

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Laboratoř přenosu tepla a proudění

Ing. Jozef Hrabovský

**KVANTIFIKACE MECHANISMŮ HYDRAULICKÉHO ODSTRANĚNÍ
OKUJÍ**

Quantification of Hydraulic Descaling Mechanisms

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.
Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova

Okuje, impaktní tlak, součinitel přestupu tepla, výpočtové modelování, stabilizátor, kolektor, mechanické vlastnosti, optimalizace

Keywords

Oxide scale, impact pressure, heat transfer coefficient, numerical simulation, stabilizer, water chamber, mechanical properties, optimization

Místo uložení dizertační práce

Laboratoř přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně

Obsah

1 ÚVOD	5
2 FORMULACE PROBLÉMŮ A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ	5
3 ANALÝZA HYDRAULICKÉHO ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ	6
3.1 Experimentální měření charakteristik vodního paprsku	6
3.1.1 Měření součinitele přestupu tepla	6
3.1.2 Měření impaktního tlaku	8
3.2 Výpočtové modelování vodního paprsku	10
3.2.1 Výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují	10
3.3 Zhodnocení dosažených výsledků	12
4 ANALÝZA VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA VODNÍ PAPERSEK	14
4.1 Experimentální měření vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku	14
4.2 Výpočtová simulace vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku	17
4.3 Zhodnocení dosažených výsledků	18
5 ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OKUJÍ	20
5.1 Experimentální měření vlastností okují	20
5.1.1 Měření mechanických vlastností okují	21
5.2 Analýza dat	23
5.2.1 Kvalitativní analýza	24
5.2.2 Optimalizace materiálových parametrů	25
5.3 Zhodnocení dosažených výsledků	27
6 ZÁVĚR	29
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
ABSTRACT	31
CURRICULUM VITAE	32

1 ÚVOD

Zvýšená poptávka zákazníků po ocelových produktech s dobrou kvalitou povrchových vrstev bez zbytkových a zaválcovaných okují vede ocelový průmysl k hledání možností a metod pro splnění těchto nároků. K dosažení těchto cílů je potřeba detailně prozkoumat jak mechanismus vzniku okují, jejich vlastností, tak mechanismy vedoucí k jejich odstranění.

Vznik okují je velice nepříjemným a hlavně nežádoucím procesem, který je doprovázen jak zhoršením kvality povrchu, tak jeho degradací v podobě vzniku mikrotrhlin či dutinek. Tyto vady mohou způsobit zhoršení fyzikálních a mechanických vlastností daného polotovaru, či konečného výrobku. Tvorba a růst okují v povrchových vrstvách je specifickým problémem pro každou výrobu. Důvodem je rozmanitá atmosféra, ve které vznikají primární, sekundární či terciární okuje. Tato rozmanitost dále vede k velké diverzifikaci okují z pohledu chemických, fyzikálních a mechanických vlastností. Mechanizmů pro jejich odstranění je mnoho. Tato práce je zaměřena na hydraulický mechanismus odstraňování sekundárních okují.

Hydraulické odstraňování okují zahrnuje velké množství parametrů, kterými je možno více či méně ovlivnit konečnou kvalitu povrchu oceli. Mezi základní parametry patří typ odkujovací trysky, tlak dopadajícího vodního paprsku, vzdálenost trysek od povrchu, počet trysek, překrývání vodního paprsku, atd. Všechny tyto vlivy je potřeba ladit v závislosti na konkrétních provozních podmínkách. Tento proces je obvykle prováděn v laboratorních podmínkách, tedy experimentálně. Aby bylo možno tyto experimenty provádět efektivně a s optimálním výsledkem, je zapotřebí detailně rozpoznat a popsat tento proces. Pro dosažení tohoto cíle byla zvolena numerická metoda (MKP) ve výpočtovém programu ANSYS, která je schopna simulovat jak experimentální, tak reálný proces odstraňování okují.

2 FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ

Tato práce je primárně zaměřena na kvantifikaci mechanismů vysokotlakého hydraulického odstraňování sekundárních okují. Formulace problému je následující: obtížné a složité odstraňování okují při tváření a tepelném zpracování oceli, spojené s nedostatečnou kvalitou povrchu oceli po hydraulickém odstraňování okují. K řešení tohoto problému bylo přistupováno zejména jako k nepřímému problému, kdy jsou známy důsledky a je potřeba najít a objasnit příčiny, které je způsobily. Tento problém představuje zásadní fenomén pro všechny výrobce oceli, a proto je nezbytně nutné se jím zabývat.

Mezi hlavní cíle této práce patří zejména analýza vysokotlakého hydraulického paprsku, dále zkoumání vlivu hydraulického paprsku na vrstvu okují, analýza vlivu kolektorů a stabilizátorů na hydraulický paprsek a nakonec rozbor fyzikálních a mechanických vlastností sekundárních okují. Tyto cíle vycházejí z jasně definovaného problému, jakým je odstraňování okují při tváření a tepelném

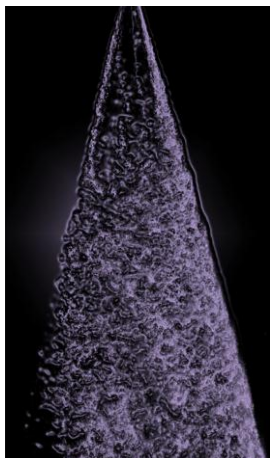
zpracování oceli. Pro postupné řešení a odhalování dílčích problémů, byly jednotlivé cíle práce řešeny jak experimentálním, tak výpočtovým přístupem. Experimentální část byla zaměřena zejména na získávání vstupních dat pro specifickou výpočtovou analýzu a korelaci vypočtených výsledků s experimentálním měřením.

3 ANALÝZA HYDRAULICKÉHO ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

Analýza hydraulického odstraňování okují byla provedena pro podrobný rozbor a popis tohoto procesu. Proces hydraulického odstraňování okují je velice specifický a komplikovaný. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí zkoumat tento problém komplexně. Komplexní analýza spočívala v rozdělení zkoumání na experimentální a výpočetní část.

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK VODNÍHO PAPRSKU

Experimentální měření charakteristik vodního paprsku bylo prováděno v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Byly připraveny dva typy měření. V prvním případě byl měřen součinitel přestupu tepla (HTC), který charakterizuje intenzitu chlazení dopadajícího paprsku vody. Ve druhém případě byl měřen impaktní tlak, který reprezentuje tlakovou sílu vodního paprsku působícího na volný povrch vzorku. Obě charakteristiky byly měřeny na standardním typu vodního paprsku (viz Obr. 1) a na pulzujícím vodním paprsku (viz Obr. 2). Standardní paprsek vody je charakteristický konstantním tlakem v potrubí, potažmo v celém průběhu měření. Pulzující vodní paprsek se vyznačuje proměnným tlakem v potrubí.



Obr. 1 Standardní vodní paprsek



Obr. 2 Pulzující vodní paprsek

3.1.1 Měření součinitele přestupu tepla

Měření součinitele přestupu tepla bylo provedeno na zařízení, které je schematicky zobrazeno a popsáno na Obr. 3. Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, experimentální měření bylo prováděno pro dva typy vodních paprsků. Pro

standardní typ vodního paprsku je hydraulická soustava složená z vysokotlakého vodního potrubí, kolektoru se stabilizátorem a odkujovací trysky. Pro pulzující vodní paprsek bylo nutné tuto soustavu rozšířit o ultrazvukový pulsátor, který byl namontován před kolektor se stabilizátorem. Experimentální měření probíhalo tak, že se nerezová deska osazená termočlánky v elektrické peci za daných podmínek nahřála na požadovanou teplotu. Poté byla vsazena na pojezdný vozík a stanovenou rychlostí se nechala projet pod odkujovací tryskou. Po celou dobu průjezdu byla pomocí zabudovaných termočlánků a snímačů polohy měřena a zaznamenávána teplota a poloha desky.

