnou drsností však dosahuje obdobných hodnot jako broušený povrch.



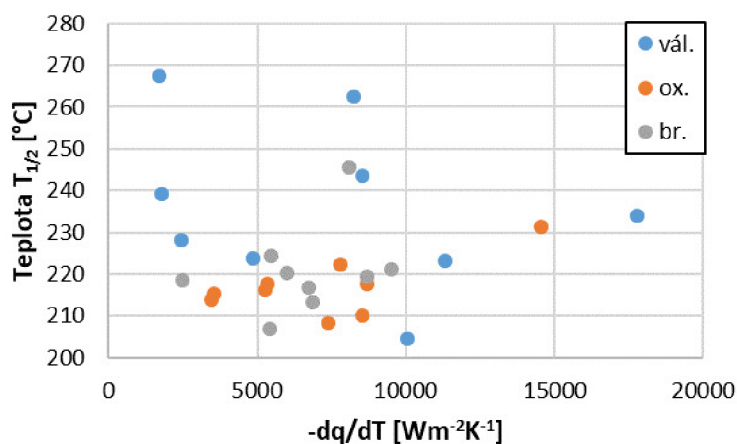
Obr. 5.19: Teplota  $T_{1/2}$  v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy

Pro zjištění, jak bude vypadat chlazení od teploty  $T_{1/2}$ , byla určena derivace hustoty tepelného toku při teplotě  $T_{1/2}$  podle teploty. Záporně vzatá derivace vyjadřuje, jak intenzivní bude nárůst hustoty tepelného toku od teploty  $T_{1/2}$  k nižším teplotám. Spolu s teplotou  $T_{1/2}$  poskytuje informace o chlazení v oblasti přechodného varu, kde dochází k velkému odběru tepla. Vypočítané záporně vzaté derivace jsou v závislosti na hustotě dopadající vody zobrazeny na obrázku 5.20. Z obrázku je vidět, že v případě trysek s plochým paprskem záporně vzatá derivace hustoty tepelného toku při teplotě  $T_{1/2}$  roste s rostoucí hustotou dopadající vody (výjimkou je hodnota záporně vzaté derivace pro maximální

hustotu dopadající vody u broušeného povrchu, tato hodnota proto nebyla zahrnuta do lineární regrese). Co se týče vlivu rozdílných povrchů, dosahuje záporně vzatá derivace u válcovaného povrchu oproti ostatním povrchům hodnot mírně nižších pro nízké hodnoty hustoty dopadající vody a naopak hodnot vyšších pro vysoké hodnoty hustoty dopadající vody. V případě trysky s kuželovým povrchem není patrný vliv rozdílných povrchů. Pozorován nebyl rovněž vztah mezi teplotou  $T_{1/2}$  a záporně vzatou derivací hustoty tepelného toku při této teplotě, což je vidět na obrázku 5.21.



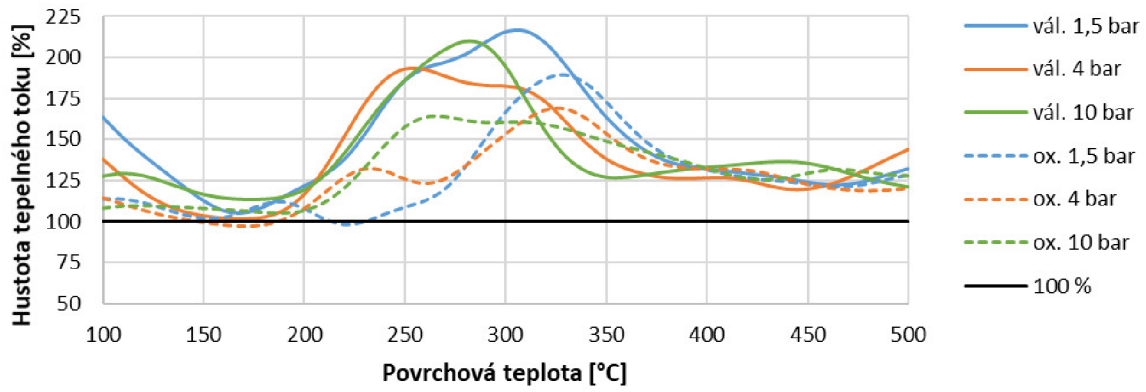
Obr. 5.20: Derivace hustoty tepelného toku při teplotě  $T_{1/2}$  v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy



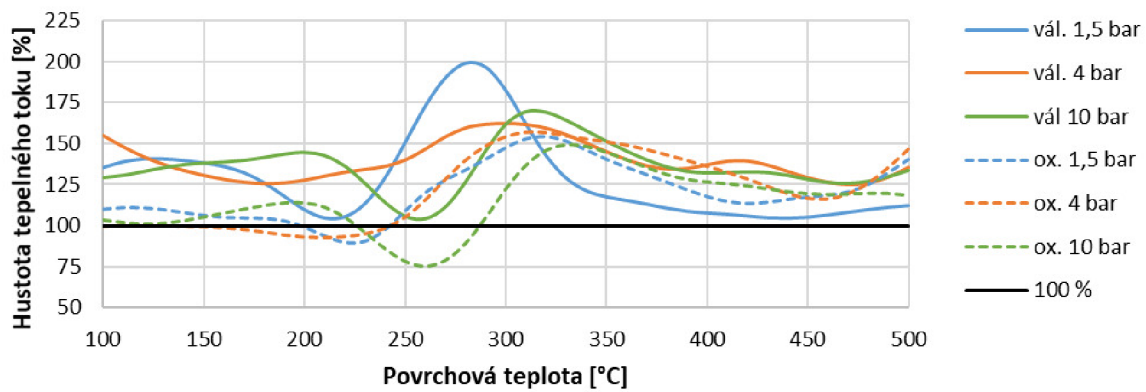
Obr. 5.21: Závislost teploty  $T_{1/2}$  na derivaci hustoty tepelného toku při teplotě  $T_{1/2}$  pro různé povrchy; chlazení tryskami s plochým i kuželovým paprskem

Pro stanovení vlivu drsnosti povrchu a přítomnosti oxidů na povrchu během celého procesu chlazení bylo využito procentuální porovnání hustoty tepelného toku. Jako 100 % byly zvoleny hodnoty pro broušený povrch. Výsledky pro jednotlivé trysky jsou na obrázcích 5.22 až 5.24. Při určování byla využita data z obrázků 5.9, 5.11 a 5.13 (závislost hustoty tepelného toku na povrchové teplotě pro jednotlivá měření). Z obrázků 5.22 až 5.24 je patrný rozdíl v chlazení na jednotlivých površích a pro jednotlivé typy ostříků.

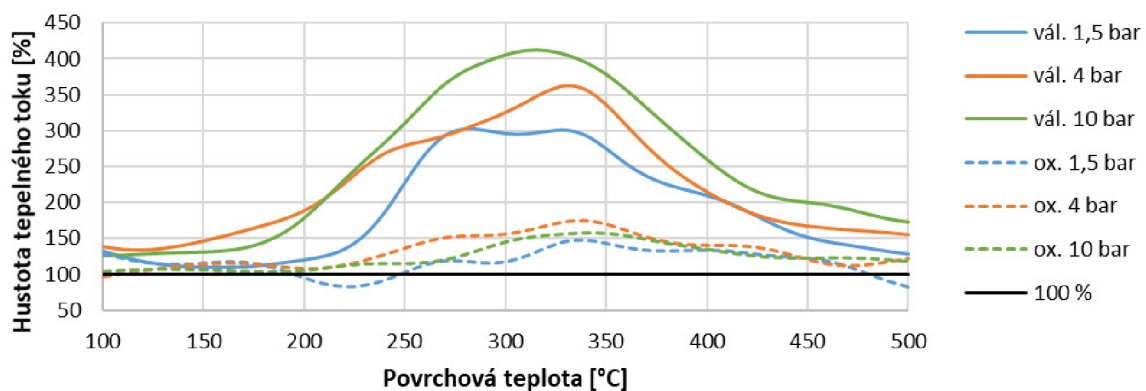




Obr. 5.22: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska P2525 (malá tryska s plochým paprskem)



Obr. 5.23: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska P2572 (velká tryska s plochým paprskem)



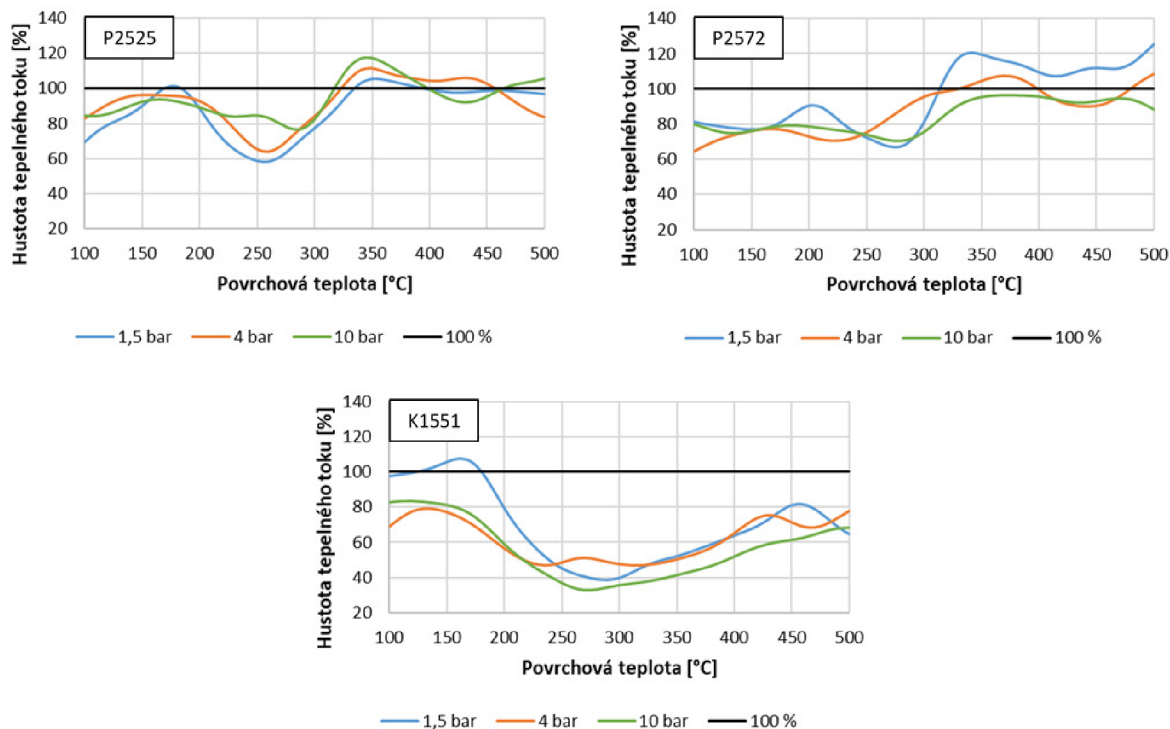
Obr. 5.24: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska K1551 (kuželová tryska)

Vliv drsnosti povrchu na průběh chlazení je z obrázků 5.22 až 5.24 patrný při porovnání válcovaného povrchu ( $R_a = 3,0 \mu\text{m}$ ) a broušeného povrchu ( $R_a = 0,9 \mu\text{m}$ ).

V případě chlazení tryskami s plochým paprskem hustota tepelného toku na válcovaném povrchu dosahuje v oblasti vyšších povrchových teplot (cca 350 až 500 °C) vyšších hodnot a to zhruba o 25 %. To je způsobeno tím, že drsnější povrch má větší teplosměnnou plochu a v případě blánového varu je z něj tak více tepla vyzářeno přes parní vrstvu. Při dalším poklesu povrchových teplot dojde k nárůstu rozdílu hustoty tepelného toku mezi sledovanými povrchy. To je důsledkem toho, že pro povrchy s větší drsností dosahuje Leidenfrostova teplota vyšších hodnot. Jak se s klesající teplotou postupně snižuje tloušťka parní vrstvy, dostává se u drsného povrchu stále více nerovností nad tuto vrstvu a vystavují se tak přímému kontaktu s chladicí kapalinou (vodou) z trysek. V důsledku toho se odvádí z povrchu více tepla a blánový var se mění na přechodný. S dalším poklesem povrchových teplot je dosaženo Leidenfrostovy teploty i na broušeném povrchu, hustota tepelného toku i zde začíná intenzivně narůstat a rozdíly v chlazení se opět snižují.

V případě kuželové trysky dochází k nárůstu rozdílu v chlazení již za vyšších teplot. Rozdíly v intenzitě chlazení mezi jednotlivými povrchy jsou v tomto případě také výrazně větší. Během přechodového varu dosahuje hustota tepelného toku na válcovaném povrchu více jak trojnásobné hodnoty oproti broušenému povrchu.

Pro stanovení vlivu přítomnosti oxidů na chlazení byl porovnán zoxidovaný a válcovaný povrch. Tyto povrchy měly takřka totožné výškové parametry  $R_a$  (zoxidovaný povrch  $R_a = 3,1 \mu\text{m}$ , válcovaný povrch  $R_a = 3,0 \mu\text{m}$ ). Z obrázku 5.25 tak můžeme vidět, jak přítomnost oxidů na povrchu ovlivňuje chlazení.



Obr. 5.25: Porovnání chlazení na zoxidovaném a válcovaném povrchu; 100 % – válcovaný povrch

Při použití trysek s plochým paprskem je chlazení v oblasti blánového varu pro oba povrchy velmi podobné. Po poklesu povrchové teploty pod Leidenfrostovu teplotu nedosahuje chlazení zoxidovaného povrchu takové intenzity jako v případě válcovaného povrchu. Největší rozdíl je kolem povrchové teploty cca 250 °C, kdy intenzita chlazení zoxidovaného povrchu odpovídá přibližně 70 % intenzity chlazení na válcovaném povrchu. Pokles intenzity chlazení zoxidovaného povrchu vůči válcovanému je způsoben vyšší Leidenfrostovou teplotou u válcovaného povrchu. Oba povrchy mají podobné hodnoty parametru drsnosti  $R_a$ , ale u válcovaného povrchu byly zaznamenány větší hodnoty výškového parametru  $R_z$  (viz tabulka 5.1). Tento parametr lépe postihuje vliv drsnosti povrchu na Leidenfrostovu teplotu, protože zohledňuje výskyt velkých nerovností, které dříve proniknou parní vrstvou a způsobí větší odvod tepla. Leidenfrostova teplota tedy s rostoucím parametrem drsnosti  $R_z$  roste, což je potvrzeno například v [3]. Při nízkých povrchových teplotách v oblasti bublinového varu můžeme pozorovat izolační vliv vrstvy oxidů. Intenzita chlazení zde dosahuje 80–90 % intenzity chlazení na válcovaném povrchu.

U kuželové trysky je intenzita chlazení na zoxidovaném povrchu nižší v celém rozsahu teplot. Pokles intenzity se pohybuje přibližně v rozmezí od 40 do 80 %.

### 5.3 Laminární chlazení

Pro laminární chlazení bylo využito 18 trysek o průměru 17 mm. Trysky byly umístěny ve dvou řadách vzdálených od sebe 360 mm a rozteč mezi tryskami byla 40 mm. Osa prostřední trysky v první řadě procházela středem testovací desky. Vzdálenost od ochlazovaného povrchu byla stejně jako v případě sprchového chlazení 1900 mm (obrázek 5.26). Totožná byla rovněž rychlost testovací desky ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ) a počáteční teplota (500 °C). Další parametry měření jsou uvedeny v tabulce 5.4.



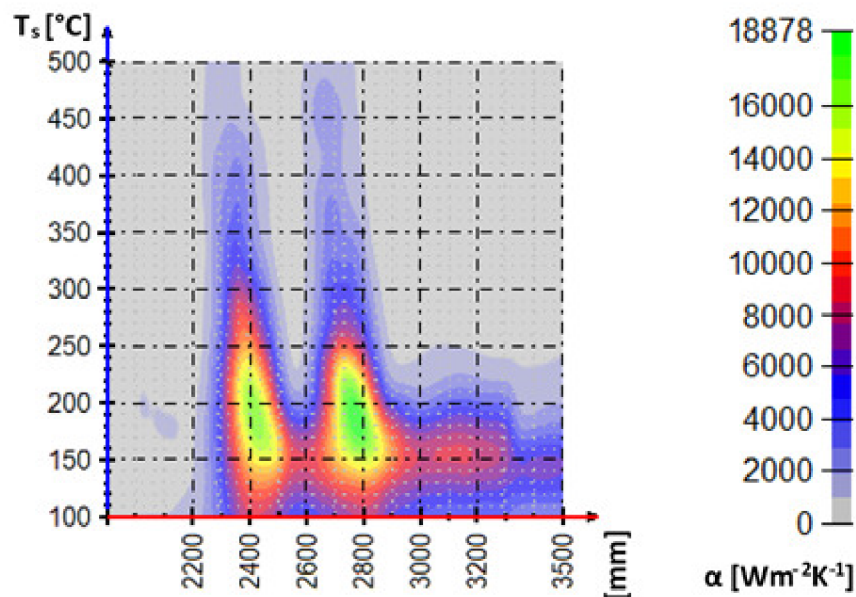
Obr. 5.26: Ukázka laminárního chlazení



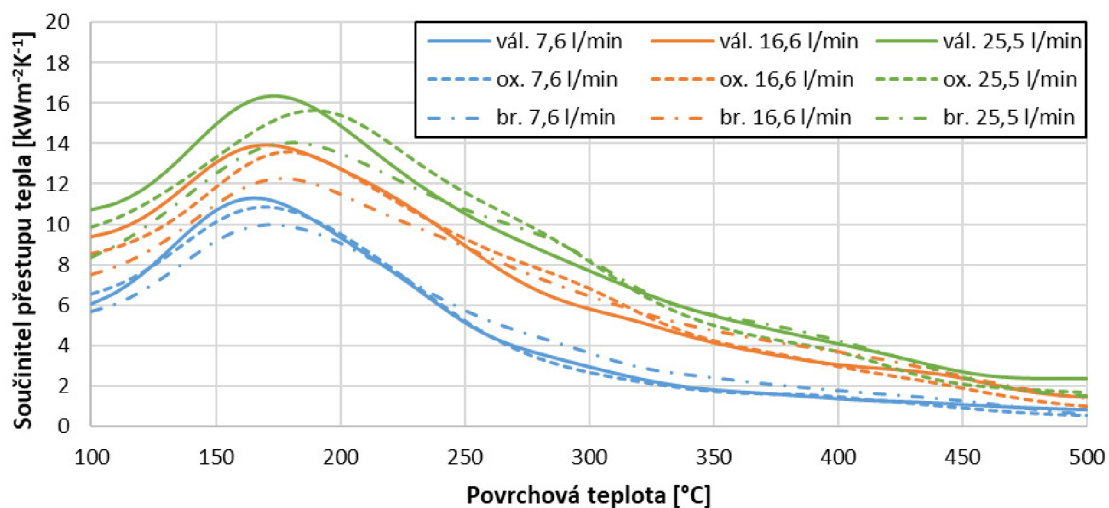
Tab. 5.4: Parametry měření – laminární chlazení

Experiment	Průtok vody na trysku [l min <sup>-1</sup> ]	Hustota dopadající vody [l min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]	Povrch
E01_L	7,6	382	válcovaný
E02_L	16,6	828	válcovaný
E03_L	25,5	1274	válcovaný
E11_L	7,6	382	zoxidovaný
E12_L	16,6	828	zoxidovaný
E13_L	25,5	1274	zoxidovaný
E21_L	7,6	382	broušený
E22_L	16,6	828	broušený
E23_L	25,5	1274	broušený

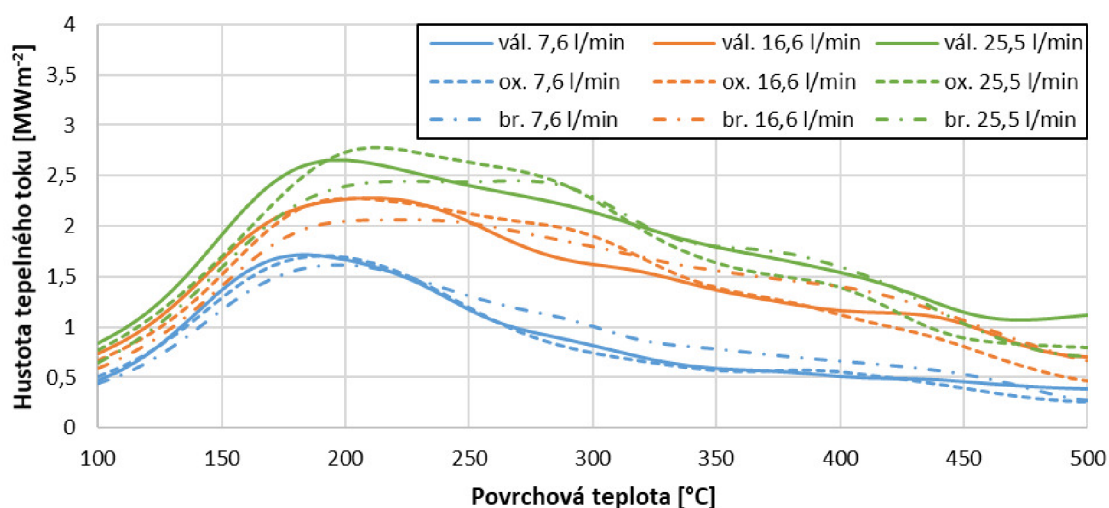
Na obrázku 5.27 je pro představu zobrazen výsledek měření z experimentu E01\_L. Uvedený součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze byl získán jako průměr ze čtyřech termočlánků T1–T4. Poloha 2400 mm a 2760 mm odpovídá pozici přímo pod tryskami. Pro určení součinitele přestupu tepla a hustoty tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě byl součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze zprůměrován přes interval polohy ⟨2220, 2940⟩ o délce 720 mm (dvojnásobek rozteče řad). Výsledky z jednotlivých experimentů jsou na obrázcích 5.28 a 5.29.



Obr. 5.27: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze; průměrná hodnota z termočlánků T1–T4; experiment E01\_L



Obr. 5.28: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; laminární chlazení; experimenty E01\_L–E03\_L, E11\_L–E13\_L, E21\_L–E23\_L



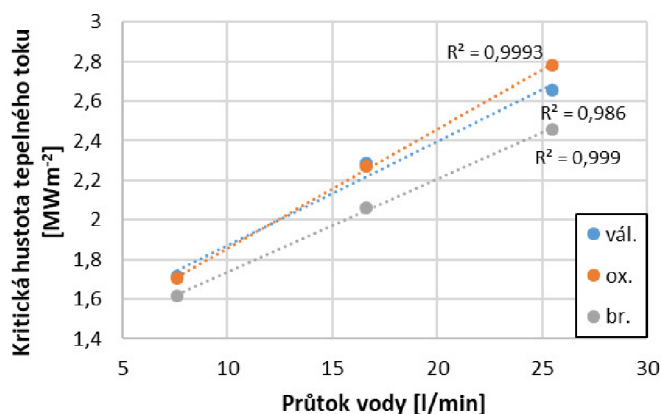
Obr. 5.29: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; laminární chlazení; experimenty E01\_L–E03\_L, E11\_L–E13\_L, E21\_L–E23\_L

Z obrázků je patrné, že oproti sprchovému chlazení nejsou v případě laminárního chlazení na první pohled vidět značné rozdíly mezi jednotlivými povrchy. Zřejmá je jen nižší hodnota kritické hustoty tepelného toku v případě broušeného povrchu, což je potvrzeno na obrázku 5.30, kde je zobrazena kritická hustota tepelného toku v závislosti na průtoku vody. Z tohoto obrázku je vidět, že pro válcovaný a zoxidovaný povrch dosahuje kritická hustota tepelného toku velmi podobných hodnot, které jsou průměrně o cca 9 % vyšší než v případě broušeného povrchu.

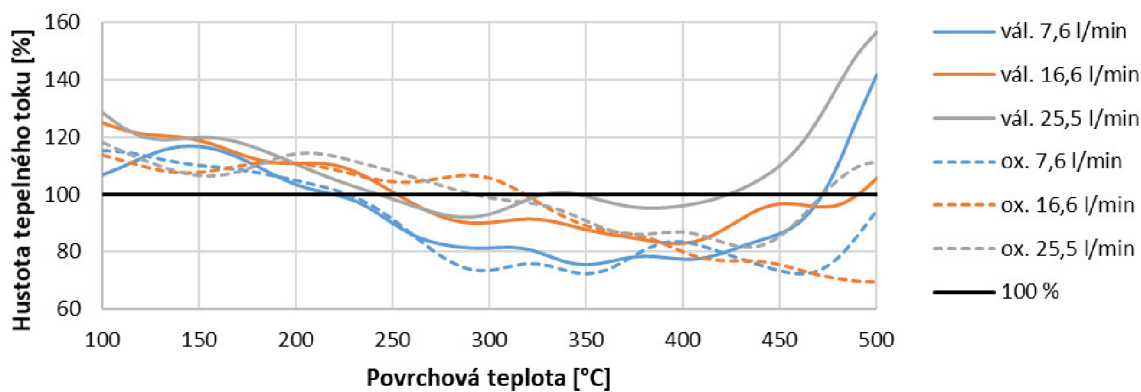
Malé rozdíly mezi chlazením na jednotlivých površích jsou dobře pozorovatelné na obrázku 5.31, kde můžeme vidět procentuální porovnání hustoty tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě. Hodnotu 100 % zde zastupuje broušený povrch. Jak válcovaný, tak

i zoxidovaný povrch vykazují trochu nižší intenzitu chlazení v oblasti blánového a přechodného varu. Naopak při nižších povrchových teplotách v oblasti bublinového varu je intenzita chlazení u válcovaného a zoxidovaného povrchu mírně vyšší oproti povrchu broušenému.

Vzhledem k tomu, že Leidenfrostova teplota dosahovala hodnot nad 500 °C, nebyla v případě laminárního chlazení stanovena teplota  $T_{1/2}$  a minimální hustota tepelného toku. Počáteční teplota experimentů 500 °C byla zvolena z důvodu zamezení oxidace experimentálních desek při vyšších teplotách.



Obr. 5.30: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na průtoku vody pro různé povrchy



Obr. 5.31: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch

## 5.4 Shrnutí získaných výsledků

Pomocí experimentálních měření byl na testovacích deskách s různou úpravou povrchu (válcovaný, zoxidovaný, broušený povrch) zkoumán vliv kvality povrchu na sprchové a laminární chlazení, které se využívá při tepelném zpracování oceli.

