



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

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ONDŘEJ RESL

VEDOUCÍ PRÁCE

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

OBSAH

Úvod	4
1 Přenos tepla během tepelného zpracování oceli	5
1.1 Vedení	5
1.2 Konvekce	5
1.3 Záření	5
1.4 Var	6
2 Válcování za tepla	7
2.1 Chlazení	7
3 Faktory ovlivňující chlazení při tepelném zpracování oceli	8
4 Popis provedených laboratorních měření chlazení	9
5 Vliv kvality povrchu na chlazení	10
5.1 Stanovení drsnosti povrchu	10
5.2 Sprchové chlazení	10
5.3 Laminární chlazení	17
5.4 Shrnutí získaných výsledků	19
6 Zbytková voda	20
6.1 Úvod do problematiky	20
6.2 Experimentální měření	20
6.2.1 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch .	21
6.2.2 Spodní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch .	24
6.2.3 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, broušený povrch . .	25
6.2.4 Vrchní chlazení: tryska s plochým paprskem, zoxidovaný povrch . .	27
6.2.5 Porovnání vrchního a spodního chlazení	28
6.2.6 Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu	30
6.2.7 Porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem	31
6.3 Shrnutí získaných výsledků	32
Závěr	34
Seznam použitých zdrojů	36

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 rekrystalizace a tudíž nedochází ke zpevňování 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 ostříku 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 ostříků (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 drsností 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 ostříku 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 [5].

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 plyných látek je vedení realizováno pohybem molekul [5, 6].

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} [W m^{-2}] je hustota tepelného toku, λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti a ∇T je teplotní gradient. Fourierův zákon tedy říká, že hustota tepelného toku \dot{q} je přímo úměrná teplotnímu gradientu ∇T ve směru toku tepla, přičemž konstanta úměrnosti je součinitel tepelné vodivosti λ [5, 6].

1.2 Konvekce

Přenos tepla konvekcí je důsledkem pohybu tekutiny a skládá se ze dvou mechanismů – náhodného pohybu molekul (difúze) a objemového 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 [5].

Konvektivní přenos tepla můžeme dále dělit podle povahy proudění na přirozenou a nucenou konvekci. Bez ohledu na povahu proudění lze přenos tepla konvekcí popsat vztahem:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_\infty), \quad (1.2)$$

kde α [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla, T_s je povrchová teplota tělesa a T_∞ je teplota proudící tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu. Tento vztah je znám jako Newtonův ochlazovací zákon a určení součinitele přestupu tepla α je v mnoha odvětvích stěžejním úkolem [5, 6].

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. Nejvyšší energii emituje tzv. černé

těleso (ideální zářič), které pohlcuje veškerou dopadající energii a energie emitovaná tímto tělesem se řídí Stefan–Boltzmannovým zákonem. Pro reálná tělesa platí vztah:

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4, \quad (1.3)$$

kde E [W m^{-2}] je zářivost tělesa, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ je Stefan–Boltzmannova konstanta a ε [–] je poměrná emisivita, což je poměr mezi zářivostí reálného tělesa a černého tělesa o identické teplotě. [5, 6].

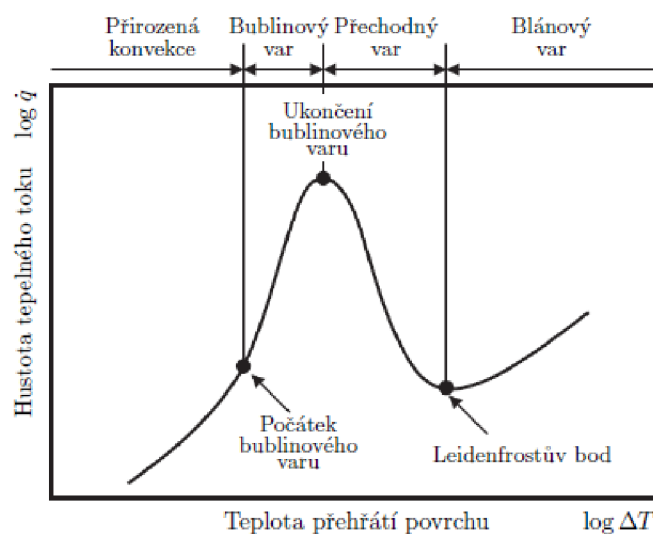
1.4 Var

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 kapalinou, a je spojen s fázovou přeměnou, díky čemuž je možné dosáhnout velkého přenosu tepla při malém teplotním rozdílu. Přenos tepla může být vyjádřen Newtonovým ochlazovacím zákonem ve tvaru:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_{sat}) = \alpha\Delta T, \quad (1.4)$$

kde T_{sat} je teplota saturace a ΔT je teplota přehřátí povrchu [5, 6, 11].

Na obrázku 1.1 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 a jako první identifikoval různé režimy varu: přirozenou konvekci, bublinový var, přechodný var a blánový var. Mezi těmito režimy se vyskytují tři důležité přechodové body: počátek bublinového varu, ukončení bublinového varu a Leidenfrostův bod. Leidenfrostův bod je spjat s minimální hustotou tepelného toku, která nastává při teplotě nazývané Leidenfrostova teplota. Z hlediska chlazení jde o důležitý bod, protože v jeho okolí se intenzita chlazení značně mění. Maximální (kritická) hustota tepelného toku nastává při ukončení bublinového varu. [5, 6, 11].

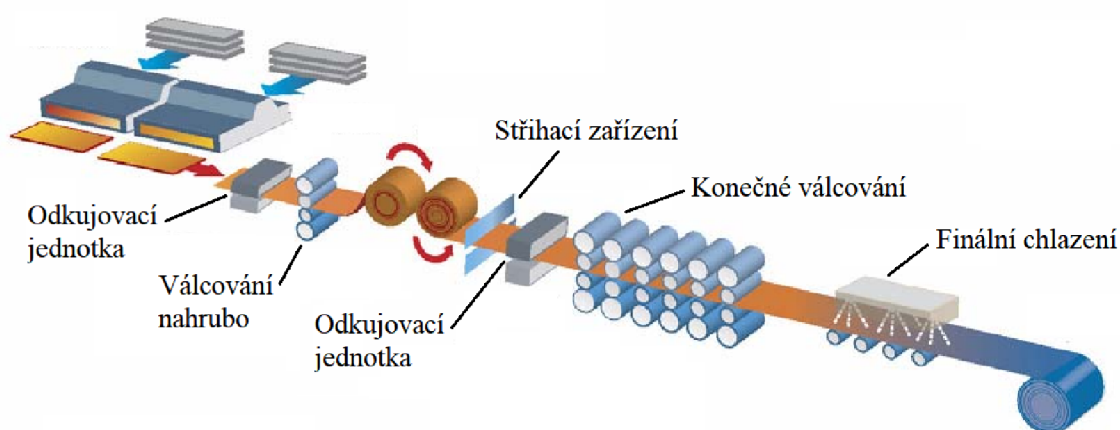


Obr. 1.1: Nukiyamiho křivka varu [8]

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) [9].



Obr. 2.1: Válcování za tepla [9]

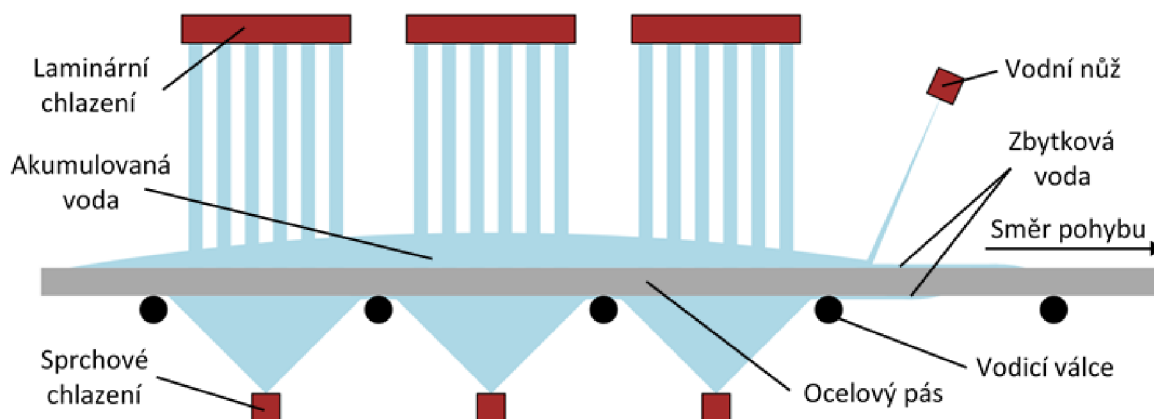
2.1 Chlazení

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 zespodu ocelového pásu. Dosáhnout vhodného nastavení chlazení je složitý proces, protože chlazení ovlivňuje mnoho faktorů. 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 [19].

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, 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 také na spodním povrchu (obrázek 3.1). Pozorována může být i v případě velmi slabého ostříku a může významně ovlivnit finální teplotu ocelových produktů.



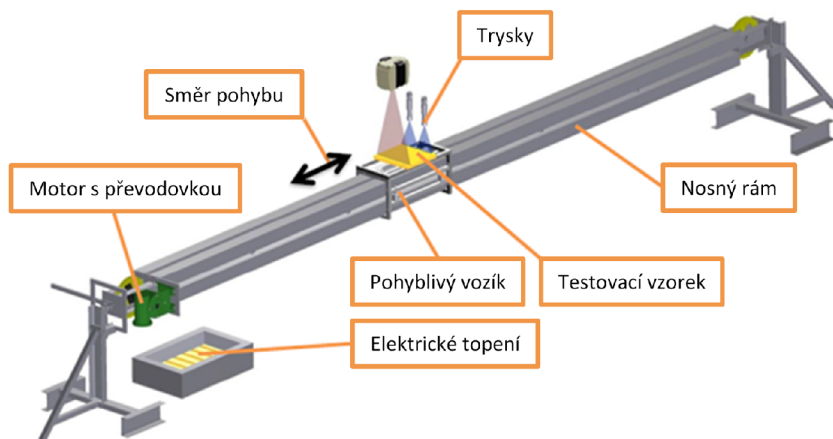
Obr. 3.1: Zbytková voda při chlazení [15]

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 [3, 16]. S rostoucí drsností povrchu dochází k nárůstu kritické hustoty tepelného toku a rovněž k posunu Leidenfrostovy teploty k vyšším hodnotám [1, 2, 7, 16].