Experimentální měření, která byla prováděna, jsou uvedena v Tab. 1.



1. Lineární trať
2. Pojezdný vozík
3. Nerezová deska s termočlánky
4. Odkujovací trysky

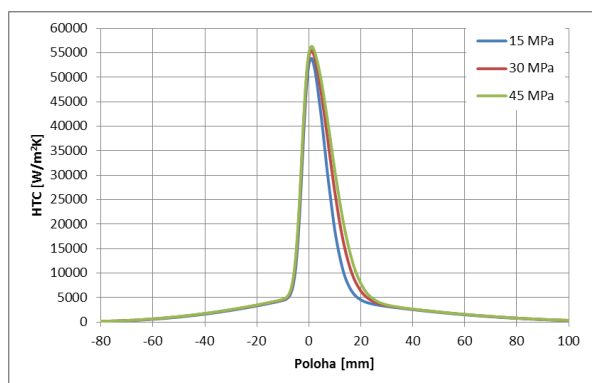


Obr. 3 Experimentální zařízení pro měření HTC v Laboratoři přenosu tepla a proudění

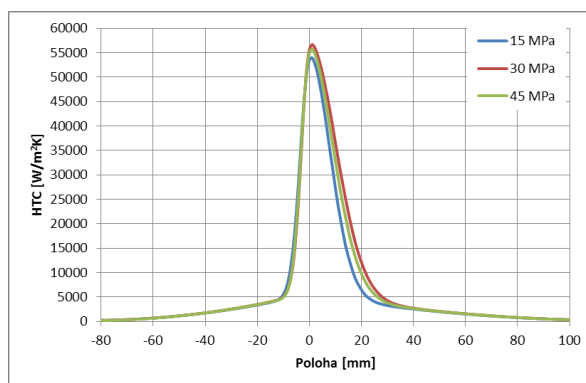
Tab. 1 Tabulka experimentů HTC se změřenými veličinami

Experiment	Vzdálenost trysky [mm]	Tlak [MPa]	Rychlost [m/s]	Počáteční teplota [°C]	Teplota vody [°C]
1	100	15	5	1050	14
2	100	30	5	1050	14
3	100	45	5	1050	14
pulzace					
1	100	15	5	1050	17
2	100	30	5	1050	17
3	100	45	5	1050	17

Výsledky experimentálního měření a následného převodu dat na hodnoty součinitele přestupu tepla byly vyhodnoceny pro všech šest uvedených měření. Výsledky byly rozděleny podle typu vodního paprsku. Vliv tlaku vody na průběh součinitele přestupu tepla pro standardní typ vodního paprsku je uveden na Obr. 4. Jak je vidět z uvedených průběhů, nejvyšší hodnoty součinitele přestupu tepla bylo dosaženo pro nejvyšší tlak vody 45 MPa. Zároveň tato konfigurace dosahovala nejširší oblasti pod křivkou. Se snižujícím tlakem vody klesala hodnota HTC i plocha pod křivkou. Výsledky součinitele přestupu tepla pro pulzující vodní paprsek jsou prezentovány na Obr. 5. Z uvedených průběhů HTC je vidět, že vliv pulzujícího vodního paprsku na součinitel přestupu tepla pro danou konfiguraci není zásadně odlišný od standardního vodního paprsku. Výsledné hodnoty HTC byly pro oba typy vodních paprsků srovnatelné.



Obr. 4 Hodnoty HTC pro standardní vodní paprsek

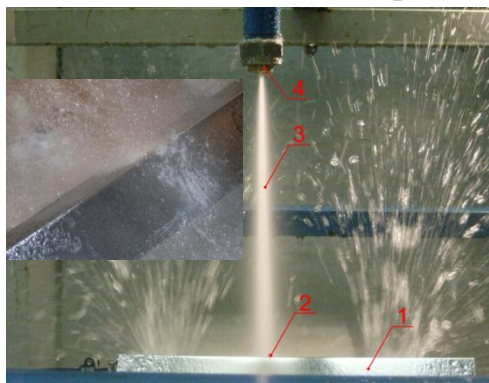


Obr. 5 Změřené hodnoty HTC pulzujícího paprsku

3.1.2 Měření impaktního tlaku

Impaktní tlak je jedním z nejdominantnějších parametrů hydraulického odstraňování okují. Pomocí tohoto parametru je možné posoudit účinnost odkujovací trysky a tedy v některých případech i kvalitu odkujeného povrchu. Tento parametr byl definován jako podíl síly (která je funkcí tlaku a průtoku vody) a plochy, na kterou dopadá (stopa trysky).

Pro zjišťování hodnot impaktního tlaku při odpovídajícím tlaku vody v hydraulické soustavě bylo provedeno šest experimentálních měření. Všechny tyto experimenty byly prováděny při stejných podmínkách jako experimenty na zjišťování hodnot HTC. Nezávislou proměnnou tedy byl opět tlak vody a závislou proměnnou průběh impaktního tlaku. Experimentální měření bylo prováděno při tlacích 15 MPa, 30 MPa a 45 MPa. Měření impaktního tlaku bylo stejně jako při měření HTC zkoumáno pro dva typy vodního paprsku. V prvním případě to byl standardní vodní paprsek, ve druhém případě pulzující vodní paprsek. Měřicí zařízení pro stanovení velikosti impaktního tlaku od paprsku vody je zobrazeno na Obr. 6. Měření impaktního tlaku je zaznamenáváno v uzlových bodech pravidelné sítě. Měření probíhá tak, že tělo se snímačem podle předem nadefinované sítě měřených pozicí najede do každého uzlu a změří v něm hodnotu tlaku dopadajícího vodního paprsku. Tyto hodnoty zaznamená spolu s pozicí do počítače. Po projetí všech uzlů sítě je měření ukončeno. Výsledkem takto naměřených hodnot je prostorové rozložení hodnot impaktního tlaku pro danou trysku.

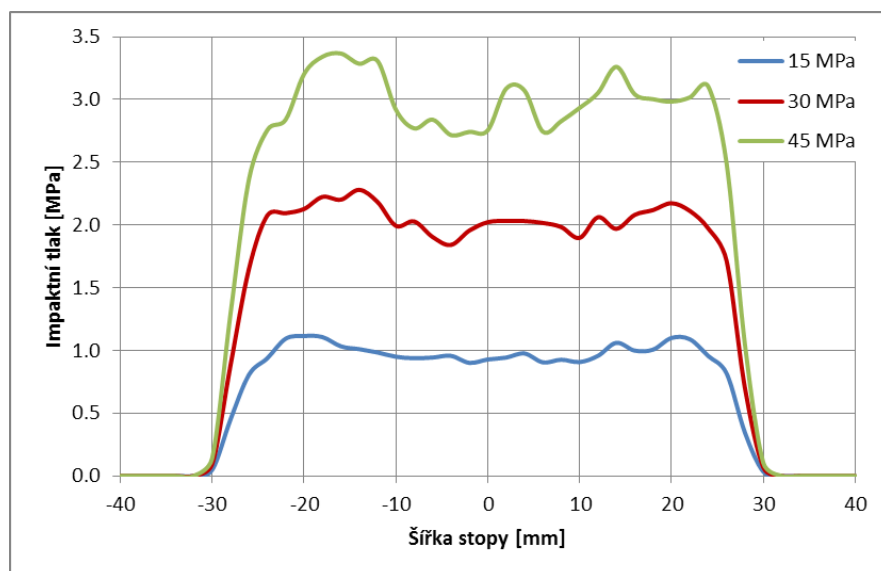


1. Tělo zařízení
2. Tenzometrický snímač
3. Vodní paprsek
4. Tryska

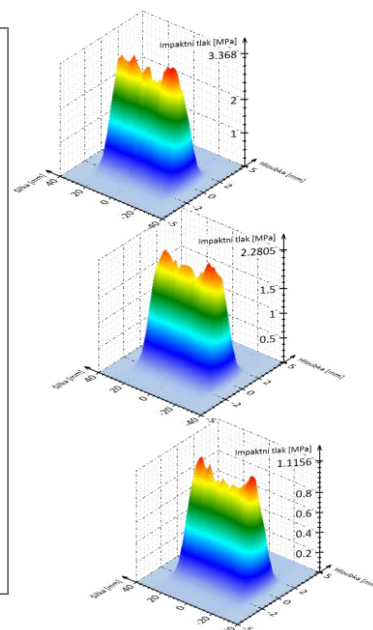
Obr. 6 Experimentální měření impaktního tlaku pro danou trysku

