

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 622

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Lukáš Vavrečka

**Vliv parametrů
vysokotlakového ostříku
na kvalitu odokujení**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

Ing. Lukáš Vavrečka

**VLIV PARAMETRŮ VYSOKOTLAKÉHO OSTŘIKU
NA KVALITU ODOKUJENÍ**

**EFFECT OF HIGH PRESSURE WATER BEAM PARAMETERS ON
QUALITY OF DESCALED SURFACE**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: doc. Ing. JAROSLAV HORSKÝ, CSc.
Oponenti: Ing. MARTIN PAVLIŠKA, Ph.D.
doc. Ing. ZDENĚK TOMAN, CSc.
Datum obhajoby: 14. dubna 2011

KEYWORDS

Descaling, oxide scales, impact pressure, heat transfer coefficient, nozzle inclination angle, water pressure, finite element method, inverse task, water beam overlap

KLÍČOVÁ SLOVA

Odokujení, okuje, impaktní tlak, součinitel přestupu tepla, úhel odklonu trysky, tlak vody, metoda konečných prvků, inverzní úloha, překryv vodních paprsků

ULOŽENÍ PRÁCE

Práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně.

1. ÚVOD	5
2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
3. POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ	7
3.1 Experimentální měření součinitele přestupu tepla	7
3.2 Experimentální měření impaktního tlaku	9
3.3 Hydraulické odokujení a kvalita výsledných povrchů	9
4. MĚŘENÍ PARAMETRŮ OSTŘIKU A SIMULACE ODOKUJENÍ	11
4.1 Vliv rychlosti na výslednou kvalitu povrchu	12
4.2 Vliv odklonu trysky od kolmice na kvalitu povrchu	13
4.3 Vliv impaktního tlaku v závislosti na množství dopadající vody	15
4.4 Vliv překryvu na velikost HTC	19
5. VÝPOČTOVÁ ČÁST	20
6. ZÁVĚR	24
LITERATURA	26
ABSTRAKT	27
ABSTRACT	27
ŽIVOTOPIS	29

1. ÚVOD

Ocel je v současné době páteřním materiálem moderního světa pro své jedinečné a nenahraditelné vlastnosti a charakteristiky a tím také ještě dlouhou dobu zůstane. Například v roce 2008 bylo na celém světě vyprodukováno 1329 miliónů tun oceli, z nichž bylo 49% zpracováno válcováním.

Nedílnou součástí válcovacího procesu oceli je hydraulické odstranění okují z horkého povrchu před samotným válcováním materiálu. Kvalita takto ošetřeného povrchu je rozhodující pro výslednou kvalitu válcovaného produktu. Hydraulické odokujení má rovněž vliv na ochlazení válcovaného produktu, a to může proces válcování značně znesnadnit.

K poznání procesu odokujení jsou používány jak experimentální metody, tak matematické modelování. V této práci bych chtěl přiblížit vlivy parametrů ostříku při odokujení na kvalitu výsledného produktu a na tepelné ztráty způsobené tímto procesem. Část této práce je rovněž věnována vývoji konečno-prvkového modelu, který zjišťuje rozložení napětí ve vrstvě okují během ostříku a tak nám napomáhá ujasnit si procesy, které ve vrstvě okují a těsně pod ní probíhají.

2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Během zpracování železných materiálů za tepla vznikají na horkých površích díky oxidaci okolní atmosférou oxidy základního materiálu - okuje. Tato oxidace litých a válcovaných povrchů a vznik okují je způsobena komplexním termochemickým pochodem – difusí železných iontů přes vakance ve vrstvě oxidů z rozhraní mezi železem a okujemi směrem k povrchu [1]. Dá se říct, že v současnosti jsou výzkumy v této oblasti zaměřeny na praktické aspekty procesu - zaručení potřebné kvality povrchu během kontinuálního lití a válcování.

Všeobecně je vznik okují považován za velice významný problém, jenž způsobuje ztrátu výnosů a hlavně snižuje kvalitu povrchu vznikem trhlin, důlků a dekarbonizací a rovněž má vliv na opotřebení pracovních válců. Jelikož se tomuto procesu okujení povrchu nedá stoprocentně zabránit, je nutné takto vzniklé okuje před dalším zpracováním základního materiálu důkladně odstranit.

Způsobů odstranění okují v kovozpracujícím průmyslu je několik. Daly by se rozdělit do několika základních skupin. Chemické způsoby odstranění jsou používány zejména při odstranění terciárních okují, vznikajících během finálního válcování a také po ukončení samotného válcovacího procesu. Nejčastěji se při této metodě používají kyseliny dusitá, fluorovodíková, nebo jejich kombinace v různých poměrech. Další velmi často používanou metodou je odstranění okují pomocí elektrického proudu, kdy je na odokujovaný povrch napojena katoda a celý předmět je ponořen do kyseliny fosforečné. Okuje je možno odstranit i mechanicky a to použitím různých kartáčů, broušením, otryskáváním a také ohýbáním. Poslední metodou, nejčastěji používanou během válcovacích procesů, je vysokotlaký ostřík vodním paprskem.

Při použití vodního paprsku existuje mnoho teorií o tom, který jeho vliv je pro odstranění okují ten důležitější, zda mechanický či tepelný. V podstatě existuje pět základních konceptů odstraňování okují.

Koncept 1 předpokládá, že síla vodního paprsku je dostatečná k rozdrčení vrstvy okují na malé částičky, které jsou pak odnášeny pryč. Tato teorie je známa také pod názvem Water-Hammer Effect a na stejném principu je například založena i technologie řezání vodním paprskem. Koncept 2 tvrdí, že mechanická síla způsobuje ohyb okují na exponované hraně. Okuje se pak díky tomuto mechanismu odlamují ve vrstvách. Koncept 3 je založen na různé teplotní roztažnosti okují a oceli. Tento rozdíl způsobuje, během dopadu vodního paprsku a následného ochlazování povrchu, vznik velkých smykových napětí. Koncept 4 předpokládá, že teplotní gradient kromě napětí způsobuje i výrazné ohýbání vrstev okují, tudíž jejich odlupování. Konceptem 5 je mechanismus tzv. parní exploze, kdy vodní kapičky s vysokou rychlostí pronikají do povrchových prasklin. Díky vysoké teplotě se zde tyto kapičky téměř okamžitě vypařují - explodují. Zvyšující se tlak má za následek smyková napětí mezi vrstvami okují vedoucí k jejich následnému rozrušení [7].



Obr. 1: Nejčastěji zmiňované koncepty odstraňování okují

Uvedené koncepty je možno opakovaně nalézt v literatuře. Výsledky měření provedených při tvorbě této práce, by měly výše uvedené koncepty potvrdit nebo vyvrátit. Jak je však zmíněno v [1], celý proces odokujení není s největší pravděpodobností závislý na jednom konceptu, ale dal by se rozložit do 4 fází:

- mechanický vliv vodního paprsku, jenž je definován impaktním tlakem (SIP – spray impact pressure); okuje jsou s povrchu odstraňovány na principu vodního dláta,
- tepelný vliv paprsku, definovaný množstvím dopadající vody (SIR – spray impingement rate); způsobuje teplotní šok na povrchu válcovaného produktu, a tedy deformaci a praskání okují, jež mají rozdílnou teplotní roztažnost než základní materiál,

- vznik vodní páry v prasklinách okují a její expanze, způsobující další praskání okují,
- opláchnutí uvolněných okují z povrchu válcovaného materiálu.

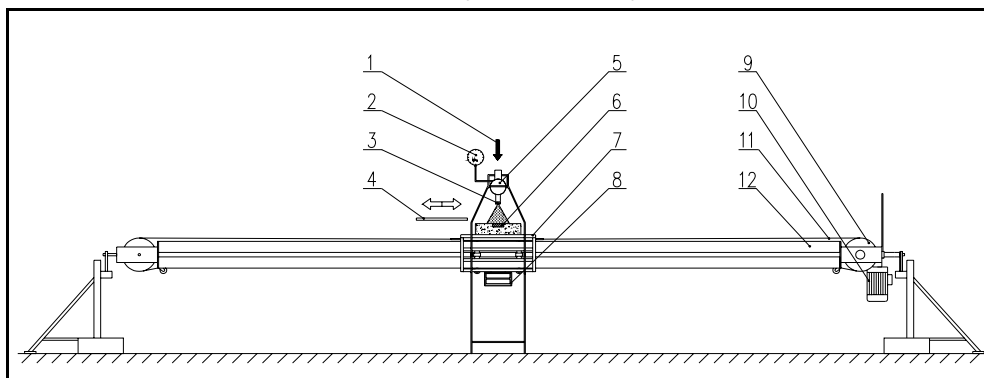
V našem případě je však tepelný vliv paprsku definován pomocí součinitele přestupu tepla – HTC (Heat transfer coefficient), jež jasněji popisuje vliv paprsku na průběh naměřených teplot a je použitelný jako okrajová podmínka matematických simulací.

3. POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

Pro získání potřebných okrajových podmínek do matematických simulací – součinitele přestupu tepla a průběh impaktního tlaku a hlavně simulaci samotného procesu odokujení byla v Laboratoři přenosu tepla a proudění, dále jen LPTP, zkonstruována speciální zařízení. Celkem byla zkonstruována dvě zařízení. Prvním je lineární stand, jenž slouží k měření součinitele přestupu tepla a simulaci samotného odokujovacího procesu. Druhým je zařízení pro měření impaktního tlaku. Jejich popis a funkce jsou obsaženy v následujících kapitolách.

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA

Pro měření součinitele přestupu tepla se používá speciálně zkonstruované 6m dlouhé zařízení Obr.2. Toto zařízení je umístěno v ochranné komoře, jež zabraňuje odrazu vysokotlakého vodního paprsku do okolí. Na tomto zařízení je připevněna austenitická deska se dvěma zabudovanými senzory Obr.3 a 4.



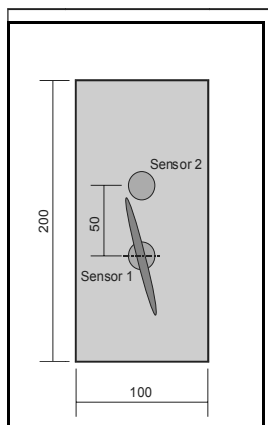
Obr.2: Schéma zkušebního zařízení 1. přívod chladicího média, 2. manometr, 3. tryska, 4. krycí lišta, 5. rozdělovací potrubí, 6. testovací deska, 7. vedení, 8. dataloger, 9. kladka, 10. elektrický motor, 11. tažné ocelové lano, 12. nosník

Průběh experimentu je následující:

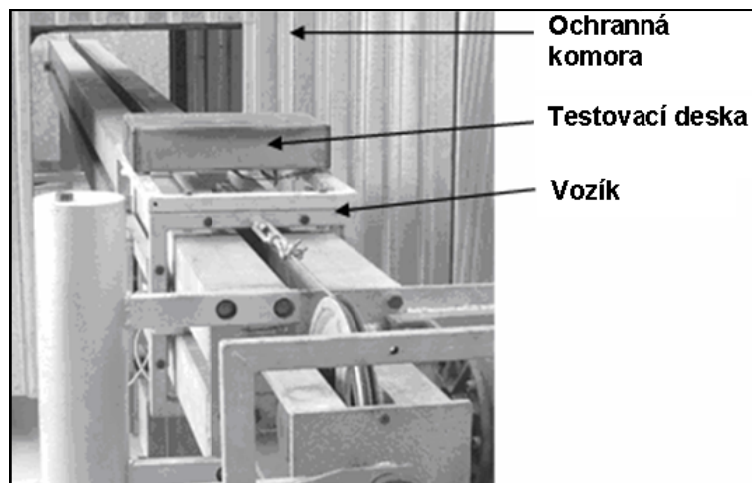
Deska se pomocí elektrické pece zahřeje na teplotu 1000°C. Jakmile deska dosáhne požadované teploty, je zapnuto plunžrové čerpadlo a v tryskách je nastaven požadovaný tlak. Po té je deska pomocí řídicího mechanismu uvedena do pohybu pod vodní tryskou, která se používá při odokujování. Během průjezdů se pomocí zabudovaných senzorů měří teplota uvnitř desky. Z obrázku 5 je viditelné, že hlavní

měřicí součástí senzoru je K-termočlánek umístěný 1 mm pod povrchem. Měřená data se ukládají do datalogeru.