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, která může být značně porézní, má oproti oceli mnohem menší součinitel tepelné vodivosti a chová se jako izolant, čímž ovlivňuje proces chlazení a výslednou kvalitu oceli [12, 13]. Chlazení je také ovlivňováno rozdílnou drsností povrchu před a po oxidaci [17]. Zejména tlustá vrstva oxidů má značný vliv na průběh chlazení a to hlavně v oblasti přechodového varu [18]. To je způsobeno tím, že s rostoucí tloušťkou vrstvy oxidů roste efektivní Leidenfrostova teplota (Leidenfrostova teplota na rozhraní oceli a vrstvy oxidů) [4].

4 POPIS PROVEDENÝCH LABORATORNÍCH MĚŘENÍ CHLAZENÍ

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 [15]

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. Před každým experimentem byla testovací deska připojená k pohyblivému vozíku umístěna do elektrické pece a nahřata 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.

Z naměřených průběhů teplot byly pomocí inverzní úlohy získány časově závislý součinitel přestupu tepla a časově závislá povrchová teplota. K výpočtům inverzních úloh v této práci byla využita metoda sekvenční identifikace vyvinutá Pohankou [10]. Tato metoda 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 [10].

Jelikož během celého experimentálního měření se zaznamenává poloha testovací desky, lze součinitel přestupu tepla vyjádřit v závislosti na povrchové teplotě a poloze. Vzhledem k složité interpretaci a implementaci do komerčních softwarů se však často využívá součinitel přestupu tepla v závislosti pouze na povrchové teplotě, popřípadě poloze [3].

Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě se získá zprůměrováním přes interval polohy, na kterém chceme zkoumat intenzitu chlazení. Z takto určeného součinitele přestupu tepla můžeme pomocí Newtonova ochlazovacího zákona (1.2) vypočítat hustotu tepelného toku 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. Pro experimentální studium byly použity tři testovací desky s různými druhy povrchů: s broušeným, válcovaným a zoxidovaným. 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. U každého povrchu byla provedena měření profilu drsnosti ve dvou směrech (A a B). Výškové parametry Ra a Rz jsou shrnuty v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Parametry Ra a Rz pro zkoumané povrchy

Úsek	Broušený povrch		Válcovaný povrch		Zoxidovaný povrch	
	A	B	A	B	A	B
Ra [μm]	0,636	1,146	3,201	2,821	3,296	2,931
Rz [μm]	8,665	21,216	67,998	34,790	39,539	27,335

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° a lišily se ve velikosti ústí. Kuželová tryska měla úhel rozstříku 15° . Chlazení bylo vždy realizováno třemi tryskami stejného typu, přičemž osa prostřední trysky procházela středem testovací desky. Rozteč mezi tryskami byla 200 mm. Vzdálenost od ochlazovaného povrchu byla 1900 mm (typická pro výběhový úsek na válcovací trati). Rychlost testovací desky byla vždy 5 m s^{-1} a počáteční teplota 500°C . Další parametry měření jsou uvedeny v tabulce 5.2.

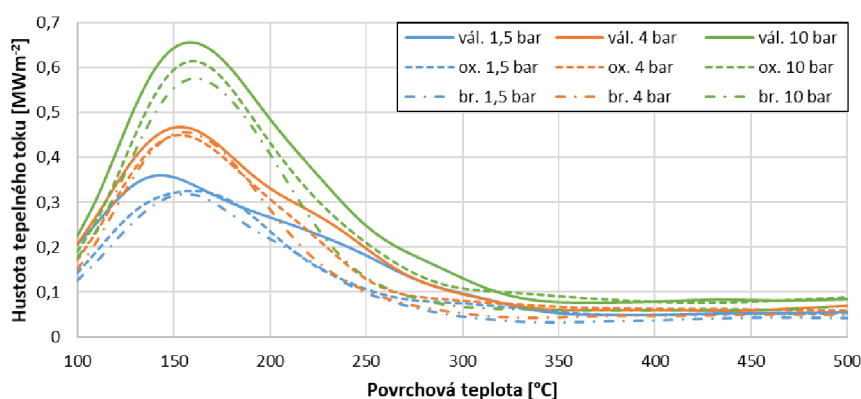
Tab. 5.2: Parametry měření – sprchové chlazení

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

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

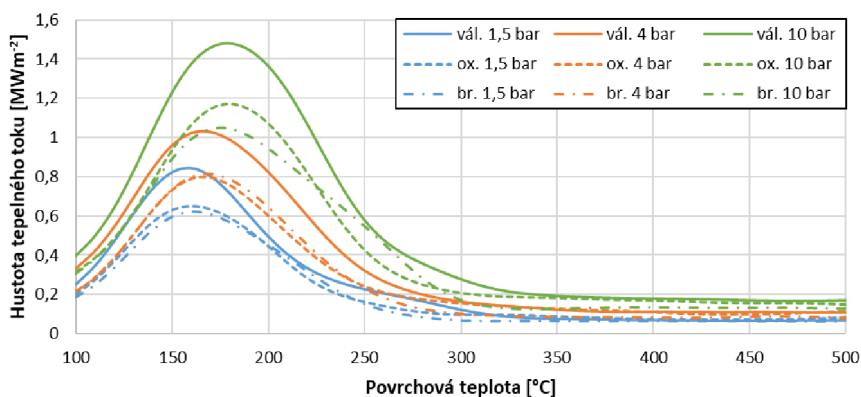
Experiment	Tryska	Tlak vody [bar]	Hustota dopadající vody [$\text{l min}^{-1} \text{m}^{-2}$]	Povrch
E08	K1551	4	32	válcovaný
E09	K1551	10	51	válcovaný
E11	P2525	1,5	10	zoxidovaný
E12	P2525	4	16	zoxidovaný
E13	P2525	10	25	zoxidovaný
E14	P2572	1,5	28	zoxidovaný
E15	P2572	4	46	zoxidovaný
E16	P2572	10	72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

Pro další analýzu je využívána hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě, která byla získána zprůměrováním přes interval polohy o délce jeden metr. Výsledky ze všech experimentů jsou pro jednotlivé druhy trysek uvedeny na obrázcích 5.1 až 5.3.

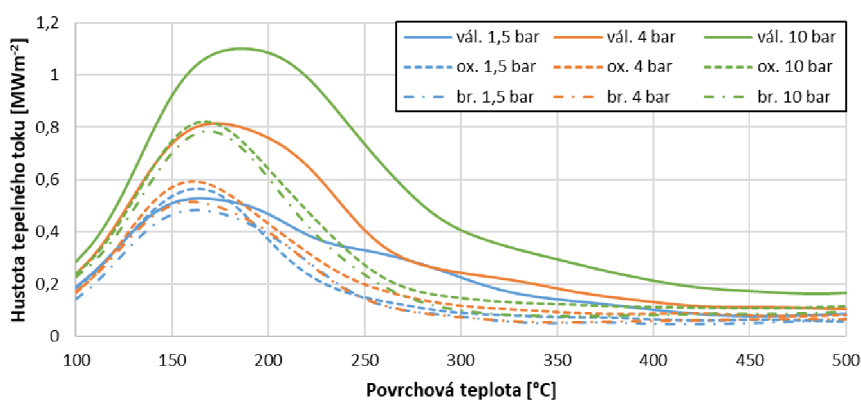


Obr. 5.1: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryška P2525

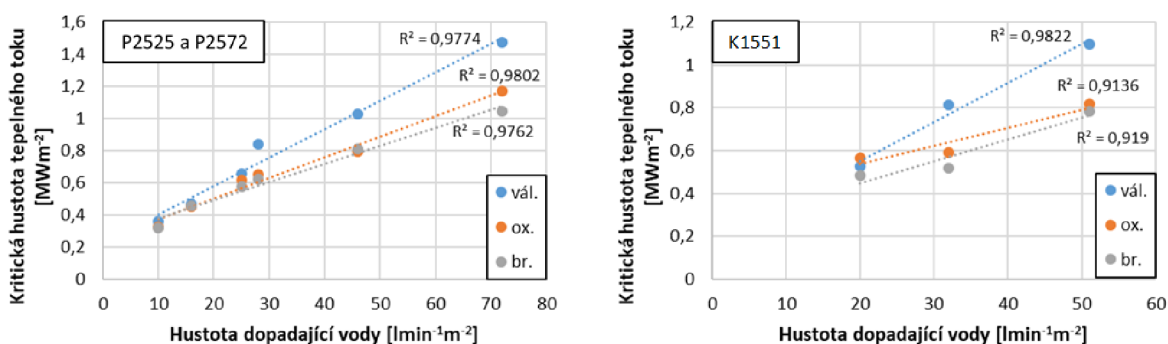
Ze závislosti hustoty tepelného toku na povrchové teplotě byly určeny kritická (maximální) a minimální hustota tepelného toku. Tyto veličiny jsou v závislosti na hustotě dopadající vody zobrazeny na obrázcích 5.4 a 5.5.