U sprchového chlazení byl vliv drsnosti nejvíce patrný u chlazení realizovaného tryskou s kuželovým paprskem. U válcovaného povrchu s drsností povrchu  $R_a = 3,0 \mu\text{m}$  bylo oproti

broušenému povrchu ( $Ra = 0,9 \mu\text{m}$ ) dosaženo větší intenzity chlazení v celém rozsahu povrchových teplot. Největší rozdíl byl však v oblasti přechodného varu, kde v důsledku vyšší Leidenfrostovy teploty související s vyšší drsností povrchu dosahovala intenzita chlazení více jak trojnásobné hodnoty. U trysek s plochým paprskem byla rovněž pozorována větší intenzita chlazení u drsnějšího povrchu. V oblasti blánového varu byl rozdíl v chlazení přibližně 25 % a v oblasti přechodného varu tento rozdíl výrazně narostl. Obecně je tak chlazení drsnějších povrchů v oblasti blánového varu intenzivnější v důsledku větší teplosměnné plochy (v případě velkého množství dopadající vody nebude pravděpodobně vliv drsnosti tak významný). To potvrzují například i výsledky zjištěné v [9]. Největší rozdíl je však v oblasti přechodného varu, protože větší drsnost povrchu posouvá Leidenfrostovu teplotu k vyšším hodnotám a rovněž způsobuje nárůst kritické hustoty tepelného toku. Tato zjištění jsou v souladu s již publikovanými výsledky v pracích zabývajících se touto tematikou [6, 3, 20]

V případě laminárního chlazení nebyl vliv drsnosti povrchu výrazný. Stejně jako v případě sprchového chlazení dosahovala kritická hustota tepelného toku vyšších hodnot pro drsnější povrch, nicméně rozdíl byl průměrně jen zhruba 9 % (u sprejů více jak 28 %). Totožné bylo i chování v oblasti bublinového varu, kde drsnější povrch rovněž vykazoval vyšší intenzitu chlazení (cca o 15 %). Rozdíl byl však oproti sprejům (30 %) méně výrazný. V ostatních režimech varu vykazoval drsnější povrch trochu nižší intenzitu chlazení. Vliv drsnosti povrchu v případě laminárního chlazení tak nebyl příliš významný a to v důsledku velkého množství dopadající vody na ochlazovaný povrch.

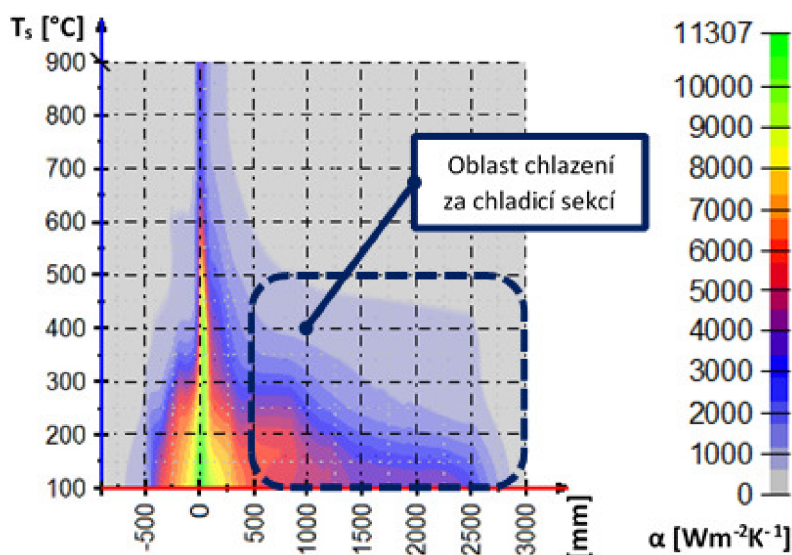
Co se týče vlivu přítomnosti oxidů na povrchu, tak v případě laminárního chlazení nebyl, stejně jako v případě vlivu drsnosti, pozorován významný vliv.

U sprchového chlazení byl patrný izolační vliv oxidů v oblasti bublinového varu, kde intenzita chlazení dosahovala 80–90 % intenzity chlazení na válcovaném povrchu. Izolační vliv oxidů v oblasti bublinového varu byl rovněž pozorován v [9] a [35]. U trysek s plochým paprskem byla v oblasti blánového varu intenzita chlazení podobná jako u válcovaného povrchu – oba povrchy měly velmi podobné hodnoty parametru  $Ra$  a přenos tepla přes parní vrstvu byl tak velmi podobný. V oblasti přechodného varu se projevila vyšší hodnota Leidenfrostovy teploty u válcovaného povrchu, která byla způsobena vyššími hodnotami parametru drsnosti  $Rz$ . Zoxidovaný povrch tak nedosahoval takové intenzity chlazení. V případě kuželové trysky u válcovaného povrchu blánový var nastal jen na velmi krátkou dobu (Leidenfrostova teplota byla blízko  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a proto byla intenzita chlazení na zoxidovaném povrchu nižší v celém rozsahu teplot.

## 6 ZBYTKOVÁ VODA

### 6.1 Úvod do problematiky

Zbytková voda se vyskytuje ve formě tenké vodní vrstvy na ochlazovaném povrchu po ostříku. V důsledku povrchového napětí se drží také na spodním povrchu v případě spodního chlazení. K tvorbě zbytkové vodní vrstvy dochází rovněž i v případě použití velmi slabého ostříku. Efekt zbytkové vody na chlazení je dobře patrný z obrázku 6.1, na kterém je zobrazen součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě testovacího vzorku a poloze testovacího vzorku vůči chladicí sekci, skrz kterou ochlazovaný vzorek projížděl. Poloha 0 mm odpovídá pozici přímo pod tryskou. Z obrázku je patrné, že pro povrchové teploty nižší jak 500 °C dochází ke znatelnému odvodu tepla v oblasti za tryskou. K tomuto odvodu tepla dochází vlivem přítomnosti zbytkové vodní vrstvy na ochlazovaném povrchu.

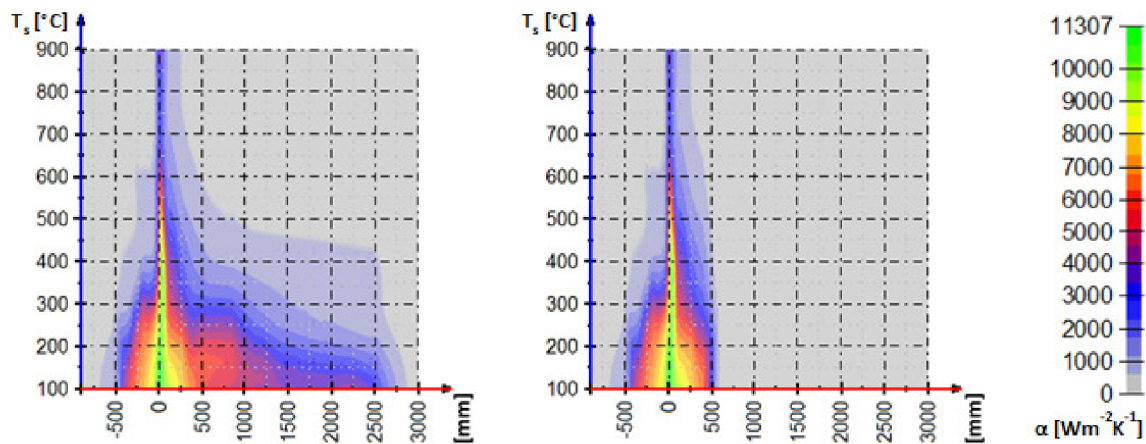


Obr. 6.1: Efekt zbytkové vody na chlazení [30]

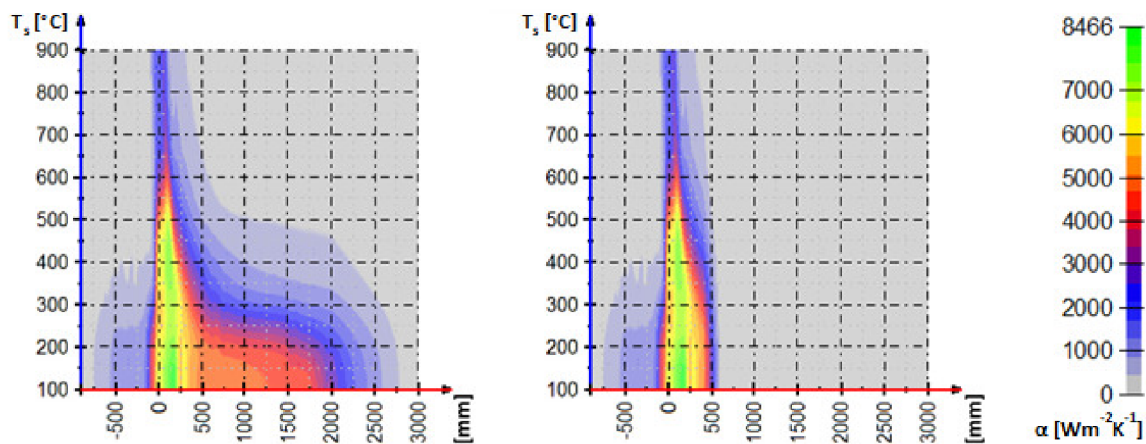
Jak tato zbytková vodní vrstva ovlivňuje proces chlazení však není doposud známo. Publikace na toto téma chybí, a proto se v rámci dizertační práce numericky simuloval vliv zbytkové vodní vrstvy na finální teplotu ocelového pásu při válcování za tepla [30].

Pro okrajové podmínky byl využit experimentálně získaný součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze testovacího vzorku. Ten je pro vrchní chlazení zobrazen na obrázku 6.2 a pro spodní chlazení na obrázku 6.3. V obou případech je vždy vlevo součinitel přestupu tepla tak jak byl experimentálně zjištěn. Vpravo je pak jeho modifikovaná varianta, v které je zanedbán vliv zbytkové vody. Poloha 0 mm odpovídá pozici přímo pod tryskou v chladicí sekci. V případě spodního chlazení byla použita kuželová tryska, a proto je oblast s vysokými hodnotami součinitele přestupu tepla v blízkosti polohy 0 mm širší, než v případě vrchního chlazení, kde byla použita tryska s plochým paprskem. Z obou obrázků je evidentní, že významné chlazení se objevuje ještě více než 2 metry za chladicí sekci pro povrchové teploty pod 500 °C (rychlost testovacího vzorku byla 2 m s<sup>-1</sup>). Tento odvod tepla je způsoben právě zbytkovou vodou a je patrné, že jeho význam roste s klesající povrchovou teplotou.





Obr. 6.2: Vrchní chlazení - součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze (vlevo: data se zbytkovou vodou; vpravo: modifikovaná data bez zbytkové vody) [30]



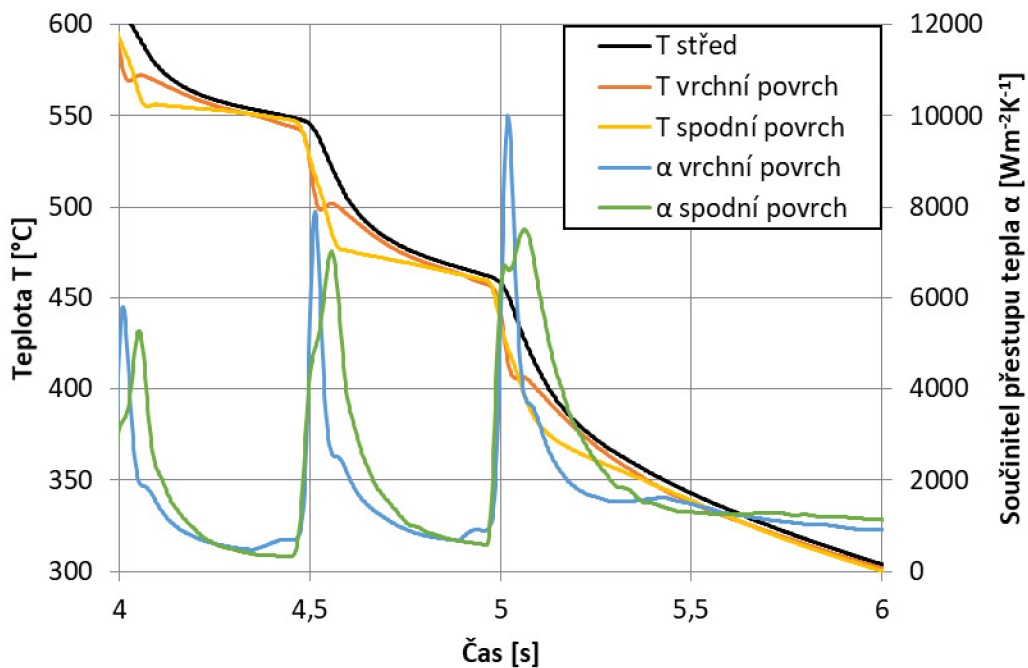
Obr. 6.3: Spodní chlazení - součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze (vlevo: data se zbytkovou vodou; vpravo: modifikovaná data bez zbytkové vody) [30]

Celkem bylo provedeno šest numerických simulací (viz tabulka 6.1). Tři s vlivem zbytkové vody a tři, kde byl vliv zbytkové vody zanedbán. Číslo v názvu simulace značí počet chladicích sekcí. Délka chlazení v simulacích byla 10 m pro koncovou teplotu 700 °C a 14 m pro koncovou teplotu 300 °C. Rychlost ocelového pásu byla 2 m s<sup>-1</sup>. Požadovaná rychlost chlazení byla přibližně 100 °C s<sup>-1</sup>. Počáteční teplota byla 900 °C a požadovaná koncová teplota byla 700 °C pro simulace s pěti chladicími sekcemi a 300 °C pro zbylé simulace o více chladicích sekcích. Rozteč mezi jednotlivými sekcemi byla 1 m.

Detail vypočtených průběhů teplot spolu s použitým součinitelem přestupu tepla je pro numerickou simulaci „Sim-10-water“ na obrázku 6.4. Z obrázku je vidět, že vrchní a spodní chlazení je mírně posunuté v čase, ale výsledné chlazení je velmi podobné. Teplota vrchního i spodního povrchu je před vstupem do chladicí sekce mírně nižší než teplota ve středu pásu.

Tab. 6.1: Provedené numerické simulace.

Simulace	Počet chladicích sekcí	Zbytková voda	Spočtená koncová teplota [°C]
Sim-5	5	Ne	699
Sim-5-water	5	Ano	677
Sim-10	10	Ne	413
Sim-10-water	10	Ano	285
Sim-11	11	Ne	314
Sim-11-water	11	Ano	110

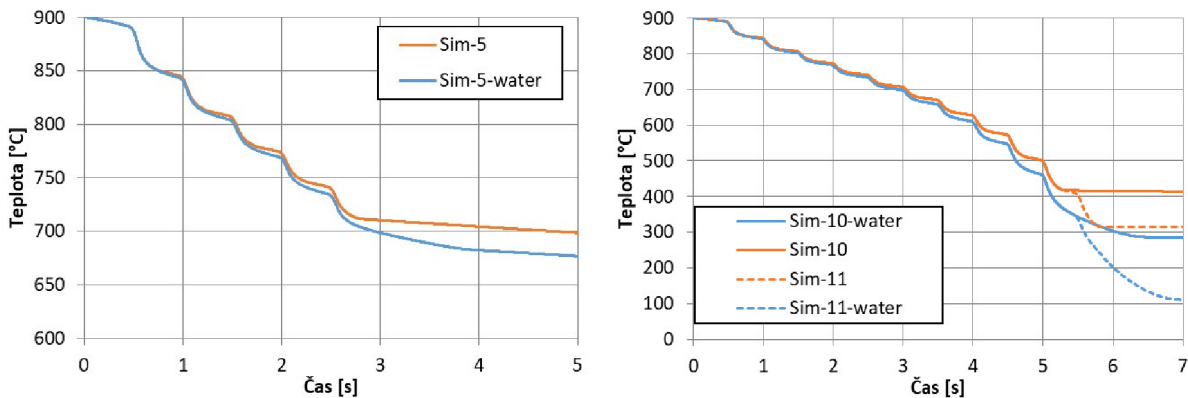


Obr. 6.4: Detail z numerické simulace „Sim-10-water“ spolu s použitým součinitelem přestupu tepla [30]

Výsledky z provedených numerických simulací jsou porovnány na obrázku 6.5. Při požadované koncové teplotě 700 °C byl rozdíl mezi simulací s vlivem zbytkové vody a simulací, kde byl vliv zbytkové vody zanedbán, velmi malý. Teplotní rozdíl byl pouze 12 °C v čase 3 s a 22 °C v čase 5 s.

Při požadované koncové teplotě 300 °C byl však již vliv zbytkové vody velmi patrný. Uvažujeme-li vliv zbytkové vody, výsledkem simulace „Sim-10-water“ s deseti chladicími sekcemi je koncová teplota 285 °C, což je blízko požadované teplotě. V případě zanedbání vlivu zbytkové vody simulace s deseti chladicími sekcemi „Sim-10“ vede na koncovou teplotu 413 °C. K dosažení požadované koncové teploty musíme tedy jednu chladicí sekci přidat, což zahrnuje simulace „Sim-11“. Výsledkem je koncová teplota 314 °C blízka požadované. V případě použití okrajových podmínek zahrnujících vliv zbytkové vody pro simulaci s navýšeným počtem chladicích sekcí na jedenáct („Sim-11-water“) dosahuje koncová teplota hodnoty pouze 110 °C, což je 190 °C pod požadovanou koncovou teplotu.

tu. Z těchto zjištění je patrné, že vliv zbytkové vody je v případě nižších koncových teplot (pod 500 °C) značný. To potvrzují rovněž i výrobci oceli.



Obr. 6.5: Provedené numerické simulace (vlevo: koncová teplota 700 °C; vpravo: koncová teplota 300 °C) [30]

Velké rozdíly v koncových teplotách vedou k odlišným vlastnostem oceli a horší kvalitě. Z tohoto důvodu je vhodné zabývat se problematikou a chováním zbytkové vody.

## 6.2 Korelace pro porovnání s varem ve velkém objemu

Význam zbytkové vody může být patrný při porovnání s varem ve velkém objemu. Var ve velkém objemu je charakterizován čtyřmi rozdílnými režimy varu: přirozenou konvekcí, bublinovým varem, přechodným varem a blánovým varem (viz obrázek 1.1). Pro přenos tepla během různých režimů varu ve velkém objemu existuje spousta korelací. Protože vliv zbytkové vody je největší při nižších povrchových teplotách, zaměříme se v této kapitole na oblast bublinového varu, respektive kritickou (maximální) hustotu tepelného toku a rovněž na přirozenou konvekci.

V případě vodorovně umístěné desky můžeme přirozenou konvekci popsat korelací pro Nusseltovo číslo  $Nu$  ve tvaru [13]:

$$Nu = 0,15Ra^{\frac{1}{3}}, \quad (6.1)$$

kde  $Ra$  je Rayleighovo číslo. Bezrozměrná čísla jsou definovaná jako:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (6.2)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu a}, \quad (6.3)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla,  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti,  $g$  je tíhové zrychlení,  $\beta$  je součinitel teplotní objemové roztažnosti,  $T_s$  je povrchová teplota,  $T_\infty$  je teplota kapaliny (vody),  $\nu$  je kinematická viskozita,  $a$  je součinitel teplotní vodivosti a  $L$  je charakteristický rozměr definovaný jako:

$$L = \frac{A_s}{P}, \quad (6.4)$$



kde  $A_s$  je plošný obsah povrchu desky a  $P$  je obvod desky. Všechny zmiňované vlastnosti jsou určovány při teplotě  $T_f = (T_s + T_\infty) / 2$ . Z rovnic (6.1) až (6.3) a z Newtonova ochlazovacího zákona (1.7) můžeme hustotu tepelného toku vyjádřit jako:

$$\dot{q} = 0,15\lambda \left( \frac{g\beta}{\nu a} \right)^{\frac{1}{3}} (T_s - T_\infty)^{\frac{4}{3}}. \quad (6.5)$$

Kritickou hustotu tepelného toku  $\dot{q}_{max}$  lze aproximovat vztahem:

$$\dot{q}_{max} = Cl_v \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6.6)$$

Tato korelace byla vyvinuta Zuberem a Kutateladzem a lze ji najít například v [13].  $C$  je konstanta, která v případě vodorovné desky nabývá hodnoty  $C = 0,149$ ,  $l_v$  je měrné skupenské teplo varu,  $\rho_v$  a  $\rho_l$  jsou hustota syté páry, respektive hustota syté kapaliny (vody) a  $\sigma$  je povrchové napětí. Všechny vlastnosti jsou určovány při teplotě saturace.

### 6.3 Experimentální měření

Pro studium zbytkové vodní vrstvy byly provedeny čtyři skupiny měření. Vrchní chlazení a spodní chlazení realizované tryskou s kuželovým paprskem na desce se zoxidovaným povrchem, vrchní chlazení realizované tryskou s kuželovým paprskem na desce s broušeným povrchem a vrchní chlazení realizované tryskou s plochým paprskem na desce se zoxidovaným povrchem viz tabulka 6.2. Jednotlivé parametry měření (tlak vody, počáteční teplota atd.) jsou uvedeny v následujících kapitolách pro každou skupinu.

Tab. 6.2: Provedené experimenty pro studium zbytkové vodní vrstvy

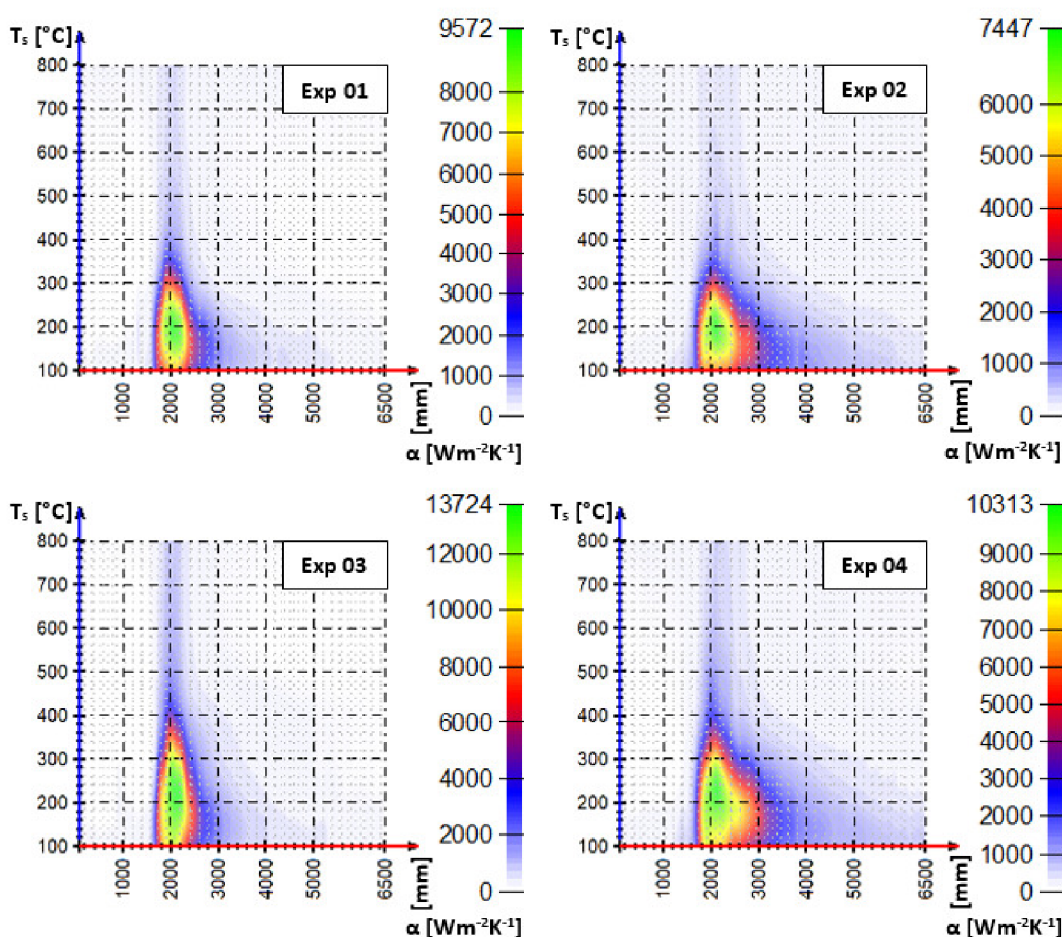
Experiment	Tryska	Chlazení	Povrch
Exp01	Kuželová	Vrchní	Zoxidovaný
Exp02	Kuželová	Vrchní	Zoxidovaný
Exp03	Kuželová	Vrchní	Zoxidovaný
Exp04	Kuželová	Vrchní	Zoxidovaný
Exp05	Kuželová	Spodní	Zoxidovaný
Exp06	Kuželová	Spodní	Zoxidovaný
Exp07	Kuželová	Spodní	Zoxidovaný
Exp08	Kuželová	Spodní	Zoxidovaný
Exp09	Kuželová	Vrchní	Broušený
Exp10	Kuželová	Vrchní	Broušený
Exp11	Kuželová	Vrchní	Broušený
Exp12	Kuželová	Vrchní	Broušený
Exp13	Plochá	Vrchní	Zoxidovaný
Exp14	Plochá	Vrchní	Zoxidovaný
Exp15	Plochá	Vrchní	Zoxidovaný
Exp16	Plochá	Vrchní	Zoxidovaný

### 6.3.1 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

Pro měření byla použita tryska s kuželovým paprskem s úhlem rozstříku 60°. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.3. Střed trysky byl přímo nad termočlánkem T5 (viz obrázek 4.2). Výsledky měření v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze jsou na obrázku 6.6.