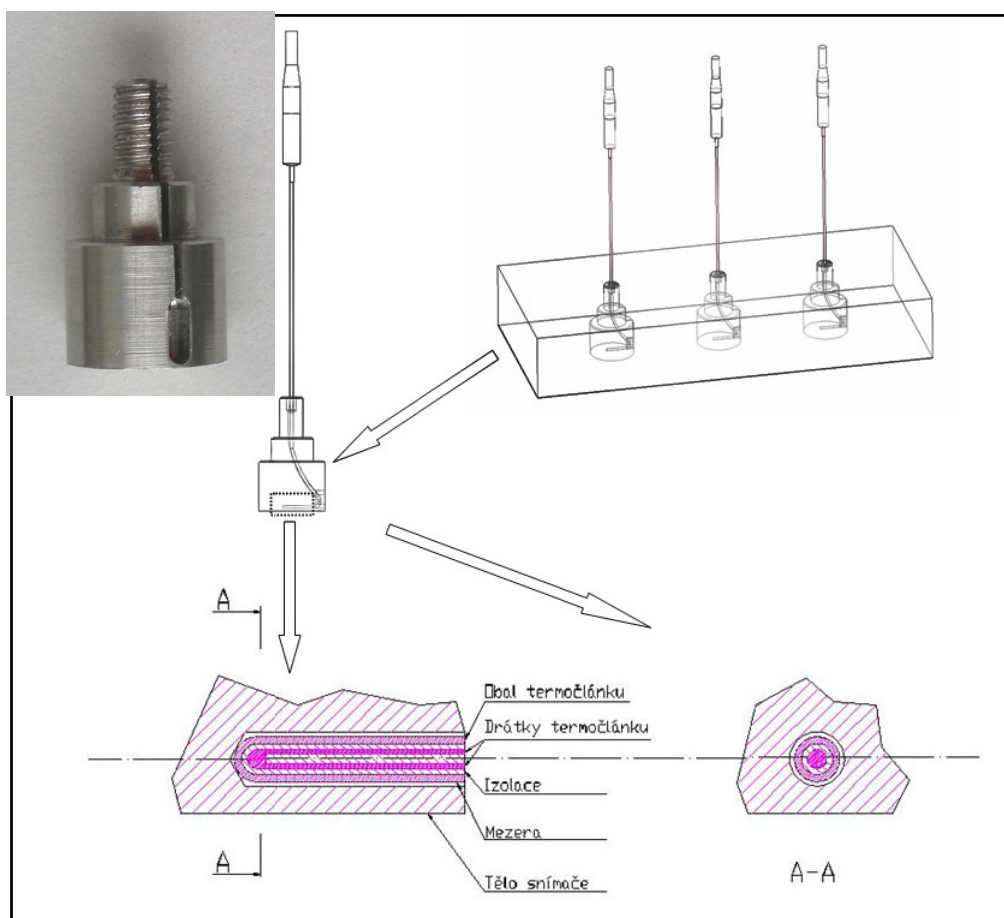
Zároveň s teplotou je také zaznamenávána poloha desky, jež následně slouží ke stanovení přesné rychlosti desky pod tryskou.



Obr. 3: Schéma měřicí desky



Obr. 4: Detail zkušebního zařízení

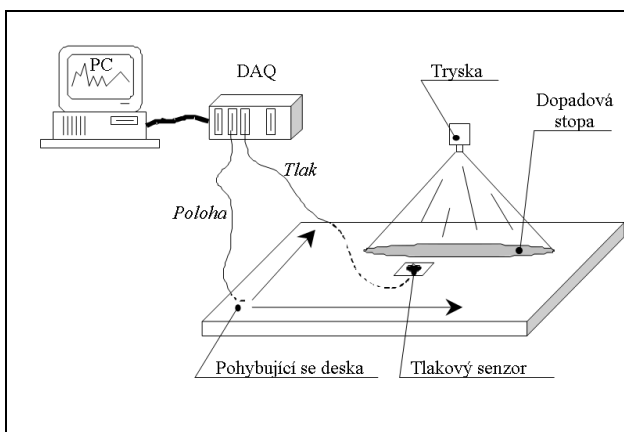


Obr.5: Schéma senzoru umístěného v testovací desce

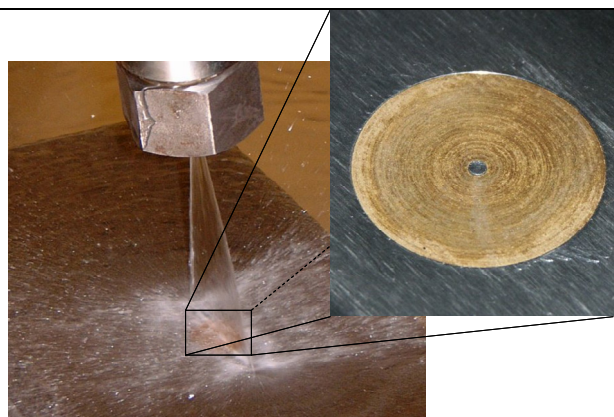
Po experimentu jsou data vyhodnocena a z naměřených průběhů teplot se pomocí inverzní úlohy [2] počítá povrchová teplota desky, tepelný tok a součinitel přestupu tepla.

3.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ IMPAKTNÍHO TLAKU

Pro měření rozložení impaktního tlaku jednotlivých trysek pro dané konfigurace tlaku a vzdálenosti bylo zkonstruováno speciální zařízení, jehož základem je tenzometrický snímač o průměru 1,5 mm, který je zabudovaný v ocelové desce. Tato deska se pomocí elektromotorů pohybuje pod stříkající tryskou ve dvou navzájem kolmých směrech. Během měření se provádí měření tlaku v uzlových bodech pravidelné sítě. Deska se senzorem najede do příslušného uzlového bodu, zastaví se, a změří tlak. Senzor setrvá v uzlovém bodě 0,7 s. Informace o změřeném tlaku a o poloze čidla jsou zaznamenány do počítače (Obr. 6 a 7).



Obr. 6: Schéma zařízení pro měření rozložení impaktního tlaku



Obr. 7: Detail tlakového senzoru – malý stříbrný kruh uprostřed mosazného kruhu

Senzor bylo nutno před měřením kalibrovat a zajistit tak dostatečnou přesnost měření. Pro tuto kalibraci bylo použito statické závaží, které působí na senzor tlakem $1,36 \text{ N/mm}^2$. Bylo provedeno sto opakovaných měření tohoto tlaku. Směrodatná odchylka při měření kalibračního závaží byla 0,3% a maximální chyba 1%.

3.3 HYDRAULICKÉ ODOKUJENÍ A KVALITA VÝSLEDNÝCH POVRCHŮ

Základem tohoto měření je stejné zařízení jako pro experimentální měření součinitele přestupu tepla, Obr. 2. Rozdíl je ale v tom, že na vozíku je umístěna ocelová deska bez senzorů, která se nechá před průjezdem pod tryskou zokujit. Pro snadný průběh experimentu je nutné, aby kvalita povrchu požitého materiálu byla co nejlepší, a tedy jeho drsnost byla menší, než tloušťka okují zbylých na povrchu po

ostříku. Proto je povrch všech experimentálních desek před jejich použitím přebroušen na stejnou drsnost. Průběh experimentu je následující.

Deska je nejprve nahřata v ochranné atmosféře, aby se zabránilo nekontrolovanému vzniku okují. Po dosažení požadované teploty je deska ponechána v peci, je odstraněna ochranná atmosféra a umožněn vznik okují. Jakmile vyprší čas okujení tak je deska umístěna na měřicí zařízení, a projede pod tryskou, Obr. 8. Maximálně do dvou sekund po průjezdu je deska přikryta krytem napojeným na zdroj dusíku, čímž se zabrání vzniku dalších okují.



Obr. 8: Průběh odstranění okují

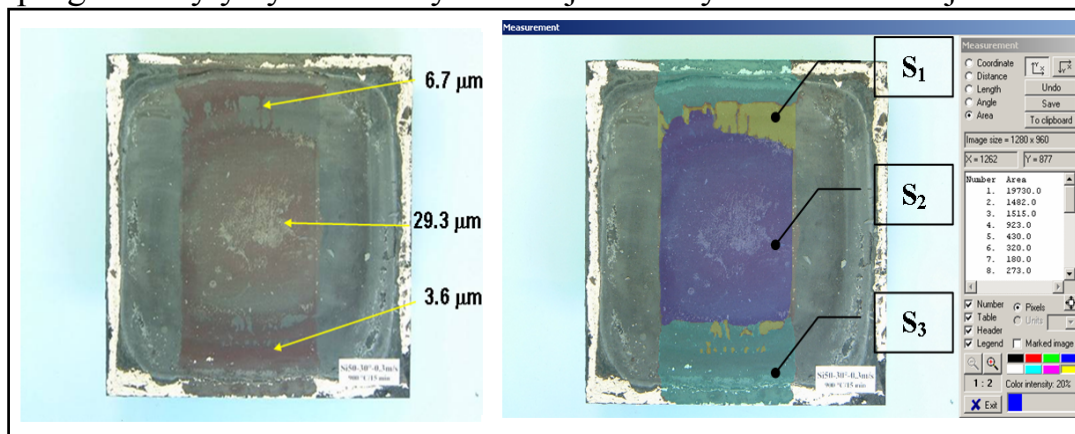
Na takto ošetřeném povrchu teď máme dvě rozdílné oblasti, stopu trysky a okolí. Pomocí elektromagnetického měřiče je na vybraných místech změřena tloušťka zbylých okují. Toto měření bylo pro několik míst verifikováno elektronovým mikroskopem.