Obr. 5.2: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska P2572

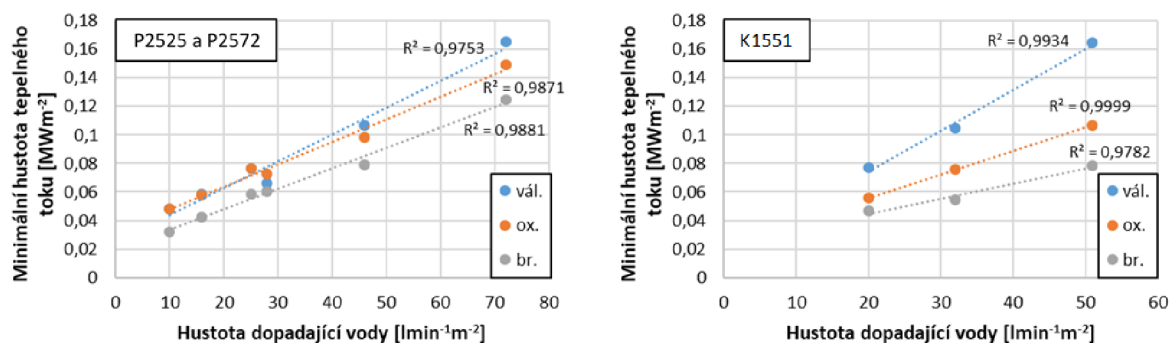


Obr. 5.3: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; tryska K1551



Obr. 5.4: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy (václ. – válcovaný, ox. – zoxidovaný, br. – broušený);

Z obrázků 5.4 a 5.5 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 prů-



Obr. 5.5: Minimální hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy

měrně 28 %. Zoxidovaný povrch rovněž vykazuje vyšší hodnoty kritické hustoty tepelného toku v porovnání s broušeným povrchem. Rozdíl však není tak značný.

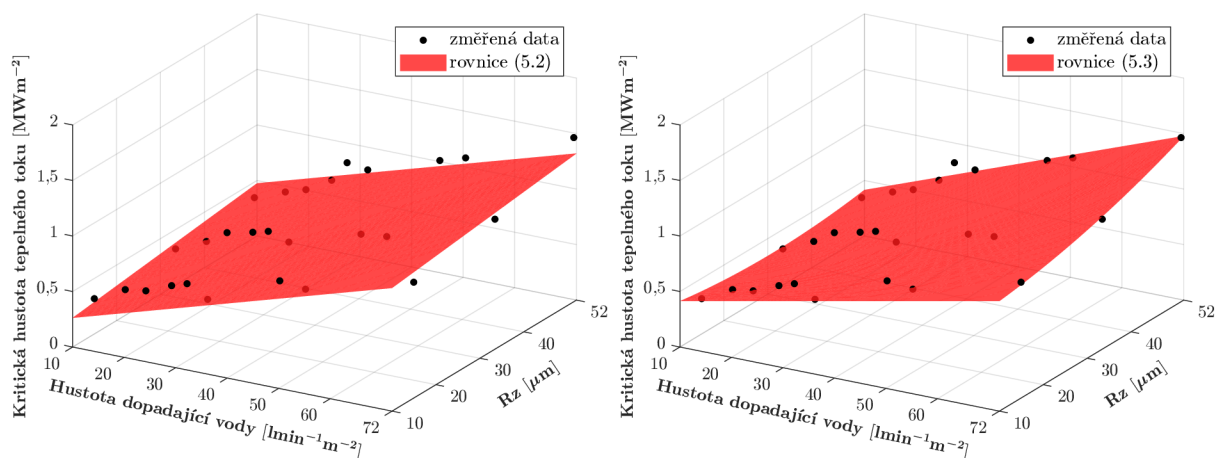
Interpretovat vliv hustoty dopadající vody společně s vlivem kvality povrchu na kritickou hustotu tepelného toku lze s pomocí parametru drsnosti Rz (tabulka 5.1). V [3] bylo experimentálně zjištěno, že kritická hustota tepelného toku lineárně roste se zvyšujícím se parametrem drsnosti Rz . Lineární vztah je i mezi kritickou hustotou tepelného toku a hustotou dopadající vody (obrázek 5.4). 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 [μm], H_v [$\text{l min}^{-1} \text{m}^{-2}$]) dostáváme rovnici ve tvaru

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

jejíž grafická interpretace je na obrázku 5.6 (vlevo).



Obr. 5.6: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na hustotě dopadající vody a drsnosti povrchu; data z experimentů E01–E29

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 5.6 (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).

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

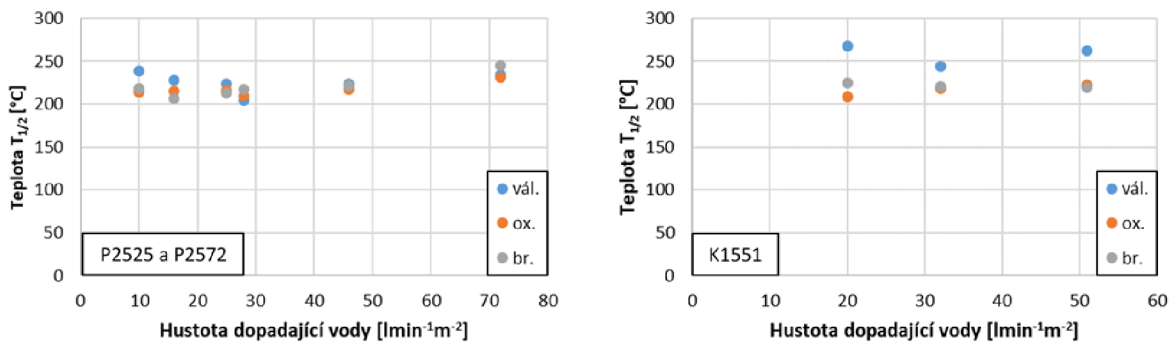
Dalším významným parametrem popisujícím chlazení je Leidenfrostova teplota, která je výrazně závislá na parametrech chlazení a vlastnostech ochlazovaného povrchu, mezi které patří také právě drsnost povrchu a přítomnost oxidů. Její určení však může být zejména při slabším ostříku komplikované a to z důvodu, že hustota tepelného toku v oblasti blánového varu je často téměř konstantní.

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

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

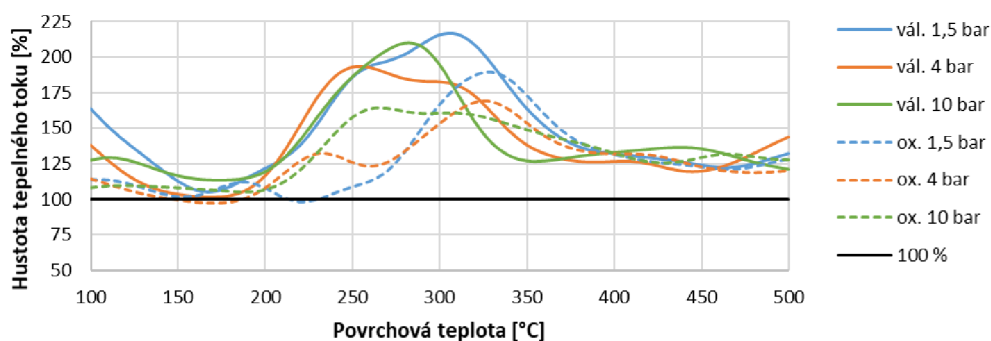
kde \dot{q}_{max} je kritická hustota tepelného toku a \dot{q}_{min} je minimální hustota tepelného toku. Teplota $T_{1/2}$ se nachází v přechodném varu a intenzita chlazení se v jejím okolí velmi rychle mění. Pro teploty nad hodnotou $T_{1/2}$ je chlazení mírné a naopak při teplotách pod hodnotou $T_{1/2}$ intenzivní. Jde tedy o důležitý bod z hlediska regulace chlazení.

Vypočtené hodnoty teploty $T_{1/2}$ jsou v závislosti na hustotě dopadající vody zobrazeny na obrázku 5.7. Není pozorovatelný žádný trend s rostoucí hustotou dopadající vody. Rozdíly mezi jednotlivými povrchy jsou velmi malé.

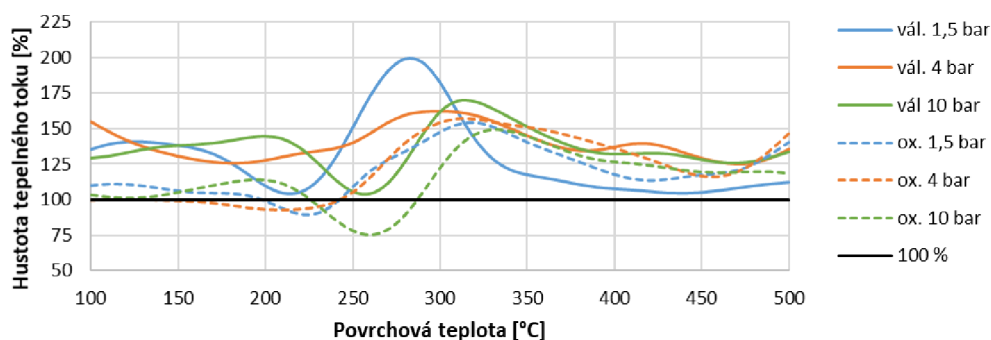


Obr. 5.7: Teplota $T_{1/2}$ v závislosti na hustotě dopadající vody pro různé povrchy

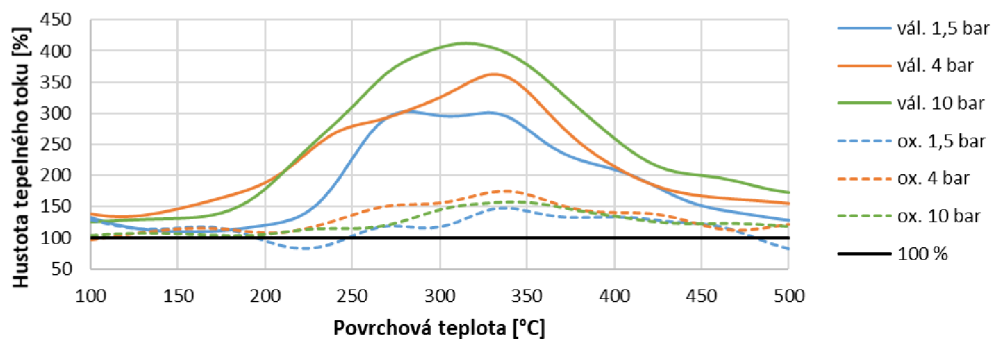
Pro stanovení vlivu drsnosti povrchu a přítomnosti oxidů na povrchu během celého procesu chlazení bylo využito procentuální porovnání hustoty tepelného toku. Jako 100 % byly zvoleny hodnoty pro broušený povrch. Výsledky pro jednotlivé trysky jsou na obrázcích 5.8 až 5.10. Z těchto obrázků je patrný rozdíl v chlazení na jednotlivých površích a pro jednotlivé typy ostříků.