Tab. 6.3: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

Experiment	Průtok vody [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Počáteční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Vzdálenost trysky [mm]
Exp01	0,56	0,25	2	820	500
Exp02	0,56	0,25	5	820	500
Exp03	1,06	1	2	820	500
Exp04	1,06	1	5	820	500



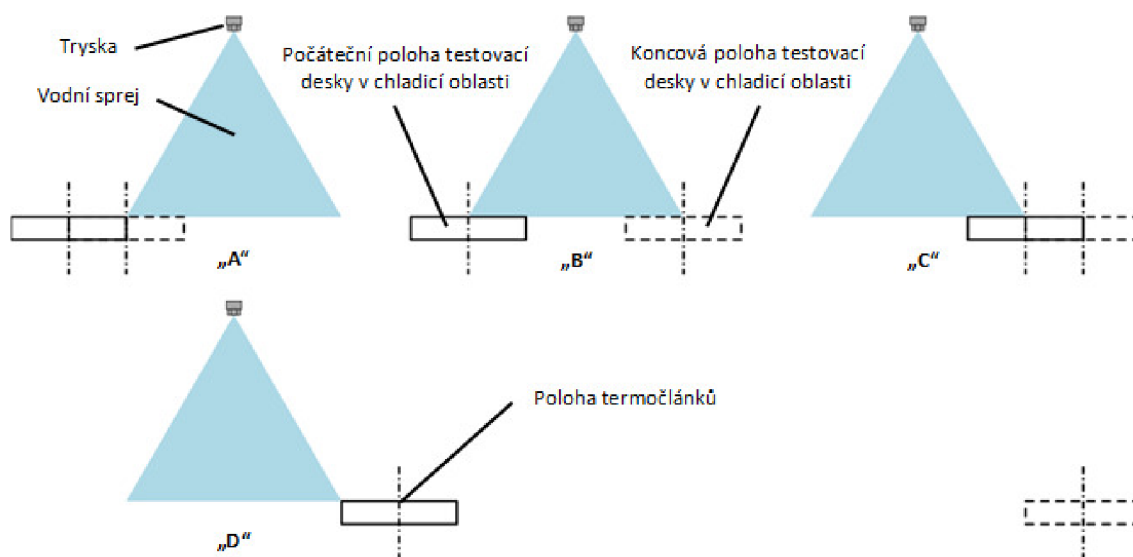
Obr. 6.6: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp01–Exp04

Poloha 1940 mm na obrázku 6.6 odpovídá pozici přímo pod tryskou. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data ze středu desky, tedy z oblasti, která procházela přímo pod tryskou (data z termočlánku T5 na obrázku 4.2).

### 6.3.1.1 Stanovení oblastí chlazení

Chlazení bylo zkoumáno na čtyřech chladicích oblastech, které jsou znázorněny na obrázku 6.7. První chladicí oblast, označená jako oblast „A“, reprezentuje situaci, kdy část desky již vstupuje pod vodní paprsek, ale zóna s termočlánky se nachází stále mimo přímý dopad vodního spreje. Poloha testovací desky odpovídá rozmezí 1510–1659 mm. Další oblastí je oblast „B“. V této oblasti se termočlánky nacházejí přímo pod vodním paprskem. Poloha testovací desky je zde v rozmezí 1660–2219 mm. Třetí oblast „C“ zachycuje stejně jako oblast „A“ situaci, kdy se část desky nachází pod ostřikem, avšak zóna s termočlánky je mimo přímý dopad vodního paprsku. Oproti oblasti „A“ zde testovací deska opouští dosah vodního spreje. Této oblasti odpovídá poloha testovací desky v rozmezí 2220–2369 mm. Obě oblasti „A“ a „C“ můžeme označit jako přechodové oblasti, ve kterých je pouze část testovací desky v přímém kontaktu s vodním paprskem. Poslední chladicí oblast je oblast „D“. V této oblasti se již celá testovací deska nachází mimo ostřík. Přenos tepla je tedy v této oblasti realizován pouze vypařováním zbytkové vody a radiací. Velikost této oblasti byla určena na základě času, který uplynul od doby, kdy testovací deska opustila oblast „C“. Tento čas byl stanoven jako 0,6 s (více podrobností dále v textu). Rozmezí polohy testovací desky závisí tedy na rychlosti, kterou se deska při měření pohybovala. Rychlosti  $2 \text{ m s}^{-1}$  odpovídá rozmezí 2370–3570 mm a rychlosti  $5 \text{ m s}^{-1}$  2370–5370 mm.

Takto stanovené oblasti chlazení jsou platné pro všechny experimenty, kde byla pro chlazení použita tryska s kuželovým paprskem. V případě experimentů s tryskou s plochým paprskem se v jednotlivých oblastech liší rozmezí polohy testovací desky. Tato rozmezí jsou uvedena v příslušné kapitole 6.3.4. Princip stanovení jednotlivých oblastí však zůstává v platnosti.

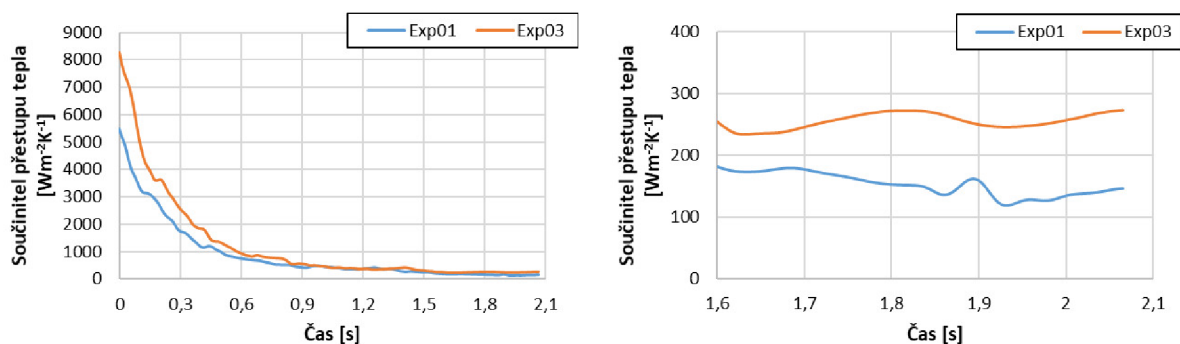


Obr. 6.7: Zvolené chladicí oblasti [31]

Největší vliv zbytkové vody byl pozorován pro povrchovou teplotu kolem 150 °C. To je vidět na obrázku 6.6, kde součinitel přestupu tepla pro povrchovou teplotu 150 °C za pozicí 2370 mm dosahuje stále vysokých hodnot. Tyto poznatky byly využity při určování velikosti oblasti „D“. Přiřadíme-li poloze 2370 mm (poloha, kdy deska opouští oblast „C“) čas 0 s, můžeme součinitel přestupu tepla vyjádřit jako funkci času, jenž testovací deska stráví v oblasti bez sprchového chlazení (oblast pouze se zbytkovou vodou navazující na oblast "C"). Pro povrchovou teplotu 150 °C je takto časově závislý součinitel přestupu tepla zobrazen na obrázku 6.8. Z obrázku je vidět, že v případě experimentů Exp01 a Exp03 je součinitel přestupu tepla od času 1,6 s až do konce téměř konstantní a dosahuje hodnoty kolem 200 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>. V případě experimentů Exp02 a Exp04, které byly prováděny s vyšší rychlostí testovací desky 5 m s<sup>-1</sup>, máme k dispozici data pouze do času 0,82 s. Z tohoto důvodu byla data pro tyto experimenty proložena (a extrapolována) racionální funkcí ve tvaru:

$$y(t) = \frac{p_1 t^2 + p_2 t + p_3}{t^3 + p_4 t^2 + p_5 t + p_6} \approx \alpha(t), \quad (6.7)$$

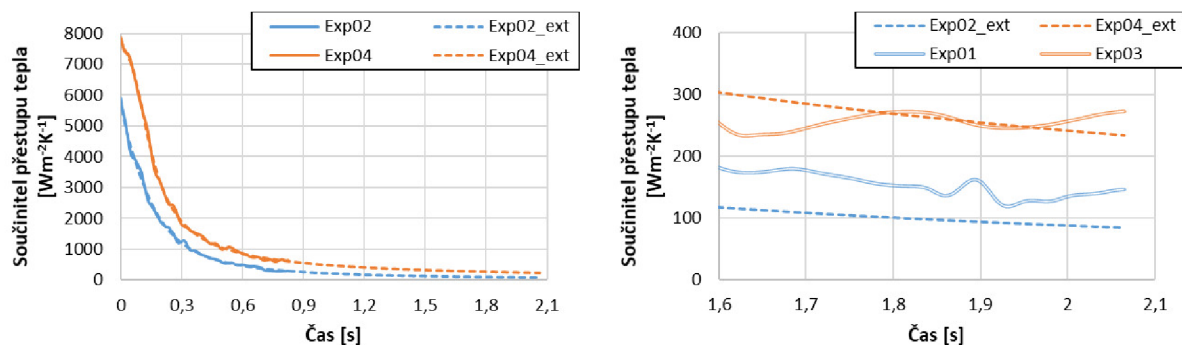
kde  $t$  je čas od doby, kdy testovací deska opustila oblast „C“ a  $p_1$ – $p_6$  jsou koeficienty z nelineárního proložení (příloha A). Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C je pak pro experimenty Exp02 a Exp04 na obrázku 6.9. Jak je vidět, situace je velmi podobná experimentům Exp01 a Exp03 s menší rychlostí testovací desky 2 m s<sup>-1</sup>, kde máme k dispozici data pro delší časový úsek. I v případě experimentů s vyšší rychlostí testovací desky je součinitel přestupu tepla od času 1,6 s až do konce téměř konstantní. K ověření vhodnosti zvolené funkce pro extrapolaci byl experiment Exp01 od času 0,82 s extrapolován stejnou funkcí a výsledek byl porovnán s experimentálně získanými daty (obrázek 6.10). Je zřejmé, že funkce z rovnice (6.7) simuluje experiment Exp01 velmi věrohodně.



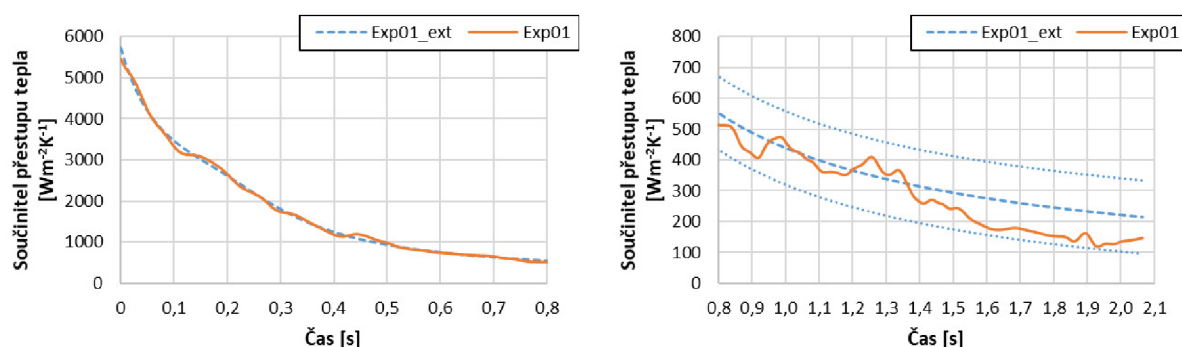
Obr. 6.8: Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou (experimenty Exp01 a Exp03)

Po těchto zjištěních bylo pro povrchovou teplotu 150 °C spočítáno odvedené teplo z povrchu testovací desky v oblastech „A“–„C“ a do času 1,6 s za oblastí „C“ pro experimenty Exp01 a Exp03. 90 % tepla bylo odvedeno do času 0,6 s za oblastí „C“. Čas 0,6 s byl stanoven jako čas, který určuje konec chladicí oblasti „D“, protože již bylo odvedeno 90 % tepla.





Obr. 6.9: Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou (experimenty Exp02 a Exp04; graf vpravo obsahuje rovněž experimenty Exp01 a Exp03 pro porovnání)



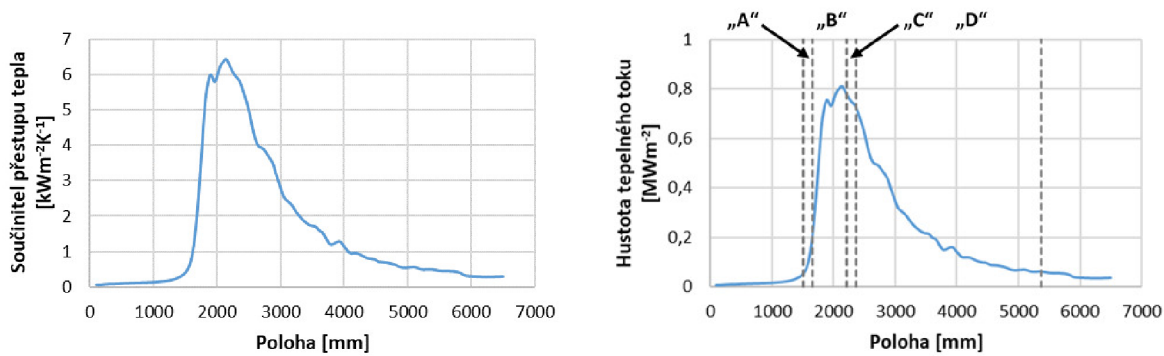
Obr. 6.10: Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou (experiment Exp01 a experiment Exp01 simulovaný pomocí funkce z rovnice (6.7); graf vpravo obsahuje rovněž 95% predikční interval (tečkované křivky))

### 6.3.1.2 Chlazení ve všech oblastech

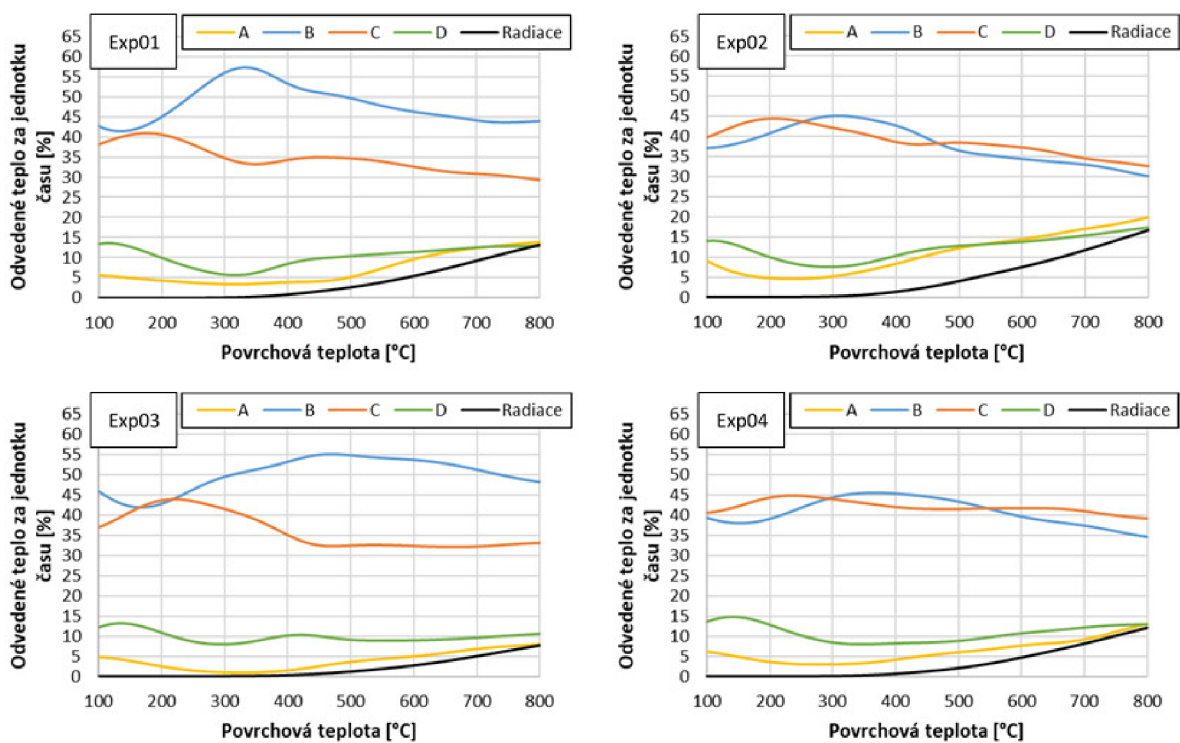
Součinitel přestupu tepla může být z dat na obrázku 6.6 vyjádřen pro konkrétní povrchovou teplotu jako funkce polohy. Jak bylo zmíněno výše, největší vliv zbytkové vody je pro povrchové teploty okolo 150 °C, ale významný vliv má zbytková voda pro všechny povrchové teploty nižší než 500 °C, což je patrné z obrázku 6.1. Součinitel přestupu tepla spolu s hustotou tepelného toku pro povrchovou teplotu 150 °C a experiment Exp02 jsou v závislosti na poloze zobrazeny na obrázku 6.11. Z tohoto obrázku, na kterém jsou rovněž zaznačeny chladicí oblasti „A“–„D“, je zřejmé, že k významnému chlazení nedochází pouze v oblasti s přímým dopadem vodního spreje (oblast „B“), ale rovněž v oblastech „C“ a „D“, kde již termočlánky nejsou pod přímým ostříkem. Stejné chování bylo pozorováno i v případě ostatních experimentů.

Z hustoty tepelného toku v závislosti na poloze bylo spočítáno odvedené teplo v jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) pro povrchové teploty v rozmezí 100–800 °C. Výsledky ve formě procentuálního podílu odvedeného tepla za jednotku času jsou uvedeny na obrázku 6.12. Je zde rovněž uvedeno, kolik tepla je odvedeno do okolí vlivem radiace.

Z obrázku 6.12 je vidět, že v případě experimentů Exp02 a Exp04 (rychlost testovací



Obr. 6.11: Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na poloze pro povrchovou teplotu 150 °C (experiment Exp02)



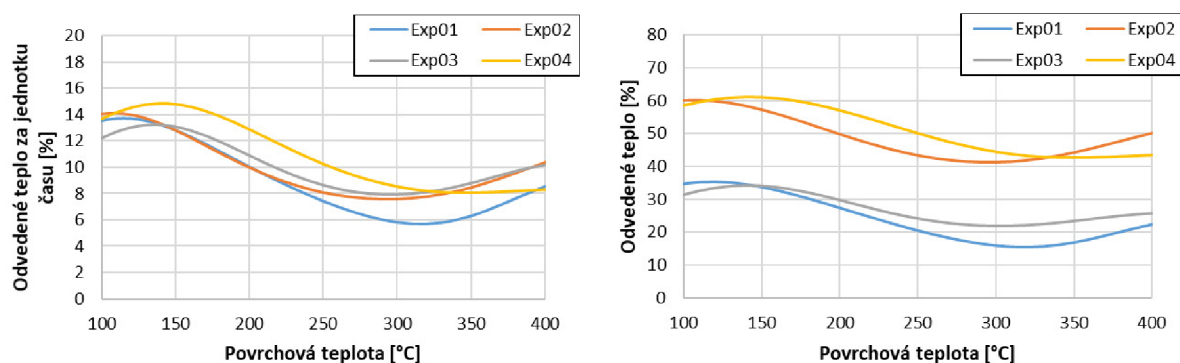
Obr. 6.12: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací (experimenty Exp01, Exp02, Exp03, Exp04)

desky  $5 \text{ m s}^{-1}$ ) je chlazení v oblastech „B“ a „C“ velmi podobné. V případě experimentů s nižší rychlostí ( $2 \text{ m s}^{-1}$ ) je více tepla odvedeno v oblasti „B“. Tato oblast se stává dominantní a to hlavně pro vyšší povrchové teploty. Co se týče tlaku vody, změna z  $0,25 \text{ MPa}$  na  $1 \text{ MPa}$  má za následek méně odvedeného tepla za jednotku času v oblasti „A“.

Oblast „D“ vykazuje velmi podobné chování pro všechny rychlosti i tlaky vody a to obzvláště v případě nižších povrchových teplot, kde je vliv zbytkové vody významný (obrázek 6.13 vlevo). Patrný je však posun maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším povrchovým teplotám při experimentech s vyšším tlakem vody. V případě povrchové teploty okolo  $150 \text{ °C}$  je chladicí oblast „D“ zodpovědná za téměř 15% odvedeného

tepla za jednotku času. Vzhledem k nízké povrchové teplotě je v tomto případě radiace velmi nízká a odvedené teplo tak připadá převážně na vypařování zbytkové vody.

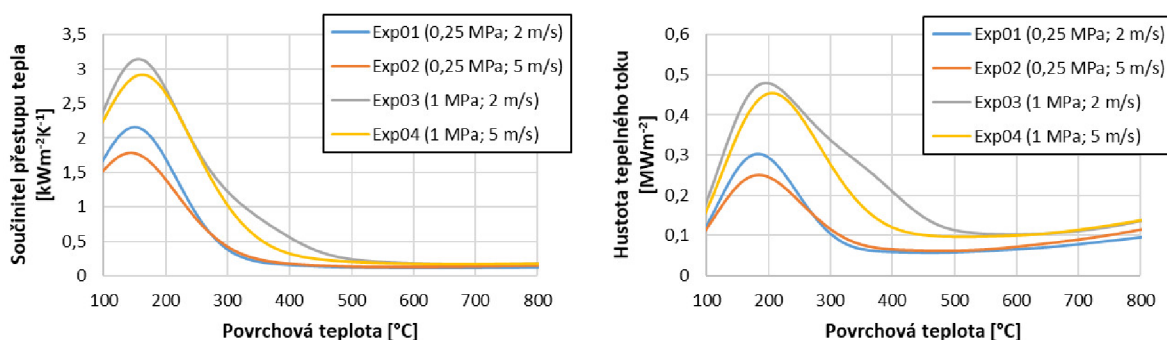
Dosud však bylo zkoumáno odvedené teplo za jednotkový čas. Pokud vezmeme v potaz rozdílné délky jednotlivých chladicích oblastí, dostaneme odlišné výsledky. Odvedené teplo v oblasti „D“ je nyní závislé na rychlosti a procentuální podíl odvedeného tepla je značně vyšší (obrázek 6.13 vpravo). Chladicí oblast „D“ je nyní v případě povrchové teploty okolo 150 °C zodpovědná za více než 30 % odvedeného tepla při experimentech s rychlostí 2 m s<sup>-1</sup>. V případě vyšší rychlosti 5 m s<sup>-1</sup> se jedná dokonce až o 60 %.



Obr. 6.13: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

### 6.3.1.3 Chlazení v oblasti „D“

Ze zjištěných poznatků je zřejmé, že zbytková voda může významně ovlivnit chlazení. Z tohoto důvodu se věnovalo více pozornosti chladicí oblasti „D“. Na obrázku 6.14 jsou zobrazeny součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ pro jednotlivé experimenty. Z obrázku je patrné, že s rostoucím tlakem vody roste hustota tepelného toku. S rostoucí rychlostí můžeme pozorovat pokles maximální hustoty tepelného toku.

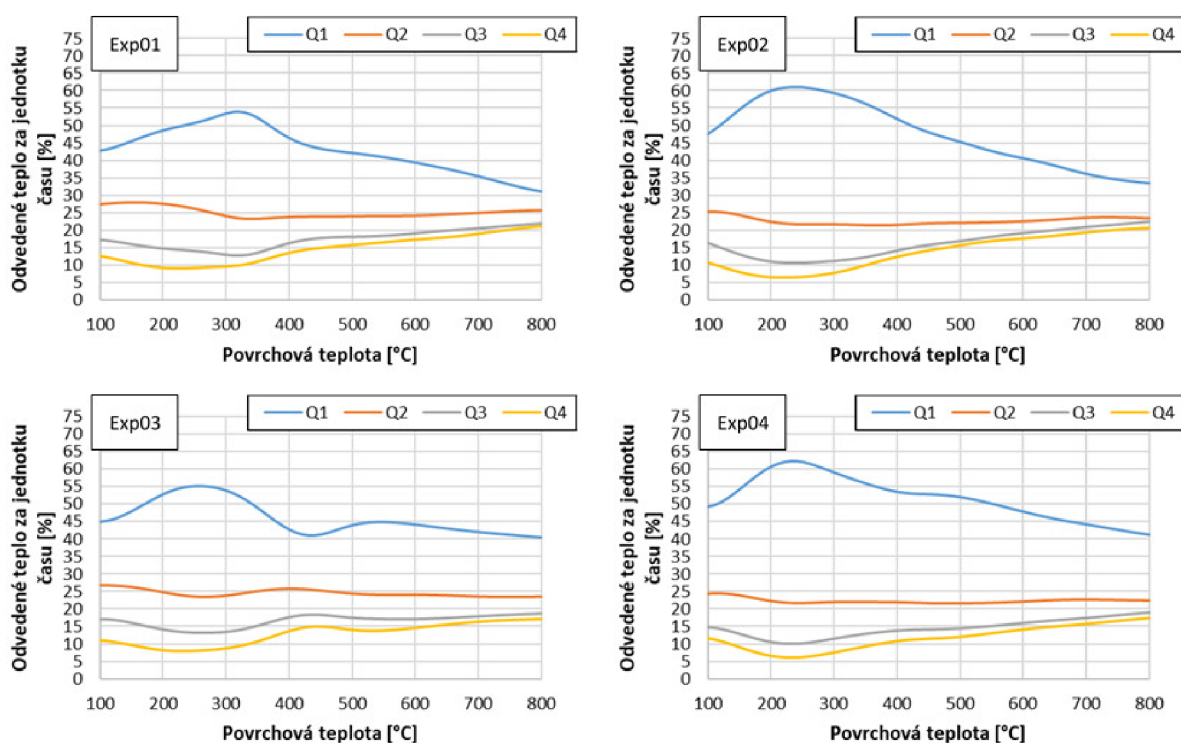


Obr. 6.14: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

Pro další zkoumání byla chladicí oblast „D“ rozdělena do čtyř stejně velkých podoblastí Q1, Q2, Q3 a Q4, přičemž podoblast Q1 se nacházela nejbližší k vodnímu chlazení

a podoblast Q4 nejdále. Obdobně jako v případě rozboru chlazení na všech oblastech byl stanoven procentuální podíl odvedeného tepla v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ (obrázek 6.15).

Z obrázku 6.15 je patrné, že chlazení je převážně realizováno v první polovině oblasti „D“. Pro povrchové teploty pod 400 °C je podoblast Q1 zodpovědná za více než 40 % odvedeného tepla. V případě experimentu Exp04 je při povrchové teplotě okolo 200 °C odvedeno v této oblasti dokonce více než 60 % tepla. Co se týče podoblasti Q2, je procentuální podíl odvedeného tepla v celém rozsahu povrchových teplot téměř konstantní nehledě na parametry měření. Vyšší rychlost má za následek více odvedeného tepla v podoblasti Q1 a to zejména při nižších povrchových teplotách. V případě povrchových teplot pod 500 °C bylo při vyšší rychlosti 5 m s<sup>-1</sup> odvedeno v podoblasti Q1 v průměru o 7 % více tepla za jednotku času. V ostatních podoblastech dochází naopak k mírnému poklesu. Vyšší tlak vody rovněž způsobí, že je více tepla odvedeno v podoblasti Q1 (průměrně o cca 3 %) na úkor podoblastí Q3 a Q4.