V oblasti stopy trysky nám zůstaly vrstvy okují s několika tloušťkami, proto je lepší vyjádřit výslednou kvalitu povrchu nikoli pomocí průměrné tloušťky zbylých okují, ale procentuálně. Tedy z poměru množství okují před ostříkem a množství okují po ostříku. K tomu je použito následující rovnice:

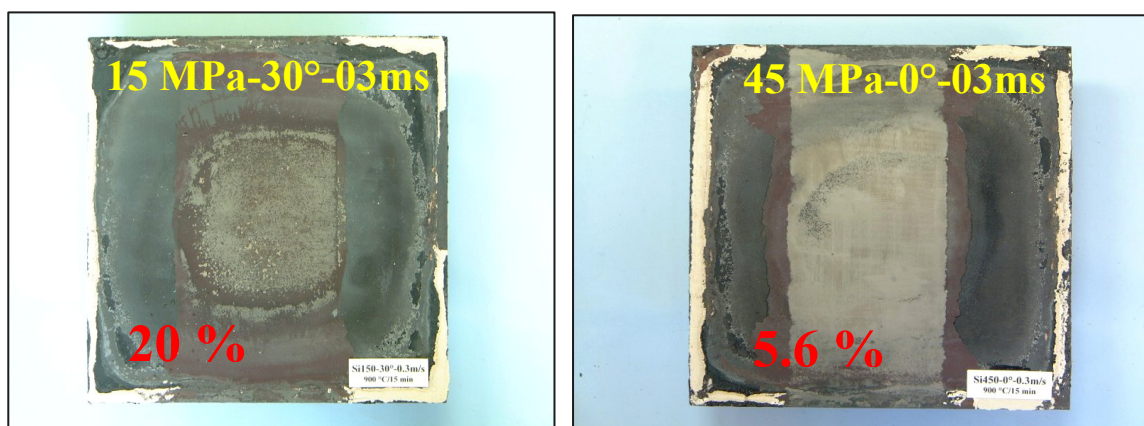
$$\left(\frac{h_1 S_1 + h_2 S_2 + \dots + h_n S_n}{h_{\max} S_{SUM}} \right) \times 100 = \% \text{ zbylých okují, kde} \quad (1)$$

- $h_1 \dots h_n$ - tloušťka okují
- h_{\max} - maximální tloušťka okují
- $S_1 \dots S_n$ - oblast okují
- S_{SUM} - celá oblast ovlivněna tryskou

Pro vyhodnocení množství zbylých okují byl vyvinut speciální software, jenž je založen na technice zpracování obrazu. Povrchy desek byly nafoceny, a pomocí tohoto programu byly vyhodnoceny oblasti jednotlivých tloušťek okují.



Obr.17: Snímky povrchů testovacích desek a jejich



Obr. 18 a 19: Výsledné povrchy po odokujení s rozdílnými parametry

4. MĚŘENÍ PARAMETRŮ OSTŘIKU A SIMULACE ODOKUJENÍ

Výsledná kvalita odokujeného povrchu závisí na několika parametrech. Nejdůležitějšími parametry jsou impaktní tlak, úhel natočení trysky od normály povrchu a rychlost posuvu desky pod tryskou. Proto bylo provedeno několik sérií experimentů, jež byly zaměřeny na zjištění vlivu těchto parametrů na výslednou kvalitu povrchu.

Experimenty zaměřené na vliv rychlosti posuvu

Experimenty zaměřené na vliv tlaku

Experimenty zaměřené na vliv úhlu odklonu trysky – inclination angle

Experimenty s různými odokujovanými materiály a délkami oxidace

Experimenty zkoumající vliv překryvu trysek

Experimenty zaměřené na vliv impaktního tlaku v závislosti na množství dopadající vody

U všech experimentů byla použita totožná tryska Lechler 694.727 mající ekvivalentní průměr 3 mm a úhel rozstříku 30°.

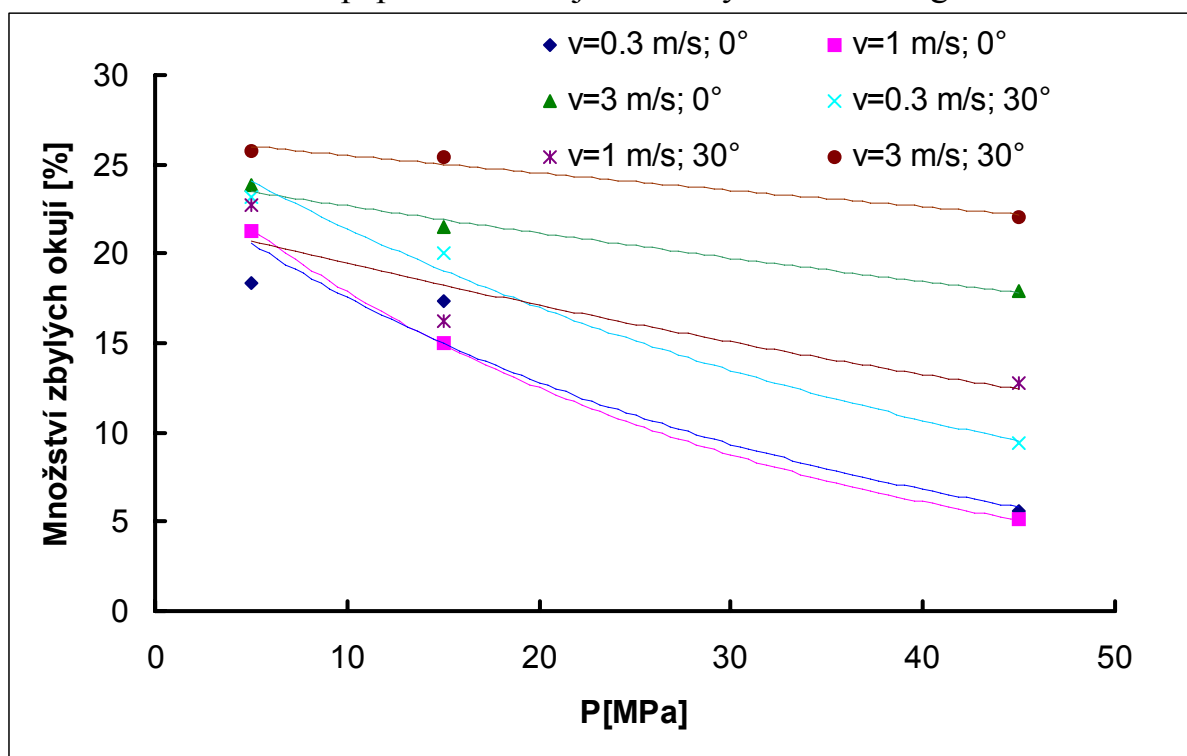
Všechny tyto experimenty byly provedeny na ocelové desce o rozměrech 250 x 250 x 25 mm s jasným chemickým složením. Ve většině případů jde o materiál se složením uvedeným v tab. 1.

Prvek:	C	Si	Mn	Cr	P	S
Obsah (%):	0,23	0,57	1,52	1,03	0,025	0,007

Tab.1: Chemické složení experimentální desky

4.1 VLIV RYCHLOSTI NA VÝSLEDNOU KVALITU POVRCHU

Z teorie nám vyplývá, že s rostoucí dobou ostříku = nižší rychlostí pohybu desky a rostoucím impaktním tlakem se zvyšuje výsledná kvalita povrchu. Na druhou stranu je ale nutné zohlednit, že přílišné ochlazení povrchu produktu nám může znesnadnit jeho další zpracování. Úkolem těchto měření je tedy zjistit, jak velký vliv má změna rychlosti posuvu produktu na výslednou kvalitu povrchu. Pro naše experimenty byly použity rychlosti 0,3 ; 1 a 3 m/s, jež odpovídají rychlostem používaným v praxi. Dalšími parametry experimentu jsou tlak a úhel odklonu. Hodnoty tlaku byly 5, 15 a 45 MPa. Úhlu odklonu je věnována samostatná kapitola, přesto byly experimenty v této sadě měření provedeny nejen kolmo na povrch desky, 0°, ale také pro odklon 30° proti směru pohybu desky. Úhel 30° je poměrně málo používaný a takto ostříkávaný povrch je před samotným průjezdem pod tryskou ochlazen vodou, kterou proud tlačí před sebou a zároveň na povrch nepůsobí mechanická síla vodního paprsku. Tento jev se nazývá subcooling.

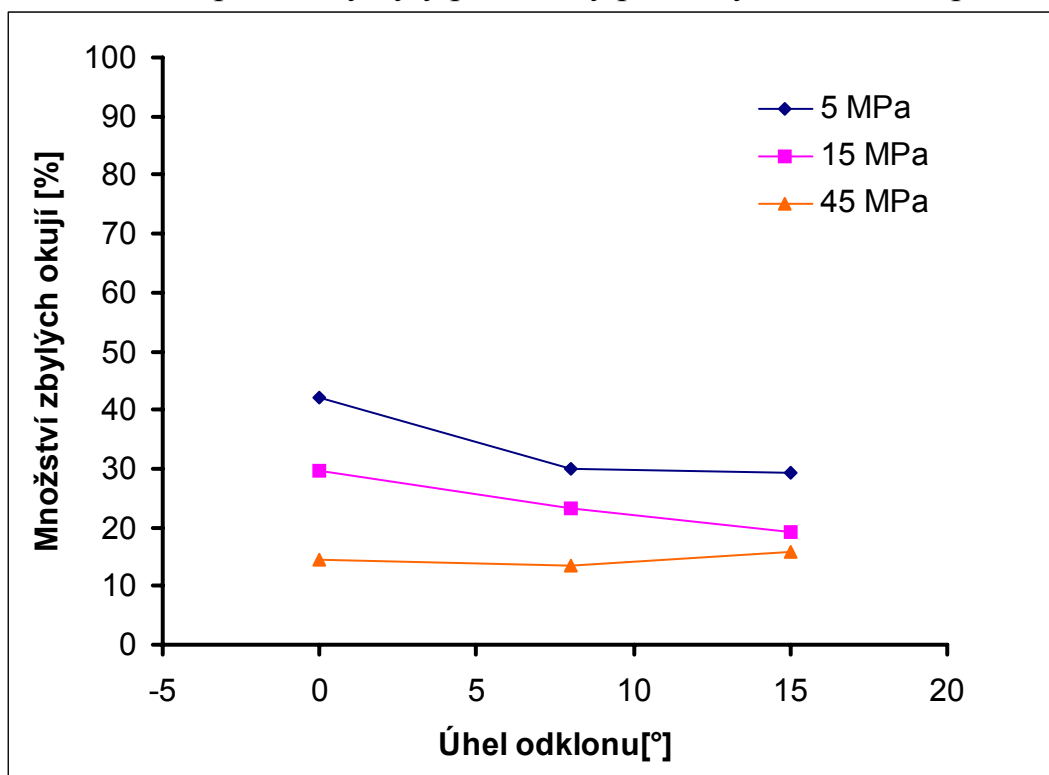


Obr. 20: Závislost kvality povrchu na rychlosti a tlaku – úhel odklonu trysky 0° a 30°

Jak je vidět z Obr. 20, tak oba úhly odklonu mají stejný trend – s rostoucím tlakem se snižuje množství zbylých okují a rozdíly kvality povrchů s rychlostí posuvu desky 0,3 a 1 m/s jsou zanedbatelné. Avšak pro rychlost 3 m/s se kvalita povrchu výrazně zhoršila, zvýšilo se množství zbylých okují. To je způsobeno nedostatečným tepelným zatížením povrchu okují, který se nedostatečně rozruší, a tudíž další odstranění okují je znesnadněno. To platí pro oba inklinací úhly. Při rychlosti 3 m/s se rovněž zmenšil vliv použitého tlaku. Rozdíl v množství zbylých okují pro tlak 5 MPa a 45 MPa je 6,1% při odklonu trysky 0° a 3,6 % pro 30°. Je zde nutno podotknout, že hodnoty zbylých okují jsou celkově pro úhel 30° vyšší. To se ale rozchází s naším očekáváním, kdy by okuje měly být odstraňovány na principu vodního dláta [3]. Tento jev je s největší pravděpodobností způsobeno „subcoolingem“ a použitím velkého úhlu odklonu.