Obr. 5.8: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska P2525



Obr. 5.9: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska P2572



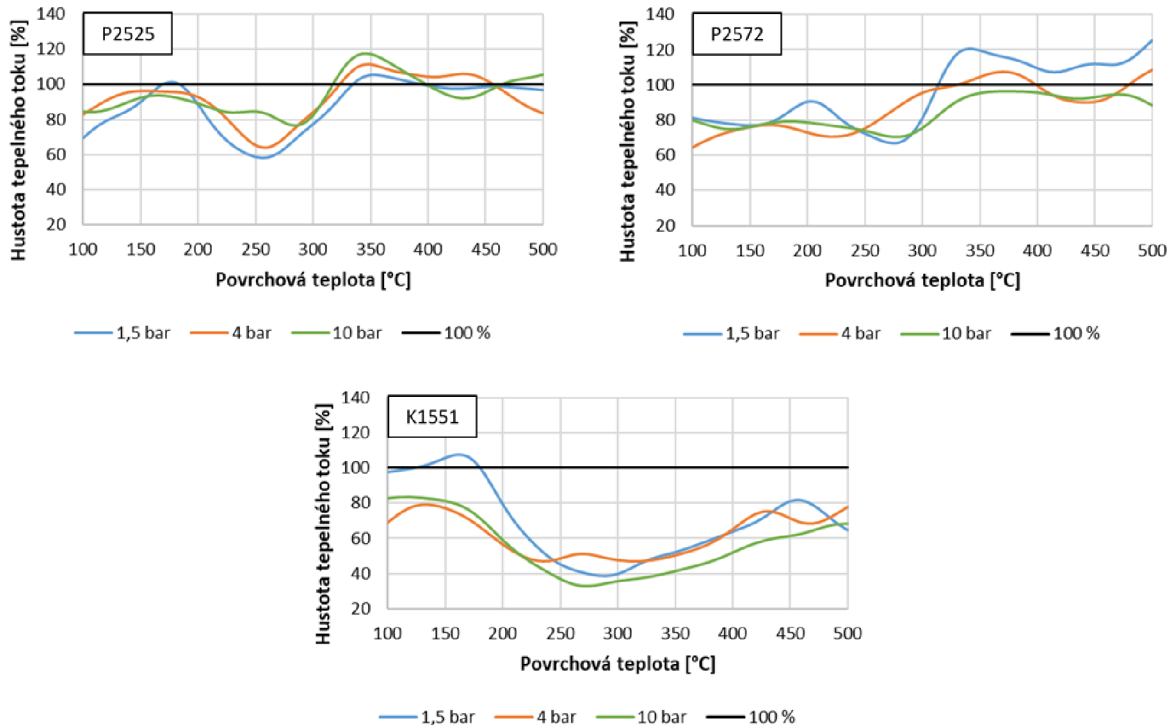
Obr. 5.10: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch; tryska K1551

Vliv drsnosti povrchu na průběh chlazení je z obrázků 5.8 až 5.10 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 5.11 tak můžeme vidět, jak přítomnost oxidů na povrchu ovlivňuje chlazení.



Obr. 5.11: 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 [1]. 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

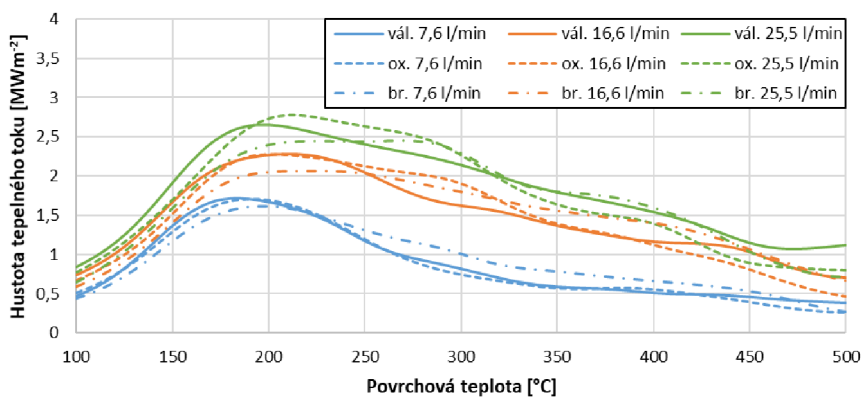
Pro laminární chlazení bylo využito 18 trysek o průměru 17 mm. Trysky byly umístěny ve dvou řadách vzdálených od sebe 360 mm a rozteč mezi tryskami byla 40 mm. Osa prostřední trysky v první řadě procházela středem testovací desky. Vzdálenost od ochlazovaného povrchu byla 1900 mm. Rychlost testovací desky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

Tab. 5.4: Parametry měření – laminární chlazení

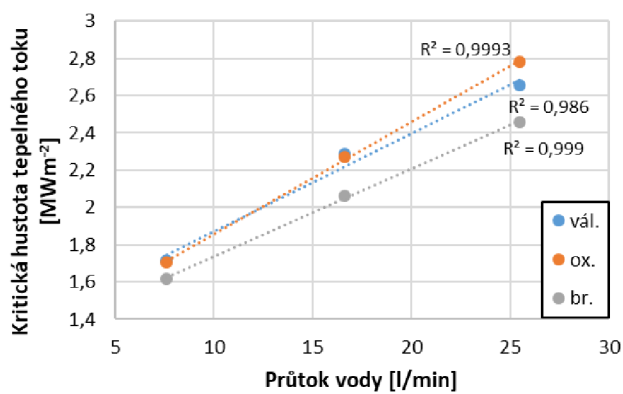
Experiment	Průtok vody na trysku [l min^{-1}]	Hustota dopadající vody [$\text{l min}^{-1} \text{ m}^{-2}$]	Povrch
E01_L	7,6	382	válcovaný
E02_L	16,6	828	válcovaný
E03_L	25,5	1274	válcovaný
E11_L	7,6	382	zoxidovaný
E12_L	16,6	828	zoxidovaný
E13_L	25,5	1274	zoxidovaný
E21_L	7,6	382	broušený
E22_L	16,6	828	broušený
E23_L	25,5	1274	broušený

Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě byla získána zprůměrováním přes interval polohy o délce 720 mm (dvojnásobek rozteče řad). Výsledky z experimentů jsou na obrázku 5.12.

Z obrázku je patrné, že oproti sprchovému chlazení nejsou 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 5.13.

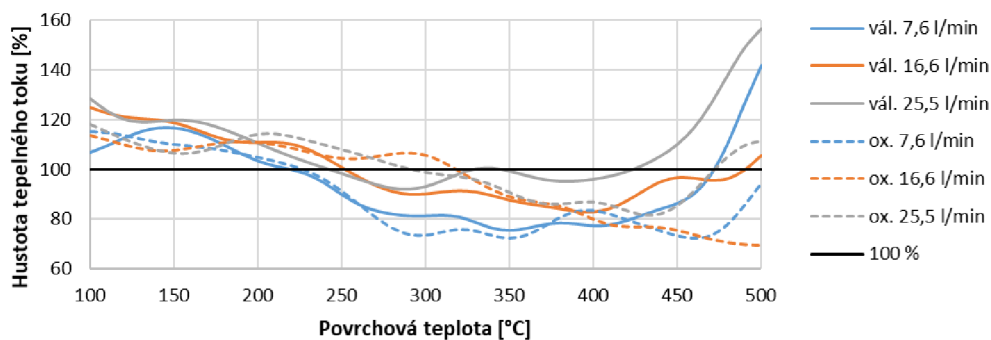


Obr. 5.12: Hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě; laminární chlazení



Obr. 5.13: Kritická hustota tepelného toku v závislosti na průtoku vody pro různé povrchy

Malé rozdíly v chlazení na různých površích jsou dobře pozorovatelné na obrázku 5.14 (procentuální porovnání hustoty tepelného toku). Hodnotu 100 % zde zastupuje broušený povrch. Válcovaný i zoxidovaný povrch vykazují trochu nižší intenzitu chlazení v oblasti blánového a přechodného varu. Naopak v oblasti bublinového varu je intenzita chlazení u válcovaného a zoxidovaného povrchu mírně vyšší oproti povrchu broušenému.



Obr. 5.14: Porovnání chlazení na různých površích; 100 % – broušený povrch

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.

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 ($R_a = 0,9 \mu\text{m}$) 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 [3]. 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 [2, 1, 7]

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.

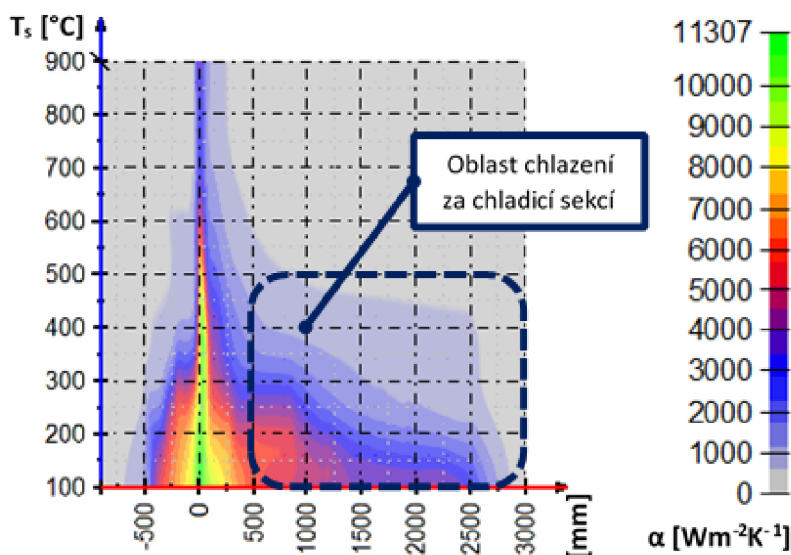
Co se týče vlivu přítomnosti oxidů na povrchu, tak v případě laminárního chlazení nebyl, stejně jako v případě vlivu drsnosti, pozorován významný vliv.