Obr. 6.15: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ (experimenty Exp01, Exp02, Exp03, Exp04)

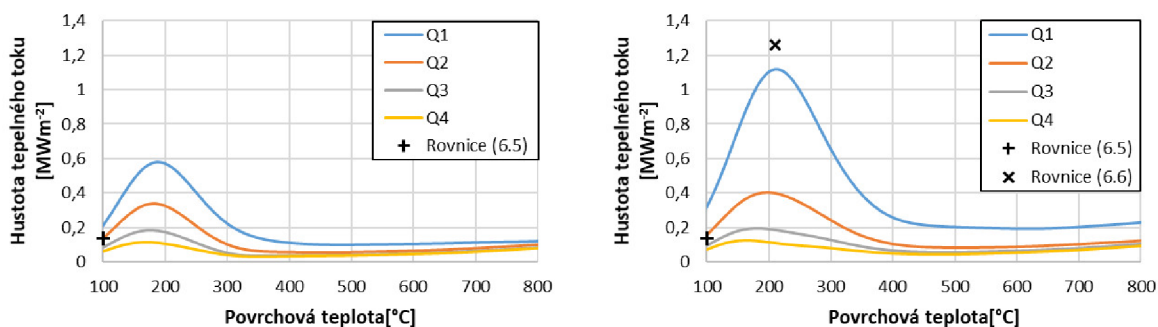
Pro demonstraci vlivu zbytkové vody můžeme využít existujících korelací pro přenos tepla během varu ve velkém objemu. Pro povrchovou teplotu 100 °C a teplotu vody 22 °C dosahuje hustota tepelného toku pro přirozenou konvekci určená rovnicí (6.5) hodnoty přibližně  $1,36 \times 10^5 \text{ W m}^{-2}$ . Všechny vlastnosti vody a další potřebné parametry pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 6.4. Porovnání s experimentálně získanými daty je na obrázku 6.16. Pro porovnání byly vybrány experimenty s limitními hodnotami tlaku vody a rychlosti testovací desky Exp01 a Exp04. Z obrázku je vidět, že v první polovině chladicí oblasti „D“ je chlazení zbytkovou vodou intenzivnější než v případě přirozené konvekce. Se zvětšující se vzdáleností od vodního chlazení dochází k nárůstu teploty zbytkové vody



na povrchu, a proto klesá hustota tepelného toku. Hustota tepelného toku od zbytkové vody v druhé polovině chladicí oblasti „D“ tak nedosahuje hodnot pro přirozenou konvekci určenou rovnicí (6.5).

Tab. 6.4: Parametry pro určení hustoty tepelného toku pro přirozenou konvekci určenou rovnicí (6.5)

Povrchová teplota [K]	Teplota vody [K]	Součinitel tepelné vodivosti [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Tíhové zrychlení [m s <sup>-2</sup> ]
373,15	295	0,655	9,81
Součinitel teplotní objemové roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]	Kinematická viskozita [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Součinitel teplotní vodivosti [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	
$5,297 \times 10^{-4}$	$4,62 \times 10^{-7}$	$1,58 \times 10^{-7}$	



Obr. 6.16: Chlazení v oblasti „D“ a porovnání s korelací pro přirozenou konvekci (vlevo: experiment Exp01; vpravo: experiment Exp04)

V případě využití rovnice (6.6) pro kritickou hustotu tepelného toku dostáváme pro parametry uvedené v tabulce 6.5 hodnotu přibližně  $1,26 \times 10^6$  W m<sup>-2</sup>. To je, jak je patrné z obrázku 6.16, hodnota velmi blízká maximální hustotě tepelného toku v podoblasti Q1 v případě experimentu Exp04. Z uvedených poznatků je zřejmé, že zbytková voda má významný vliv na průběh chlazení.

Tab. 6.5: Parametry pro určení kritické hustoty tepelného toku dané rovnicí (6.6)

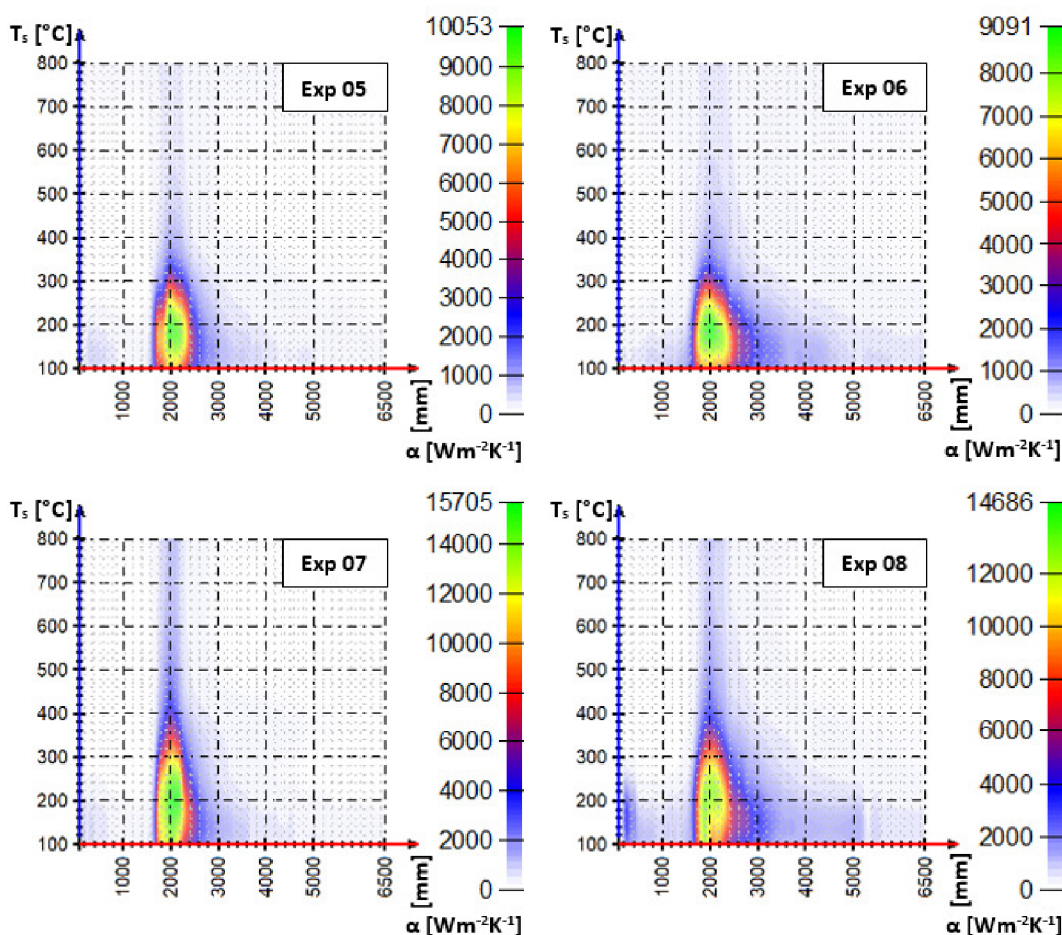
Konstanta C [-]	Měrné skupenské teplo varu [J kg <sup>-1</sup> ]	Hustota syté páry [kg m <sup>-3</sup> ]	Hustota syté kapaliny [kg m <sup>-3</sup> ]	Povrchové napětí [N m <sup>-1</sup> ]	Tíhové zrychlení [m s <sup>-2</sup> ]
0,149	$2,257 \times 10^6$	0,596	957,85	0,059	9,81

### 6.3.2 Spodní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

K měření byla použita stejná tryska s kuželovým paprskem jako v případě vrchního chlazení. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.6. Střed trysky byl přímo nad termočlánkem T5 (viz obrázek 4.2). Výsledky měření v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze jsou na obrázku 6.17.

Tab. 6.6: Parametry měření; spodní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

Experiment	Průtok vody [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Počáteční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Vzdálenost trysky [mm]
Exp05	0,56	0,25	2	820	500
Exp06	0,56	0,25	5	820	500
Exp07	1,06	1	2	820	500
Exp08	1,06	1	5	820	500



Obr. 6.17: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp05–Exp08

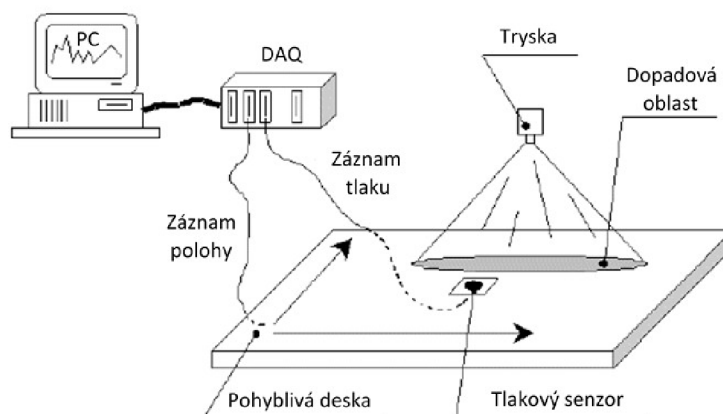
Poloha 1940 mm odpovídá pozici přímo nad tryskou. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data z termočlánku ze středu desky (termočlánek T5 na obrázku 4.2).

Z důvodu nedostatku místa nebylo možné zajistit přívod vody do trysky pomocí rovné trubky jako v případě vrchního chlazení. Proto byl přívod realizován přes koleno viz obrázek 6.18. Kvůli různému způsobu přívodu vody bylo provedeno měření rozložení tlaku dopadající vody, aby se vyvrátil vliv jiného zapojení na průběh chlazení.



Obr. 6.18: Přívod vody do trysky; vlevo spodní chlazení, vpravo vrchní chlazení

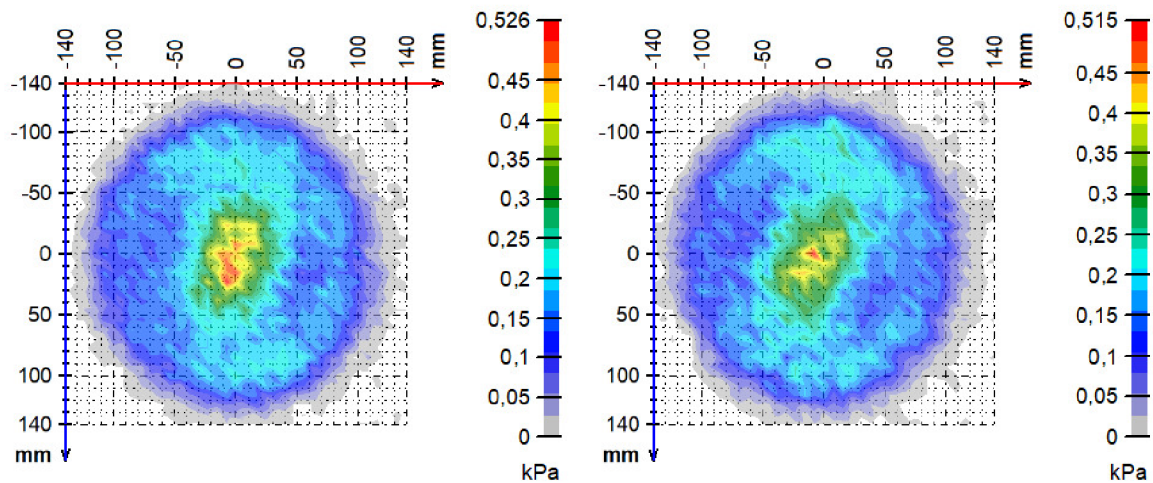
K měření rozložení tlaku dopadající vody bylo použito měřicí zařízení vyvinuté v Laboratoři přenosu tepla a proudění (obrázek 6.19). Voda z trysky dopadá na pohyblivou desku, která je vybavená tlakovým senzorem o průměru 12 mm. Tato deska se senzorem se pohybuje pod tryskou a zaznamenává se tak tlak v závislosti na poloze. Výstupem je rozložení tlaku v dopadové oblasti trysky.



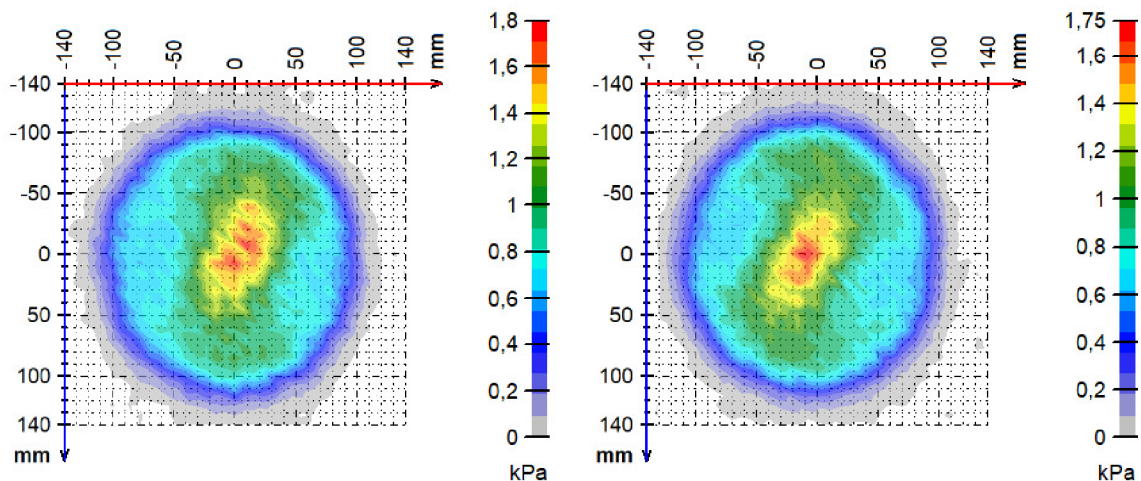
Obr. 6.19: Schéma zařízení pro měření rozložení tlaku dopadající vody [30]

Výsledky z měření jsou na obrázcích 6.20 a 6.21 a je z nich zřejmé, že způsob přívodu vody nehraje významnou roli. Sumy tlaku dopadající vody ve dvou na sebe kolmých řezech procházejících středem a vedených ve směru obou hlavních os dosahují v případě přívodu vody přes koleno vyšších hodnot o 5,4 % pro tlak v trysce 0,25 MPa a o 1,5 % pro tlak v trysce 10 MPa. Rozdíl je částečně způsoben mírným pootočením trysky. Maximální tlak dopadající vody je v případě přívodu vody přes koleno vyšší o 2,1 % pro tlak v trysce 0,25 MPa a o 2,9 % pro tlak v trysce 10 MPa.





Obr. 6.20: Změřené rozložení tlaku dopadající vody pro tlak v trysce 0,25 MPa, vzdálenost trysky 200 mm; vlevo přívod s kolenem, vpravo přívod pomocí rovné trubky



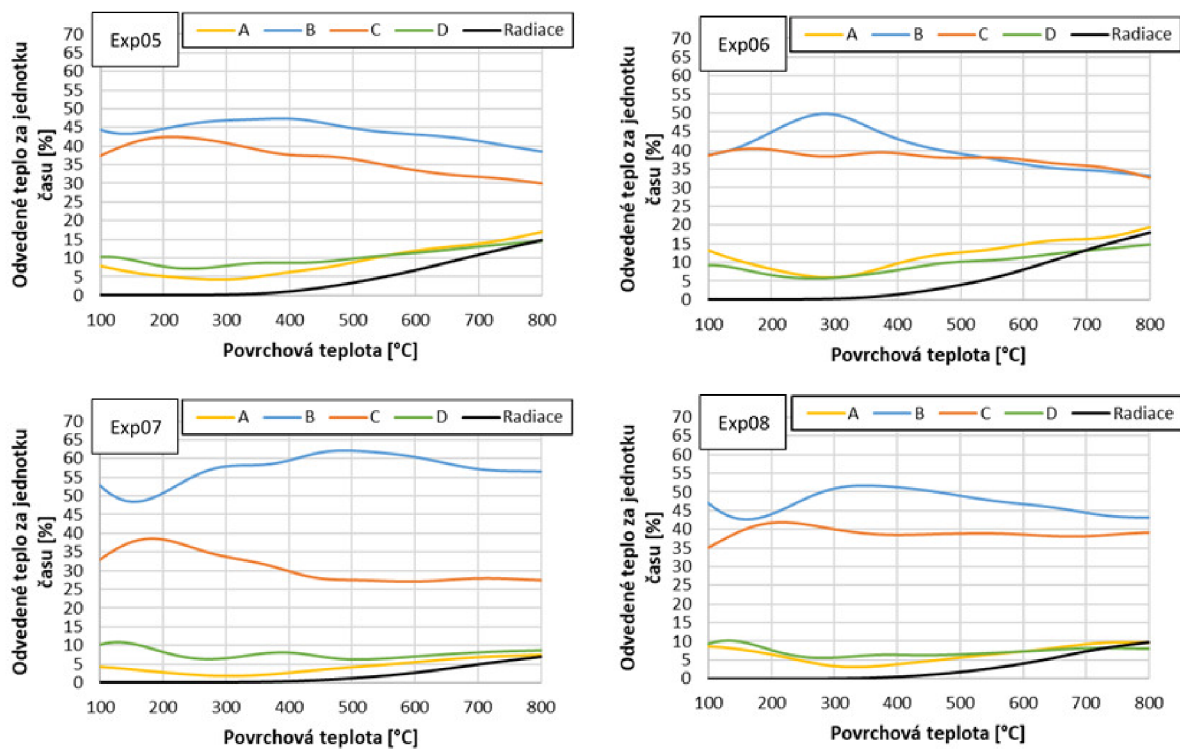
Obr. 6.21: Změřené rozložení tlaku dopadající vody pro tlak v trysce 1 MPa, vzdálenost trysky 200 mm; vlevo přívod s kolenem, vpravo přívod pomocí rovné trubky

### 6.3.2.1 Chlazení ve všech oblastech

Obdobně jako v případě vrchního chlazení bylo spočítáno odvedené teplo v jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) pro povrchové teploty v rozmezí 100–800 °C. Výsledky ve formě procentuálního podílu odvedeného tepla za jednotku času jsou uvedeny na obrázku 6.22.

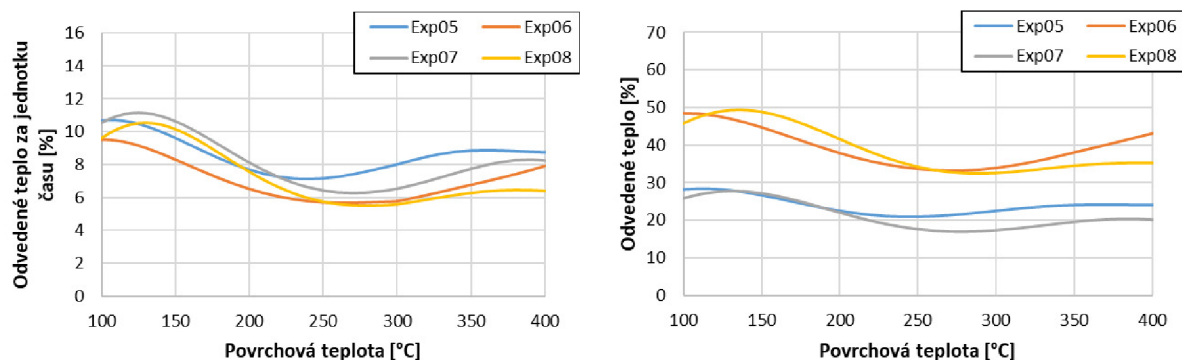
Z obrázku je vidět, že s rostoucím tlakem vody dochází k většímu rozdílu mezi oblastmi „B“ a „C“. Tento rozdíl je nejvíce patrný při vyšších povrchových teplotách. Rovněž s poklesem rychlosti dochází k většímu rozdílu mezi oblastmi „B“ a „C“.

Stejně jako v případě vrchního chlazení vykazuje oblast „D“ velmi podobné chování pro všechny rychlosti i tlaky vody a to obzvláště v případě nižších povrchových teplot, kdy je vliv zbytkové vody významný (obrázek 6.23 vlevo). Rovněž je však patrný posun maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším povrchovým teplotám při experimentech s vyšším tlakem vody. V případě povrchové teploty okolo 150 °C je v chladicích



Obr. 6.22: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladičí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací (experimenty Exp05, Exp06, Exp07, Exp08)

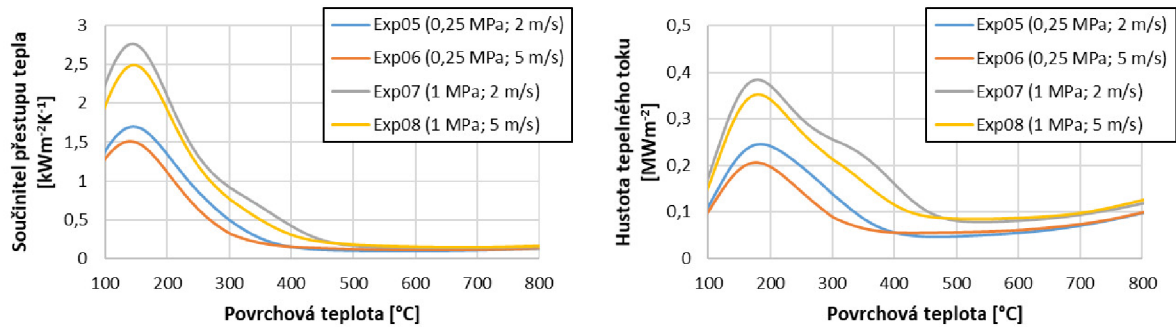
oblasti „D“ odvedeno přibližně 10 % tepla za jednotku času. Budeme-li uvažovat rozdílné délky jednotlivých chladičích oblastí, tzn. odvedené teplo nebudeme vztahovat na jednotku času, bude odvedené teplo v oblasti „D“ závislé na rychlosti a procentuální podíl odvedeného tepla bude značně vyšší (obrázek 6.23 vpravo). Jak je patrné z obrázku, chladičí oblast „D“ je nyní pro povrchové teploty okolo 150 °C zodpovědná za více než 25 % odvedeného tepla při experimentech s rychlostí  $2 \text{ m s}^{-1}$ . V případě vyšší rychlosti  $5 \text{ m s}^{-1}$  jde téměř o 50 %.



Obr. 6.23: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladičí oblasti „D“

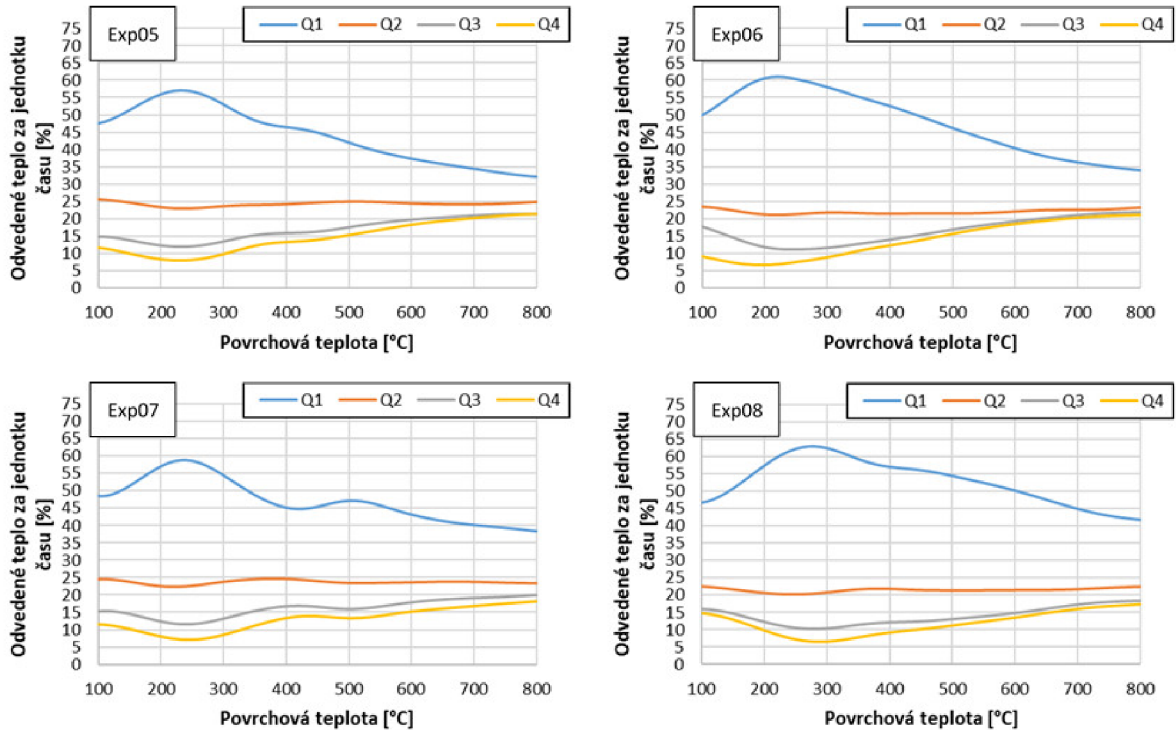
### 6.3.2.2 Chlazení v oblasti „D“

Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.24. Na obrázku můžeme pozorovat, že s rostoucím tlakem vody roste hustota tepelného toku. Rovněž je patrné, že v případě experimentů s nižší rychlostí ( $2 \text{ m s}^{-1}$ ) začíná intenzivnější chlazení při vyšších povrchových teplotách oproti experimentům s vyšší rychlostí ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ). Při nižší rychlosti také dosahuje maximální hustota tepelného toku větších hodnot.



Obr. 6.24: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

Dále bylo zkoumáno chlazení v podoblastech Q1–Q4. Procentuální podíl odvedeného tepla v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ je na obrázku 6.25.



Obr. 6.25: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ (experimenty Exp05, Exp06, Exp07, Exp08)

Z obrázku 6.25 je zřejmé, že významná část tepla je odvedena v první polovině chladicí oblasti „D“, přičemž podoblast Q1 je dominantní. Pro povrchové teploty pod 400 °C je podoblast Q1 zodpovědná za více než 45% odvedeného tepla. V případě experimentů Exp06 a Exp08 (experimenty s vyšší rychlostí) je při povrchové teplotě okolo 250 °C odvedeno v této oblasti více než 60 % tepla. Co se týče podoblasti Q2, je procentuální podíl odvedeného tepla v celém rozsahu povrchových teplot téměř konstantní neohledě na parametry měření. Vyšší rychlost má za následek více odvedeného tepla v podoblasti Q1 na úkor ostatních podoblastí. V průměru bylo oproti experimentům s nižší rychlostí odvedeno v podoblasti Q1 o 5 % více tepla. Vyšší tlak vody rovněž způsobí, že je více tepla odvedeno v podoblasti Q1 (průměrně o 5 %) s výjimkou povrchových teplot pod 200 °C.