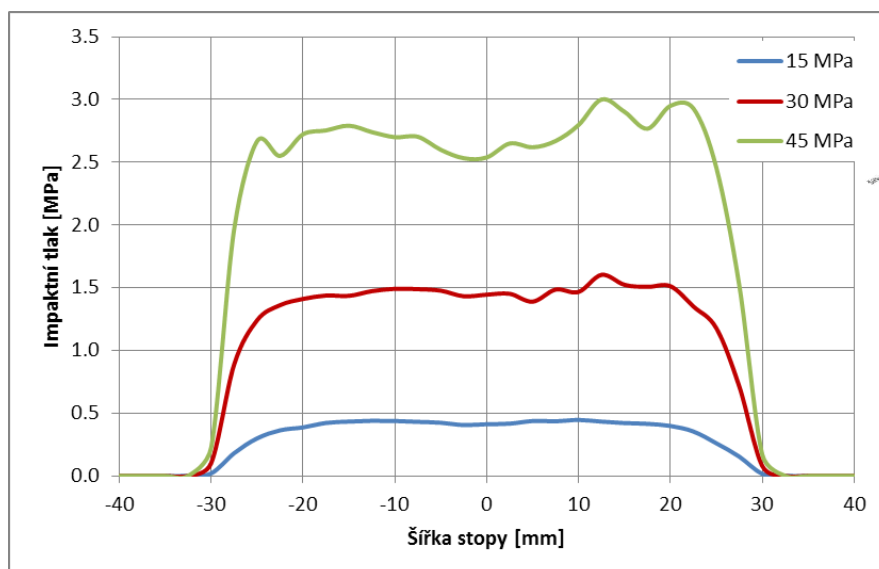
Měření impaktního tlaku vyvolaného odpovídajícím vodním paprskem ovlivněným hydraulickou soustavou včetně odkujovací trysky bylo měřeno tenzometrickým snímačem o průměru 2 mm. Měření probíhalo ve dvou na sebe kolmých směrech, proto byla měřená hodnota impaktního tlaku proměnná na aktuální poloze snímače. Výsledkem výše popsané metody měření impaktního tlaku je jeho prostorové rozložení. Zpracování experimentálních dat získaných při měření hodnot impaktního tlaku spočívá v přepočtu změřených dat. Přepočet je nutný z důvodu rozměru měřicího senzoru, jehož průměr zkresluje změřené hodnoty. Naměřené hodnoty impaktního tlaku jsou tedy částečně zkresleny plochou senzoru, větší plocha snižuje skutečnou velikost impaktního tlaku a rozšiřuje hloubku stopy trysky. Z tohoto důvodu jsou měřená data přepočtena dle metodiky vyvinuté v Laboratoři přenosu tepla a proudění na skutečné hodnoty impaktního tlaku a skutečnou šířku stopy.

Přepočtená a vyhodnocená data pro standardní typ vodního paprsku jsou uvedena na Obr. 7 a Obr. 8. Jak je vidět ze srovnání jednotlivých křivek, maximální hodnoty impaktního tlaku respektují velikost tlaku vody v hydraulické soustavě. Stejně jako pro standardní vodní paprsek, tak i pro pulzující odpovídaly maximální hodnoty impaktního tlaku maximální hodnotě tlaku vody. Při srovnání průběhů impaktních tlaků standardního vodního paprsku a pulzujícího vodního paprsku je vidět, že vyšších hodnot bylo dosaženo ve všech měřených konfiguracích pro standardní vodní paprsek zhruba o 0,5 MPa při stejné šířce stopy trysky. Hloubka stopy trysky byla při standardním typu vodního paprsku pro všechny měřené tlaky zhruba stejná, při pulzujícím vodním paprsku se hloubka stopy se zvyšujícím tlakem vody zkracovala.

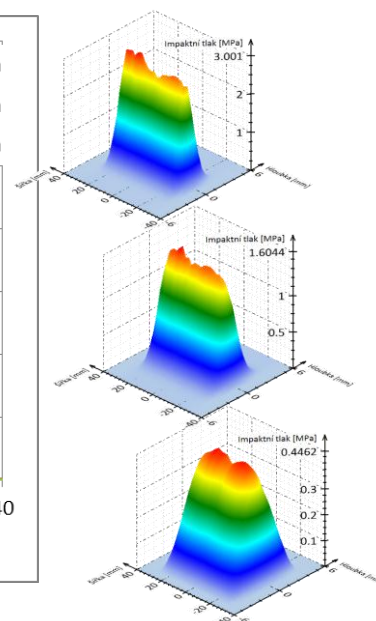


Obr. 7 Změřené hodnoty impaktního tlaku





Obr. 8 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci



3.2 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ VODNÍHO PAPRSKU

Pro výpočtové modelování vodního paprsku byla zvolena metoda konečných prvků v programu Ansys. Výpočtové modelování bylo zaměřeno na analýzu hydraulického odstraňování okují.

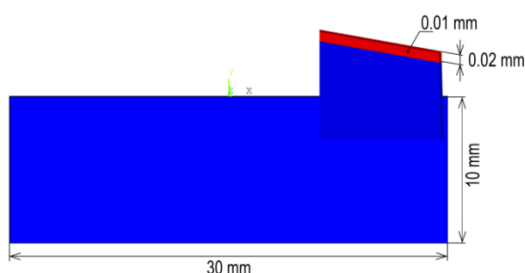
Hydraulické odstraňování okují je možné rozdělit na dvě složky. První složka je teplotní. Reprezentuje ji teplotní gradient mezi intenzivně ochlazovanou tenkou vrchní vrstvou okují a zbylou masivní horkou částí oceli. Druhá složka je mechanická, která je způsobena vysokým tlakem vodního paprsku. V analýze hydraulického odstraňování okují bylo sledování jednotlivých složek prováděno ze dvou hledisek. Z makro-hlediska, kdy bylo pohlíženo na hydraulické odkujování jako na kontinuální vodní paprsek s definovaným přestupem tepla a definovaným impaktním tlakem. Z mikro-hlediska, kdy byl vodní paprsek hydraulického odkujování dekomponován na jednotlivé kapky vody. Kapka měla také definovanou hodnotu součinitele přestupu tepla a impaktního tlaku. Obě tato hlediska byla rozdělena dle měřených typů vodních paprsků popsanych v přechozí kapitole. Standardní vodní paprsek má převážně kompaktnější strukturu. Vliv standardního vodního paprsku z hlediska mechanického a teplotního byl analyzován v rámci makro hlediska. Pulzující vodní paprsek je složen z většího počtu vodních kapek, a proto analýza pulzujícího vodního paprsku více odpovídá tzv. mikro hledisku. U mikro hlediska byl analyzován vliv mechanické a teplotní složky samostatné kapky vody s definovanými parametry.