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 [3] a [18]. U trysek s plochým paprskem byla v oblasti blánového varu intenzita chlazení podobná jako u válcovaného povrchu – oba povrchy měly velmi podobné hodnoty parametru R_a 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 R_z . 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 °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 zdatelnému 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 [14]

Jak tato zbytková vodní vrstva ovlivňuje proces chlazení však není doposud známo, publikace na toto téma chybí. V rámci dizertační práce se proto numericky simuloval vliv zbytkové vodní vrstvy na finální teplotu ocelového pásu při válcování za tepla [14]. Bylo zjištěno, že vliv zbytkové vody je v případě nižších koncových teplot (pod 500 °C) značný. To potvrzují rovněž i výrobci oceli. 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 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

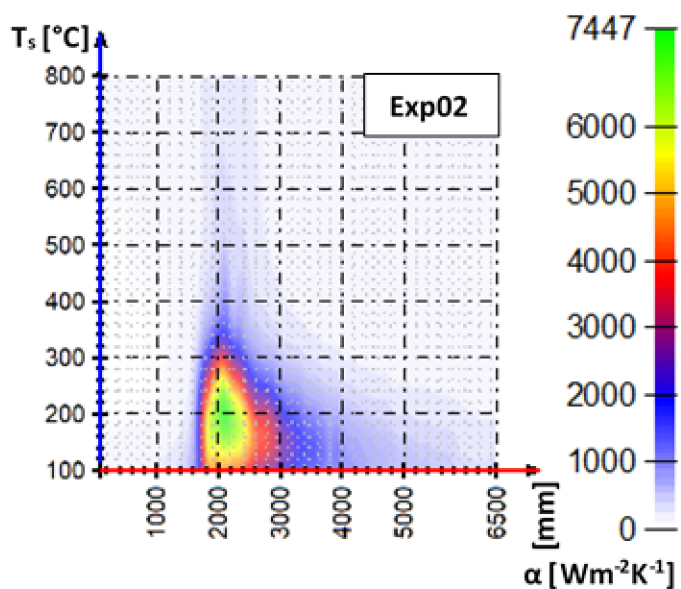
zoxidovaným povrchem. Jednotlivé parametry měření (tlak vody, počáteční teplota atd.) jsou uvedeny v následujících kapitolách pro každou skupinu.

6.2.1 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 6.1. Osa trysky procházela středem testovací desky. Závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě a poloze z experimentu Exp02 je pro ukázkou na obrázku 6.2. Poloha 1940 mm na obrázku 6.2 odpovídá pozici přímo pod tryskou. Pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data ze středu desky, tedy z oblasti, která procházela přímo pod tryskou a na kterou dopadá nejvíce vody.

Tab. 6.1: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

Experiment	Průtok vody [l s^{-1}]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [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

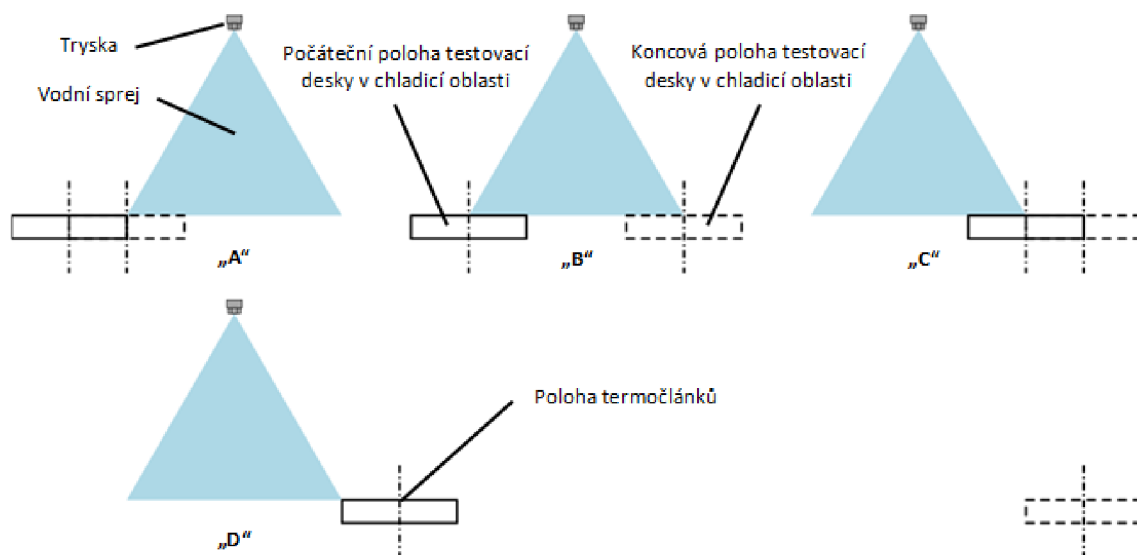


Obr. 6.2: Součinitel přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě a poloze pro experiment Exp02

Chlazení bylo zkoumáno na čtyřech chladičích oblastech, které jsou znázorněny na obrázku 6.3. První chladič 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 chladičí 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. Rozmezí polohy testovací desky závisí tedy na rychlosti, kterou se deska při měření pohybovala. Rychlosti 2 m s^{-1} odpovídá rozmezí 2370–3570 mm a rychlosti 5 m s^{-1} 2370–5370 mm.

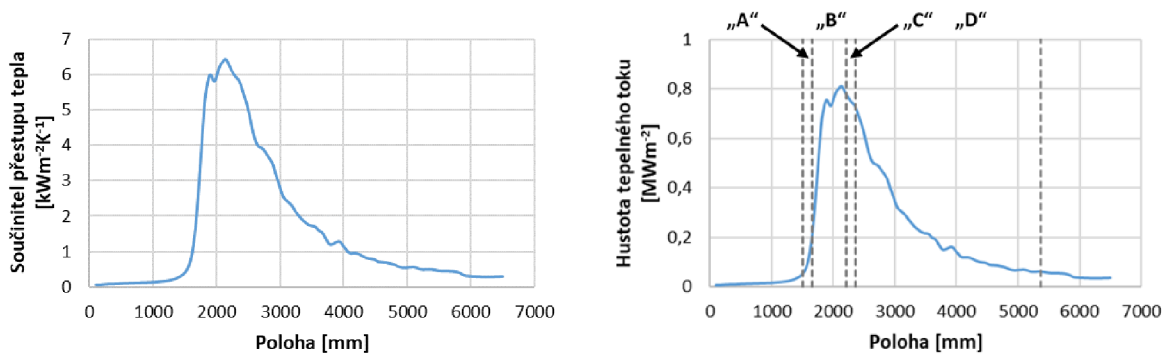
Takto stanovené oblasti chlazení jsou platné pro všechny experimenty, kde byla pro chlazení použita tryska s kuželovým paprskem. V případě experimentů s tryskou s plochým paprskem se v jednotlivých oblastech liší rozmezí polohy testovací desky. Tato rozmezí jsou uvedena v příslušné kapitole 6.2.4. Princip stanovení jednotlivých oblastí však zůstává v platnosti.



Obr. 6.3: Zvolené chladičí oblasti [15]

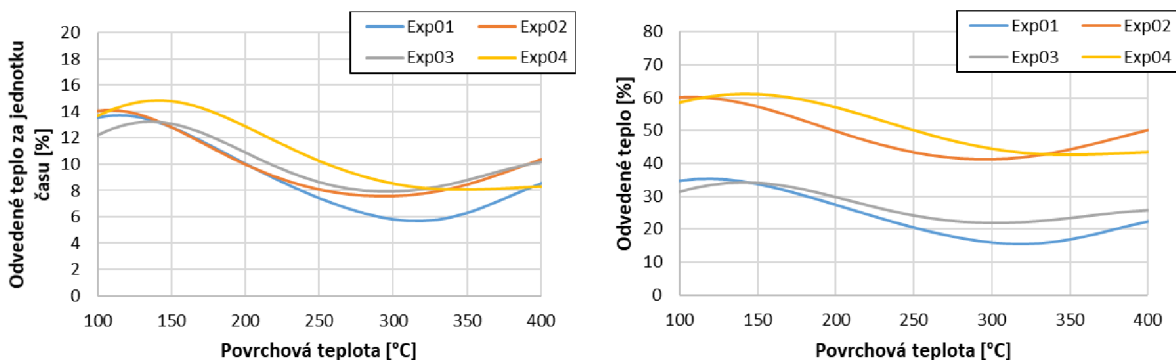
Součinitel přestupu tepla může být vyjádřen pro konkrétní povrchovou teplotu jako funkce polohy. Součinitel přestupu tepla spolu s hustotou tepelného toku pro povrchovou teplotu $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (teplota, při které je vliv zbytkové vody výrazný, viz obrázek 6.2) a experiment Exp02 jsou v závislosti na poloze zobrazeny na obrázku 6.4. Z tohoto obrázku, na kterém jsou rovněž zaznačeny chladičí 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 ostřikem. Stejně chování bylo pozorováno i v případě ostatních experimentů.

Z hustoty tepelného toku v závislosti na poloze bylo spočítáno odvedené teplo v jednotlivých chladičích oblastech („A“–„D“) pro povrchové teploty v rozmezí $100\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 6.4: Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na poloze pro povrchovou teplotu 150 °C (experiment Exp02)

Na obrázku 6.5 vlevo je pak formou procentuálního podílu odvedeného tepla za jednotku času ukázáno, jakou mírou se na odvodu tepla podílí chladicí oblast „D“.