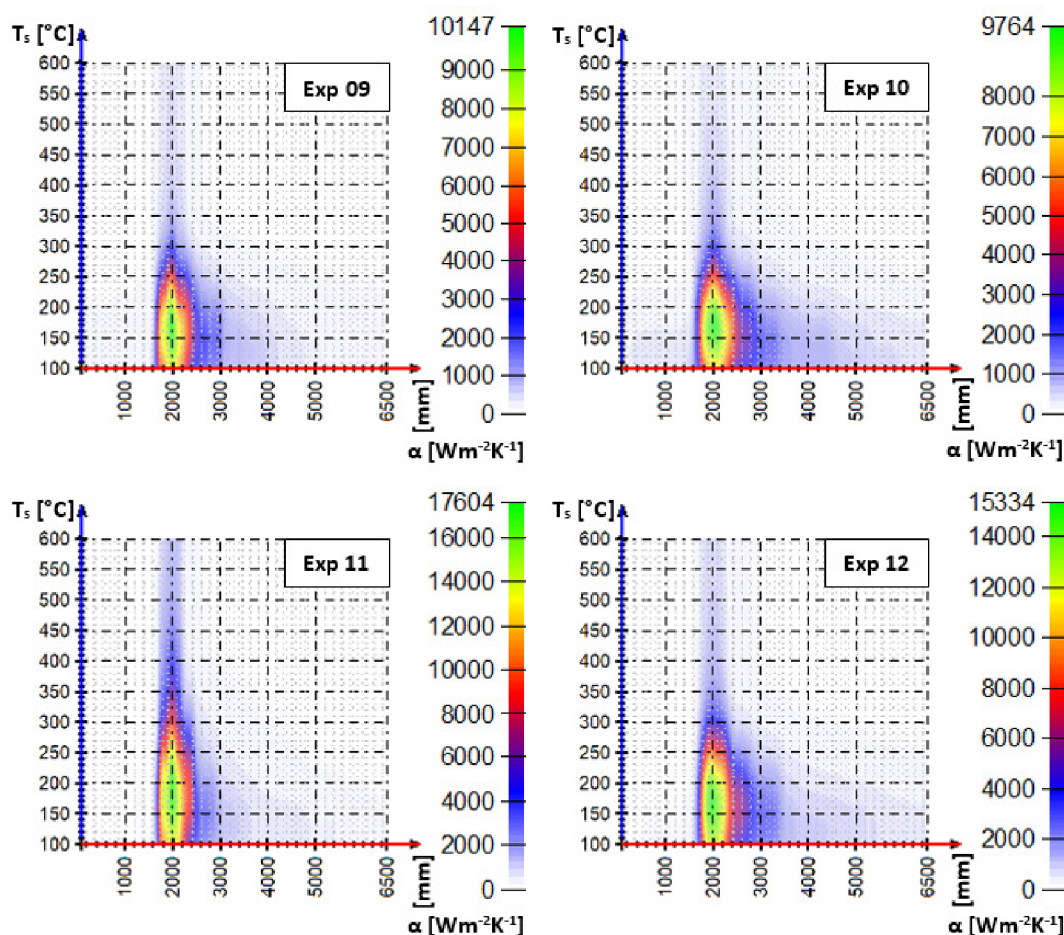


### 6.3.3 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, broušený povrch

K měření byla použita stejná tryska s kuželovým paprskem jako v předchozích případech. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.7. Střed trysky byl přímo nad termočlánkem T2 (viz obrázek 4.2 vlevo). Výsledky měření v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze jsou na obrázku 6.26.

Tab. 6.7: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, broušený povrch

Experiment	Průtok vody [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Počáteční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Vzdálenost trysky [mm]
Exp09	0,56	0,25	2	600	500
Exp10	0,56	0,25	5	600	500
Exp11	1,06	2	600	500	
Exp12	1,06	1	5	600	500



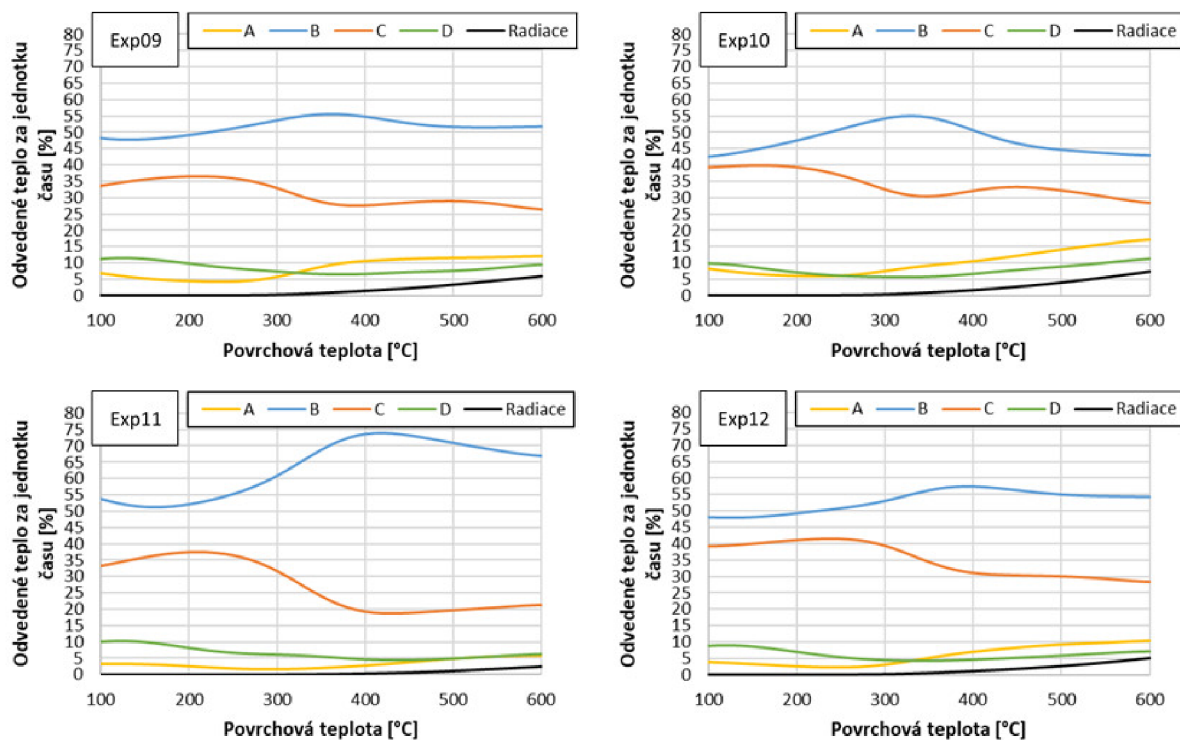
Obr. 6.26: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp09–Exp12



Poloha 1940 mm odpovídá pozici přímo pod tryskou. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data z termočlánku T2 (obrázek 4.2 vlevo). Počáteční teplota byla oproti předchozím případům nižší (600 °C) z důvodu zamezení oxidace a zachování kvality povrchu.

### 6.3.3.1 Chlazení ve všech oblastech

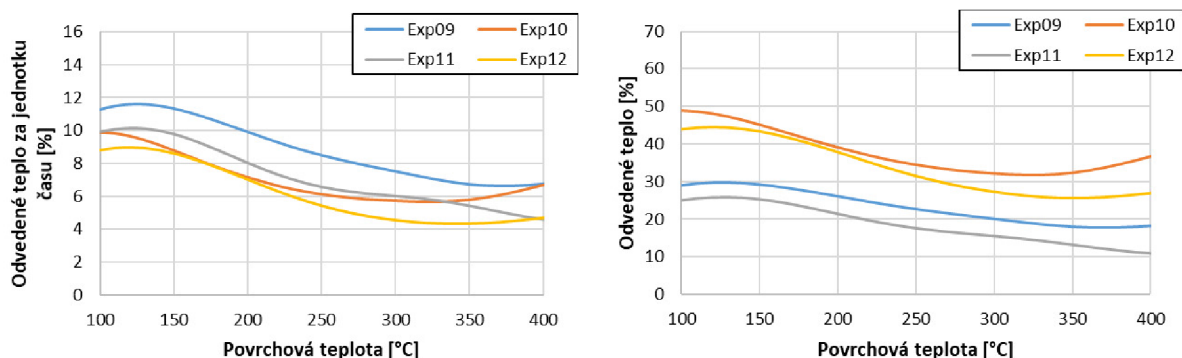
V jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) bylo spočítáno odvedené teplo pro povrchové teploty v rozmezí 100–600 °C. Výsledky ve formě procentuálního podílu odvedeného tepla za jednotku času jsou uvedeny na obrázku 6.27.



Obr. 6.27: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací (experimenty Exp09, Exp10, Exp11, Exp12)

Z obrázku můžeme vidět, že při povrchových teplotách nad cca 300 °C dochází s rostoucím tlakem vody k většímu rozdílu mezi oblastmi „B“ a „C“. S poklesem rychlosti dochází rovněž k většímu rozdílu mezi oblastmi „B“ a „C“ a to pro povrchové teploty v celém zkoumaném rozsahu.

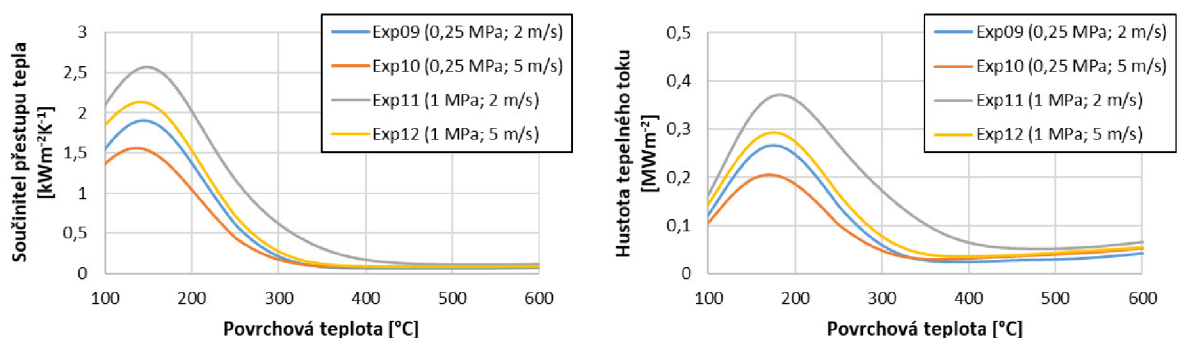
V oblasti „D“ není v případě nižších povrchových teplot patrná výrazná změna pro různé rychlosti a tlaky vody (obrázek 6.28 vlevo). V případě povrchové teploty okolo 150 °C je v chladicí oblasti „D“ odvedeno přibližně 10 % tepla za jednotku času. Posun maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším povrchovým teplotám při experimentech s vyšším tlakem vody je v tomto případě dobře viditelný jen u experimentů s vyšší rychlostí. V případě, že odvedené teplo nevztahujeme na jednotku času, je chladicí oblast „D“ při povrchové teplotě okolo 150 °C zodpovědná za více než 25 % odvedeného tepla při experimentech s rychlostí 2 m s<sup>-1</sup>. V případě experimentů s vyšší rychlostí 5 m s<sup>-1</sup> je odvedeno okolo 45 % tepla (obrázek 6.28 vpravo).



Obr. 6.28: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

### 6.3.3.2 Chlazení v oblasti „D“

Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.29. Z obrázku je vidět, že s rostoucím tlakem vody roste hustota tepelného toku. Rovněž je zřejmé, že v případě nižší rychlosti začíná intenzivnější chlazení při vyšších povrchových teplotách a maximální hustota tepelného toku dosahuje větších hodnot.

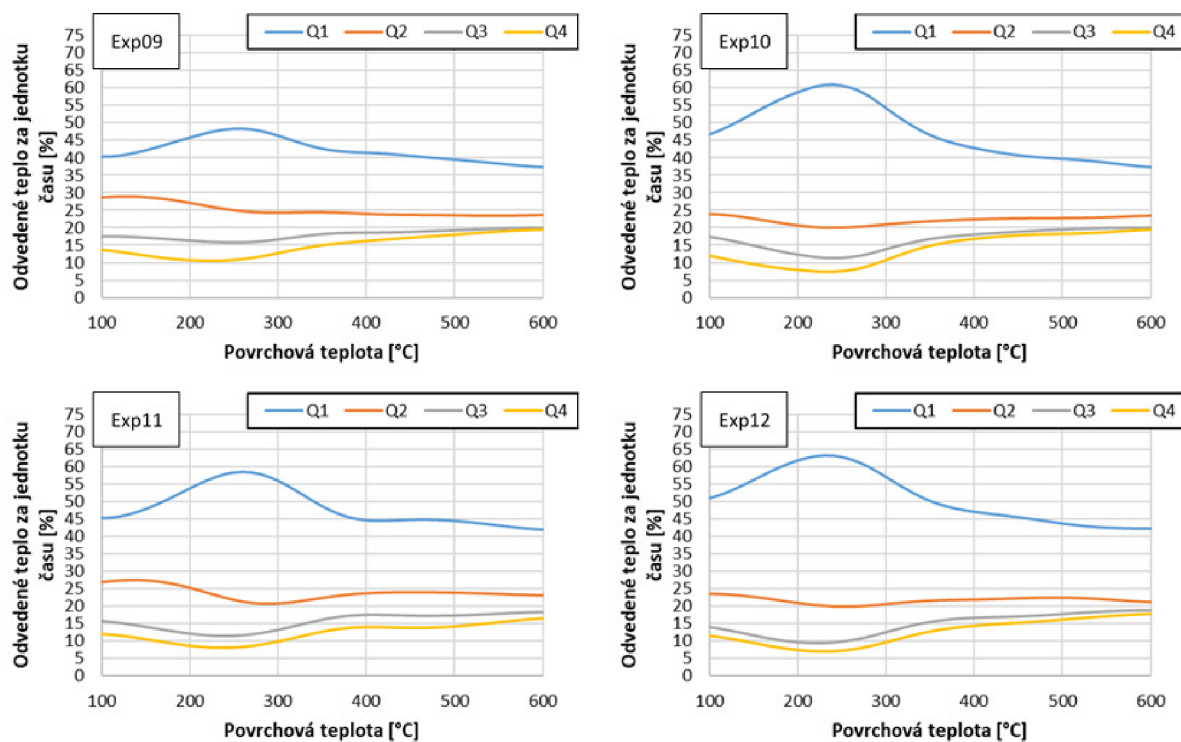


Obr. 6.29: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

Dále bylo zkoumáno chlazení v podoblastech Q1–Q4. Procentuální podíl odvedeného tepla v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ je na obrázku 6.30

Z obrázku 6.30 je vidět, že významná část tepla je opět odvedena v první polovině chladicí oblasti „D“, přičemž v podoblasti Q1 dochází k největšímu odvodu. Pro povrchové teploty pod 400 °C je podoblast Q1 zodpovědná za více než 40 % odvedeného tepla. V případě experimentů Exp10 a Exp12 (experimenty s vyšší rychlostí) je při povrchové teplotě okolo 250 °C odvedeno v této oblasti více než 60 % tepla. V podoblasti Q2 je procentuální podíl odvedeného tepla v celém rozsahu povrchových teplot téměř konstantní nehlédě na parametry měření. Lze pozorovat pouze mírný nárůst, když povrchové teploty poklesnou pod 300 °C. Vyšší rychlost má za následek více odvedeného tepla v podoblasti Q1 na úkor ostatních podoblastí a to především v případě experimentů s nižším tlakem vody, kdy je v podoblasti Q1 při vyšší rychlosti odvedeno v průměru o 6,5 % více tepla oproti

experimentu s nižší rychlostí. Vyšší tlak vody rovněž způsobí, že je více tepla odvedeno v podoblasti Q1 (průměrně o cca 5 %).



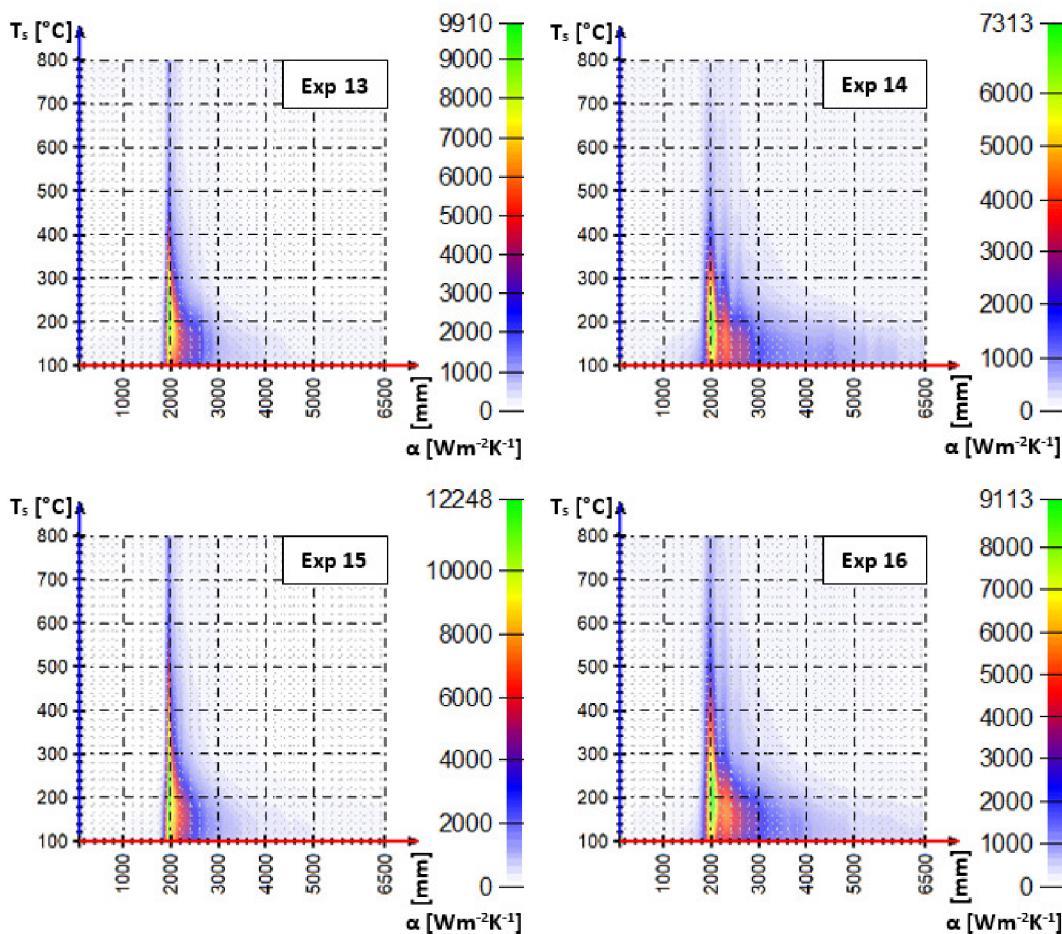
Obr. 6.30: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladící oblasti „D“ (experimenty Exp09, Exp10, Exp11, Exp12)

### 6.3.4 Vrchní chlazení: tryska s plochým paprskem, zoxidovaný povrch

K měření byla použita tryska s plochým paprskem s úhlem rozstříku 90°. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.8. Střed trysky byl přímo nad termočlánkem T5 (viz obrázek 4.2). Výsledky měření v podobě součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze jsou na obrázku 6.31.

Tab. 6.8: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s plochým paprskem, zoxidovaný povrch

Experiment	Průtok vody [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Počáteční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Vzdálenost trysky [mm]
Exp13	0,46	0,25	2	820	250
Exp14	0,46	0,25	5	250	
Exp15	0,92	1	2	820	250
Exp16	0,92	1	5	820	250

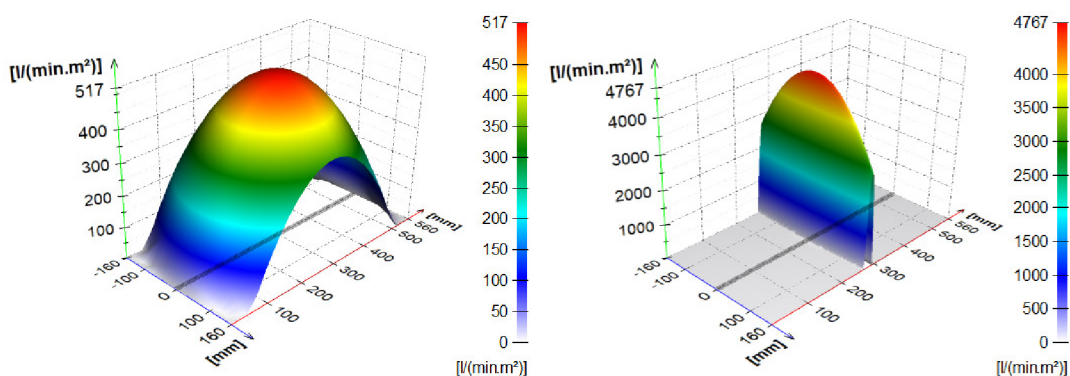


Obr. 6.31: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp13–Exp16



Poloha 1940 mm odpovídá pozici přímo pod tryskou. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data z termočlánku T5 ze středu desky (obrázek 4.2).

Tryska a její vzdálenost byly vybrány tak, aby průměrné množství dopadající vody na oblasti kolem středového termočlánku bylo podobné jako v případě využití trysky s kuželovým paprskem. Rozložení dopadající vody pro oba typy trysek, z kterého se vycházelo při výběru trysky s plochým paprskem, je na obrázku 6.32. Zaznačená šedá oblast na dopadové ploše je uvažovaná oblast v okolí středového termočlánku. Změřené rozložení tlaku dopadající vody pro jednotlivé konfigurace jsou uvedeny v příloze B.



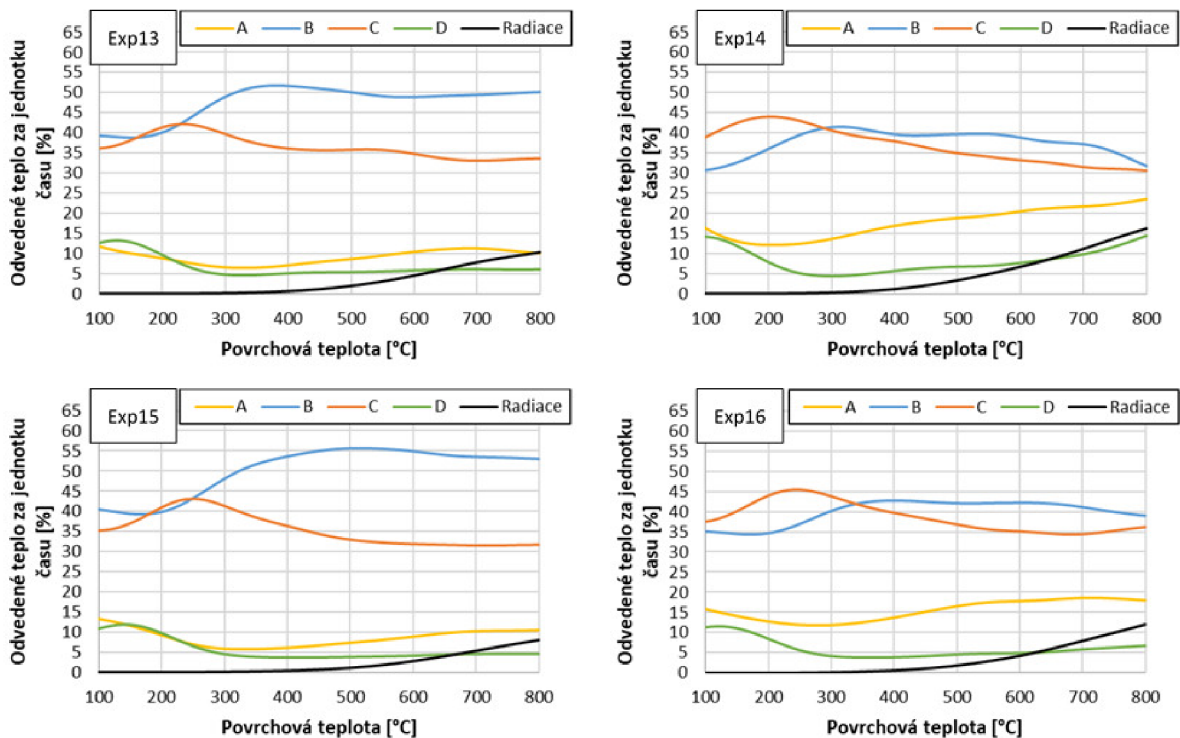
Obr. 6.32: Rozložení dopadající vody pro trysku s kuželovým (vlevo) a plochým (vpravo) paprskem; šedě na dopadové ploše vyznačena oblast v okolí středového termočlánku

#### 6.3.4.1 Chlazení ve všech oblastech

Obdobně jako v případě chlazení s kuželovou tryskou bylo spočítáno odvedené teplo v jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) pro povrchové teploty v rozmezí 100–800 °C. Poloha testovací desky v jednotlivých chladicích oblastech se ale liší. Oblasti „A“ odpovídá poloha testovací desky v rozmezí 1773–1922 mm, oblasti „B“ 1923–1956 mm, oblasti „C“ 1957–2106 mm a oblasti „D“ 2107–3307 mm pro rychlost 2 m s<sup>-1</sup> a 2107–5107 mm pro rychlost 5 m s<sup>-1</sup>. Výsledky ve formě procentuálního podílu odvedeného tepla za jednotku času jsou uvedeny na obrázku 6.33.