3.2.1 Výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují

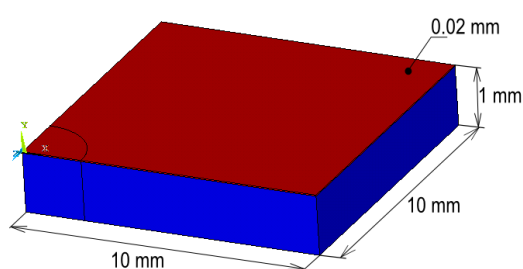
Metodologie výpočtu byla zvolena na základě stanoveného cíle. Výpočtové modelování, které bylo aplikováno jako metoda řešení bylo prováděno z makro a mikro hlediska. Oba přístupy přinesly kvalitativně stejné výsledky, které bylo možné

srovnat. Pro oba přístupy byla použita stejná metodika výpočtu. U makro hlediska byly použity experimentálně naměřené okrajové podmínky a byl vytvořen odpovídající model geometrie. Pro mikro hledisko byly okrajovými podmínkami data z literatury a také byl připraven model geometrie. V obou přístupech byl použit stejný model materiálu. Po vytvoření všech potřebných modelů byla provedena transientní teplotní analýza. Výsledkem této analýzy bylo rozložení teplotního pole v modelu. Na základě těchto dat byla poté provedena deformačně napjatostní analýza. Dalším výpočtem provedeným na modelu byla strukturální analýza, zaměřená na vyšetření vlivu impaktního tlaku na napjatost v tělese. Tento postup byl aplikován jak pro makro, tak pro mikro hledisko.

Model geometrie byl připraven na základě předchozích výpočtů s ohledem na geometrii vzorků používaných v Laboratoři přenosu tepla a proudění při odkujovacích experimentech nebo při měření součinitelů přestupu tepla. Model geometrie je složen ze dvou částí. První robustní část tvořil základní materiál (ocel) a druhou část tvořila tenká vrstva okují. Vrstva okují nebyla dále členěná a byla souvislá. Geometrickými rozměry se modely lišily (viz Obr. 9 a Obr. 10). Model geometrie je složen ze dvou typů materiálů. Z důvodu kombinace teplotní a strukturální úlohy byly použity materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě. Materiálové vlastnosti použité pro ocel přibližně odpovídají hodnotám pro konstrukční ocel S235[1][2]. Materiálové vlastnosti vrstvy oxidů odpovídají hodnotám pro wüstit (FeO)[3][4].



Obr. 9 Model geometrie pro makro hledisko

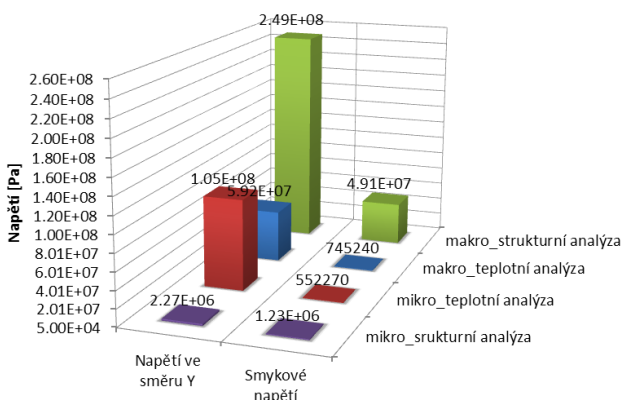


Obr. 10 Model geometrie pro mikro hledisko

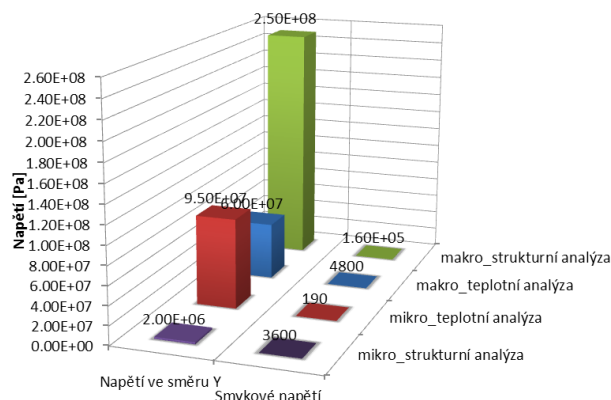
Pro makro hledisko byly stanoveny následující okrajové podmínky a zatížení. Teplotní okrajové podmínky byly definovány konstantní hodnotou teploty modelu, která byla 1000°C. Strukturální okrajové podmínky aplikované na model geometrie, byly zvoleny tak, aby simulovaly reálné chování teplotně a mechanicky zatěžovaného vzorku. Proto byly na příslušné plochy zadány tak, aby v odpovídajícím směru zamezovaly, či umožňovaly posuvy. Pro teplotní úlohu byl použit průběh funkce HTC v závislosti na poloze. Zatížením vstupujícím do strukturální úlohy byl průběh funkce impaktního tlaku vodního paprsku na poloze. Stejně jako v předchozím případě byly pro mikro hledisko teplotní okrajové podmínky stanoveny konstantní hodnotou teploty modelu, která byla 1000°C.

Výpočtová analýza byla rozdělena a následně vyhodnocena ze dvou hledisek. Prvním byla analýza (standardního typu) vodního paprsku z makro hlediska, kde byl uvažován celý kompaktní vodní paprsek. Pro tento přístup byly sledovány hodnoty

ochlazení povrchu vzorku vlivem přestupu tepla a následné hodnoty napětí ve směru působení impaktního tlaku a smykového napětí od teplotního a tlakového zatížení. Tyto hodnoty byly sledovány jak pro ocelovou část vzorku, tak pro část z okují. Druhým způsobem byla analýza (pulzujícího) vodního paprsku z mikro hlediska, kde byla uvažována jedna kapka vodního paprsku. V tomto případě bylo postupováno stejným způsobem jako u předchozího případu. Sledovanými veličinami byly teplota povrchu, tlakové a smykové napětí. Shrnutí dosažených výsledků a srovnání jednotlivých složek napětí pro oba přístupy jsou prezentovány na Obr. 11 a Obr. 12.



Obr. 11 Vyhodnocení složek napětí v základním materiálu pro všechny analýzy



Obr. 12 Vyhodnocení složek napětí v okujích pro všechny analýzy

3.3 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola byla zaměřena na analýzu vodního paprsku a jeho vlivu na vrstvu okují při vysokotlakém hydraulickém odstraňování okují. Byl zkoumán standardní vodní paprsek (nepulzující) a pulzující vodní paprsek. Analýza hydraulického odstraňování okují byla prováděna experimentálním měřením a výpočtovou analýzou v programu Ansys.

Experimentální analýza hydraulického odstraňování okují byla prováděna měřením dvou základních a zároveň nejvýznamnějších charakteristik vodního paprsku z pohledu mechanismů porušování vrstev okují. Jak je vidět z dosažených výsledků, vliv tlaku vody na hodnotu a rozložení součinitele přestupu tepla je zanedbatelný jak pro standardní typ vodního paprsku, tak pro pulzující vodní paprsek. Rozdíl změřených hodnot součinitele přestupu tepla standardního vodního a pulzujícího paprsku se ukázal být téměř nulový. Z těchto měření bylo tedy zjištěno, že vliv tlaku vody a typ vodního paprsku nemají pro danou hydraulickou soustavu zásadní vliv na hodnotu impaktního tlaku. Tento závěr je platný pro popsanou hydraulickou soustavu a není možné jej považovat za univerzální. Malé rozdíly ve změřených hodnotách impaktního tlaku mohly být způsobeny volbou odkujovací trysky nebo vzdáleností povrchu od trysky (ta byla 100 mm). Vliv pulzujícího vodního paprsku nebyl výrazný, což mohlo být způsobeno použitím stabilizátoru v kolektoru před odkujovací tryskou.