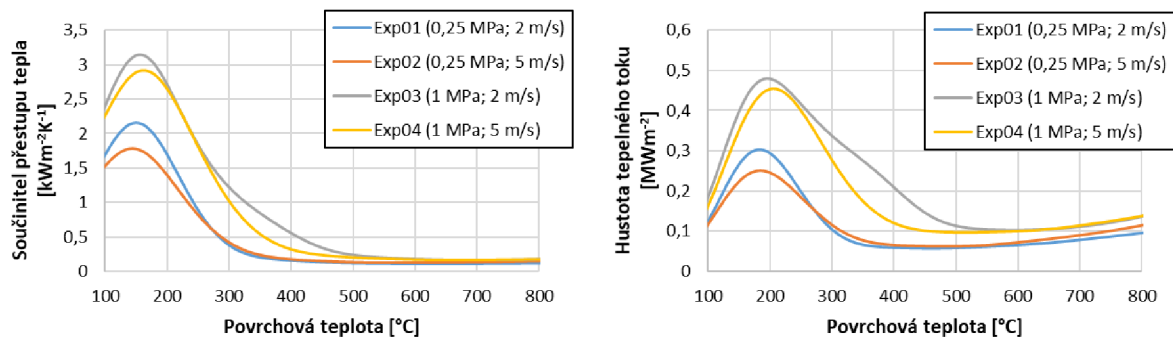
Obr. 6.5: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

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 6.5 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 °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 6.5 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⁻¹. V případě vyšší rychlosti 5 m s⁻¹ se jedná dokonce až o 60 %.

Ze zjištěných poznatků je zřejmé, že zbytková voda může významně ovlivnit chlazení. Z tohoto důvodu se věnovalo více pozornosti chladicí oblasti „D“. Na obrázku 6.6 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. 6.6: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

6.2.2 Spodní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

K měření byla použita stejná tryska s kuželovým paprskem jako v případě vrchního chlazení. Rovněž osa trysky procházela středem testovací desky a pro určení součinitele přestupu tepla byla využita data ze středu desky. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.2.

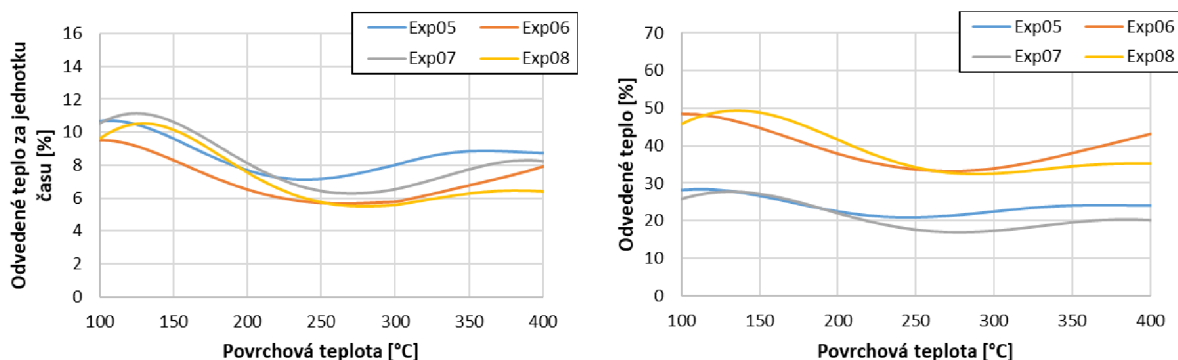
Tab. 6.2: Parametry měření; spodní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, zoxidovaný povrch

Experiment	Průtok vody [ls^{-1}]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [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

Obdobně jako v případě vrchního chlazení bylo spočítáno odvedené teplo v jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) pro povrchové teploty v rozmezí 100–800 $^{\circ}\text{C}$. Na obrázku 6.7 vlevo je zobrazen procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času připadající na chladicí oblast „D“.

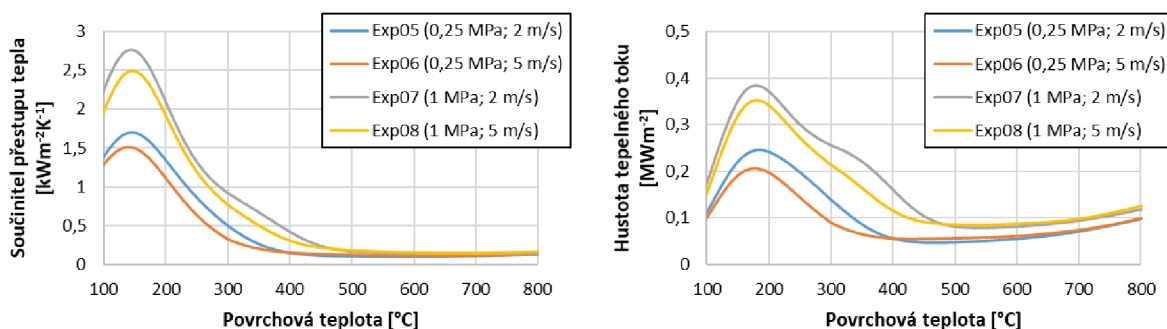
Stejně jako v případě vrchního chlazení vykazuje oblast „D“ velmi podobné chování pro všechny rychlosti i tlaky vody a to obzvláště v případě nižších povrchových teplot, kde je vliv zbytkové vody významný. Rovněž je však patrný posun maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším povrchovým teplotám při experimentech s vyšším tlakem vody (obrázek 6.7 vlevo). V případě povrchové teploty okolo 150 $^{\circ}\text{C}$ je v chladicí oblasti „D“ odvedeno přibližně 10 % tepla za jednotku času.

Budeme-li uvažovat rozdílné délky jednotlivých chladicích 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 6.7 vpravo). Jak je patrné z obrázku, chladicí oblast „D“ je nyní pro povrchové teploty okolo 150 °C zodpovědná za více než 25 % odvedeného tepla při experimentech s rychlostí 2 m s⁻¹. V případě vyšší rychlosti 5 m s⁻¹ jde téměř o 50 %.



Obr. 6.7: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.8. Na obrázku můžeme pozorovat, že s rostoucím tlakem vody roste hustota tepelného toku. Rovněž je patrné, že v případě experimentů s nižší rychlostí (2 m s⁻¹) začíná intenzivnější chlazení při vyšších povrchových teplotách oproti experimentům s vyšší rychlostí (5 m s⁻¹). Při nižší rychlosti také dosahuje maximální hustota tepelného toku větších hodnot.



Obr. 6.8: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

6.2.3 Vrchní chlazení: tryska s kuželovým paprskem, broušený povrch

K měření byla použita stejná tryska s kuželovým paprskem jako v předchozích případech. Osa trysky procházela středem testovací desky a k určení součinitele přestupu tepla byla

využita data ze středu desky. Počáteční teplota byla oproti předchozím případům nižší (600 °C) z důvodu zamezení oxidace a zachování kvality povrchu. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.3.

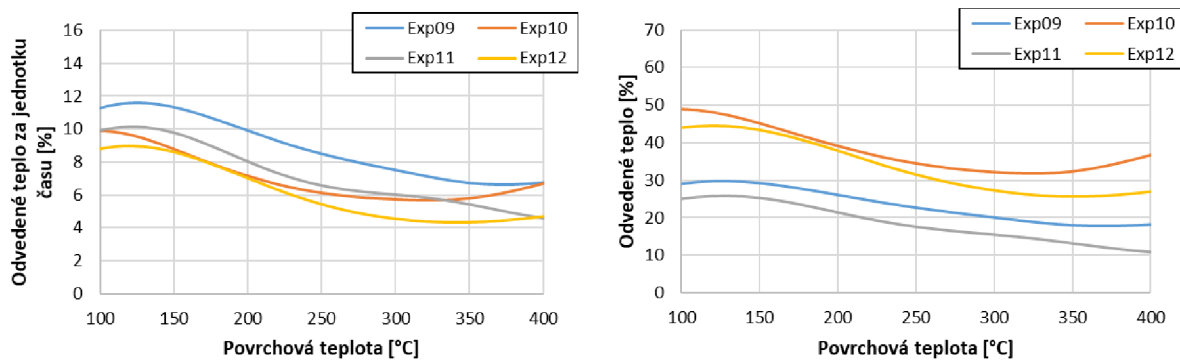
Tab. 6.3: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s kuželovým paprskem, broušený povrch

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

V jednotlivých chladicích oblastech („A“–„D“) bylo spočítáno odvedené teplo pro povrchové teploty v rozmezí 100–600 °C. Na obrázku 6.9 vlevo je zobrazen procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času připadající na chladicí oblast „D“.

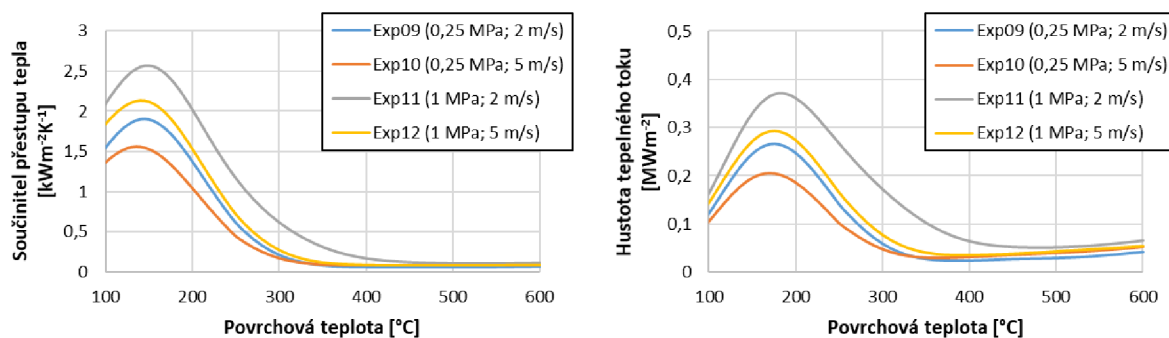
V oblasti „D“ není v případě nižších povrchových teplot patrná výrazná změna pro různé rychlosti a tlaky vody (obrázek 6.9 vlevo). V případě povrchové teploty okolo 150 °C je v chladicí oblasti „D“ odvedeno přibližně 10 % tepla za jednotku času. Posun maxima odvedeného tepla za jednotku času k vyšším 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^{-1} . V případě experimentů s vyšší rychlostí 5 m s^{-1} je odvedeno okolo 45 % tepla (obrázek 6.9 vpravo).