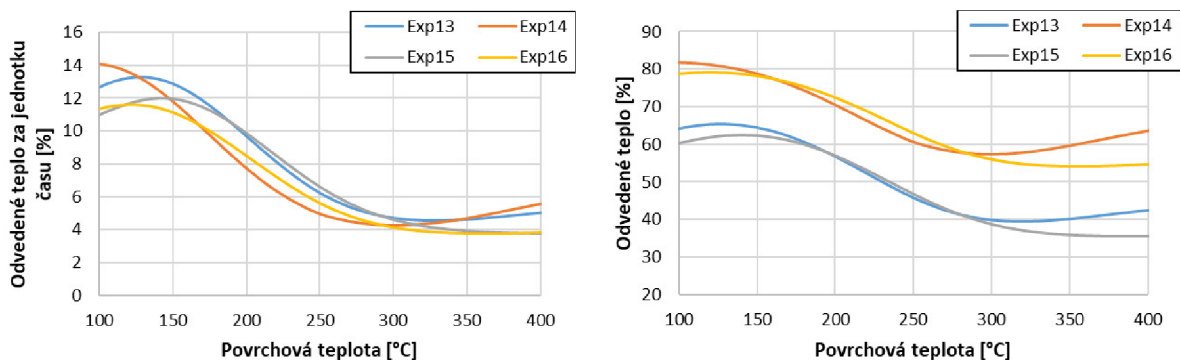
Z obrázku je opět dobře patrný vliv rychlosti. Při experimentech s vyšší rychlostí (Exp14, Exp16) se chlazení v oblastech „B“ a „C“ liší jen málo (rozdíl v odvedeném teple za jednotku času je cca 5 %). Naopak u experimentů s nižší rychlostí (Exp13, Exp15) je patrný rozdíl mezi oblastmi „B“ a „C“ pro teploty nad 300 °C. Více tepla je odvedeno v oblasti „B“. Rozdíl mezi oblastmi „B“ a „C“ a dominance oblasti „B“ se navíc v případě experimentů s nižší rychlostí zvětšují s rostoucím tlakem vody. S poklesem rychlosti dochází také k menšímu odvodu tepla za jednotku času v oblasti „A“.

V oblasti „D“ se v případě nižších povrchových teplot neprojevuje významná změna s rozdílnými rychlostmi ani tlaky vody (obrázek 6.34 vlevo). Jako v předchozích případech i zde dochází k posunu maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším povrchovým teplotám při experimentech s vyšším tlakem vody. Posun je však malý. V případě povrchové teploty okolo 150 °C je v chladicí oblasti „D“ odvedeno cca 12 % tepla za jednotku času. V případě, kdy odvedené teplo není vztahováno na jednotku času, je chladicí oblast „D“ při povrchové teplotě okolo 150 °C zodpovědná za více než 60 % odvedeného tepla



Obr. 6.33: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladičí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací (experimenty Exp13, Exp14, Exp15, Exp16)

při experimentech s rychlostí  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Při vyšší rychlosti ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ) je v této oblasti odvedeno téměř 80 % tepla (obrázek 6.34 vpravo). Jedná se o nejvyšší hodnoty, kterých bylo dosaženo mezi všemi zkoumanými variantami chlazení.

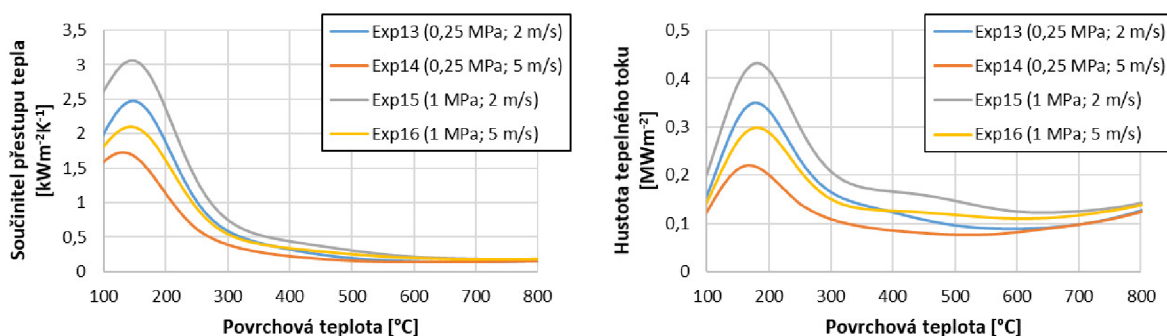


Obr. 6.34: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladičí oblasti „D“

### 6.3.4.2 Chlazení v oblasti „D“

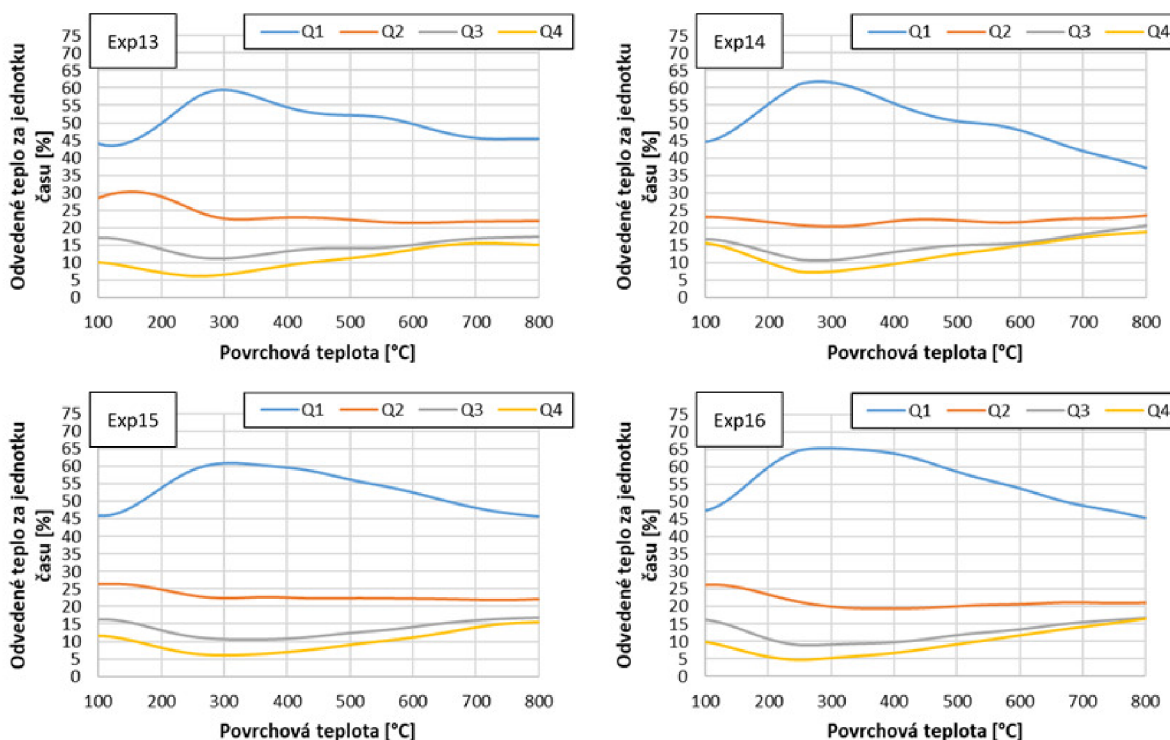
Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.35. Z obrázku je zřejmé, že hustota tepelného toku roste s rostoucím tlakem vody. Také můžeme pozorovat,

že v případě nižší rychlosti začíná intenzivnější chlazení při vyšších povrchových teplotách a maximální hustota tepelného toku dosahuje vyšších hodnot. Toto chování je totožné s předchozími měřeními.



Obr. 6.35: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

Dále bylo rovněž zkoumáno chlazení v podoblastech Q1–Q4. Procentuální podíl odvedeného tepla v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ je na obrázku 6.36.



Obr. 6.36: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ (experimenty Exp13, Exp14, Exp15, Exp16)

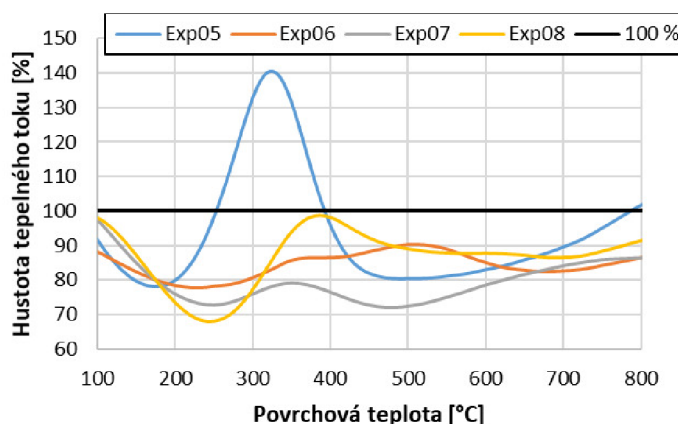
Z obrázku 6.36 můžeme vidět, že situace je velmi podobná jako v případě využití trysky s kuželovým paprskem. Převážná část tepla je i v tomto případě odvedena v první polovině chladicí oblasti „D“, přičemž podoblast Q1 je opět dominantní. Podoblast Q1



je zodpovědná za více jak 40 % odvedeného tepla a v případě povrchových teplot okolo 300 °C za až 65 %. S Rostoucím tlakem vody dochází v podoblasti Q1 k mírnému nárůstu procentuálního odvodu tepla (cca o 4 %).

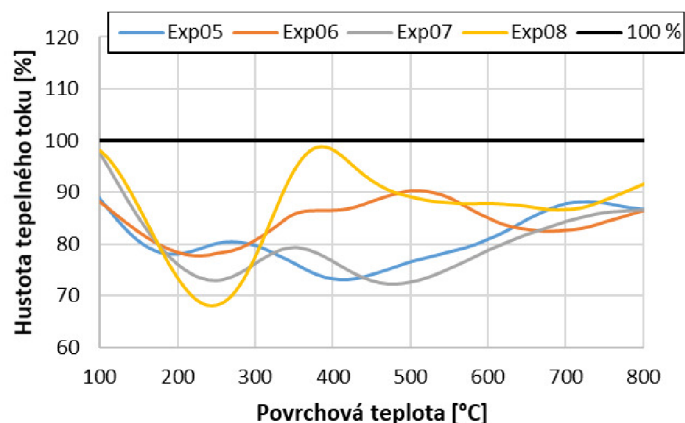
### 6.3.5 Porovnání vrchního a spodního chlazení

K porovnání vrchního a spodního chlazení byla využita měření s tryskou s kuželovým paprskem provedená na testovací desce se zoxidovaným povrchem. Jde o experimenty Exp01–Exp04 (vrchní chlazení) a Exp05–Exp08 (spodní chlazení). K porovnání chlazení byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.14 a 6.24). Pro lepší přehlednost bylo spodní chlazení vyjádřeno jako procentuální podíl vrchního chlazení (obrázek 6.37). Experimenty Exp01–Exp04 reprezentující vrchní chlazení jsou tak na obrázku 6.37 znázorněny černou úsečkou značící 100 %. Z obrázku je vidět, že v případě spodního chlazení dosahuje hustota tepelného toku převážně 70–90 % hustoty tepelného toku při vrchním chlazení. Výjimkou je experiment Exp05, kdy v případě povrchových teplot v rozmezí cca 250–400 °C dosahuje hustota tepelného toku při spodním chlazení větších hodnot. To je pravděpodobně způsobeno vodou odkapávající při brzdění z pohyblivého vozíku, která se dostala do oblasti termočláнку T5. Použijeme-li místo středového termočláнку termočláanky T2 a T8, které se nacházejí více u kraje desky (obrázek 4.2 vpravo), obdržíme i v případě experimentu Exp05 hodnoty hustoty tepelného toku v rozmezí 70–90 % viz obrázek 6.38.

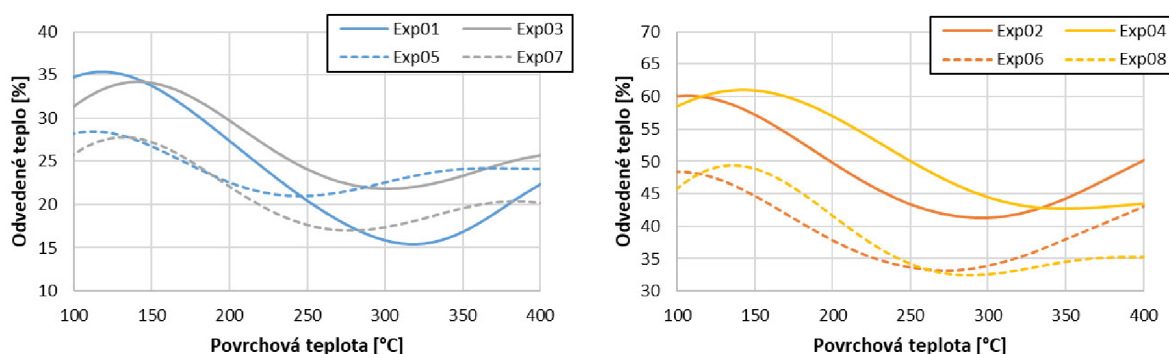


Obr. 6.37: Porovnání vrchního (černá úsečka, experimenty Exp01–Exp04) a spodního (experimenty Exp05–Exp08) chlazení v oblasti „D“

Budeme-li chtít porovnat vrchní a spodní chlazení na chladicí oblasti „D“ z celkového hlediska, tzn. zajímat nás bude vliv oblasti „D“ vůči ostatním oblastem, využijeme data z obrázků 6.13 a 6.23. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro vrchní a spodní chlazení je na obrázku 6.39. Pozorovat můžeme, že v případě experimentů s vyšší rychlostí (obrázek 6.39 vpravo) je rozdíl mezi vrchním a spodním chlazením jasně patrný. Pro povrchové teploty okolo 150 °C jde o více než 10% rozdíl. V případě experimentů s nižší rychlostí můžeme také pozorovat pokles odvedeného tepla v oblasti „D“ u spodního chlazení s výjimkou experimentů s nižším tlakem vody, kde pro povrchové teploty nad cca 250 °C dochází naopak k nárůstu odvedeného tepla.



Obr. 6.38: Porovnání vrchního (černá úsečka, experimenty Exp01–Exp04) a spodního (experimenty Exp05–Exp08) chlazení v oblasti „D“; u experimentů Exp01 a Exp05 využita data z termočlánků T2 a T8 (průměr)



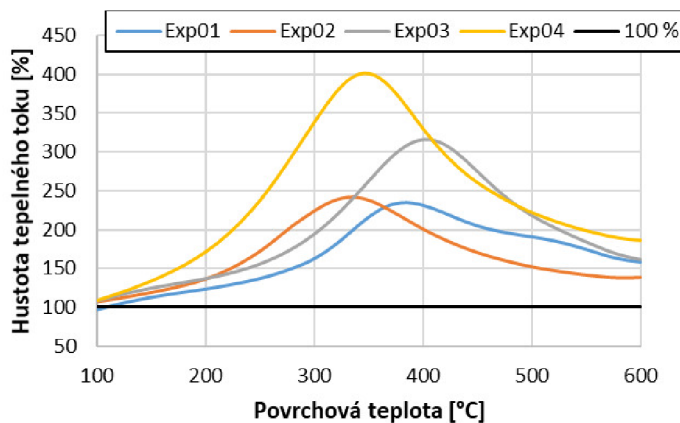
Obr. 6.39: Porovnání vrchního (experimenty Exp01–Exp04) a spodního (experimenty Exp05–Exp08) chlazení; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

Ačkoliv je patrné, že spodní chlazení v oblasti „D“ nedosahuje intenzity vrchního chlazení, stále však v této oblasti dochází k značnému odvodu tepla. Je tedy zřejmé, že zbytková voda hraje významnou roli i v případě, kdy tíhová síla působí proti ostříku.

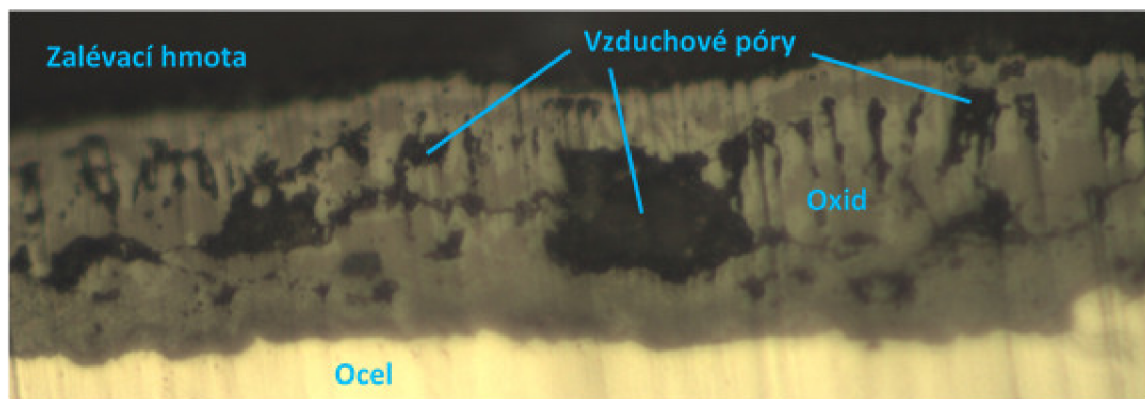
### 6.3.6 Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu

K porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu byly využity experimenty Exp09–Exp12 (broušený povrch) a Exp01–Exp04 (zoxidovaný povrch). V obou případech bylo chlazení realizováno tryskou s kuželovým paprskem. Stejně jako v případě porovnání vrchního a spodního chlazení byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.29 a 6.14) a chlazení zoxidovaného povrchu bylo vyjádřeno jako procentuální podíl chlazení broušeného povrchu (obrázek 6.40). Černá úsečka značící 100 % na obrázku 6.40 reprezentuje tedy experimenty Exp09–Exp12 provedené na testovací desce s broušeným povrchem. Z obrázku je zřejmé, že rozdíl mezi zkoumanými povrchy je značný. U zoxidovaného povrchu dosahuje hustota tepelného toku v extrémním případě až čtyřnásobné hodnoty oproti broušenému povrchu. Patrný je

vliv jak tlaku vody, tak rychlosti testovací desky. U experimentů s vyšším tlakem vody je rozdíl mezi broušeným a zoxidovaným povrchem větší než v případě experimentů s nižším tlakem vody. S rostoucí rychlostí testovací desky pak dochází k poklesu povrchové teploty, při které je dosaženo maximálního rozdílu v chlazení. V případě experimentů s nižším i vyšším tlakem vody tento pokles činil 50 °C. Velký rozdíl mezi povrchy je pravděpodobně způsoben nasákavostí vrstvy oxidů. Tato vrstva může být značně porézní (jak je vidět z obrázku 6.41) a voda se tak během ostřiku dostává do vzduchových pórů. Vrstva oxidů se tedy v podstatě „chová jako houba“. V oblasti za ostřikem poté dochází k vypařování nasáklé vody a k odvodu tepla. Svou roli může sehrát i vyšší drsnost zoxidovaného povrchu.



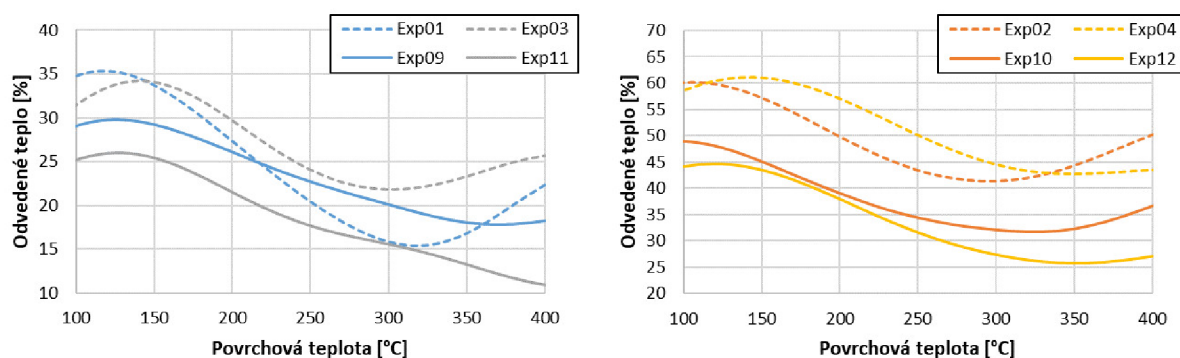
Obr. 6.40: Porovnání chlazení na broušeném (černá úsečka, experimenty Exp09–Exp12) a zoxidovaném (experimenty Exp01–Exp04) povrchu v oblasti „D“



Obr. 6.41: Vrstva oxidů [28]

K porovnání vlivu oblasti „D“ vůči ostatním oblastem při chlazení na různých površích byla využita data z obrázků 6.28 a 6.13. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu je na obrázku 6.42. Z obrázku je vidět, že v případě experimentů s vyšší rychlostí (obrázek 6.42 vpravo) je ze zoxidovaného povrchu v chladicí oblasti „D“ odvedeno o cca 10 až 15 % více tepla (v závislosti na tlaku vody). V případě experimentů s nižší rychlostí (obrázek 6.42 vlevo)

není rozdíl mezi povrchy tak velký, ale rovněž je více tepla odvedeno ze zoxidovaného povrchu s výjimkou experimentů s nižším tlakem vody a povrchových teplot v rozmezí cca 220–360 °C.



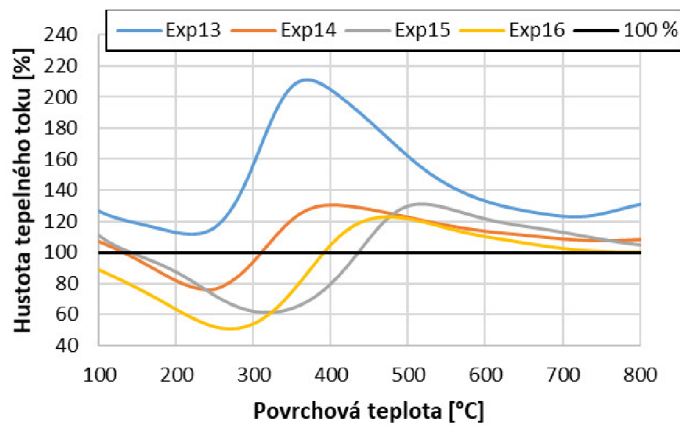
Obr. 6.42: Porovnání chlazení na broušeném (experimenty Exp09–Exp12) a zoxidovaném (experimenty Exp01–Exp04) povrchu; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

Přítomnost oxidů na povrchu oceli hraje v případě chlazení zbytkovou vodou významnou roli. Nasákavost oxidů má za následek výrazně vyšší odvody tepla za chladicí sekci oproti čistému ocelovému povrchu.

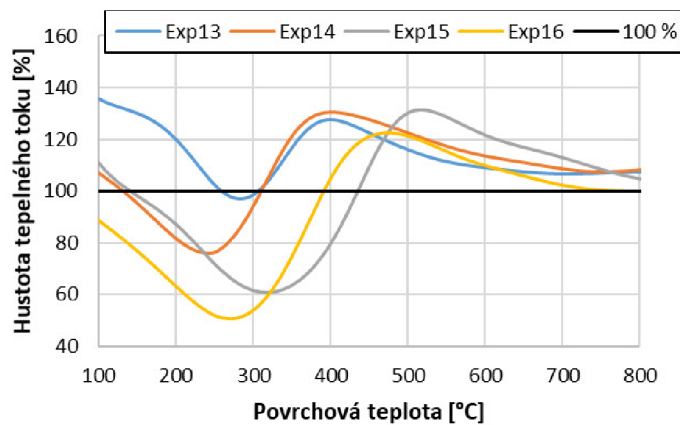
### 6.3.7 Porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem

K porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem byly využity experimenty Exp13–Exp16 (tryska s plochým paprskem) a Exp01–Exp04 (tryska s kuželovým paprskem). V obou případech bylo chlazení realizováno na zoxidovaném povrchu. Stejně jako v předchozích porovnáních byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.35 a 6.14). Chlazení realizované tryskou s plochým paprskem bylo vyjádřeno jako procentuální podíl chlazení využívajícího trysku s kuželovým paprskem (obrázek 6.43). Černá úsečka značící 100 % na obrázku 6.43 reprezentuje tedy experimenty Exp01–Exp04, při kterých byla k chlazení využita tryska s kuželovým paprskem. Z obrázku je vidět, že při vyšších povrchových teplotách dosahuje chlazení tryskou s plochým paprskem větší intenzity (cca o 10–30 %). V rozmezí povrchových teplot cca 250–500 °C však dojde ke změně a intenzita chlazení tryskou s plochým paprskem klesne na 50–80 % intenzity chlazení s tryskou s kuželovým paprskem. To je způsobeno tím, že v případě chlazení tryskou s plochým paprskem sice dojde k dřívějšímu nástupu (při vyšších povrchových teplotách) intenzivního chlazení, ale tento nástup je mnohem pozvolnější než v případě chlazení s tryskou s kuželovým paprskem. S dalším poklesem povrchové teploty se rozdíl v chlazení zmenšuje. Výše zmíněné neplatí v případě experimentu Exp13, který vykazuje odlišný průběh. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v případě experimentu Exp01 s tryskou s kuželovým paprskem došlo k nástupu intenzivního chlazení později. Provedeme-li porovnání na termočláncích dále od středu trysky (T2 a T8), dostáváme již průběh více podobný ostatním měřením (obrázek 6.44). Lze tedy předpokládat popsany průběh u všech konfigurací ostříku.





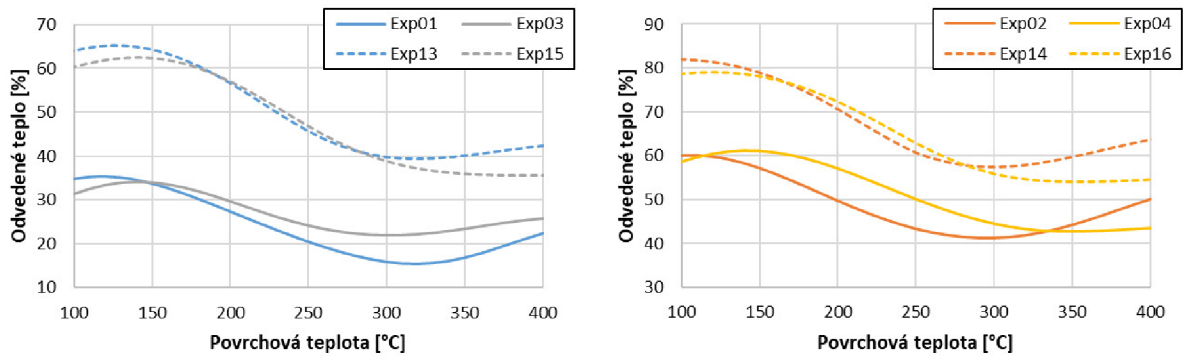
Obr. 6.43: Porovnání chlazení tryskou s kuželovým (černá úsečka, experimenty Exp01–Exp04) a plochým (experimenty Exp13–Exp16) paprskem v oblasti „D“



Obr. 6.44: Porovnání chlazení tryskou s kuželovým (černá úsečka, experimenty Exp01–Exp04) a plochým (experimenty Exp13–Exp16) paprskem v oblasti „D“; u experimentů Exp01 a Exp13 využita data z termočlánků T2 a T8 (průměr)

K porovnání vlivu oblasti „D“ vůči ostatním oblastem při chlazení pomocí různých trysek byla využita data z obrázků 6.34 a 6.13. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro chlazení s tryskou s plochým a kuželovým paprskem je na obrázku 6.45. Z obrázku je patrné, že jak v případě experimentů s nižší rychlostí (obrázek 6.45 vlevo), tak i při experimentech s vyšší rychlostí (obrázek 6.45 vpravo) je v chladicí oblasti „D“ více tepla odvedeno při využití trysky s plochým paprskem. Rozdíl mezi použitými tryskami je větší při nižších rychlostech. Kupříkladu pro povrchovou teplotu 150 °C je procentuální rozdíl odvedeného tepla více jak 25 % u experimentů s nižší rychlostí a zhruba 20 % u experimentů s vyšší rychlostí.