V experimentální analýze hydraulického odstraňování okují byla druhou měřenou a neméně významnou charakteristikou hodnota impaktního tlaku. Jak je vidět z dosažených výsledků, vliv tlaku vody na maximální hodnotu impaktního tlaku byl lineární. Nejvyšší tlak vody v hydraulické soustavě vyvolal nejvyšší hodnoty impaktního tlaku. Tento vliv byl změřen jak pro standardní, tak pro pulzující vodní paprsek. Jak je také vidět z prezentovaných výsledků, maximální hodnoty impaktního tlaku pro standardní vodní paprsek dosahovaly přibližně o 0,5 MPa vyšších hodnot ve všech měřených režimech než hodnoty impaktního tlaku pro pulzující paprsek. Tento závěr však není možné považovat za všeobecně platný, protože může být ovlivněný volbou odkujovací trysky, která má zásadní vliv na rozložení a velikost impaktního tlaku. Nižší hodnoty impaktního tlaku změřené pro pulzující vodní paprsek, mohou být ovlivněny stejně jako při měření součinitele přestupu tepla použitým stabilizátorem proudu v kolektoru. Dalším zajímavým výsledkem tohoto měření byla šířka stopy vodního paprsku, která byla pro standardní vodní paprsek při všech hodnotách tlaku vody přibližně stejná. U pulzujícího vodního paprsku se šířka stopy zužovala se zvyšujícím se tlakem vody. Tento výsledek potvrdil předpoklad o větší kompaktnosti standardního vodního paprsku a tedy jeho větší stálost při různých provozních režimech. Dále také potvrdil výskyt většího počtu vodních kapek a tedy menší soudržnost pulzujícího vodního paprsku, která právě může přispět k vyvolání tzv. „water hammer“ efektu.

Výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují byla zaměřena na zkoumání jednotlivých vlivů vodního paprsku. Pro oba přístupy bylo ve výpočtové analýze sledováno teplotní pole povrchu vzorku ovlivněné průběhem součinitele přestupu tepla a následné hodnoty napětí ve směru působení zatížení (ve směru Y) a smykového napětí, jak od teplotního tak od mechanického zatížení. Hodnoty teplotního pole a uvedených napětí byly sledovány pro ocelovou část vzorku a pro část z okují. Prezentované výsledky naznačují, že vliv impaktního tlaku na napjatost v povrchové vrstvě okují i v ocelové struktuře je větší pro makro hledisko. Kdežto pro mikro hledisko bylo zjištěno větší namáhání od teplotního zatížení. Tyto výsledky dobře korespondují s výsledky obdrženými při experimentálním měření, kdy hodnoty impaktního tlaku pro standardní vodní paprsek dosahovaly vyšších hodnot než pro pulzující vodní paprsek. Změřené hodnoty součinitele přestupu tepla byly pro oba typy vodního paprsku stejné, vliv teplotního zatížení byl tedy pro pulzující vodní paprsek dominantnější než vliv impaktního tlaku, což se projevilo v mikro hledisku. Tyto závěry jsou však velice omezeny uvažovanými okrajovými podmínkami. I navzdory odlišným hodnotám zatížení bylo dosaženo dobré shody experimentální a výpočtové analýzy.

4 ANALÝZA VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA VODNÍ PAPERSEK

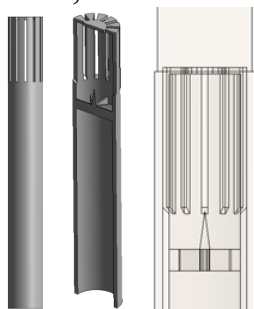
Analýza vlivů působících na vodní paprsek byla připravena pro identifikaci některých parametrů působících na konečné chování vodního paprsku a v konečném důsledku i na kvalitu odkujeného povrchu. Jak již bylo napsáno, vysokotlaká hydraulická soustava je v jednoduchosti složena z vysokotlakého čerpadla, potrubí, kolektoru, stabilizátoru a odkujovací trysky. Všechny tyto komponenty mají určitý podíl a vliv na charakter vodního paprsku. Z experimentálních měření a provozních zkušeností má zásadní vliv typ odkujovací trysky. Vliv vysokotlakého čerpadla a potrubí na základní charakteristiky vodního paprsku byl zkoumán v předchozí kapitole, kdy byl měřen vliv tlaku vody (v podstatě vyvolaný čerpadlem a změnou průřezu potrubí) na součinitel přestupu tepla a hodnotu impaktního tlaku. Dalšími komponentami hydraulické soustavy v těsné blízkosti odkujovací trysky jsou, rozvodní kolektor a stabilizátor. Primární funkcí stabilizátoru je usměrnit proud vody přicházející z potrubí do trysky tak, aby byl konečný paprsek co nejrovnoměrnější a stabilizovaný. V této kapitole byl zkoumán vliv stabilizátoru a kolektoru na základní charakteristiky vodního paprsku. Měřeným parametrem při analýze vlivu stabilizátoru a kolektoru byl průběh a rozložení impaktního tlaku. Dalším krokem v analýze vlivů působících na vodní paprsek byla numerická simulace v programu ANSYS CFX, proudění vody uvnitř kolektoru a stabilizátoru při stejných podmínkách jako byly zkoumány při experimentálním měření.

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLIVU KOLEKTORU A STABILIZÁTORU NA CHARAKTER VODNÍHO PAPERSKU

Experimentální měření vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku bylo prováděno v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Měření bylo prováděno na stejném experimentálním zařízení jako měření impaktního tlaku. Měření impaktního tlaku bylo v tomto případě vyšetřováno v závislosti na konfiguraci hydraulické soustavy. Hydraulická soustava byla složena z vysokotlakého čerpadla, přívodního potrubí, kolektoru, stabilizátoru a dvou typů odkujovacích trysek. Při experimentech byl zkoumán vliv dvou typů stabilizátorů a několika konfigurací kolektoru. Cílem této experimentální analýzy bylo vyšetřit, případně odhalit vliv těchto dvou komponent na rozložení impaktního tlaku.

Aby bylo možné popsat vliv těchto komponent, bylo experimentální měření prováděno na hydraulické soustavě, se dvěma typy odkujovacích trysek a při různých tlakových režimech. První typ odkujovací trysky byl konstruován pro vyšší hodnoty průtoků (dále označován jako typ 1), druhý typ trysky dosahoval menších hodnot průtoků (dále typ 2). Tryska typu 1 byla měřena při tlaku vody v hydraulické soustavě 25 MPa. Pro tento typ trysky byl změřen průtok 2,3 l/s. Druhý typ trysky (typ 2), byl měřen při tlaku vody 10 MPa a naměřená hodnota průtoku byla 1,2 l/s. Při měření byly použity dva typy stabilizátorů. První typ stabilizátoru odpovídal staršímu designu s plochým zakončením (dále bude označován jako typ A). Druhý

typ stabilizátoru byl nové konstrukce se sférickým zakončením (dále typ B). Dalším zásadním rozdílem v konstrukci mezi těmito dvěma stabilizátory bylo uspořádání vnitřního prostoru, které mělo u typu A vnitřní žebra uprostřed spojené ostrým kuželem, na rozdíl od typu B, kdy vnitřní žebra byla na konci volná, a prostředek stabilizátoru byl bez kužele. Konstrukce jednotlivých typů stabilizátorů jsou uvedeny na Obr. 13 a Obr. 14. Při experimentálním měření byly dále použity různé konfigurace kolektorů. Prvním typem kolektoru bylo přímo přírodní potrubí, druhým typem byl ocelový válec o daných rozměrech. Další konfigurace byly připraveny tím, že přírodní potrubí bylo nastaveno v několika úhlech a to konkrétně 0° přímá varianta, 90° zahnutá varianta.