4.2 VLIV ODKLONU TRYSKY OD KOLMICE NA KVALITU POVRCHU

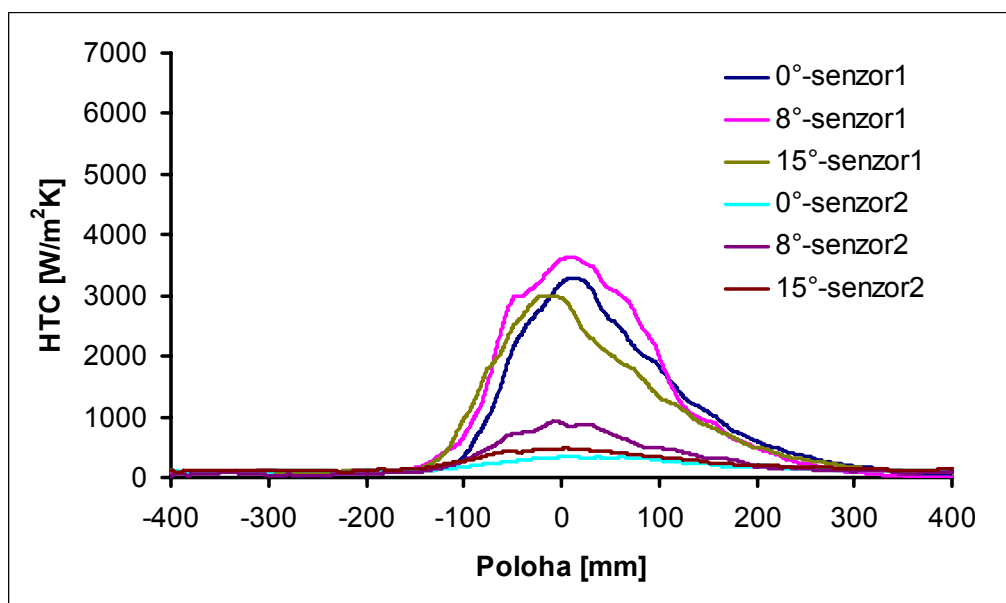
Základem pro tyto experimenty je teorie, že vrstvy okují jsou z ocelového povrchu odstraňovány na principu „vodního dláta“. Z toho by nám mělo logicky vyplynout, že se zvětšujícím se úhlem odklonu trysky od normály k ostříkovanému povrchu budeme získávat povrch s menším množstvím zbylých okují. Se zvětšujícím se úhlem ovšem dochází také k již zmíněnému subcoolingu. Úkolem tedy bylo zjistit, zda je efekt „vodního dláta“ pouze teorií a jaký je rozdíl mezi kvalitami povrchů pro trysky nastavené pod úhlem 0; 8 a 15°. V praxi je nejčastěji používán úhel 15°. Experimenty byly provedeny pro tlaky 5; 15 a 45 MPa



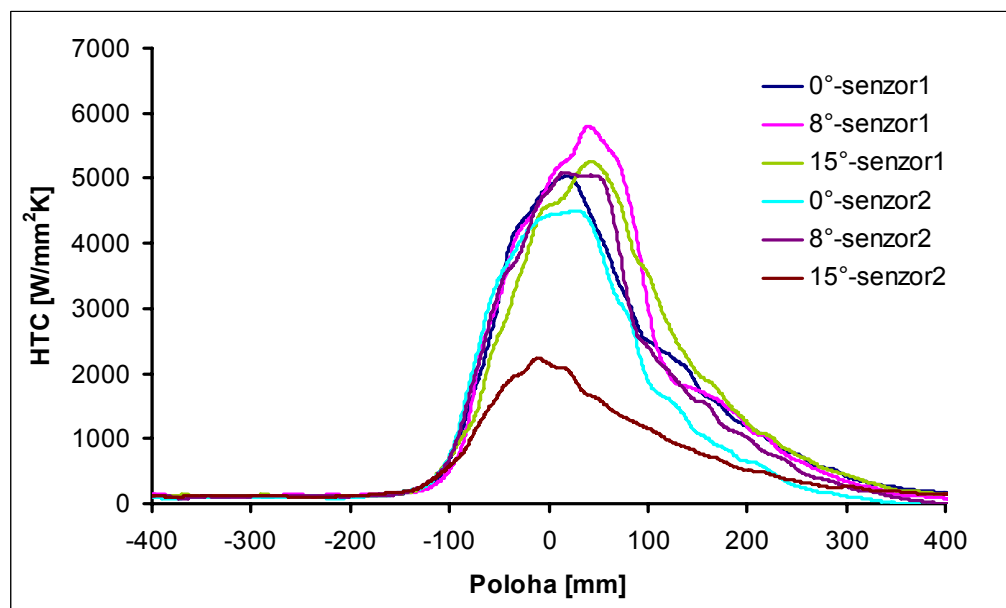
Obr. 21: Závislost kvality povrchu na úhlu odklonu trysky a tlaku

Jak je vidět z Obr. 21, nedá se s jistotou říci, který úhel je pro výslednou kvalitu povrchu výhodnější. Pro nastavení trysky kolmo k ostříkovanému povrchu jsme získali nejhorší hodnoty pro tlaky 5 a 15 MPa. Avšak pro tlak 45 MPa se hodnota pro tento úhel příliš neliší od hodnoty pro úhel 8°.

Rozdíl mezi výsledky pro odklon trysky 8 a 15° není možné jednoduše shrnout. U tlaků 5 a 15 MPa došlo k mírnému zlepšení kvality povrchu. Naopak u tlaku 45 MPa byla výsledná kvalita povrchu horší než u experimentů s menšími úhly. Tento jev je možno přičíst opět subcoolingu, jelikož při tomto tlaku dopadá na povrch značné množství vody, jež je následně tlačena před proudem trysky. Z grafu je rovněž patrný vliv velikosti tlaku na výslednou kvalitu povrchu – rostoucí tlak = lepší kvalita.



Obr. 22: Rozložení HTC pro tlak 5 MPa a různé úhly odklonu trysky



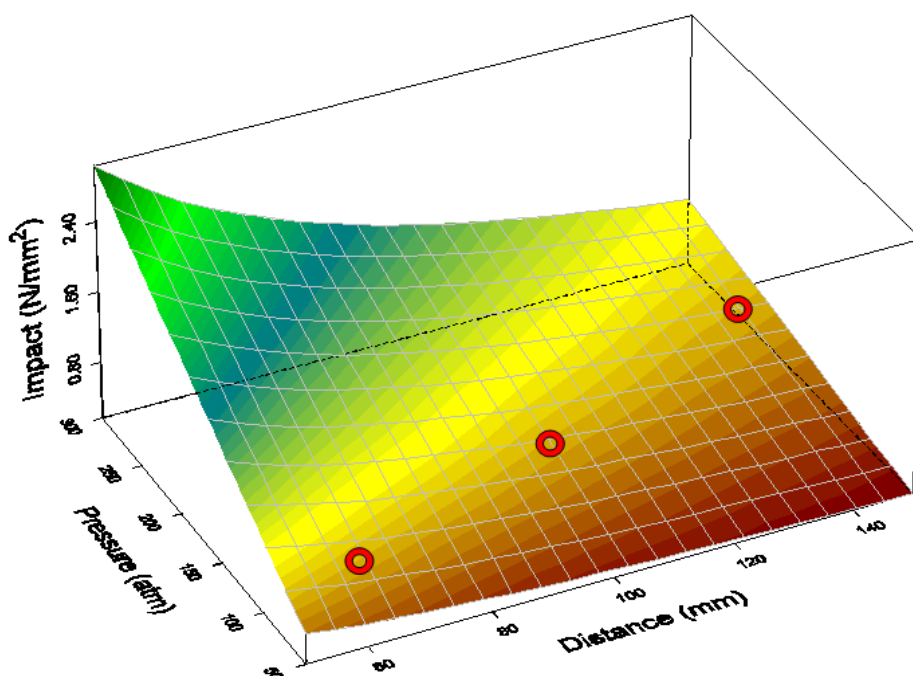
Obr. 22: Rozložení HTC pro tlak 45 MPa a různé úhly odklonu trysky

Z průběhů spočtených průběhů HTC je zřejmé, že rozdíly mezi snímačem 1 v ose trysky a snímačem 2 jsou značné. Nejvýrazněji je to viditelné u tlaku 5 Mpa, Obr. 21, kdy je stopa trysky poměrně úzká, a vodní paprsek ovlivňuje oblast druhého snímače minimálně.. Pro tlak 45 Mpa, Obr. 22, jsou již tyto rozdíly znatelně menší, což je způsobeno rozšířením stopy trysky.

Z grafů jsou rovněž patrné mírně větší hodnoty HTC pro úhel odklonu trysky 8° , které převyšují hodnoty HTC pro ostatní úhly o 12 až 15%. Pro tlaky 15 a 45 MPa jsou druhé největší hodnoty HTC pro úhel 15° . Pouze pro tlak 5 MPa je druhou nejvyšší hodnotou HTC hodnota pro 0° .

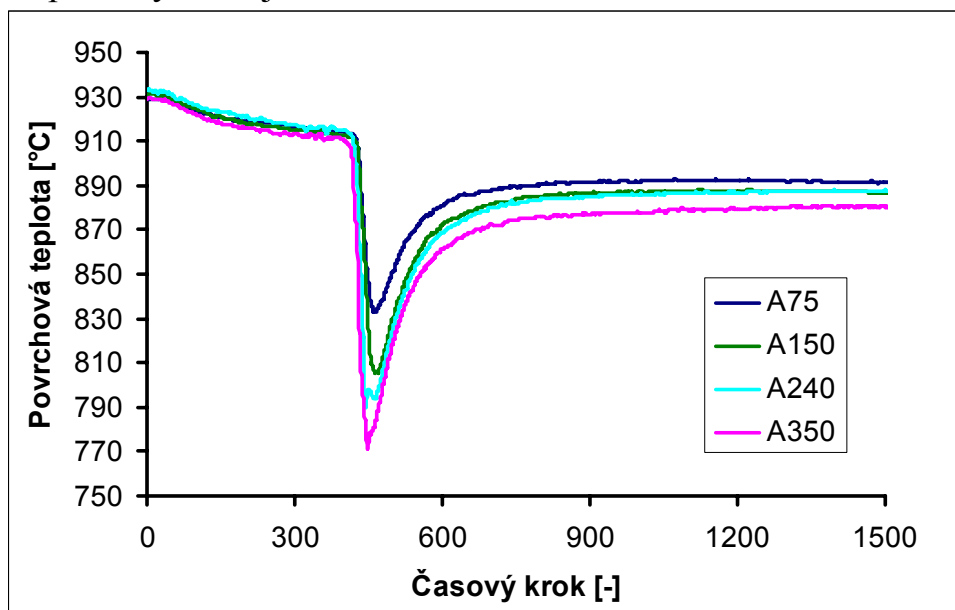
4.3 VLIV IMPAKTNÍHO TLAKU V ZÁVISLOSTI NA MNOŽSTVÍ DOPADAJÍCÍ VODY

Jak již bylo zmíněno, s rostoucí vzdáleností trysky od povrchu desky se snižuje maximální impaktní tlak. Tudiž pro zachování hodnoty impaktního tlaku s rostoucí vzdáleností trysky od ostříkované desky, je nutno zvýšit tlak v hydraulickém systému. To má za následek dopad většího množství vody na povrch desky a tudíž větší tepelné ztráty. Závislost velikosti impaktního tlaku na vzdálenosti trysky od ostříkovaného povrchu a tlaku v trysce je zobrazena na Obr. 23 [4]. Pro naše experimenty bylo zvoleno referenční nastavení 15 MPa při výšce 100 mm. To odpovídá impaktnímu tlaku 0.73 N/mm^2 . Experimenty byly provedeny pro konstantní impaktní tlak při vzdálenosti trysky 50,100,150 a 200 mm od ostříkovaného povrchu.