I přesto, že v případě využití trysky s plochým paprskem nedosahuje hustota tepelného toku v chladicí oblasti „D“ při nižších povrchových teplotách takových hodnot jako v případě trysky s kuželovým paprskem, je procentuální podíl odvedeného tepla v této oblasti větší pro trysku s plochým paprskem. To je způsobeno úzkou dopadovou stopou trysky.



Obr. 6.45: Porovnání chlazení tryskou s kuželovým (experimenty Exp01–Exp04) a plochým (experimenty Exp13–Exp16) paprskem; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

### 6.3.8 Chyby měření

K záznamu teplot během experimentálních měření byly využity termočlánky typu K, které mají vodiče vyrobené z chromelu (NiCr) a alumelu (NiAl). Tyto termočlánky umožňují měřit teploty až do 1250 °C s chybou 0,4 %, nebo v případě nízkých teplot 1,1 °C [36]. S měřením teplot se však pojí další chyby a to chyba způsobená přepočtovým polynomem, který termoelektrické napětí převádí na teplotu (lze nalézt např. v [14]), a chyba dataloggeru (záznamového zařízení). Výsledná chyba měřené teploty je tak složením těchto chyb. V případě experimentů provedených v rámci této práce byla teplota měřena s chybou  $\pm 1,85$  °C pro teploty nižší než 275 °C. Pro teploty nad 275 °C byla chyba 0,4 %  $\pm 0,75$  °C.

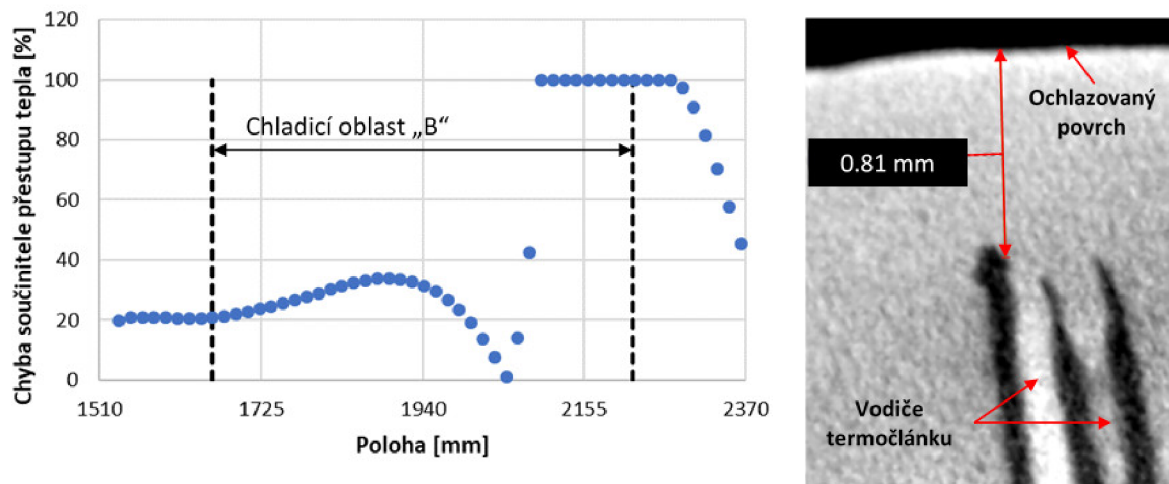
Data zatížená touto chybou však způsobí jen velmi malé rozdíly v součiniteli přestupu tepla (pod jedno procento). Větší problémy by způsobil šum v datech, na který je inverzní úloha velmi citlivá. Z tohoto důvodu se změřené teploty filtrují metodou víceúrovňové filtrace, která je popsána v [25].

Další nepřesnosti souvisí s nastavením výpočtového modelu, kde hrají vliv například materiálové vlastnosti, ale především hloubka zabudovaného termočlánku. U testovacích desek použitých v rámci této práce byly termočlánky zabudovány 0,8 mm pod ochlazovaným povrchem. Změníme-li hloubku termočlánku o 0,1 mm, dostaneme součinitel přestupu tepla s průměrnou chybou 19 %. V oblasti ostříku je však tato chyba značně větší. To je patrné z obrázku 6.46 (vlevo), na kterém je zobrazena chyba součinitele přestupu tepla způsobená změnou hloubky termočlánku během jednoho průjezdu chladicí sekcí. Z obrázku je vidět, že v oblasti ostříku „B“ a v následující přechodové oblasti „C“ dosahuje chyba hodnot až 100 %.

Této chybě nastavení modelu se zamezuje kalibrací testovací desky se zabudovanými termočlánky. Ke kalibraci se využívá skutečná hloubka umístění termočlánku získaná z tomografu a součinitel přestupu tepla vyvolaný laminárním proudem vody o dané teplotě [34]. Typický snímek zabudovaného termočlánku z tomografu je na obrázku 6.46 (vpravo). Z tohoto obrázku je možné určit skutečnou vzdálenost termočlánku od ochlazovaného povrchu.

Jednotlivá měření jsou rovněž zatížena chybou provedení samotného měření. Sem patří například nastavení tlaku vody, průtoku vody, pozice trysek atd., ale také třeba opotřebení testovací desky. Některé tyto chyby lze minimalizovat zkušenou obsluhou, ale

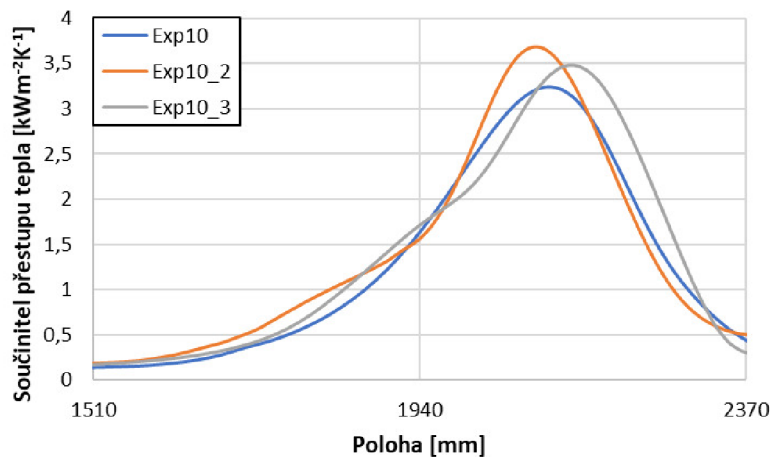




Obr. 6.46: Chyba součinitele přestupu tepla vlivem hloubky zabudovaného termočlánku v chladicích oblastech „A“–„C“ (vlevo); snímek zabudovaného termočlánku z tomografu (vpravo)

opakovaná měření budou vždy zatížena určitou chybou. Z provedených experimentálních měření v Laboratoři přenosu tepla a proudění v minulých letech lze usoudit, že chyba se při opakovaných měřeních pohybuje okolo 10 %. Vždy záleží na typu konkrétního měření. Tato chyba v sobě zahrnuje i stochastičnost celého procesu, která je způsobena například nehomogenitou vodního spreje či shluky vody v případě laminárních proudů.

V případě opakovaného experimentu Exp10 byla chyba přibližně 13 %. Průběhy součinitele přestupu tepla při opakovaných měřeních jsou pro povrchovou teplotu 285 °C zobrazeny na obrázku 6.47.



Obr. 6.47: Součinitel přestupu tepla pro povrchovou teplotu 285 °C při opakovaném experimentu Exp10 v chladicích oblastech „A“–„C“

Jednotlivé druhy chyb byly prezentovány na datech pořízených během experimentálních měření pro studium zbytkové vody. Jsou ale v platnosti i pro ostatní měření, která byla provedena v rámci této práce.

## 6.4 Shrnutí získaných výsledků

V této kapitole byla představena a vysvětlena problematika zbytkové vody. Experimentálně byl zkoumán vliv zbytkové vody na chlazení horkých ocelových povrchů. Použity byly různé druhy ostříků (tryska s plochým paprskem, tryska s kuželovým paprskem) a různé typy povrchů (broušený, zoxidovaný). Bylo prokázáno, že zbytková voda může značně ovlivnit průběh chlazení v oblasti nižších teplot. Některé závěry byly již publikovány [30, 31].

Při porovnání provedených experimentů bylo potvrzeno, že zbytková voda ovlivňuje chlazení i v případě použití spodního ostříku, kdy vlivem povrchového napětí zůstává na ochlazovaném povrchu. Ačkoliv spodní chlazení nedosahovalo v oblasti „D“ (oblast, v které se celá testovací deska nachází mimo ostřík a přenos tepla je realizován pouze vypařováním zbytkové vody a radiací) intenzity vrchního chlazení, stále v této oblasti docházelo k značnému odvodu tepla.

Mezi chlazením s tryskou s plochým paprskem a s tryskou s kuželovým paprskem byl největší rozdíl pozorován v procentuálním podílu odvedeného tepla v oblasti „D“. V případě trysky s plochým paprskem bylo v této oblasti odvedeno při povrchových teplotách kolem 150 °C až 80 % tepla (cca o 20 % více než v případě použití trysky s kuželovým paprskem). To je způsobeno úzkou dopadovou stopou trysky s plochým paprskem. Dále tryska s plochým paprskem prorazí parní vrstvu při vyšší teplotě, což rovněž ovlivňuje chlazení v oblasti „D“, kde vlivem toho dosahuje při vyšších povrchových teplotách hustota tepelného toku vyšších hodnot oproti chlazení tryskou s kuželovým paprskem. Naopak tryska s kuželovým paprskem smáčí více povrchu, což se v oblasti „D“ projeví vyšší hustotou tepelného toku při nižších povrchových teplotách oproti chlazení tryskou s plochým paprskem.

Největší vliv na chlazení zbytkovou vodou však měla přítomnost oxidů na ochlazovaném povrchu. Oproti broušenému povrchu dosahovala hustota tepelného toku v oblasti „D“ u zoxidovaného povrchu až čtyřnásobné hodnoty. Za tímto velkým nárůstem stojí pravděpodobně nasákavost porézní vrstvy oxidů a vyšší drsnost zoxidovaného povrchu.

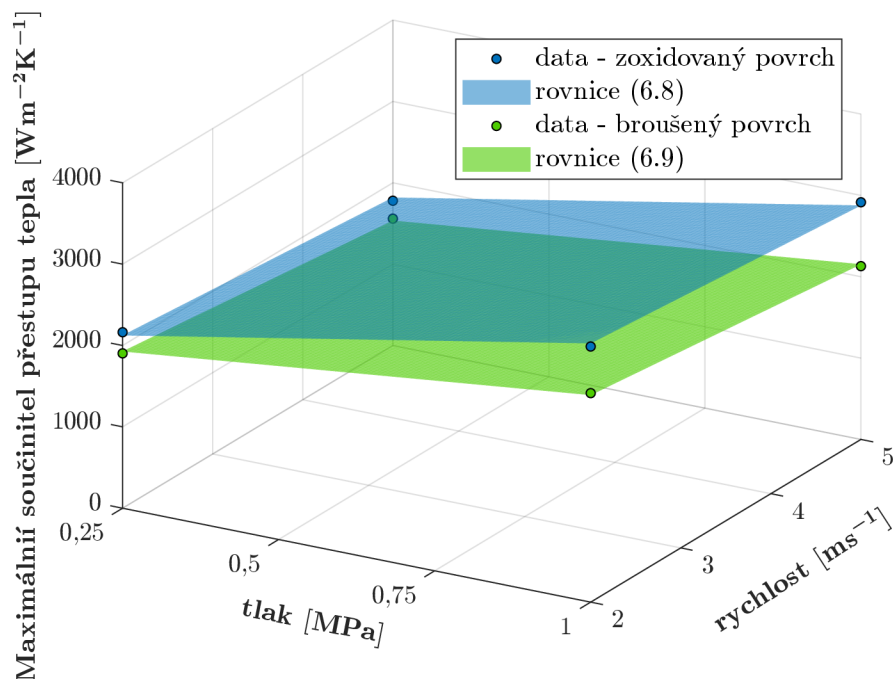
V případě odvedeného tepla za jednotku času nebyly v chladicí oblasti „D“ pozorovány rozdíly pro různé tlaky vody ani různé rychlosti pohybu testovacích desek. Pokud nebylo odvedené teplo v oblasti „D“ vztaženo na jednotku času, bylo odvedené teplo závislé na rychlosti a procentuální podíl odvedeného tepla byl značně vyšší (v případě použití ploché trysky o více než 50 %). Podíváme-li se na průběh hustoty tepelného toku v oblasti „D“, tak s rostoucím tlakem vody dosahovala hustota tepelného toku vyšších hodnot. Kritická hustota tepelného toku byla vyšší o 25–80 %. S rostoucí rychlostí pohybu testovací desky docházelo k poklesu kritické hustoty tepelného toku (o 5–35 %) a v naprosté většině případů také k poklesu povrchové teploty, při které došlo k nástupu prudkého chlazení.

Pro experimenty s tryskou s kuželovým paprskem na broušeném povrchu (Exp09–Exp12) a zoxidovaném povrchu (Exp01–Exp04, vrchní chlazení) byl rovněž stanoven maximální součinitel přestupu tepla v chladicí oblasti „D“. Ten nastává při velmi podobné povrchové teplotě jako kritická hustota tepelného toku (viz obrázky 6.14 a 6.29). Maximální součinitel přestupu tepla v chladicí oblasti „D“ je zobrazen v závislosti na tlaku vody a rychlosti desky na obrázku 6.48. Spolu s ním je na obrázku 6.48 zobrazena rovněž grafická interpretace rovnic

$$y_{ox}(p, v) = 1410p - 101,7v + 1975 \approx \alpha_{max}(p, v), \quad (6.8)$$

$$y_{br}(p, v) = 824,6p - 130,6v + 1982 \approx \alpha_{max}(p, v), \quad (6.9)$$

kde  $\alpha_{max}$  je maximální součinitel přestupu tepla v chladicí oblasti „D“,  $p$  je tlak vody v megapascálech a  $v$  je rychlost desky v metrech za sekundu. Rovnice vznikly proložení experimentálních dat pro zoxidovaný povrch (rovnice (6.8)) a broušený povrch (rovnice (6.9)) rovinou a dávají představu o tom, jaké přibližné hodnoty maximálního součinitele přestupu tepla lze v chladicí oblasti „D“ očekávat pro různé hodnoty tlaku vody a rychlosti desky při použití trysky s kuželovým paprskem. V případě spodního chlazení lze očekávat hodnoty zhruba o 15 % nižší.



Obr. 6.48: Maximální součinitel přestupu tepla pro experimenty s tryskou s kuželovým paprskem na broušeném (Exp09–Exp12) a zoxidovaném povrchu (Exp01–Exp04) a maximální součinitel přestupu tepla určený rovnicemi (6.8) a (6.9); chladicí oblast „D“

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala faktory ovlivňujícími chlazení během tepelného zpracování oceli. Jednalo se konkrétně o vliv kvality povrchu, kam byl zařazen vliv drsnosti povrchu a přítomnost oxidů na ochlazovaném povrchu, a o zbytkovou vodu, která po ostřiku zůstává na ochlazovaném povrchu. Vliv těchto parametrů na průběh chlazení byl experimentálně zkoumán v laboratorních podmínkách v Laboratoři přenosu tepla a proudění.

První část práce byla zaměřena na zkoumání vlivu kvality povrchu na sprchové a laminární chlazení. K tomuto účelu byly vyrobeny testovací desky s různou úpravou povrchu. Chlazení tak bylo experimentálně zkoumáno na broušeném, válcovaném a zoxidovaném povrchu. Pro studium vlivu drsnosti byly využity experimenty na broušeném povrchu, který dosahoval drsnosti  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$ , a na válcovaném povrchu s drsností  $R_a = 3,0 \mu\text{m}$ . Pro posouzení vlivu oxidů byla porovnána data z experimentů na válcovaném a zoxidovaném povrchu. Parametr drsnosti  $R_a = 3,1 \mu\text{m}$  u zoxidovaného povrchu byl velmi podobný, jako v případě válcovaného povrchu.

Sprchové chlazení bylo realizováno třemi druhy trysek. Dvě trysky byly s plochým paprskem a lišily se ve velikosti ústí. Třetí tryska byla s kuželovým paprskem. Vliv drsnosti byl nejvíce patrný u chlazení s tryskou s kuželovým paprskem. Drsnější válcovaný povrch dosáhl oproti broušenému větší intenzity chlazení v celém rozsahu povrchových teplot. Největší rozdíl byl však pozorován v oblasti přechodného varu, kde vlivem vyšší Leidenfrostovy teploty u drsnějšího válcovaného povrchu dosáhla intenzita chlazení více než trojnásobné hodnoty. Větší intenzita chlazení na drsnějším válcovaném povrchu byla dosažena i v případě trysek s plochým paprskem. V oblasti blánového varu byl rozdíl v chlazení přibližně 25 % a v oblasti přechodného varu tento rozdíl výrazně narostl. Obecně tak v případě vodních sprejů dochází u drsnějších povrchů k intenzivnějšímu chlazení v oblasti blánového varu, které je způsobeno větší teplosměnnou plochou drsného povrchu. Dále větší drsnost způsobuje posun Leidenfrostovy teploty k vyšším hodnotám, což má za následek dřívější nástup intenzivního chlazení, a také způsobuje nárůst kritické hustoty tepelného toku. Co se týče přítomnosti oxidů na povrchu, byl v oblasti bublinového varu pozorován izolační vliv oxidů. Intenzita chlazení na zoxidovaném povrchu dosahovala při bublinovém varu 80–90 % intenzity chlazení na válcovaném povrchu. Při využití trysek s plochým paprskem bylo chlazení při vyšších povrchových teplotách v oblasti blánového varu podobné pro zoxidovaný i válcovaný povrch. Oba povrchy měly téměř totožné hodnoty parametru  $R_a$  a přenos tepla přes parní vrstvu byl tak velmi podobný. Při rozpadu parní vrstvy se však projevily vyšší hodnoty parametru  $R_z$  u válcovaného povrchu, což u tohoto povrchu vedlo k vyšším hodnotám Leidenfrostovy teploty a dřívějšímu nástupu intenzivnějšího chlazení. V případě použití trysky s kuželovým paprskem probíhal blánový var pouze velmi krátkou dobu (Leidenfrostova teplota byla blízko  $500^\circ\text{C}$ ), a proto byla intenzita chlazení na zoxidovaném povrchu nižší v celém rozsahu teplot.

U laminárního chlazení nebyl vliv kvality povrchu tak významný. Při studiu vlivu drsnosti byly stejně jako v případě sprchového chlazení zjištěny vyšší hodnoty kritické hustoty tepelného toku u drsnějšího válcovaného povrchu. Rozdíl oproti broušenému povrchu byl však průměrně jen cca 9 % (u sprejů více jak 28 %). V oblasti bublinového varu dosáhl drsnější povrch větší intenzity chlazení (přibližně o 15 %). K tomu rovněž došlo i v případě použití vodních sprejů, kde však byl procentuální rozdíl vyšší (cca 30 %). V ostatních režimech varu byla situace již odlišná od sprchového chlazení. Drsnější povrch zde v případě laminárního chlazení vykazoval mírně nižší intenzitu chlazení. Při porovnání

laminárního chlazení na zoxidovaném a válcovaném povrchu nebyly pozorovány významné rozdíly. Intenzita chlazení byla v obou případech velmi podobná.

Další významnou částí práce bylo studium zbytkové vody, která po ostříku zůstává ve formě tenké vodní vrstvy na ochlazovaném povrchu. Této problematice bylo věnováno hodně prostoru, protože relevantní publikace na toto téma zcela chybí. Experimentálně bylo zkoumáno, jak zbytková voda ovlivňuje chlazení horkých ocelových povrchů a jak se liší intenzita chlazení zbytkové vody pro různé druhy ostříků (spodní, vrchní, tryska s kuželovým paprskem, tryska s plochým paprskem) a typy povrchů (broušený, zoxidovaný). Rovněž bylo zkoumáno, jaký vliv má tlak vody a rychlost pohybu ochlazovaného povrchu na chlazení zbytkovou vodou.

V rámci dizertační práce bylo prokázáno, že zbytková voda značně ovlivňuje průběh chlazení v oblasti nižších teplot. Při porovnání různých ostříků bylo potvrzeno, že i v případě spodního chlazení se vliv zbytkové vody projeví. Ačkoliv intenzita chlazení zbytkovou vodou při spodním ostříku nedosahovala takových hodnot jako v případě vrchního chlazení, stále docházelo k značnému odvodu tepla zbytkovou vodou. Co se týče použití trysky s plochým nebo kuželovým paprskem, byl největší rozdíl pozorován v procentuálním podílu odvedeného tepla, který připadal na zbytkovou vodu. V případě trysky s plochým paprskem bylo vlivem zbytkové vody odvedeno při povrchových teplotách kolem 150 °C až 80 % tepla (cca o 20 % více než v případě použití trysky s kuželovým paprskem).

Největší vliv na chlazení zbytkovou vodou však měla přítomnost oxidů na ochlazovaném povrchu. Oproti broušenému povrchu byla intenzita chlazení zbytkovou vodou na zoxidovaném povrchu až dvaapůlkrát vyšší v případě chlazení za nižšího tlaku vody (0,25 MPa). Při použití vyššího tlaku vody (1 MPa) byla intenzita až čtyřikrát vyšší. Tento velký rozdíl byl pravděpodobně způsoben nasákavostí oxidů a vyšší drsností zoxidovaného povrchu.

Při studiu vlivu tlaku vody a rychlosti pohybu ochlazovaného povrchu na chlazení zbytkovou vodou bylo zjištěno, že v oblasti za ostříkem, kde byl přenos tepla realizován pouze vypařováním zbytkové vody a radiací, dosahovala hustota tepelného toku větších hodnot pro vyšší tlaky (průtoky) vody v celém rozsahu povrchových teplot. Kritická hustota tepelného toku byla vyšší o 25–80 %. S rostoucí rychlostí pohybu ochlazovaného povrchu docházelo k poklesu kritické hustoty tepelného toku (o 5–35 %) a v naprosté většině případů také k poklesu povrchové teploty, při které došlo k nástupu prudkého chlazení. V případě odvedeného tepla za jednotku času v oblasti za ostříkem nebyly pozorovány rozdíly pro různé tlaky vody ani různé rychlosti pohybu ochlazovaného povrchu. Pokud nebylo odvedené teplo v oblasti za ostříkem vztaženo na jednotku času, bylo odvedené teplo závislé na rychlosti pohybu ochlazovaného povrchu a procentuální podíl odvedeného tepla v oblasti za ostříkem byl výrazně vyšší (v případě použití ploché trysky o více než 50 %).

Získané poznatky přinášejí užitečné a nové informace o faktorech ovlivňujících proces chlazení horkých ocelových povrchů a umožňují lépe pochopit celý proces chlazení, což je zásadní pro následnou optimalizaci.

Pro komplexnější pochopení problematiky zbytkové vody by bylo vhodné pokračovat ve výzkumu a zaměřit se například na rozšíření chladicí sekce o více trysek či na možnost snížit vliv zbytkové vody například pomocí vzduchového nože.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BECK, J. V., B. BLACKWELL a R. C. CHARLES. *Inverse heat conduction: ill-posed problems*. New York: Wiley, c1985. ISBN 04-710-8319-4.
- [2] BEJAN, Adrian a Allan D. KRAUS. *Heat transfer handbook*. New York: J. Wiley, 2003. ISBN 04-713-9015-1.
- [3] BROŽOVÁ, Tereza, Martin CHABIČOVSKÝ a Jaroslav HORSKÝ. Influence of the surface roughness on the cooling intensity during spray cooling. In: *METAL 2016, 25rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2016, s. 41-46. ISBN 978-80-87294-67-3.
- [4] ENDO, Rie, Takashi YAGI, Mitsutoshi UEDA a Masahiro SUSU. Thermal Diffusivity Measurement of Oxide Scale Formed on Steel during Hot-rolling Process. *ISIJ International*. 2014, **54**(9), 2084-2088.
- [5] FUJIMOTO, Hitoshi, Yuhei SUZUKI, Takayuki HAMA a Hirohiko TAKUDA. Flow Characteristics of Circular Liquid Jet Impinging on a Moving Surface Covered with a Water Film. *ISIJ International*. 2011, **51**(9), 1497-1505. DOI: 10.2355/isijinternational.51.1497. ISSN 0915-1559. Dostupné také z: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/isijinternational/51.1497?from=CrossRef>
- [6] FUKUDA, Hiroyuki, Naoki NAKATA, Hideo KIJIMA, Takashi KUROKI, Akio FUJIBAYASHI, Yasuyuki TAKATA a Sumitomo HIDAKA. Effects of Surface Conditions on Spray Cooling Characteristics. *ISIJ International*. 2016, **56**(4), 628—636.
- [7] GRADECK, M., A. KOUACHI, M. LÉBOUCHÉ, F. VOLLE, D. MAILLET a J.L. BOREAN. Boiling curves in relation to quenching of a high temperature moving surface with liquid jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009, **52**(5-6), 1094-1104. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.09.015. ISSN 00179310. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931008005589>
- [8] HATTA, Natsuo a Hiroyuki OSAKABE. Numerical Modeling for Process of a Moving Hot Plate by Cooling a Laminar Water Curtain. *ISIJ International*. 1989, **29**(11), 919-925.
- [9] CHABIČOVSKÝ, Martin. *Faktory ovlivňující sprchové chlazení za vysokých teplot*. Brno, 2016, 105 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [10] CHABIČOVSKÝ, Martin a Miroslav RAUDENSKÝ. Experimental Investigation of a Heat Transfer Coefficient. *Materiali in tehnologije/ Materials and Technology*. 2013, **3**, 395-398.
- [11] CHABIČOVSKÝ, M., M. HNÍZDIL, A. A. TSENG a M. RAUDENSKÝ. Effects of oxide layer on Leidenfrost temperature during spray cooling of steel at high temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, **88**, 236—246.