Obr. 13 Konstrukce stabilizátoru typu A



Obr. 14 Konstrukce stabilizátoru typu B



Obr. 15 Přímý kolektor 0°, Zahnutý kolektor 90°, Válcový kolektor

Při experimentálním měření bylo použito několik konfigurací hydraulické soustavy, tři varianty kolektorů, dva typy stabilizátorů a dva typy odkujovacích trysek. Zobrazení jednotlivých variant uvažovaných kolektorů při samotném průběhu měření je uvedeno na Obr. 15.

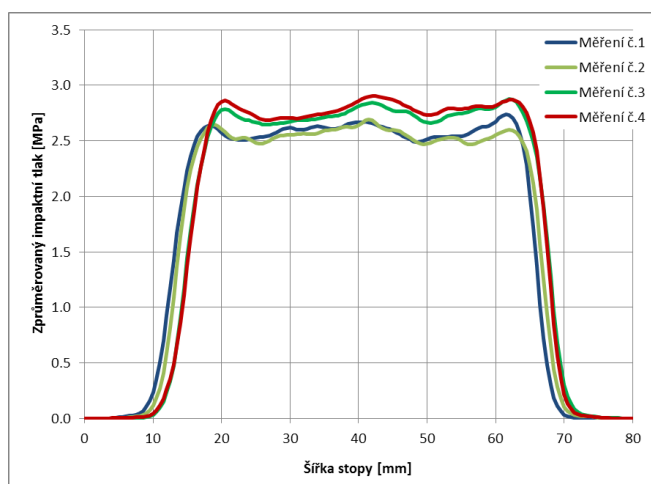
Samotná realizace měření spočívala v postupném nastavení jednotlivých konfigurací hydraulické soustavy se všemi popsány variantami. Při každé variantě byly nastaveny a zaznamenány vstupní parametry experimentálního měření, k nimž patřil tlak vody v hydraulické soustavě, výška ostříku, objemový průtok.

Tab. 2 Seznam všech měřených konfigurací a jejich parametry

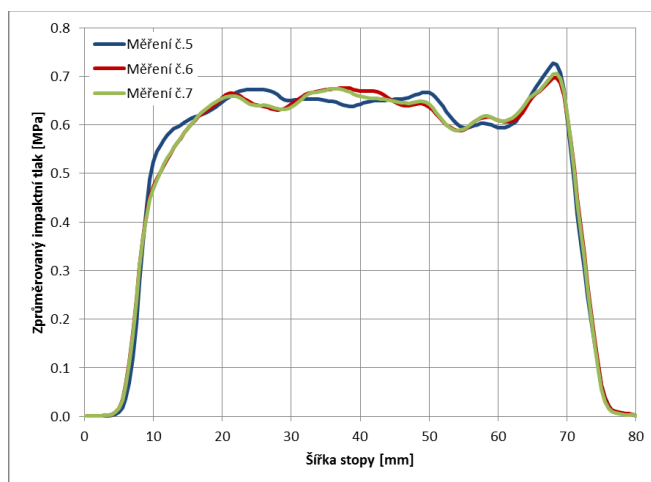
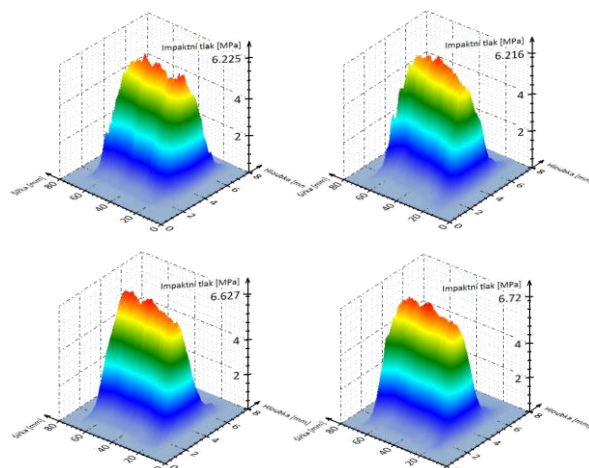
Číslo měření	Tryska	Stabilizátor	Tlak vody	Výška ostříku	Kolektor
1	1	A	25 MPa	100 mm	Válcový
2	1	A	25 MPa	100 mm	Válcový
3	1	A	25 MPa	100 mm	Přímý 0°
4	1	A	25 MPa	100 mm	Zahnutý 90°
5	2	B	10 MPa	100 mm	Přímý 0°
6	2	B	10 MPa	100 mm	Zahnutý 90°
7	2	B	10 MPa	100 mm	Zahnutý 90°

Při měření vlivu kolektoru a stabilizátoru byla jako závislá proměnná měřena hodnota impaktního tlaku. Výsledkem měření hodnot impaktního tlaku bylo opět jeho trojrozměrné rozložení, kdy na horizontálních osách je šířka resp. hloubka stopy trysky a na vertikální ose je vynesena hodnota impaktního tlaku.

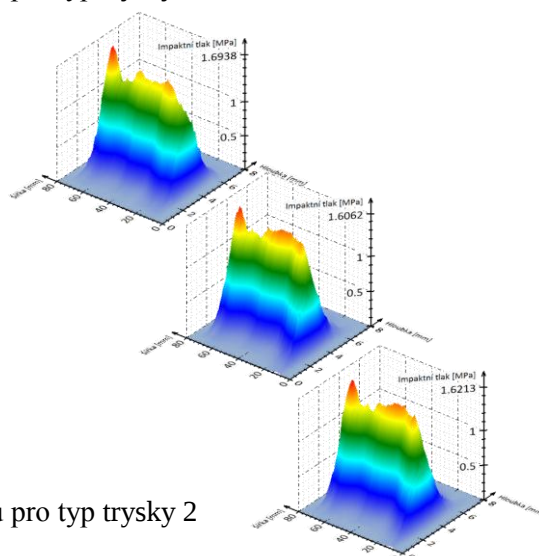
Vliv kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku byl měřen na dvou typech odkujovacích trysek. Z naměřených a následně vyhodnocených prostorových dat bylo zjištěno, že obě trysky vytvářely tenkou stopu, která dosahovala hloubku zhruba 4 mm a šířku 60 mm pro typ trysky 1 resp. 70 mm pro typ 2. Z vyhodnocených výsledků je také patrné, že stopa trysky pro kombinaci typ trysky 1 se stabilizátorem A měla pravidelný obdélníkový profil. U výsledků změřených hodnot impaktního tlaku pro kombinaci trysky typu 2 se stabilizátorem B se objevil výrazný vrcholek s vyšší hodnotou impaktního tlaku na jedné straně stopy trysky. Tato nerovnoměrnost ve stopě vodního paprsku mohla být s největší pravděpodobností způsobena nějakou výrobní nepřesností na straně stabilizátoru nebo spíše na straně odkujovací trysky. Pro lepší srovnání vlivu kolektorů a stabilizátorů na oba typy trysek, bylo provedeno zprůměrování změřených hodnot impaktního tlaku po hloubce (0 až 8 mm). Takto zprůměrované hodnoty impaktního tlaku jsou prezentovány na Obr. 16 pro typ trysky 1 a pro typ trysky 2 na Obr. 17.