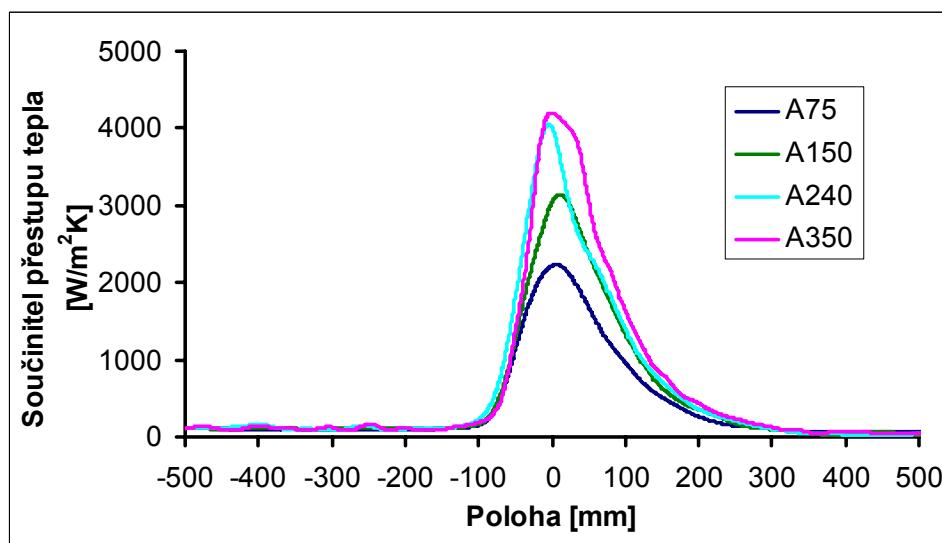


Obr. 23: Závislost impaktního tlaku na vzdálenosti trysky od povrchu a tlaku v hydraulickém systému

Pro měření součinitele přestupu tepla byl zvolen nejpoužívanější úhel odklonu trysky od kolmice 15°. Stejný úhel byl použit také pro ostatní experimentální měření. Teploty přepočtené na povrch desky pro senzor 1 jsou zobrazeny na Obr. 24 a jim odpovídající průběhy HTC jsou na Obr.25.



Obr. 24: Průběh vypočtené povrchové teploty pro senzor 1

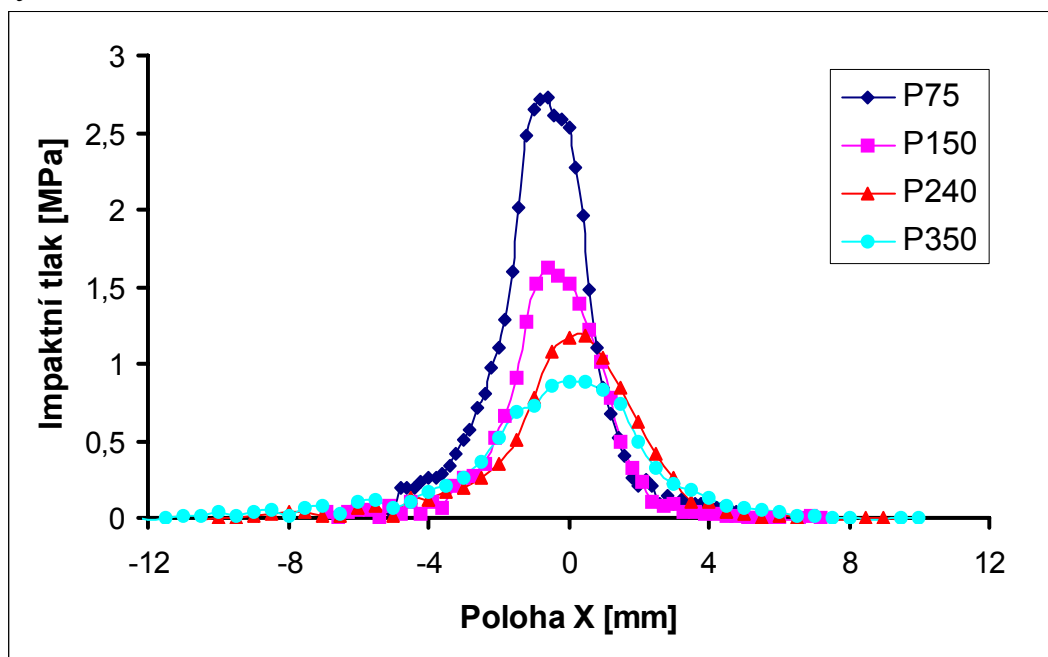


Obr. 25: Průběh součinitele přestupu tepla – senzor 1

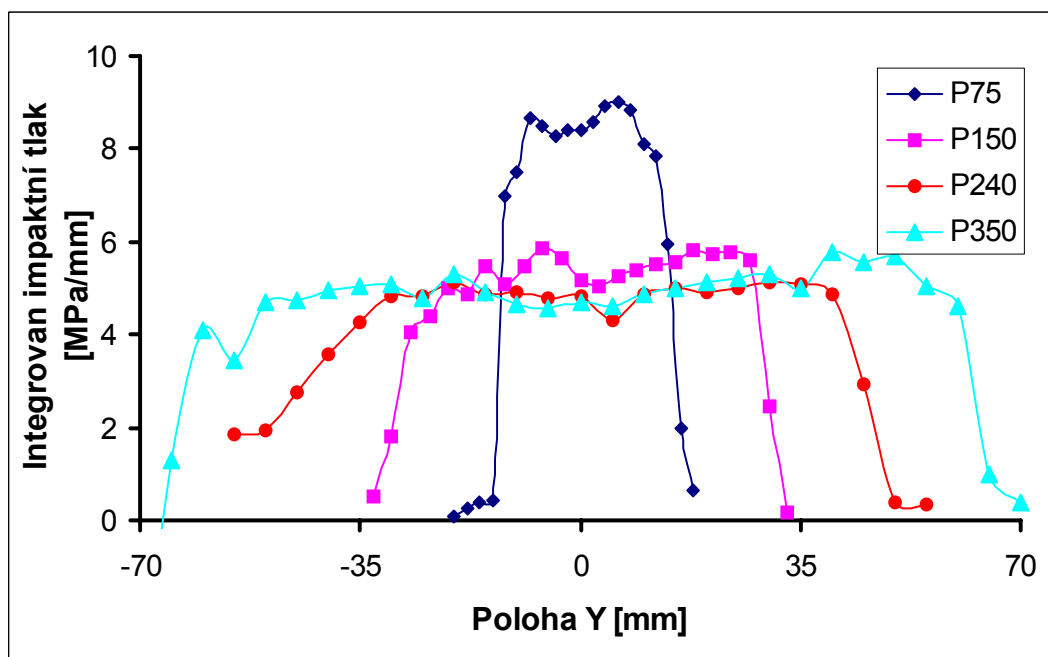
Výsledky měření impaktních tlaků pro osu $Y=0$ jsou zobrazeny na Obr.26. V LPTP však byla navržena další metoda vyhodnocení impaktních tlaků trysky – Integrovaný impaktní tlak, jež lépe popisuje homogenitu vodního proudu vzhledem k ose Y , kolmém na směr pohybu produktu. Definice je následující:

$$\text{Integrovaný impaktní tlak} = \int_{-X}^{+X} \text{impakt } dX \quad [\text{MPa}\cdot\text{mm}] \quad (2)$$

Výsledky přepočtené na Integrovaný impaktní tlak pro měření P75 až P350 jsou zobrazeny na Obr. 27.



Obr. 26: Velikost impaktního tlaku v ose $Y=0$



Obr. 27: Velikost Integrovaného impaktního tlaku v ose $X=0$

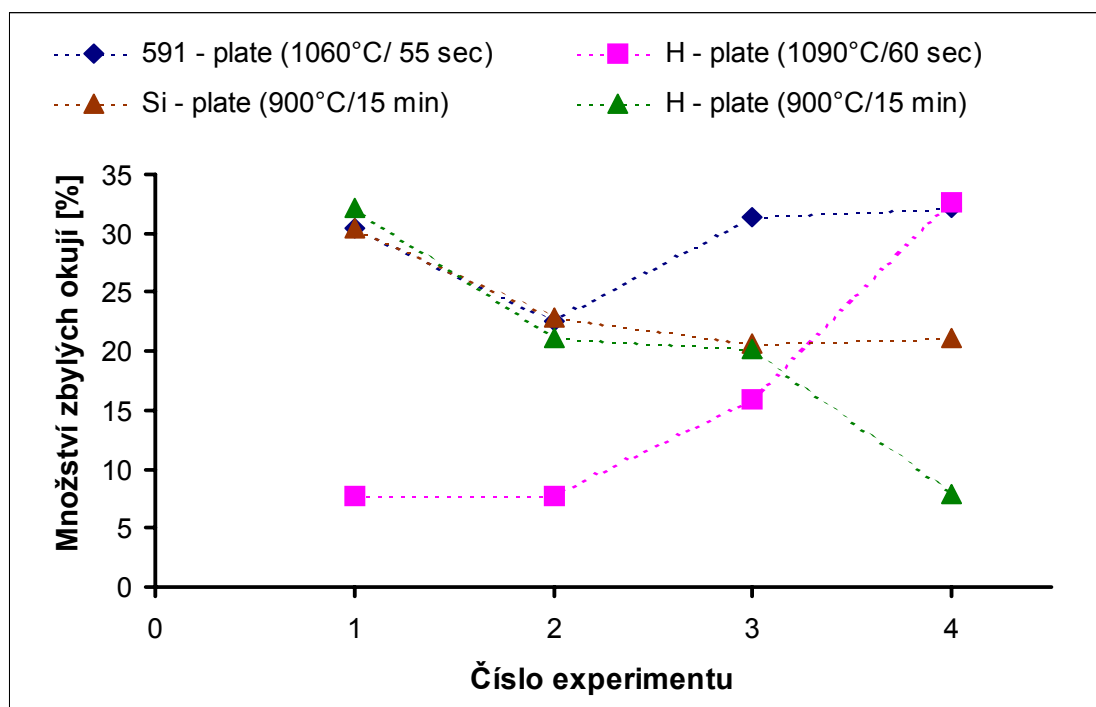
Experimenty simulující samotný proces odokujení byly provedeny pro tři různé materiály, tab. 2, jež byly zokujeny za různých podmínek (teplota/čas okujení). Jelikož tloušťky vrstev okují před samotným odokujením se pohybují ve velkém rozptylu, je to nutno brát také v úvahu. Jak je vidět na Obr.28, tak nikdy nedošlo k úplnému odstranění okují. Minimální množství okují jež nakonec zůstalo na povrchu experimentální desky bylo 7,7% pro H-plate(1090°C/60 sec) odokujené při tlaku 7,4 MPa. Tudiž při experimentu, kdy dochází k minimálnímu teplotnímu

ovlivnění avšak hodnota integrovaného impaktního tlaku dosahuje pro toto nastavení své maximální hodnoty.

591 – plate							
Element:	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
(%)	0,100	0,02	0,30	-	-	-	-
H – plate							
Element:	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
(%)	0,18	0,16	0,58	0,82	0,45	0,014	0,024
Si – plate							
Element:	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
(%)	0,23	0,57	1,52	1,03	-	0,025	0,007

Tab. 2: Použité materiály experimentálních desek

U experimentů s H-plate(900°C/15 min), se nám potvrdila teorie o tepelném ovlivnění – s rostoucím HTC je odstraněno větší množství okují. U experimentů s Si-plate(900°C/15 min) je rovněž vidět vliv rostoucího HTC, avšak ne tak výrazný jako u H-plate(900°C/15 min). U experimentů s 591-plate (1060°C/55 sec) nebyl vliv HTC vůbec pozorován a množství zbylých okují se pohybuje od 22 do 32 procent.