- [12] CHEN, Shih-Jiun a Ampere A. TSENG. Spray and jet cooling in steel rolling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1992, **13**(4), 358-369. DOI: 10.1016/0142-727X(92)90006-U. ISSN 0142727X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142727X9290006U>
- [13] INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2007. ISBN 04-714-5728-0.
- [14] ITS-90 Thermocouple Direct & Inverse Polynomials. In: *OMEGA* [online]. Norwalk: Omega Engineering, c1996-2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.omega.co.uk/temperature/z/pdf/z198-201.pdf>
- [15] JESCHAR, R., E. SPECHT a Ch. KÖHLER. Heat Transfer during Cooling of Heated Metals with Vaporizable Liquids. In: LISCIC, Bozidar, Hans M. TENSI, Lauralice C.F. CANALE a George E. TOTTEN. *Quenching Theory and Technology*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2010, s. 159-178. ISBN 9780429129650.
- [16] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [17] JONDHALE, K.V., M.A. WELLS, M. MILITZER a V. PRODANOVIC. Heat Transfer during Multiple Jet Impingement on the Top Surface of Hot Rolled Steel Strip. *Steel research international*. 2008, **79**(12), 938-946. DOI: 10.1002/srin.200806224. ISSN 16113683.
- [18] KOHLER, C., R. JESCHARS, R. SCHOLZ, J. SLOWIK a G. BORCHARDT. Influence of oxide scales on heat transfer in secondary cooling zones in the continuous casting process, part 1: heat transfer through hot-oxidized steel surfaces cooled by spray-water. *Steel Research*. 1990, **61**(7), 295-301.
- [19] KWON, M. J. a I. S. PARK. Numerical Simulation of Cooling Process after Hot Rolling with Realistic Residual Water Levels. *ISIJ International*. 2015, **55**(8), 1791-1793. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2014-804. ISSN 0915-1559. Dostupné také z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/55/8/55\\_ISIJINT-2014-804/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/55/8/55_ISIJINT-2014-804/_article)
- [20] LEE, Jungho, 2009. Role of Surface Roughness in Water Spray Cooling Heat Transfer of Hot Steel Plate. *ISIJ International*. **49**(12), 1920-1925.
- [21] LIANG, Gangtao a Issam MUDAWAR. Review of spray cooling - Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, **115**, 1174-1205.
- [22] LIANG, Gangtao a Issam MUDAWAR. Review of spray cooling - Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, **115**, 1206-1222.
- [23] LISSEL, Linda. *Modeling the microstructural evolution during hot working of C-Mn and Nb microalloyed steels using a physically based model*. Stockholm, 2006. Dostupné také z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:10817/FULLTEXT01.pdf>. Akademická práce. Royal Institute of Technology.

- [24] LIU, En-yang, Liang-gui PENG, Guo YUAN, Zhao-dong WANG, Dian-hua ZHANG a Guo-dong WANG. Advanced run-out table cooling technology based on ultra fast cooling and laminar cooling in hot strip mill. *Journal of Central South University*. 2012, **19**(5), 1341-1345. DOI: 10.1007/s11771-012-1147-6. ISSN 2095-2899. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11771-012-1147-6>
- [25] POHANKA, M. *Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics*. Brno, 2006. Disertační práce. Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [26] POHANKA, Michal, Martin CHABIČOVSKÝ a Tomáš ONDRUCH. Thermophysical properties measurement of scale layer on steel substrate using flash method. In: *24th International Conference on Materials and Technology*. Ljubljana, Slovenia: Institut za kovinske materiale in tehnologije, 2016, s. 175-175. ISBN 978-961-94088-0-3.
- [27] POHANKA, Michal a Petr KOTRBÁČEK. Design of cooling units for heat treatment. *Heat treatment conventional and novel applications*. Rijeka: InTech, 2012, s. 1-20. ISBN 978-953-51-0768-2.
- [28] RESL, Ondřej. *Vliv vrstvy oxidů na chlazení ocelových povrchů*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Chabičovský, Ph.D.
- [29] RESL, Ondřej, Martin CHABIČOVSKÝ a Helena VOTAVOVÁ. Study of thermal conductivity of the porous oxide layer. In: *Engineering Mechanics 2019, 25th International Conference*. Svratka, 2019, 2019-05-13, s. 315-318. DOI: 10.21495/71-0-315. ISBN 978-80-87012-71-0. Dostupné také z: [http://www.engmech.cz/im/proceedings/show\\_p/2019/315](http://www.engmech.cz/im/proceedings/show_p/2019/315)
- [30] RESL, Ondřej a Michal POHANKA. The Effect of Remaining Water Layer on Final Temperature of Steel Plate During Hot Rolling. In: *METAL 2019, 28rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2019, s. 355-360.
- [31] RESL, Ondřej a Michal POHANKA. Influence of the remaining water layer on the cooling of moving steel surfaces. In: *METAL 2021, 30th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2021, s. 288-293.
- [32] SINHA, J. Effects of Surface Roughness, Oxidation Level, and Liquid Subcooling on the Minimum Film Boiling Temperature. *Experimental Heat Transfer*. 2003, **16**(1), 45-60. DOI: 10.1080/08916150390126478. ISSN 0891-6152. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08916150390126478>
- [33] SUN, Weihua, A.K. TIEU, Zhengyi JIANG, Hongtao ZHU a Cheng LU. Oxide scales growth of low-carbon steel at high temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, **155-156**, 1300-1306. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.172. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604005497>

- [34] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Způsob a zařízení ke stanovení polohy teplotního čidla*. Původce Michal POHANKA. Česká republika. Patent, CZ 305609 B6. Uděleno 25.11.2015. Dostupné také z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/305/305609.pdf>
- [35] WENDELSTORF, R., K.-H. SPITZER a J. WENDELSTORF. Effect of oxide layers on spray water cooling heat transfer at high surface temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, **51**, 4892-4901.
- [36] Wire Color Codes and Limits of Error. In: *OMEGA* [online]. Norwalk: Omega Engineering, c1996-2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/colorcodes>
- [37] XIE, Qian, Zhenyi HUANG, Qingyu HOU, Long ZHANG a Jiajia CAI. Heat Transfer from a Hot Steel Plate Impinged by Air-atomized Water Jet and Impinging Water Jet. *ISIJ International*. 2019, **59**(1), 113-121. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-266. ISSN 0915-1559.
- [38] ZHAO, Yongjun. *The cooling of a hot steel plate by an impinging water jet*. Wollongong, 2005. Dizertační práce. University of Wollongong.

## VLASTNÍ PUBLIKACE

- [A1] POHANKA, Michal a Ondřej RESL. Nozzle orientation effect on thermal crown and stress in the work roll. In: *Proceedings of the 12th International Rolling Conference*. Italy: Associazione Italiana di Metallurgia, 2022. ISBN: 9788898990290.
- [A2] KOTRBÁČEK, Petr, Martin CHABIČOVSKÝ, Jan KOMINEK, Ondřej RESL a Hana BELLEROVÁ. Influence of water temperature on spray cooling at high surface temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2022, **216**, 119074. ISSN 13594311.
- [A3] RESL, Ondřej, Martin CHABIČOVSKÝ, Milan HNÍZDIL, Petr KOTRBÁČEK a Miroslav RAUDENSKÝ. Influence of Porous Oxide Layer on Water Spray Cooling. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*. Canada, 2022, s. 1-8.
- [A4] BELLEROVÁ, Hana, Michal POHANKA a Ondřej RESL. Heat losses of bloom in the hot rolling process. In: *METAL 2022, 31st International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2022, s. 182-186.
- [A5] RESL, Ondřej a Michal POHANKA. Influence of the remaining water layer on the cooling of moving steel surfaces. In: *METAL 2021, 30th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2021, s. 288-293.
- [A6] MRÁZ, Kryštof, Jan BOHÁČEK, Ondřej RESL, Martin CHABIČOVSKÝ a E. KARIMI-SIBAKI. Thermal conductivity of porous oxide layer: A numerical model based on CT data. *Materials Today Communications*. 2021, **28**, 102705. ISSN 23524928.
- [A7] MRÁZ, Kryštof, Erik BARTULI, Tereza KROULÍKOVÁ, Ilya ASTROUSKI, Ondřej RESL, Jan VANČURA a Tereza KŮDELOVA. Case study of liquid cooling of automotive headlights with hollow fiber heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, **28**, 101689. ISSN 2214157X.
- [A8] BELLEROVÁ, Hana, Tomáš LUKS, Miroslav RAUDENSKÝ a Ondřej RESL. Heat transfer coefficient during spray cooling of very hot surfaces by flat nozzles. In: *Proceedings of the 10th European Continuous Casting Conference ECCO 2021*. Italy: Associazione Italiana di Metallurgia, 2021. ISBN: 978-88-98990-24-5.
- [A9] CHABIČOVSKÝ, Martin, Petr KOTRBÁČEK, Ondřej RESL a Hana BELLEROVÁ. Intensification of the secondary cooling by the presence of the oxide layer on the steel slab surface. In: *Proceedings of the 10th European Continuous Casting Conference ECCO 2021*. Italy: Associazione Italiana di Metallurgia, 2021. ISBN: 978-88-98990-24-5.

- [A10] POHANKA, Michal, Petr KOTRBÁČEK, Ondřej RESL a Hana BELLEROVÁ. Optimal hydraulic descaling. In: *METAL 2020, 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2020, s. 118-125.
- [A11] RESL, Ondřej a Michal POHANKA. The Effect of Remaining Water Layer on Final Temperature of Steel Plate During Hot Rolling. In: *METAL 2019, 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2019, s. 355-360.
- [A12] RESL, Ondřej, Martin CHABIČOVSKÝ a Helena VOTAVOVÁ. Study of thermal conductivity of the porous oxide layer. In: *Engineering Mechanics 2019, 25th International Conference*. Svratka, 2019, s. 315-318.
- [A13] CHABIČOVSKÝ, Martin, Ondřej RESL a Miroslav RAUDENSKÝ. Impact of oxide layer on spray cooling intensity and homogeneity during continuous casting of the steel. In: *METAL 2018, 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd., 2018, s. 69-74.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	součinitel teplotní vodivosti, [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$A_s$	plošný obsah povrchu, [ $\text{m}^2$ ]
br.	broušený povrch
$C$	konstanta pro korelaci kritické hustoty tepelného toku, $[-]$
$c_p$	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku, [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
CAL	Continuous Annealing Line, kontinuální žíhací linka
DAQ	data acquisition, sběr dat
$E$	zářivost tělesa, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$g$	tíhové zrychlení, [ $\text{m s}^{-2}$ ]
$H_v$	hustota dopadající vody, [ $\text{l s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]
IHCP	Inverse Heat Conduction Problem
$k_1-k_3$	koeficienty, $[-]$
$L$	tloušťka vzorku, [ $\text{m}$ ]; charakteristický rozměr, [ $\text{m}$ ]
$l_v$	měrné skupenské teplo varu, [ $\text{J kg}^{-1}$ ]
Nu	Nusseltovo číslo, $[-]$
ox.	zoxidovaný povrch
$p$	tlak, [ $\text{Pa}$ ]
$P$	obvod, [ $\text{m}$ ]
$p_1-p_6$	koeficienty nelineární regrese, $[-]$
$\dot{q}$	hustota tepelného toku, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$\dot{q}_{max}$	maximální hodnota hustoty tepelného toku, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$\dot{q}_{min}$	minimální hodnota hustoty tepelného toku, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$\dot{q}_p$	hustota tepelného toku ze zoxidovaného povrchu, [ $\text{W m}^{-2}$ ]; průměrná hustota tepelného toku, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$\dot{q}_s$	hustota tepelného toku z čistého povrchu, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$\dot{Q}$	teplo generované v materiálu, [ $\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ]
$R^2$	koeficient determinace, $[-]$
Ra	střední aritmetická úchylka profilu, [ $\mu\text{m}$ ]; Rayleighovo číslo, $[-]$
RMSE	směrodatná odchylka chyb, [ $\text{W m}^{-2}$ ]
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu, [ $\mu\text{m}$ ]
Rz	největší výška profilu, [ $\mu\text{m}$ ]
SSE	součet kvadratických odchylek
$t$	čas, [ $\text{s}$ ]
$T$	teplota, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_\infty$	teplota okolí, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]; teplota kapaliny, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_{1/2}$	teplota při hustotě tepelného toku $\dot{q}_p$ , [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_f$	teplota povrchové vrstvy, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_i$	vypočtená teplota v místě termočládku, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_i^*$	naměřená teplota termočládkem, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_L$	Leidenfrostova teplota, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_{Lef}$	efektivní Leidenfrostova teplota, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_p$	teplota povrchu, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_s$	povrchová teplota, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$T_{sat}$	teplota saturace, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]
$\Delta T$	teplota přehřátí povrchu, [ $\text{K}$ , $^\circ\text{C}$ ]



T1–T9	označení termočlánků použitých při měření
$v$	rychlost, [ $\text{m s}^{-1}$ ]
vál.	válcovaný povrch
$\alpha$	součinitel přestupu tepla, [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_{ef}$	efektivní součinitel přestupu tepla, [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_i$	odhad součinitele přestupu tepla, [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_{max}$	maximální součinitel přestupu tepla v chladičí oblasti „D“, [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\alpha_{min}$	součinitel přestupu tepla z neoxidovaného povrchu o Leidenfrostově teplotě, [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\beta$	součinitel teplotní objemové roztažnosti, [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\delta$	tloušťka vrstvy okují, [m]
$\varepsilon$	poměrná emisivita, [–]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti, [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\nu$	kinematická viskozita, [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	hustota, [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_l$	hustota syté kapaliny, [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_v$	hustota syté páry, [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta; povrchové napětí, [ $\text{N m}^{-1}$ ]

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Nukiyamiho křivka varu a ochlazovací křivka . . . . .	17
1.2	Režimy varu . . . . .	18
2.1	Válcování za tepla . . . . .	19
2.2	Laminární chlazení . . . . .	20
2.3	Chladicí zóny při laminárním chlazení . . . . .	20
2.4	Trysky s různým tvarem paprsku . . . . .	21
2.5	Chlazení vodní clonou . . . . .	22
2.6	Průběh teploty podél tloušťky ochlazovaného vzorku . . . . .	22
3.1	Zbytková voda při chlazení . . . . .	23
3.2	Závislost hustoty tepelného toku na teplotě přehřátí povrchu pro různé drsnosti povrchu . . . . .	24
3.3	Vliv drsnosti povrchu na kritickou hustotu tepelného toku a Leidenfrostovu teplotu . . . . .	24
3.4	Vliv drsnosti povrchu na průběh sprchového chlazení . . . . .	25
3.5	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro různě drsné povrchy . . . . .	25
3.6	Přenos tepla z povrchu po oxidaci . . . . .	27
3.7	Vliv tloušťky vrstvy oxidů na efektivní Leidenfrostovu teplotu . . . . .	27
3.8	Závislost průměrného součinitele tepelné vodivosti porézní vrstvy oxidů na teplotě . . . . .	28
3.9	Vliv průtoku vody na maximální hustotu tepelného toku; pozice pod tryskou . . . . .	29
3.10	Vliv průtoku vody na maximální hustotu tepelného toku; pozice 38,1 mm od středu trysky . . . . .	29
3.11	Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě pro různé hodnoty hustoty dopadající vody . . . . .	30
4.1	Schéma využitého experimentálního zařízení . . . . .	31
4.2	Rozmístění termočlánků na testovacích deskách . . . . .	32
4.3	Znázornění základní inverzní úlohy . . . . .	33
4.4	Závislost naměřené a povrchové teploty a součinitele přestupu tepla na čase . . . . .	33
4.5	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze . . . . .	34
4.6	Hustota tepelného toku a součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	34
5.1	Testovací deska s broušeným povrchem . . . . .	35
5.2	Testovací deska s válcovaným povrchem . . . . .	35
5.3	Testovací deska se zoxidovaným povrchem . . . . .	36
5.4	Vzorky pro měření drsnosti povrchu . . . . .	36
5.5	Profily drsnosti pro jednotlivé typy povrchů . . . . .	37
5.6	Ukázka sprchového chlazení . . . . .	38
5.7	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze . . . . .	39
5.8	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2525 . . . . .	40
5.9	Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2525 . . . . .	40
5.10	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2572 . . . . .	41
5.11	Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2572 . . . . .	41
5.12	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě; tryska K1551 . . . . .	42
5.13	Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska K1551 . . . . .	42

5.14	Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy . . . . .	43
5.15	Minimální hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy . . . . .	43
5.16	Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody a drsnosti povrchu . . . . .	44
5.17	Problematika stanovení Leidenfrostovy teploty . . . . .	45
5.18	Stanovení teploty $T_{1/2}$ . . . . .	46
5.19	Teplota $T_{1/2}$ v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy . . . . .	46
5.20	Derivace hustoty tepelného toku při teplotě $T_{1/2}$ v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy . . . . .	47
5.21	Závislost teploty $T_{1/2}$ na derivaci hustoty tepelného toku při teplotě $T_{1/2}$ pro různé povrchy . . . . .	47
5.22	Porovnání chlazení na různých površích; tryska P2525 . . . . .	48
5.23	Porovnání chlazení na různých površích; tryska P2572 . . . . .	48
5.24	Porovnání chlazení na různých površích; tryska K1551 . . . . .	48
5.25	Porovnání chlazení na zoxidovaném a válcovaném povrchu . . . . .	49
5.26	Ukázka laminárního chlazení . . . . .	50
5.27	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze . . . . .	51
5.28	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	52
5.29	Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	52
5.30	Kritická hustota tepelného toku v závislosti na průtoku vody pro různé povrchy . . . . .	53
5.31	Porovnání chlazení na různých površích . . . . .	53
6.1	Efekt zbytkové vody na chlazení . . . . .	55
6.2	Vrchní chlazení – součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze . . . . .	56
6.3	Spodní chlazení – součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze . . . . .	56
6.4	Detail z numerické simulace spolu s použitým součinitelem přestupu tepla . . . . .	57
6.5	Provedené numerické simulace . . . . .	58
6.6	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp01–Exp04 . . . . .	60
6.7	Zvolené chladicí oblasti . . . . .	61
6.8	Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou . . . . .	62
6.9	Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou . . . . .	63
6.10	Součinitel přestupu tepla v závislosti na čase pro povrchovou teplotu 150 °C v oblasti se zbytkovou vodou . . . . .	63
6.11	Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na poloze pro povrchovou teplotu 150 °C . . . . .	64
6.12	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací . . . . .	64
6.13	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času a odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	65

6.14	Průměrný součinitel přestupu tepla a průměrná hustota tepelného toku z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	65
6.15	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ . . . . .	66
6.16	Chlazení v oblasti „D“ a porovnání s korelací pro přirozenou konvekci . . . . .	67
6.17	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp05–Exp08 . . . . .	68
6.18	Přívod vody do trysky . . . . .	69
6.19	Schéma zařízení pro měření rozložení tlaku dopadající vody . . . . .	69
6.20	Změřené rozložení tlaku dopadající vody . . . . .	70
6.21	Změřené rozložení tlaku dopadající vody . . . . .	70
6.22	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací . . . . .	71
6.23	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času a odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	71
6.24	Průměrný součinitel přestupu tepla a průměrná hustota tepelného toku z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	72
6.25	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ . . . . .	72
6.26	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp09–Exp12 . . . . .	74
6.27	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací . . . . .	75
6.28	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času a odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	76
6.29	Průměrný součinitel přestupu tepla a průměrná hustota tepelného toku z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	76
6.30	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ . . . . .	77
6.31	Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experimenty Exp13–Exp16 . . . . .	78
6.32	Rozložení dopadající vody pro trysku s kuželovým a plochým paprskem . . . . .	79
6.33	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé chladicí oblasti a množství tepla odvedeného do okolí radiací . . . . .	80
6.34	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času a odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	80
6.35	Průměrný součinitel přestupu tepla a průměrná hustota tepelného toku z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě . . . . .	81
6.36	Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času v každé podoblasti chladicí oblasti „D“ . . . . .	81
6.37	Porovnání vrchního a spodního chlazení v oblasti „D“ . . . . .	82
6.38	Porovnání vrchního a spodního chlazení v oblasti „D“ . . . . .	83
6.39	Porovnání vrchního a spodního chlazení; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	83
6.40	Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu v oblasti „D“ . . . . .	84
6.41	Vrstva oxidů . . . . .	84

6.42	Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	85
6.43	Porovnání chlazení tryskou s kuželovým a plochým paprskem v oblasti „D“	86
6.44	Porovnání chlazení tryskou s kuželovým a plochým paprskem v oblasti „D“	86
6.45	Porovnání chlazení tryskou s kuželovým a plochým paprskem; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	87
6.46	Chyba součinitele přestupu tepla vlivem hloubky zabudovaného termočlánku a snímek zabudovaného termočlánku z tomografu . . . . .	88
6.47	Součinitel přestupu tepla pro povrchovou teplotu 285 °C při opakovaném experimentu Exp10 . . . . .	88
6.48	Maximální součinitel přestupu tepla v chladicí oblasti „D“ . . . . .	90
B.1	Rozložení tlaku dopadající vody pro trysku s kuželovým paprskem . . . . .	111
B.2	Rozložení tlaku dopadající vody pro trysku s plochým paprskem . . . . .	111



## SEZNAM TABULEK

5.1	Parametry $Ra$ a $Rz$ pro zkoumané povrchy . . . . .	37
5.2	Parametry měření – sprchové chlazení . . . . .	38
5.3	Porovnání modelů pro predikci kritické hustoty tepelného toku . . . . .	45
5.4	Parametry měření – laminární chlazení . . . . .	51
6.1	Provedené numerické simulace. . . . .	57
6.2	Provedené experimenty pro studium zbytkové vodní vrstvy . . . . .	59
6.3	Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	60
6.4	Parametry pro určení hustoty tepelného toku pro přirozenou konvekci . . . . .	67
6.5	Parametry pro určení kritické hustoty tepelného toku . . . . .	67
6.6	Parametry měření; spodní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	68
6.7	Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, broušený povrch . . . . .	74
6.8	Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s plochým paprskem, zoxidovaný povrch . . . . .	78
A.1	Koeficienty z nelineární regrese . . . . .	109



## SEZNAM PŘÍLOH

A	Koeficienty z nelineární regrese při určování chladicích oblastí	109
B	Rozložení tlaku dopadající vody trysek pro studium zbytkové vody	111



# A KOEFICIENTY Z NELINEÁRNÍ REGRESE PŘI URČOVÁNÍ CHLADICÍCH OBLASTÍ

Následující tabulka udává koeficienty  $p_1-p_6$  z rovnice (6.7) pro experimenty Exp02, Exp04 a pro simulovaný experiment Exp01.

Tab. A.1: Koeficienty z nelineární regrese

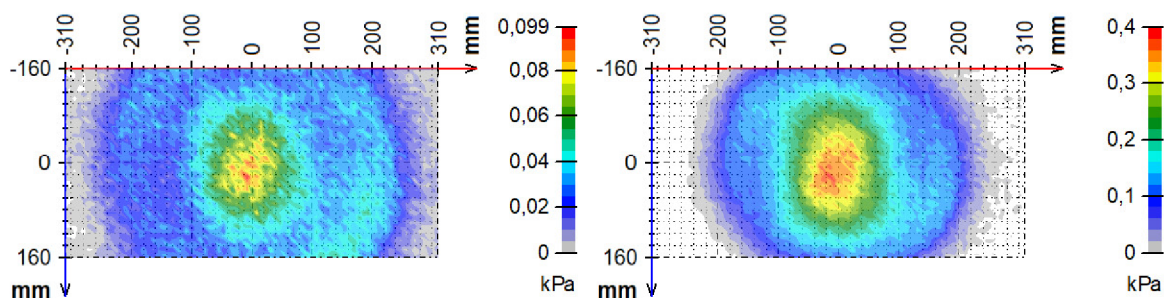
	Exp02	Exp04	Exp01 simulovaný
$p_1$ 95% interval spolehlivosti	124,4 (110,4; 138,4)	475,7 (110,4; 138,4)	458,4 (110,4; 138,4)
$p_2$ 95% interval spolehlivosti	114,3 (99,78; 128,8)	11,26 (6,481; 16,04)	-169,7 (-189,1; -150,3)
$p_3$ 95% interval spolehlivosti	7,258 (4,965; 9,551)	10,91 (9,586; 12,23)	42,87 (39,39; 46,35)
$p_4$ 95% interval spolehlivosti	0,069 28 (0,054 56; 0,083 99)	0,000 253 1 (-0,005 131; 0,005 637)	-0,2833 (-0,2984; -0,2682)
$p_5$ 95% interval spolehlivosti	0,031 34 (0,029 73; 0,032 94)	0,005 574 (0,005 119; 0,006 03)	0,031 38 (0,029 47; 0,0333)
$p_6$ 95% interval spolehlivosti	0,001 231 (0,000 836 9; 0,001 624)	0,001 398 (0,001 226; 0,001 571)	0,007 503 (0,006 872; 0,008 133)



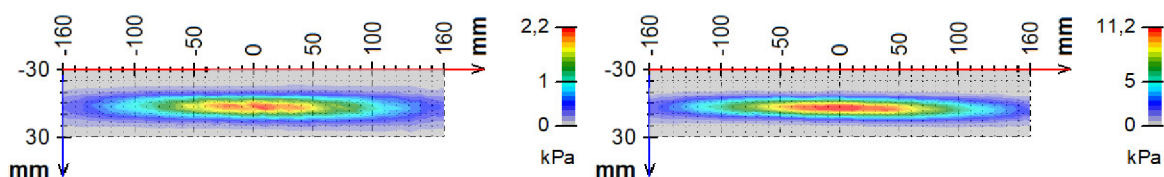


## B ROZLOŽENÍ TLAKU DOPADAJÍCÍ VODY TRYSEK PRO STUDIUM ZBYTKOVÉ VODY

Na následujících obrázcích B.1 a B.2 jsou zobrazena změřená rozložení tlaku dopadající vody pro trysky s kuželovým a plochým paprskem. Tyto trysky byly použity pro chlazení během experimentů pro studium zbytkové vody. Vzdálenost trysky od povrchu byla 500 mm v případě trysky s kuželovým paprskem a 250 mm v případě trysky s plochým paprskem.



Obr. B.1: Rozložení tlaku dopadající vody pro trysku s kuželovým paprskem; vlevo pro tlak vody 0,25 MPa, vpravo pro tlak vody 1 MPa



Obr. B.2: Rozložení tlaku dopadající vody pro trysku s plochým paprskem; vlevo pro tlak vody 0,25 MPa, vpravo pro tlak vody 1 MPa