Obr. 16 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 1



Obr. 17 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 2



4.2 VÝPOČTOVÁ SIMULACE Vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku

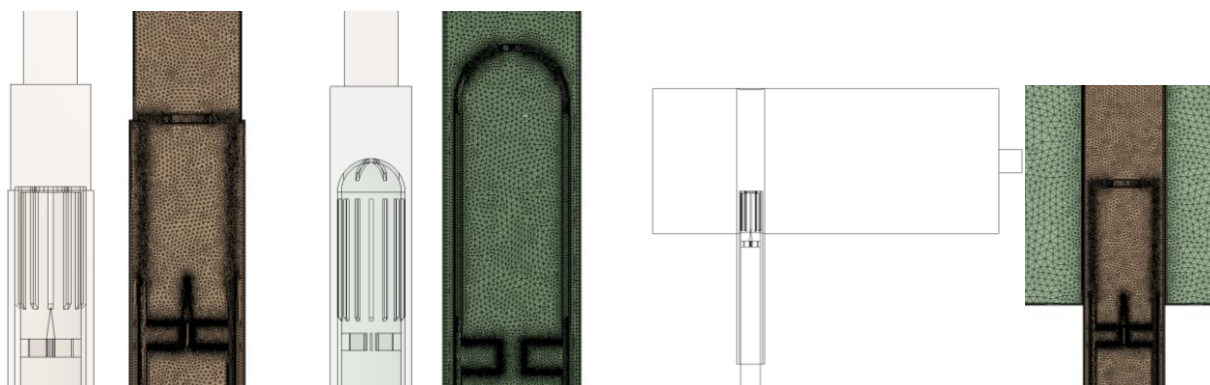
Výpočtová simulace vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku byla připravena pro hlubší analýzu vlivu daných komponent hydraulické soustavy a pro vytvoření detailní prostorové představy o proudění uvnitř kolektoru. Pro splnění těchto cílů byla připravena analýza proudění pomocí numerické simulace označovaná jako CFD (Computational Fluid Dynamics) ve výpočtovém programu ANSYS CFX. Tato metoda byla pro řešení stanovených cílů vybrána z důvodu širokých výpočtových možností a zejména možnosti vytvoření simulace provedených experimentálních měření s následným prostorovým zobrazením výsledků. Výpočtová simulace byla zaměřena na modelování proudění vody v kolektoru se stabilizátorem na základě experimentálních měření uvedených v předchozí kapitole. Výpočtová simulace proudění byla prováděna na základě experimentálních měření popsaných v předchozí kapitole. CFD analýza použitá pro simulaci proudění byla připravena tak, aby bylo možné popsat proudění vody uvnitř kolektoru a stabilizátoru.

Metodika řešení spočívala v přípravě odpovídajících CFD modelů všech konfigurací kolektorů a stabilizátorů použitých při experimentálním měření. Na základě takto připravených modelů byly provedeny výpočty jednotlivých variant pro zjištění vlivu kolektoru a stabilizátoru. Tabulka provedených výpočtů je uvedena níže (viz Tab. 3). Okrajové a počáteční podmínky odpovídaly zaznamenaným hodnotám při experimentálním měření.

Tab. 3 CFD analýzy vlivu kolektoru a stabilizátoru

Simulace	Stabilizátor	Tlak vody	Kolektor
1	A	25 MPa	Válcový
2	A	25 MPa	Přímý 0°
3	A	25 MPa	Zahnutý 90°
4	B	25 MPa	Válcový
5	B	25 MPa	Přímý 0°
6	B	25 MPa	Zahnutý 90°

Model geometrie použitý pro CFD simulaci byl vytvořen na základě odpovídajících konfigurací kolektoru a stabilizátoru. Z daných geometrií byla vytvořena skutečná proudová doména odpovídající vodnímu prostoru definovanému konstrukcí kolektoru a uložením stabilizátoru, pro všechny uvažované konfigurace. Jednotlivé proudové domény zahrnovaly část vstupního potrubí, vodní prostor uvnitř kolektoru se stabilizátorem a krátkou výstupní část před tryskou. Proudová doména byla modelována jako symetrická, proto byla při výpočtech použita pouze polovina modelu. Proudová doména byla jednoznačně ohraničena vstupem („inlet“) a výstupem („outlet“). Modely jednotlivých proudových domén odpovídajících konfigurací jsou uvedeny na Obr. 18.



Obr. 18 Modely geometrie jednotlivých konfigurací a odpovídající proudové domény

Výpočtová simulace byla připravena dle experimentálního měření a měla za cíl analyzovat proudění uvnitř kolektoru a zjistit tak vliv jednotlivých konfigurací kolektoru a stabilizátoru. Pro CFD analýzy a všechny uvažované konfigurace byly vyhodnocovány základní charakteristiky hydraulické soustavy. Mezi základní monitorované charakteristiky patřily např. celkový tlak na vstupu a výstupu nebo rychlost na vstupu a výstupu. Všechny sledované veličiny a jejich hodnoty pro odpovídající výpočtové konfigurace jsou uvedeny v Tab. 4. V těchto tabulkách jsou také pro odpovídající varianty uvedeny hodnoty tzv. ztrátového koeficientu, který je bezrozměrný. Tento parametr byl vyhodnocován pro jasné posouzení jednotlivých konfigurací hydraulické soustavy pomocí jednoho bezrozměrného parametru, který není závislý na měření. Ztrátový koeficient byl vypočten dle rovnice 1, a je možné ho interpretovat jako charakteristiku dané soustavy. Hodnota ztrátového součinitele vyjadřuje velikost odporu, který klade daná soustava proudící kapalině. Na základě tohoto parametru je tedy možné říci, že vyšší hodnota ztrátového koeficientu odpovídá vyšší hodnotě energie potřebné k překonání dané konfigurace.

$$\text{ztrátový_koeficient} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

Tab. 4 Zkoumané veličiny při CFD analýze vlivu kolektoru a stabilizátoru

Stabilizátor A					
Kolektor	Celkový tlak na vstupu	Celkový tlak na výstupu	Rychlost na vstupu	Rychlost na výstupu	Ztrátový koeficient
	[MPa]	[MPa]	[m/s]	[m/s]	[-]
Válcový	0.1395	0.0534	7.42	10.20	3.143
Přímý 0°	0.2357	0.0529	13.13	10.20	2.126
Zahnutý 90°	0.2428	0.0531	13.13	10.20	2.208
Stabilizátor B					
Válcový	0.1468	0.0542	7.42	10.21	3.379
Přímý 0°	0.1856	0.0533	13.13	10.20	1.539
Zahnutý 90°	0.2083	0.0533	13.13	10.20	1.804

4.3 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole byl vyšetřován vliv kolektoru a stabilizátoru na základní charakteristiky vodního paprsku. Cílem tohoto zkoumání byla analýza a zhodnocení dalších komponent hydraulické soustavy, jiných než typ odkujovací trysky nebo

výkon vysokotlakého čerpadla, které se považují za nejdůležitější při ovlivnění vodního paprsku a tedy kvality odkujeného povrchu.

Experimentální měření bylo prováděno při tlaku vody 25 MPa a 10 MPa. Celkem bylo připraveno a změřeno sedm experimentů. Pro všechny tyto experimenty byl změřen a vyhodnocen průběh impaktního tlaku. Prostorové zobrazení výsledků ukazuje symetrii v případě trysky typu 1 se stabilizátorem A nebo určitou míru asymetrie v případě kombinace trysky typu 2 se stabilizátorem B. Tato asymetrie, která je jasně viditelná na rozložení impaktního tlaku, mohla být způsobena výrobní nepřesností jedné z použitých komponent. Z těchto výsledků je vidět, že jsou při použití válcového kolektoru změřené hodnoty impaktního tlaku nižší než při přímém nebo zahnutém kolektoru. Při srovnání zprůměrovaných hodnot impaktního tlaku po hloubce stopy vodního paprsku bylo zjištěno, že rozdíl mezi válcovým kolektorem a přímým kolektorem způsobuje rozdíl 6,2% v případě konfigurace odkujovací trysky typu 1 a stabilizátoru A. Pro konfiguraci odkujovací trysky typu 2 a stabilizátoru B, kde byl měřen rozdíl přímého a zahnutého kolektoru při tlaku 10 MPa, byl zjištěn rozdíl ve zprůměrované hodnotě impaktního tlaku maximálně 7,9%. Tato hodnota však nebyla konstantní po celé šířce stopy vodního paprsku, ale byla lokalizována v uvedeném skoku zjištěném při prostorovém zobrazení impaktního tlaku. Při opakování tohoto experimentu byl vyhodnocen maximální rozdíl 2,1%. Dalším důležitým zjištěním obdrženým z vyhodnocení průběhu impaktního tlaku bylo rovnoměrnější a hladší rozložení v případě použití stabilizátoru A. To znamená, že konstrukce stabilizátoru A, který se odlišuje od stabilizátoru B zejména plochým vstupem a vnitřním kuzelem s navazujícími žebry, dosahuje lepšího stabilizačního efektu při usměrňování proudu vody vstupující do odkujovací trysky. Všechny tyto výsledky vedou k jednoznačnému závěru, že významný vliv na charakteristiky vodního paprsku a jeho tvar mají i kolektor a stabilizátor.