Obr. 28: Množství zbylých okují v závislosti na parametrech ostříku

1 = Tlak 7,4 MPa, vzdálenost 50 mm (průměrné HTC – 446 [W/m²K])

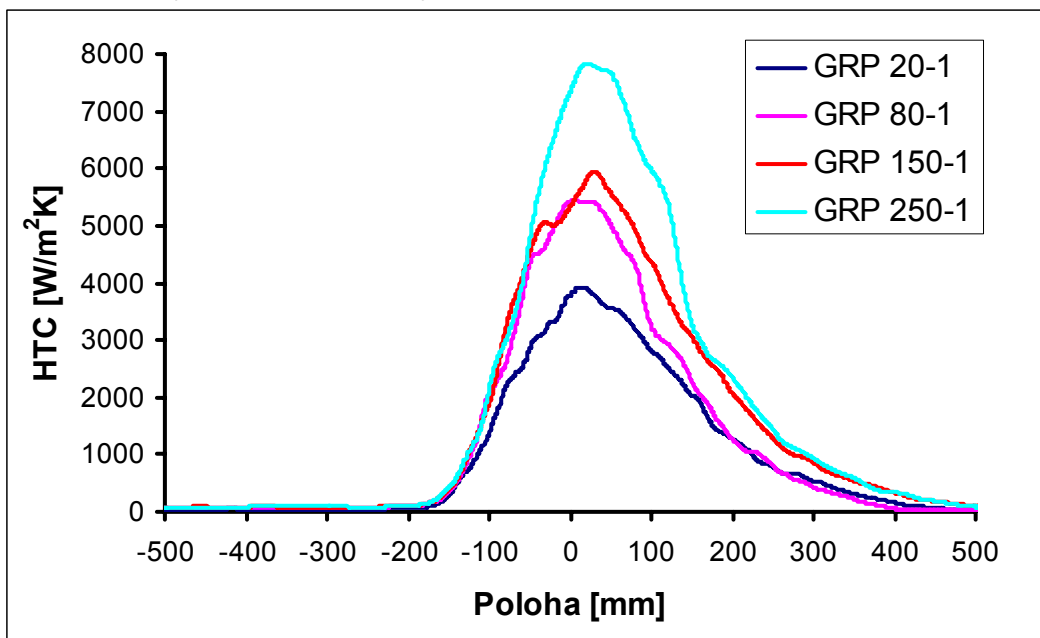
2 = Tlak 15 MPa, vzdálenost 100 mm (průměrné HTC – 578 [W/m²K])

3 = Tlak 24 MPa, vzdálenost 150 mm (průměrné HTC – 697 [W/m²K])

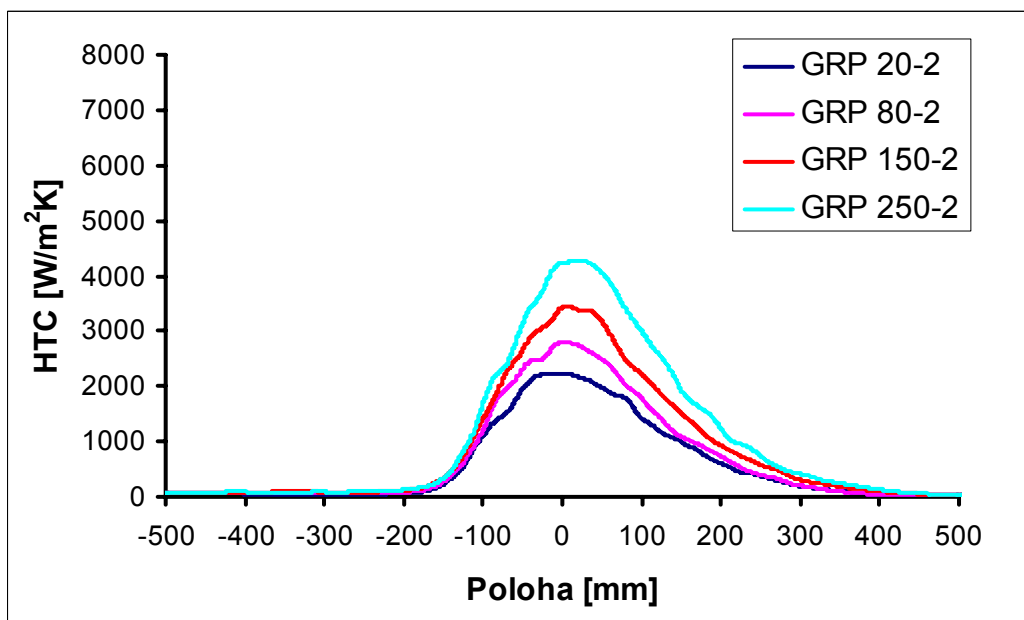
4 = Tlak 35 MPa, vzdálenost 200 mm (průměrné HTC – 796 [W/m²K])

4.4 VLIV PŘEKRYVU NA VELIKOST HTC

Pro experiment byla opět použita deska se dvěma senzory. Ta projíždí pod tryskami tak, že jeden snímač prochází přímo v místě překryvu stop trysek a druhý, ve vzdálenosti 50 mm je ostříkován pouze jedinou tryskou. Na obr. 29 jsou zobrazeny hodnoty vypočtených HTC pro oblast překryvu. Pro oblast s jednou tryskou jsou hodnoty HTC zobrazeny na Obr. 30.



Obr. 29: Rozložení HTC pro různé tlaky, senzor 1 - oblast překryvu



Obr. 30: Rozložení HTC pro různé tlaky, senzor 2 - oblast s jedinou tryskou

5. VÝPOČTOVÁ ČÁST

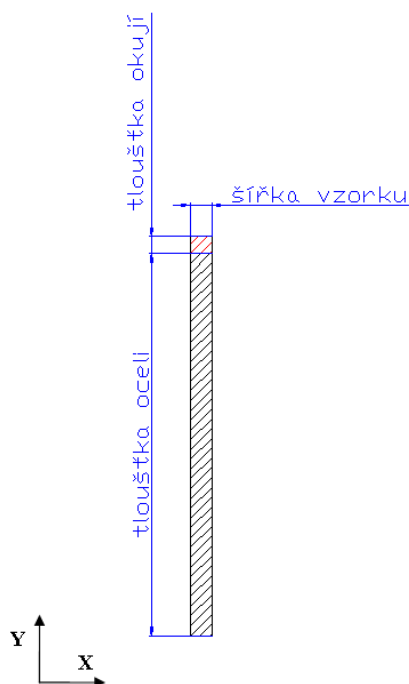
Tato část práce se zabývá vytvořením konečno-prvkového modelu základního ocelového materiálu s vrstvou okují. Cílem tohoto modelu je nastínění dějů během procesu hydraulického odokujení a vlivu jednotlivých parametrů ostříku, potažmo HTC a impaktního tlaku na napjetí ve vrstvě okují. Pro řešení konečno-prvkových simulací byl použit program ANSYS 11.

Pro zkoumání jednotlivých vlivů byl vytvořen 2-D a 3-D model základního materiálu s vrstvou okují.

Úloha je řešena ve dvou na sebe navazujících základních krocích. Prvním je výpočet nestacionárního teplotního pole, jež vzniká působením HTC na povrch vrstvy okují. Druhým krokem je napjatostně-deformační úloha, během níž je rovněž aplikován tlakový impuls na povrch okují [5, 6]. Výsledkem této analýzy jsou průběhy napětí ve vrstvě okují a také v základním materiálu. Pro nás jsou nejvýznamnější hodnoty napětí σ_x , tedy složky, jež má nejvýznamnější vliv na porušování okují, popřípadě odlupování vrstvy okují od základního materiálu.

Tab. 3: Geometrické rozměry 2-D modelu vrstvy okují

Rozměr	Velikost [mm]
Tloušťka oceli	20
Tloušťka okují	0,1
Šířka vzorku	2



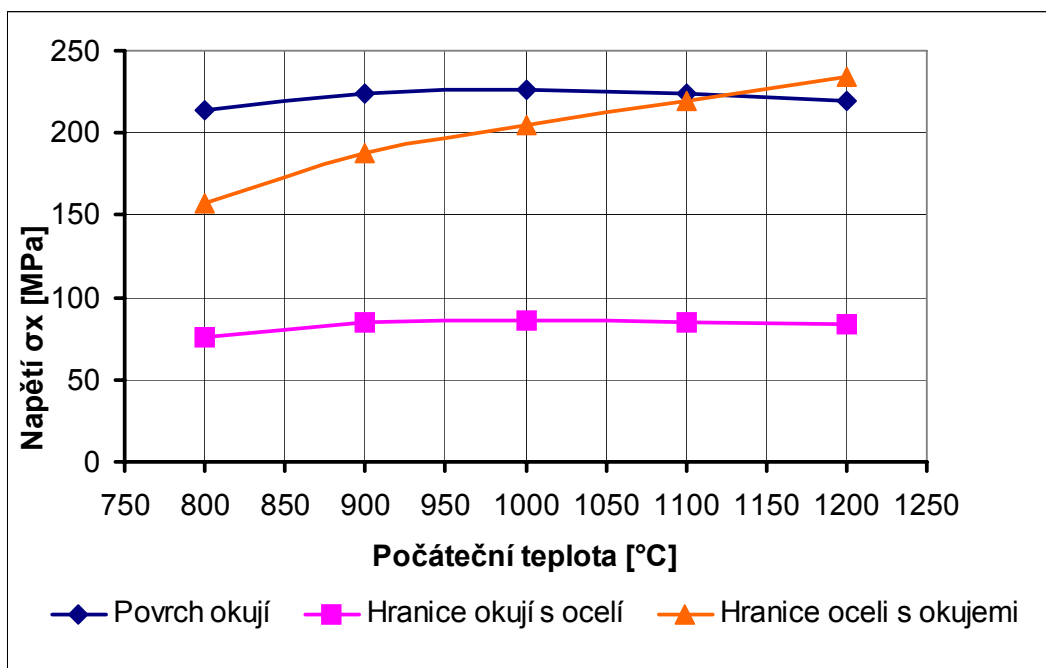
Obr.31: Geometrie 2D modelu vrstvy okují

Kromě vlivu parametrů ostříku na průběh napětí byl v této části práce zkoumán také vliv dalších okrajových podmínek – počáteční teploty a materiálových vlastností [8, 9, 10, 11, 12]. Materiálové vlastnosti se totiž v literatuře nacházejí s velice značným rozptylem. Jejich měření je totiž znesnadněno vysokými teplotami. Navíc se složení vrstvy okují mění v závislosti na času a teplotě okujení a potažmo se mění i jejich vlastnosti.