Obr. 6.9: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.10. 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. 6.10: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

6.2.4 Vrchní chlazení: tryska s plochým paprskem, zoxidovaný povrch

K měření byla použita tryska s plochým paprskem s úhlem rozstříku 90°. Osa trysky procházela středem testovací desky a k určení součinitele přestupu tepla byla využita data ze středu desky. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tab. 6.4: Parametry měření; vrchní chlazení s tryskou s plochým paprskem, zoxidovaný povrch

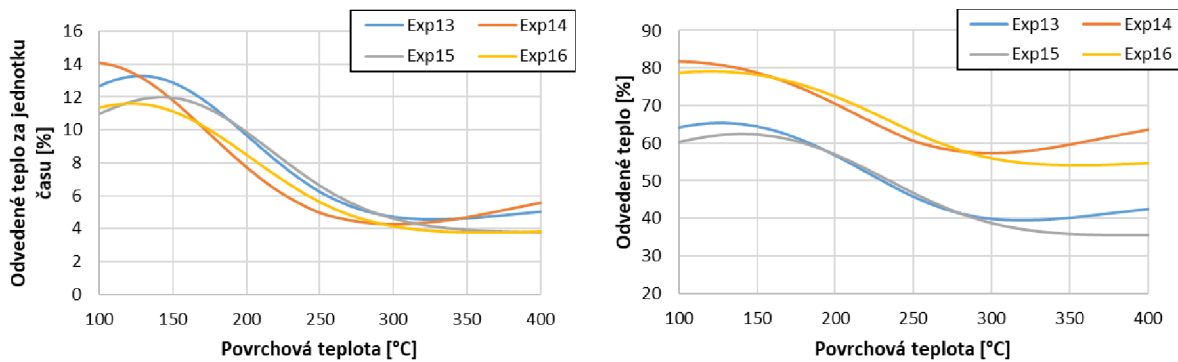
Experiment	Průtok vody [l s ⁻¹]	Tlak vody [MPa]	Rychlost desky [m s ⁻¹]	Počáteční teplota [°C]	Vzdálenost trysky [mm]
Exp13	0,46	0,25	2	820	250
Exp14	0,46	0,25	5	820	250
Exp15	0,92	1	2	820	250
Exp16	0,92	1	5	820	250

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⁻¹ a 2107–5107 mm pro rychlost 5 m s⁻¹. Na obrázku 6.11 vlevo je zobrazen procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času připadající na chladicí oblast „D“

V oblasti „D“ se v případě nižších povrchových teplot neprojevuje významná změna s rozdílnými rychlostmi ani tlaky vody (obrázek 6.11 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.

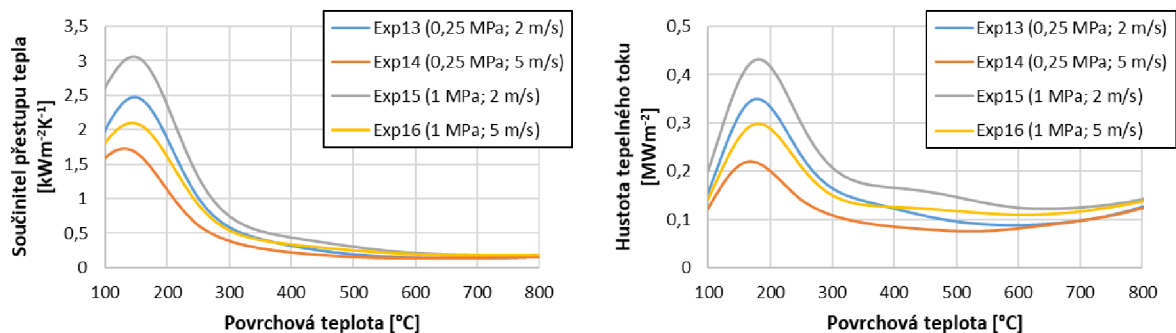
V případě, kdy odvedené teplo není vztahováno na jednotku času, je chladicí oblast „D“ při povrchové teplotě okolo 150 °C zodpovědná za více než 60 % odvedeného tepla

př experimentech s rychlostí 2 m s^{-1} . Při vyšší rychlosti (5 m s^{-1}) je v této oblasti odvedeno téměř 80 % tepla (obrázek 6.11 vpravo). Jedná se o nejvyšší hodnoty, kterých bylo dosaženo mezi všemi zkoumanými variantami chlazení.



Obr. 6.11: Procentuální podíl odvedeného tepla za jednotku času (vlevo) a odvedeného tepla (vpravo) v chladicí oblasti „D“

Součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě na oblasti „D“ jsou pro jednotlivé experimenty zobrazeny na obrázku 6.12. Z obrázku je zřejmé, že hustota tepelného toku roste s rostoucím tlakem vody. Také můžeme pozorovat, že v případě pomalejší rychlosti začíná intenzivnější chlazení při vyšších povrchových teplotách a maximální hustota tepelného toku dosahuje vyšších hodnot. Toto chování je totožné s předchozími měřeními.

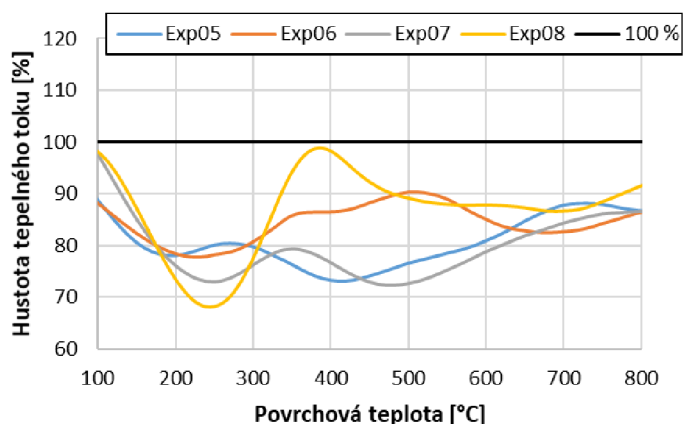


Obr. 6.12: Průměrný součinitel přestupu tepla (vlevo) a průměrná hustota tepelného toku (vpravo) z celé oblasti „D“ v závislosti na povrchové teplotě

6.2.5 Porovnání vrchního a spodního chlazení

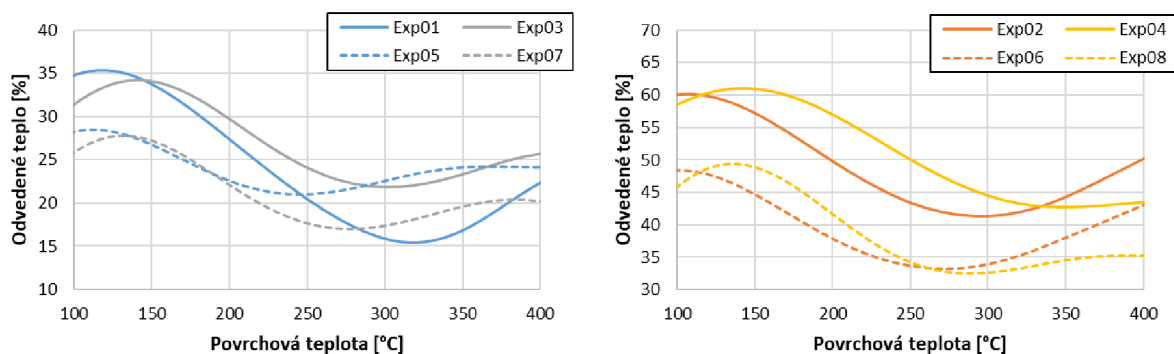
K porovnání vrchního a spodního chlazení byla využita měření s tryskou s kuželovým paprskem provedená na testovací desce se zoxidovaným povrchem. Jde o experimenty Exp01–Exp04 (vrchní chlazení) a Exp05–Exp08 (spodní chlazení). K porovnání chlazení byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.6 a 6.8). Pro lepší přehlednost bylo spodní chlazení vyjádřeno jako procentuální podíl vrchního chlazení (obrázek 6.13). Experimenty Exp01–Exp04 reprezentující

vrchní chlazení jsou tak na obrázku 6.13 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.



Obr. 6.13: 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 6.5 a 6.7. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro vrchní a spodní chlazení je na obrázku 6.14. Pozorovat můžeme, že v případě experimentů s vyšší rychlostí (obrázek 6.14 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.

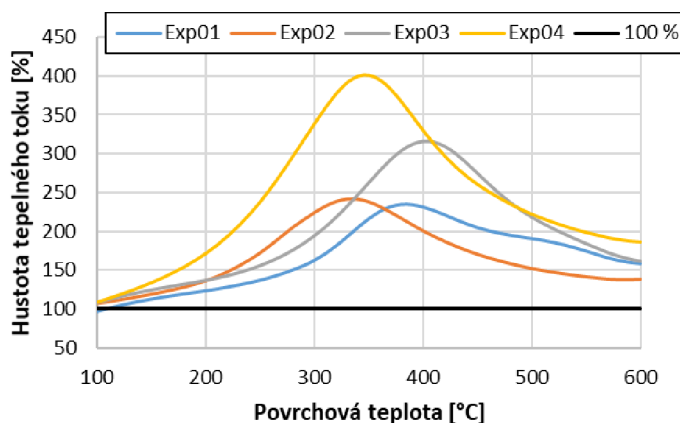


Obr. 6.14: Porovnání vrchního (experimenty Exp01–Exp04) a spodního (experimenty Exp05–Exp08) chlazení; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

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.