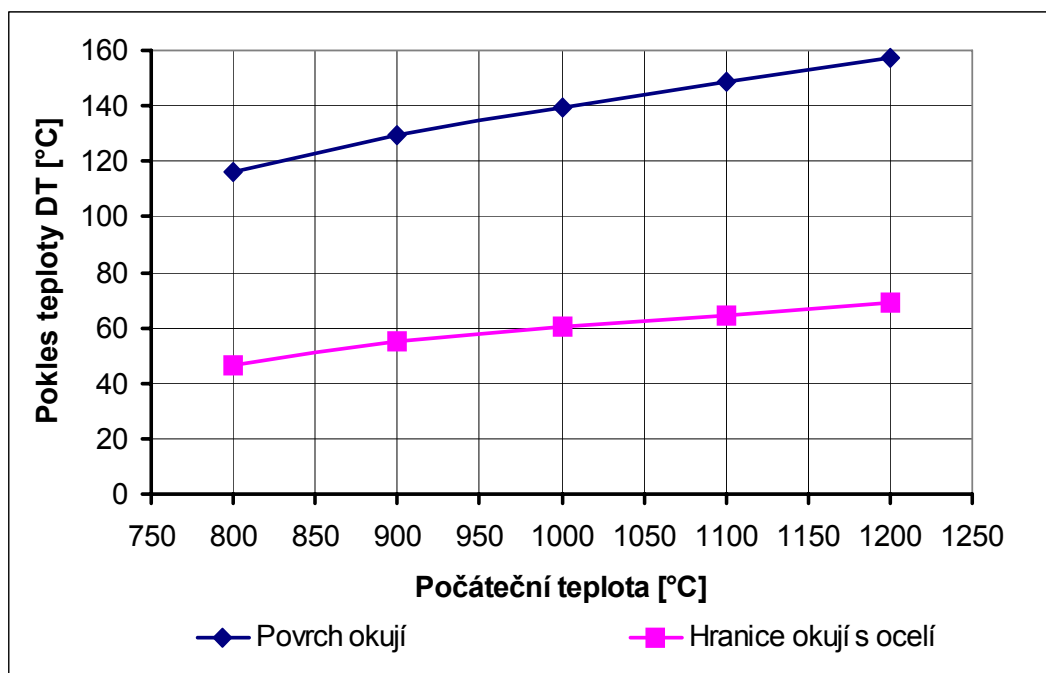
Změna teploty byla zkoumána na povrchu okují a na rozhraní okuje-ocel. Průběhy napětí byly vyhodnocovány jak na povrchu okují, tak na rozhraní okuje-ocel.

Zde však byl vyhodnocován jak průběh napětí ve vrstvě okují, tak v základním materiálu.

Po porovnání výsledků analýz s tlakovým impulsem a bez něj bylo zjištěno, že tlakový impuls ovlivňuje hlavně hodnotu napětí ve směru osy y . Ve směru osy x způsobil impuls velikosti 4 MPa pokles napětí o 0,7MPa, což je v našem případě zanedbatelná hodnota.



Obr. 32: Vliv počáteční teploty T_{unif} při rychlosti $v_x = 1 \text{ m.s}^{-1}$ na napětí σ_x



Obr. 33: Vliv rychlosti $v_x = 1 \text{ m.s}^{-1}$ a počáteční teploty T_{unif} na poklesu teploty DT

Bylo pozorováno, že se vzrůstající počáteční teplotou nelineárně vzrůstá sledované napětí σ_x . Toto však neplatí pro povrch okují a hranici okuj - ocel. V těchto dvou případech napětí σ_x dosahuje svého maxima v intervalu 900 - 1000°C. Toto je způsobeno kombinací materiálových charakteristik okují a oceli. Pro ověření tohoto tvrzení byl proveden výpočet s teplotně nezávislými materiálovými charakteristikami. Průběh σ_x ve všech třech sledovaných oblastech je v tomto případě lineární.

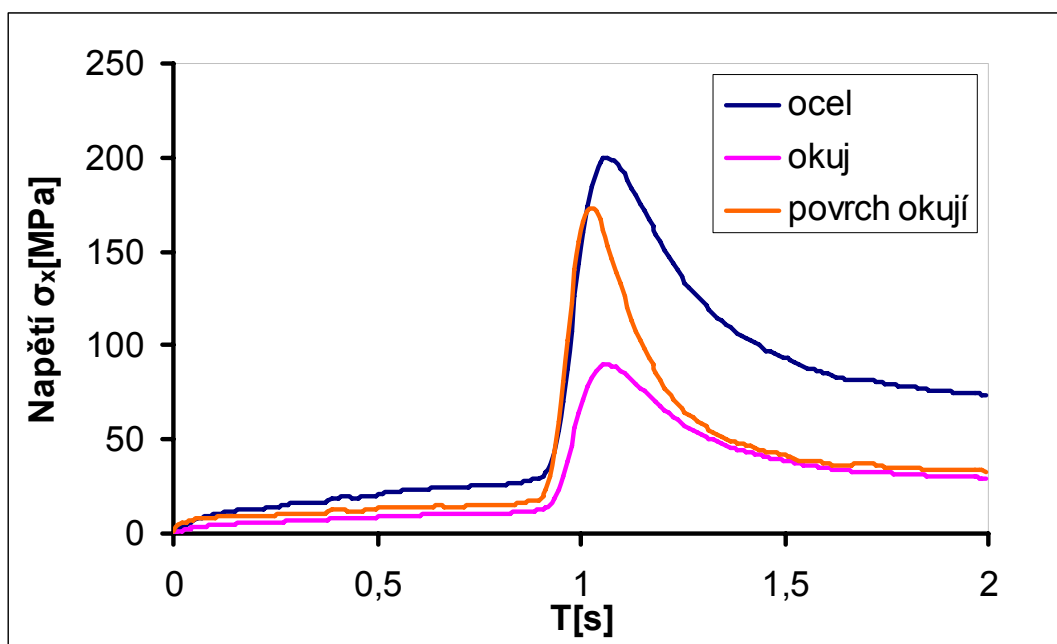
Rozhodujícím faktorem na oddělení okují od oceli je rozdíl napětí σ_x na této hranici. Se vzrůstající počáteční teplotou se rozdíl napětí σ_x nelineárně zvětšuje.

Obecně lze říci, že napětí σ_x klesá s rostoucí rychlostí průjezdu provalku pod tryskou. S rostoucí rychlostí rovněž klesá rozdíl napětí σ_x mezi hranicemi okuj – ocel a ocel – okuj.

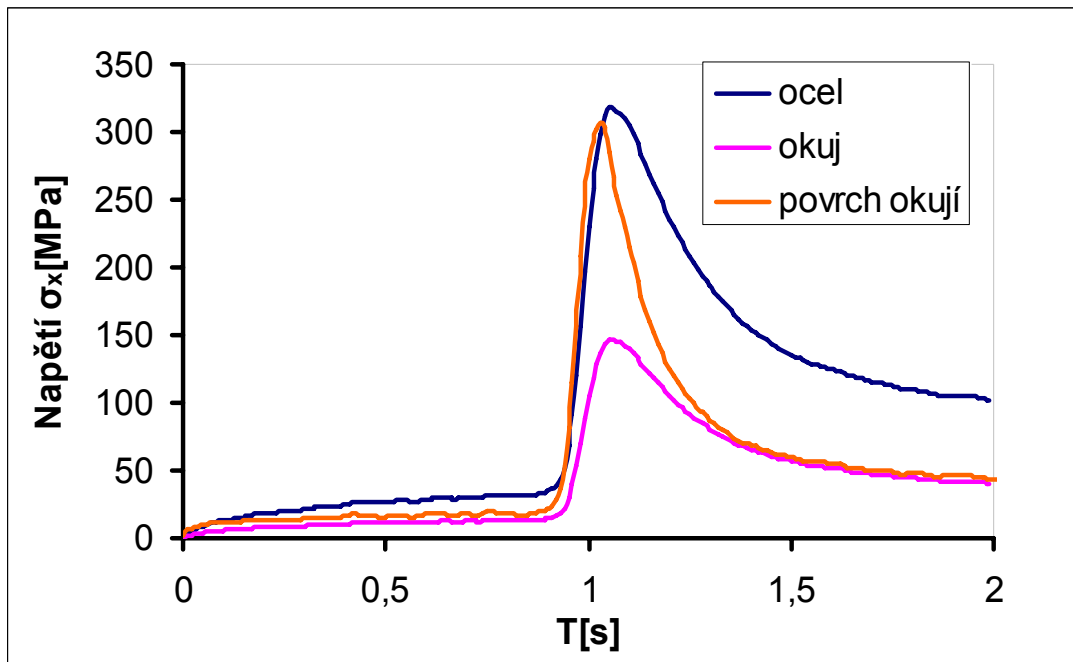
Se vzrůstající počáteční teplotou nelineárně vzrůstá sledovaný pokles teplot (vztaženo k počáteční teplotě) a to jak na povrchu okují, tak i na hranici okuj - ocel. Dále se vzrůstající teplotou vzrůstá i rozdíl teplot mezi těmito hranicemi.

Obecně lze říci, že se vzrůstající rychlostí klesají teplotní gradienty ve směru osy y , což je dáno kratší dobou působení HTC na soustavu.

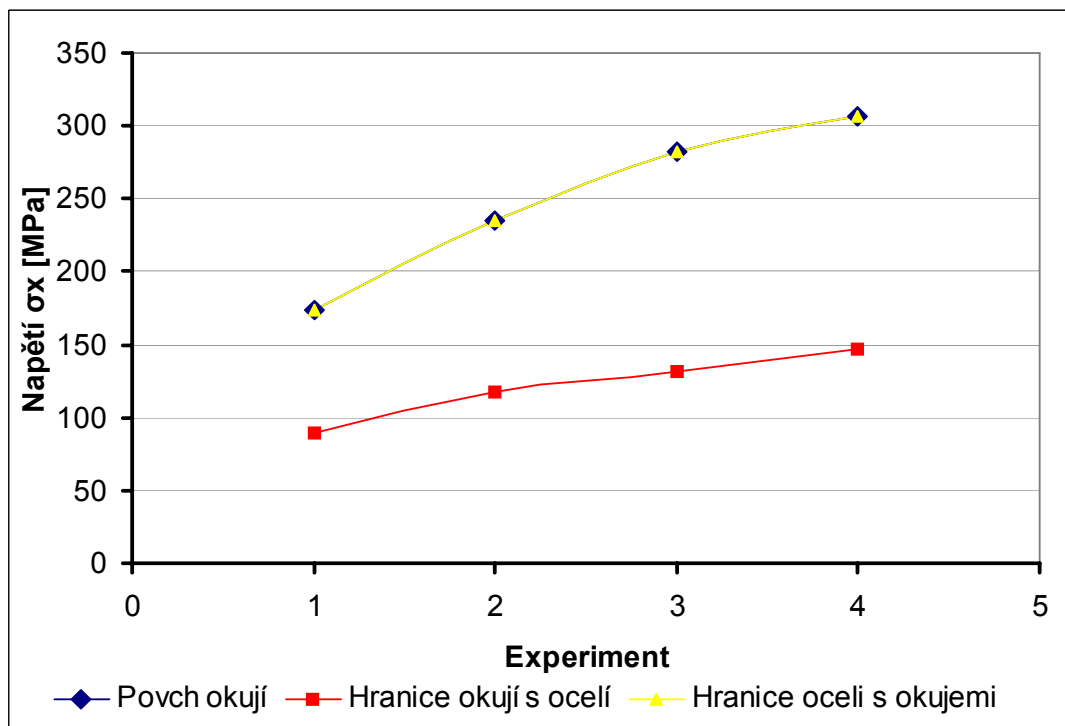
Byly provedeny také simulace kdy byly aplikovány konkrétní hodnoty součinitele přestupu tepla získané v experimentální části práce. Byly použity průběhy součinitelů přestupu tepla zobrazeny na Obr. 25.



Obr.34: Průběh vypočtených napětí σ_x na povrchu okují a na rozhraní okuje-ocel – A75



Obr. 35: Průběh vypočtených napětí σ_x na povrchu okují a na rozhraní okuje-ocel – A350



Obr. 36 : Maximální hodnoty napětí σ_x pro jednotlivé experimenty

Na Obr. 36 je jasně vidět rozdíly mezi jednotlivými výpočty založenými na experimentálním měření součinitele přestupu tepla. S rostoucím součinitelem přestupu tepla se zvyšuje nejenom hodnota napětí ale také rozdíl velikosti napětí mezi vrstvou okují a ocelí. Pro experiment č. 1 je rozdíl napětí σ_x 83 MPa, zatímco pro experiment č. 4, kdy průměrná velikost součinitele přestupu tepla je 1,78krát větší než u experimentu 1, je rozdíl 160 MPa. To nám podle teorie způsobí větší

množství odstraněných okují. Porovnáme-li tyto získaná data s výsledky experimentů, obr. 28, tak odpovídají experimentům s materiálem H-plate (900°C/15 min), kdy s rostoucím součinitelem přestupu tepla bylo odstraněno větší množství okují.

6. ZÁVĚR

Při řešení této práce jsem se komplexně zabýval problémem odokujení horkých kovových povrchů pomocí ostříku vysokotlakým vodním paprskem. Problém byl řešen jak experimentální cestou, tak pomocí matematického modelování použitím metody konečných prvků s využitím výpočtového systému ANSYS.

K řešení experimentální části byla zkonstruována zařízení umožňující simulaci odokujovacího procesu v laboratorních podmínkách. To umožnilo tento proces blíže zkoumat a odhalit zákonitosti kvality získaného povrchu. Rovněž byla vytvořena koncepce měření jednotlivých parametrů ovlivňujících kvalitu výsledného povrchu – impaktního tlaku a součinitele přestupu tepla. Pro vyhodnocení kvality experimentálních povrchů bylo použito metody zpracování obrazu v kombinaci s měřením tloušťky okují pomocí elektromagnetické sondy. Tato měření byla evaluována pomocí elektronového mikroskopu. Tím se celý proces zjednodušil a urychlil.

Ve výpočtové části byly na konečno-prvkové modely aplikovány změřené okrajové podmínky - součinitel přestupu tepla a impaktní tlak. Výsledkem těchto simulací byly průběhy napětí jak ve vrstvě okují, tak především na hranici okuj-ocel. Během experimentální a výpočtové části byly zjištěny následující poznatky:

- Při použití nižších průjezdových rychlostí dochází, stejně jako v teorii k získání lepších povrchů. Dochází však k většímu ochlazení povrchu produktu a tudíž je znesnadněno jeho další zpracování. Při větších rychlostech je však tepelné ovlivnění menší a tudíž na povrchu zůstane více okují.
- Zvětšením odklonu trysky od ostříkovaného povrchu bylo dosaženo lepší kvality povrchu pouze do určitých hodnot odklonu. Nejlepších hodnot jsme dosáhli s úhlem 8°, což bylo podpořeno měřením součinitele přestupu tepla, jež pro toto nastavení dosahoval nejvyšších hodnot. Při větších úhlech je už zlepšení povrchu sporadické. Dochází totiž k jevu zvanému subcooling a tudíž ochlazení povrchu a znesnadnění procesu odokujení.
- Všechny získané výsledky jsou závislé na použitém materiálu a na době jeho zokujení. Různé příměsi, Si, P, S atd. mohou značně ovlivnit jeho schopnost odokujení. Nelze tedy získaná data generalizovat pro všechny dostupné materiály. Stejný problém nastává při různé době okujení a teploty okujení. Při změně těchto podmínek má vrstva okují rozdílné vlastnosti a tudíž je produkt různě odokujitelný.
- Pro měření s konstantním impaktním tlakem můžeme říci, že menší množství vody z větší výšky a při odpovídajícím tlaku v systému nám způsobí větší teplotní šok.

- Na oblast působení překrývajících se trysek dopadá větší množství vody, a tudíž na ni působí větší součinitel přestupu tepla. Výsledné povrchy experimentálních desek však nevykazují známky použití více překrývajících se trysek a tloušťka okují se mění nezávisle na tomto faktu.
- Pokud vezmeme v úvahu samotnou sílu vodního paprsku a provedeme experiment za studena, zjistíme, že samotné mechanické působení nemá na oxidickou vrstvu téměř vliv. To vylučuje koncept založený na mechanické síle paprsku.
- Napětí σ_x indukované mechanickým působením paprsku je v porovnání s napětím způsobeným tepelně asi 300x menší. To rovněž odporuje konceptu vodního dláta.
- Výpočty napjatosti vlivem ochlazování na rozmezí oxid-kov ukazují přinejmenším o dva řády menší napětí, než by bylo potřebné k oddělení oxidu od povrchu vlivem jeho prohýbání – to vylučuje koncept 4 - ohýbání okují způsobeném teplotním gradientem po tloušťce okují.
- Koncept parní exploze nevysvětluje proces rozrušení vrstvy okují, která nemá vnitřní vady.

Z výše uvedených fakt nám vyplývá, že proces odokujení není možné založit na jediné teorii. Celý proces je komplexní souhrou všech působících faktorů, jak mechanických tak tepelných. Jejich vzájemná správná kombinace nakonec způsobí, že výsledný povrch má požadovanou kvalitu.

Při řešení této práce byly získány přesné a reprodukovatelné výsledky umožňující správné nastavení ostřikových parametrů a získání okrajových podmínek pro matematické modely hydraulických ostřiků. Výsledky tak umožní jak zvýšení kvality technologického procesu, tak minimalizaci odvodu tepla z ostříkávaného povrchu což umožní prodloužit proces zpracování za tepla, aniž by produkt musel být opět zahříván.

Optimalizovaný proces odstraňování okují vysokotlakým vodním paprskem může přinést značné energetické a finanční úspory což je v dnešní době prioritou každého výrobního procesu.

LITERATURA

- [1] WOLF, M. M., *Scale formation and descaling in continuous casting and hot rolling*, Iron & steelmaker, 2000
- [2] YAO-NAN CHANG, FENG-I WEI, *High temperature oxidation of low alloy steels*, Journal of material science, 1989
- [3] BLAZEVIC, D. T., *Newton and descaling*, 3rd conf. Hydraulic Descaling, London 2000
- [4] Lechler GmbH
- [5] KRZYŻANOWSKI, M., BEYNON, J., H., *Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing — oxide scale behaviour and composition effects*, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 8, 927–945, 2000
- [6] ANSYS Release 11.0 Documentation
- [7] RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J., POHANKA, M., TOŠOVSKÝ, J., KOTRBÁČEK, P., *Experimental study of parameters influencing efficiency of hydraulic descaling – theory of vapour explosion*, Descaling 2003, London, 2003
- [8] RAMIREZ-CUELLAR, J., GUERRERO-MATA, M., P., LEDUC, L. A., COLÁS, R., *Modeling descaling during hot rolling of steel*, Journal de Physique IV, France, 2004
- [9] PICQUE, B., BOUCHARD, P. O., MONTMITONET, P., PICARD, M., *A numerical study of rolled-in scale in the Hot Dtrip Mill*, 9th International Steel rolling conference, Paris, 2006
- [10] WALTER, M., SEHITZE, M., RAHMEL, A., *Behavior of Oxide Scales on 12Cr-1Mo Steel During Thermal Cycling*, Oxidation of Metals, Vol. 49, No. 1/2, 1998
- [11] BULL, S. J., *Modeling of Residual Stress in Oxide Scales*, Oxidation of Metals, Vol. 11, No. 2, 1977
- [12] DEADMORE, D., L., LOWELL, C. E., *The Effect of AT (Oxidizing Temperature Minus Cooling Temperature) on Oxide Spallation*, Oxidation of Metals, Vol. 11, No. 2, 1977

ABSTRAKT

Tato práce se komplexně zabývá procesem hydraulického odokujení horkých povrchů. Hydraulické odokujení je proces, při němž jsou odstraňovány vrstvy oxidů z horkých, obvykle ocelových povrchů za pomoci vysokotlakého ostříku vodním paprskem. Kvalita odokujení je významná pro výslednou kvalitu povrchu válcovaného produktu. Nedostatečné odokujení způsobuje mimo snížení výsledné kvality produktu také značné opotřebení pracovních válců a ztrátu výnosů.

Vodní paprsek působí na povrch okují dvěma způsoby. Prvním je mechanická síla dopadající vody a druhým je teplotní ovlivnění ostříkované oblasti způsobující teplotní šok. Existuje mnoho teorií o tom, na jakém principu jsou při tomto procesu okuje odstraňovány. Úkolem této práce tedy bylo objasnit použitelnost jednotlivých teorií a to jak teoreticky, matematickým modelováním, tak prakticky, experimenty simulujícími samotný proces odokujení.

V experimentální části byly provedeny tři typy experimentálních měření. Prvním je měření dynamické síly vodního paprsku trysky- impaktního tlaku. Druhým je měření teploty ve vzorku během průjezdu pod ostříkovou tryskou a určení součinitele přestupu tepla pomocí inverzní úlohy. Třetím je simulace samotného procesu odokujení a zhodnocení výsledné kvality ostříkovaného povrchu stanovením množství zbylých okují. Data z prvního a druhého typu měření jsou současně použita i jako okrajové podmínky pro výpočtové modely.

Ve druhé, výpočtové části byl v MKP (metoda konečných prvků) systému ANSYS vytvořen matematický 2D a 3D model základního materiálu s vrstvou okují. Na těchto modelech byl zkoumán vliv změřených okrajových podmínek na průběh napětí ve vrstvě okují. Byl rovněž zkoumán vliv zadávaných materiálových vlastností. Ty jsou totiž velice špatně měřitelné a objevují se v literatuře se značným rozptylem.

ABSTRACT

This work is focussed on hydraulic descaling of hot surfaces. Hydraulic descaling is a process when layers of oxides are removed from hot steel surfaces during continuous rolling. A high pressure water beam is used. The quality of the descaled surfaces is important for the final quality of the rolled product. Insufficient descaling causes a drop of final quality, degradation of rolls and loss of yields.

The high-pressure water beam has two effects on a scale layer. The first effect is mechanical caused by impact pressure. The second one is a relatively intensive thermal shock depending on a set of parameters (water pressure, nozzle type,

distance from the surface, inclination angle, speed of product moving). There are a lot of theories about the principles of scales removing. The main task of this work is to make it clear which theory is acceptable and which is just „theory”. For this purpose mathematical modelling and experimental work were used.

In the experimental part, three types of experimental measurement were done. The first one, measurement of dynamical effect of water beam – impact pressure. The second one, measurement of the temperature drop when a product is passing under the nozzle. Measured data (temperatures) from this measurement are evaluated with inverse task and heat transfer coefficient is obtained. And the third experimental measurement is simulation of the whole process of descaling. Quality of descaled surfaces is valuated according to the amount of remaining oxide scales. Data from the first and second experimental measurements are used as boundary conditions for mathematical modelling.

For mathematical simulations, FEM (finite element method) system ANSYS was used. Obtained data from the experimental measurement were applied on 2D and 3D models of basic steel material with a layer of scale. Influences of this data on the final temperature, stress and strain fields were observed.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno: Vavrečka Lukáš
Adresa: Krasov 223
794 01 Krnov
Česká republika
Telefon: +420 733115114
Email: lukvav@email.cz

Zaměstnání

08/2007 – dosud Výpočtář karoserií osobních automobilů, MBtech Bohemia, s.r.o, Nárožní 7, Praha 13

Vzdělání

10/2006 - 04/2007 University of Bristol, Department of mechanical engineering

2004 – dosud Postgraduální studium – Laboratoř přenosu tepla a proudění, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Téma doktorandské práce: Vliv parametrů vysokotlakého ostříku na kvalitu odokujení

1999 - 2004 Vysoké učení technické v Brně, magisterské studium na Fakultě strojního inženýrství

1995 - 1999 Gymnázium Krnov

Znalosti a dovednosti

PC znalosti AutoCAD, Catia, ANSA, Medina, ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, PERMAS, LS-DYNA, FEMSITE, MIDAS

Jazykové znalosti Anglický jazyk, Německý jazyk