6.2.6 Porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu

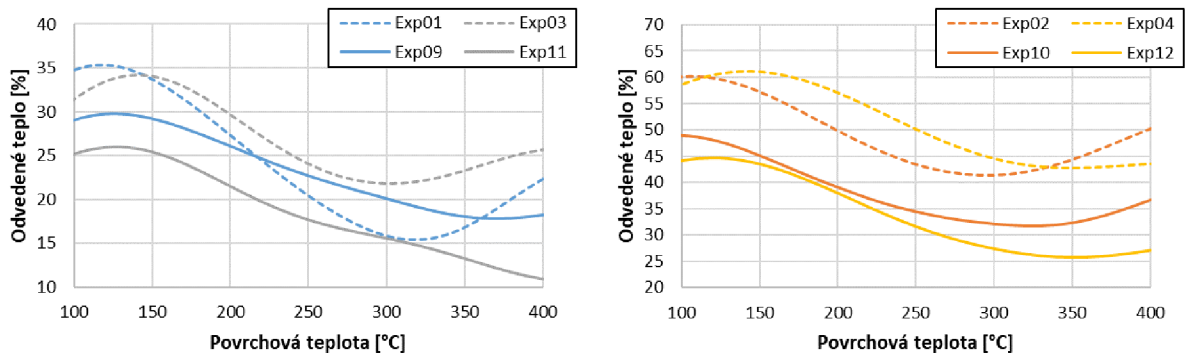
K porovnání chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu byly využity experimenty Exp09–Exp12 (broušený povrch) a Exp01–Exp04 (zoxidovaný povrch). Stejně jako v případě porovnání vrchního a spodního chlazení byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.10 a 6.6) a chlazení zoxidovaného povrchu bylo vyjádřeno jako procentuální podíl chlazení broušeného povrchu (obrázek 6.15). Černá úsečka značící 100 % na obrázku 6.15 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 a voda se tak během ostříku dostává do vzduchových pórů. Vrstva oxidů se tedy v podstatě „chová jako houba“. V oblasti za ostříkem poté dochází k vypařování nasáklé vody a k odvodu tepla. Svou roli může sehrát i vyšší drsnost zoxidovaného povrchu.



Obr. 6.15: Porovnání chlazení na broušeném (černá úsečka, experimenty Exp09–Exp12) a zoxidovaném (experimenty Exp01–Exp04) povrchu v oblasti „D“

K porovnání vlivu oblasti „D“ vůči ostatním oblastem při chlazení na různých površích byla využita data z obrázků 6.9 a 6.5. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro chlazení na broušeném a zoxidovaném povrchu je na obrázku 6.16. Z obrázku je vidět, že v případě experimentů s vyšší rychlostí (obrázek 6.16 vpravo) je ze zoxidovaného povrchu v chladicí oblasti „D“ odvedeno o cca 10 až 15 % více tepla. V případě experimentů s nižší rychlostí (obrázek 6.16 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.

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



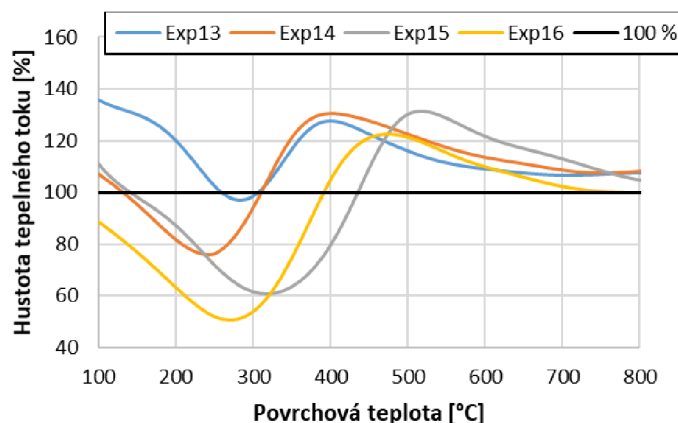
Obr. 6.16: Porovnání chlazení na broušeném (Exp09–Exp12) a zoxidovaném (Exp01–Exp04) povrchu; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

6.2.7 Porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem

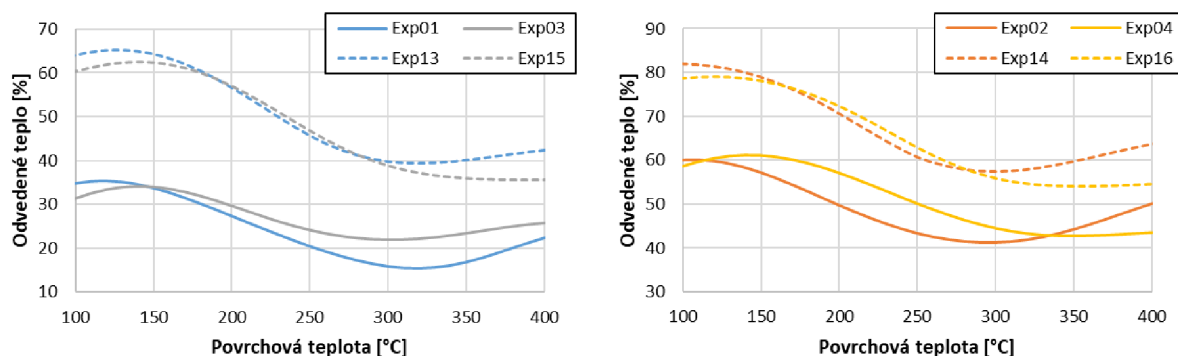
K porovnání chlazení tryskou s plochým a kuželovým paprskem byly využity experimenty Exp13–Exp16 (tryska s plochým paprskem) a Exp01–Exp04 (tryska s kuželovým paprskem). Stejně jako v předchozích porovnáních byla využita hustota tepelného toku v závislosti na povrchové teplotě v chladicí oblasti „D“ (obrázky 6.12 a 6.6). Chlazení realizované tryskou s plochým paprskem bylo vyjádřeno jako procentuální podíl chlazení využívajícího trysku s kuželovým paprskem (obrázek 6.17). Černá úsečka značící 100 % na obrázku 6.17 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 mírně odlišný průběh. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v případě experimentu Exp01 s tryskou s kuželovým paprskem došlo k nástupu intenzivního chlazení později.

K porovnání vlivu oblasti „D“ vůči ostatním oblastem při chlazení pomocí různých trysek byla využita data z obrázků 6.11 a 6.5. Procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“ pro chlazení s tryskou s plochým a kuželovým paprskem je na obrázku 6.18. Z obrázku je patrné, že jak v případě experimentů s nižší rychlostí (obrázek 6.18 vlevo), tak i při experimentech s vyšší rychlostí (obrázek 6.18 vpravo) je v chladicí oblasti „D“ více tepla odvedeno při využití trysky s plochým paprskem. 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 v důsledku úzké dopadové stopy trysky.



Obr. 6.17: Porovnání chlazení tryskou s kuželovým (černá úsečka, experimenty Exp01–Exp04) a plochým (experimenty Exp13–Exp16) paprskem v oblasti „D“



Obr. 6.18: Porovnání chlazení tryskou s kuželovým (Exp01–Exp04) a plochým (Exp13–Exp16) paprskem; procentuální podíl odvedeného tepla v chladicí oblasti „D“

6.3 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 a různé typy povrchů. Bylo prokázáno, že zbytková voda může značně ovlivnit průběh chlazení v oblasti nižších teplot. Některé závěry byly již publikovány [14, 15].

Při porovnání provedených experimentů bylo potvrzeno, že zbytková voda ovlivňuje chlazení i v případě použití spodního ostříku. 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 důsledkem úzké dopadové stopy trysky 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.

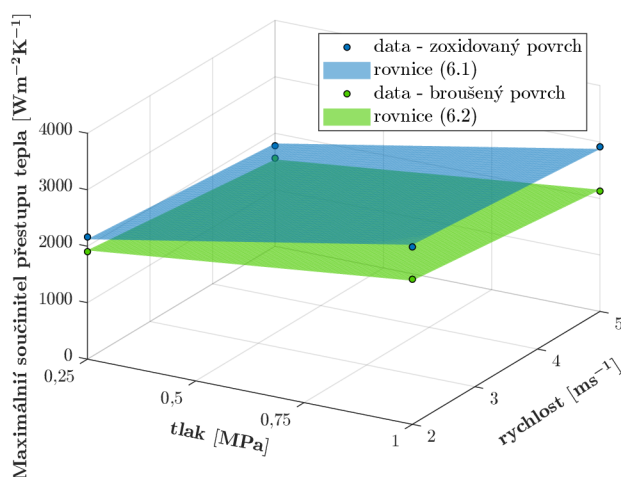
V případě odvedeného tepla za jednotku času nebyly v chladicí oblasti „D“ pozorovány rozdíly pro různé tlaky vody ani různé rychlosti pohybu testovacích desek. Pokud nebylo odvedené teplo v oblasti „D“ vztaženo na jednotku času, bylo odvedené teplo závislé na rychlosti a procentuální podíl odvedeného 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 a zoxidovaném povrchu (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 6.6 a 6.10). Maximální součinitel přestupu tepla v chladicí oblasti „D“ je zobrazen v závislosti na tlaku vody a rychlosti desky na obrázku 6.19. Spolu s ním je na obrázku 6.19 zobrazena rovněž grafická interpretace rovnic

$$y_{ox}(p, v) = 1410p - 101,7v + 1975 \approx \alpha_{max}(p, v), \quad (6.1)$$

$$y_{br}(p, v) = 824,6p - 130,6v + 1982 \approx \alpha_{max}(p, v), \quad (6.2)$$

kde α_{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 (6.1)) a broušený povrch (rovnice (6.2)) 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. 6.19: 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 (6.1) a (6.2); 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 ostříku 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°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] 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.
- [2] FUKUDA, Hiroyuki, Naoki NAKATA, Hideo KIJIMA, Takashi KUROI, Akio FUJIBAYASHI, Yasuyuki TAKATA a Sumitomo HIDAKA. Effects of Surface Conditions on Spray Cooling Characteristics. *ISIJ International*. 2016, **56**(4), 628—636.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2007. ISBN 04-714-5728-0.
- [6] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [7] LEE, Jungho, 2009. Role of Surface Roughness in Water Spray Cooling Heat Transfer of Hot Steel Plate. *ISIJ International*. **49**(12), 1920-1925.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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

- [13] 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. DOI: 10.11159/ffhmt22.125.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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>
- [17] 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>
- [18] 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.
- [19] 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. Dostupné také z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/59/1/59_ISIJINT-2018-266/_article