Druhý způsob analýzy vlivu kolektoru a stabilizátoru byl založen na vytvoření a provedení CFD analýzy. CFD analýzy jednotlivých kombinací kolektoru a stabilizátoru byly na rozdíl od experimentu prováděny pouze při tlaku vody 25 MPa, byly však prováděny pro všechny tři typy kolektorů se stabilizátorem A i B. Z těchto výsledků je dobře patrný vliv jak kolektoru, tak samotné geometrie stabilizátoru. Pro přímý kolektor je na obou řezech vidět rovnoměrné rozložení proudu vody. V tomto případě bylo pro stabilizátor A dosaženo téměř ideálně kruhového rozložení rychlosti na výstupu, u stabilizátoru B bylo rozložení rychlosti taktéž symetrické, ale spíše eliptického tvaru. U zahnutého kolektoru bylo pro oba typy stabilizátoru dosaženo velice podobných výsledků, kdy rozložení rychlosti bylo významně ovlivněno velikostí zahnutí kolektoru. Toto zahnutí se projevilo na nerovnoměrném rozložení rychlosti přes průřez symetrie a výstupu. I v tomto případě je vidět mírný rozdíl v rozložení u stabilizátoru A, původní kruhový profil je zdeformován zahnutím kolektoru, eliptické rozložení rychlosti pro stabilizátor B je opět patrné a také je zdeformováno stejným způsobem jako u stabilizátoru A. Výsledky prezentované pro válcový kolektor ukazují opět rovnoměrné rozložení pro oba typy stabilizátorů. Další parametr, který byl vyhodnocován ve všech provedených CFD

analýzách pro všechny uvažované konfigurace, se nazýval ztrátový koeficient. Z těchto výsledků je patrné, že největší odpor a tedy i ztráty jsou pro oba typy stabilizátoru při kombinaci s válcovým kolektorem. V tomto případě hodnoty ztrátového koeficientu dosáhly hodnoty 3,143 pro stabilizátor A resp. 3,379 pro stabilizátor B. Naproti tomu nejmenších hodnot ztrátového koeficientu bylo dosaženo pro přímý kolektor. Při srovnání dosažených hodnot ztrátového koeficientu všech typů kolektorů v kombinaci se stabilizátorem A a stabilizátorem B je vidět, že stabilizátor A dosahuje pro všechny typy kolektorů vyrovnanější hodnoty. U stabilizátoru B, jsou hodnoty ztrátového koeficientu ve větším rozptylu. Tento výsledek potvrzuje jeden ze závěrů zjištěných při experimentálním měření, a to, že stabilizátor A je méně citlivý na typ kolektoru.

5 ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OKUJÍ

Předchozí kapitoly byly zaměřeny na zkoumání vlivu jednotlivých parametrů a charakteristik vodního paprsku při vysokotlakém odstraňování okují a tedy potažmo na konečnou kvalitu odkujeného povrchu. Proces odstraňování okují je však velice komplexní a silně nelineární. To znamená, že při hledání efektivního způsobu odkujování a dosažení nejlepší kvality povrchu po tepelném zpracování oceli nestačí analýza hydraulické soustavy, ale také analýza povrchu a struktury okují, které jsou hlavním předmětem zájmu. Různorodost jednotlivých struktur, které při tepelném zpracování oceli vznikají na jejich povrchu, tento problém extrémně rozšiřuje a stěžuje.

Analýza mechanických vlastností okují měla za cíl zjistit a vyšetřit mechanické vlastnosti vybraných typů oceli s odpovídajícími vrstvami okují. Pro řešení této problematiky byly vybrány dva typy oceli. Typ oceli byl zvolen v duchu celé této práce, kdy byly analyzovány a zkoumány uhlíkové (konstrukční) oceli a oceli s vyšším obsahem křemíku. Prvním typem byla uhlíková ocel, jejíž chemické složení přibližně odpovídalo typu 11 308 [5]. Uhlíková ocel byla zvolena z toho důvodu, že okuje, které na ní vznikají, jsou relativně lehce odstranitelné a je tedy možné ji považovat za referenční typ z hlediska kvality odkujeného povrchu. Druhým typem oceli zvolené pro zkoumání vzniklých struktur okují byla ocel, která se využívá v elektrotechnice na výrobu trafoplechů, a je charakteristická vyšším obsahem křemíku. Její chemické složení odpovídalo typu M47-FP [6]. Oba typy oceli a zejména chemické sloučeniny, které byly vytvořeny na jejich povrchu po zokujení, byly podrobeny zkoumání jednotlivých fyzikálních a mechanických vlastností.

5.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OKUJÍ

Pro měření mechanických vlastností okují byla v této práci zvolena protlačovací metoda tzv. „small punch test“ (dále jen SPT). Tato metoda je považována za nedestruktivní, protože jsou pro měření používány vzorky malých rozměrů, které je

možné získat ze zkoumané součástky bez její významné destrukce. Tato metoda je při dodržení určitých předpokladů považována za ekvivalentní metodu s tahovou zkouškou. Pomocí této zkoušky je možné získat stejné parametry jako při provedení tahové zkoušky. Měření mechanických vlastností okujů probíhalo v několika krocích. Samotné přípravě vzorků pro SPT předcházelo měření růstu okujů pro daný materiál a za daných laboratorních podmínek. Pro zjišťování struktury vytvořených okujů, jejich fázového složení a odpovídajících fyzikálních vlastností byla použita rentgenová prášková difrakce (XRD) v kombinaci s analýzou pod elektronovým mikroskopem. Poslední část měření mechanických vlastností okujů byla věnována vyhodnocování a analýze změřených dat, která je pro zvolenou metodu absolutně nezbytná.

5.1.1 Měření mechanických vlastností okujů

Jak již bylo v úvodu kapitoly uvedeno, pro zjišťování mechanických vlastností okujů byla zvolena protlačovací zkouška na malých vzorcích (SPT). SPT zkoušku je možné rozdělit na dva typy. Prvním typem zkoušky je protlačování vzorku při konstantní rychlosti. Výsledkem tohoto měření je závislost síly na prodloužení. Tento typ se považuje za ekvivalentní s tahovou zkouškou. Zkouška při konstantní rychlosti deformace se označuje jako SPT-CDR (constant deflection rate) [7]. Druhým typem SPT zkoušky je protlačování vzorku při konstantní síle. Výsledkem této zkoušky je poté časový průběh prodloužení na čas. Tento typ zkoušky se používá jako creepová zkouška, je označována SPT-CF (constant force)[7].

Zkoumané typy oceli byly podrobeny chemickému rozboru a jejich přesné chemické složení je uvedeno v Tab. 5. Chemické složení oceli má významný vliv na rychlost růstu okujů, dále na jejich strukturu a chemické vazby vytvořené mezi základním materiálem nebo jednotlivými vrstvami okujů. Měření mechanických vlastností zvolenou metodou probíhalo na AV ČR. SPT měření byla prováděna na strojích konstrukce ÚFM AV ČR (viz Obr. 19). Teplota během zkoušky byla udržována konstantní v rozmezí $\pm 0,5$ °C.

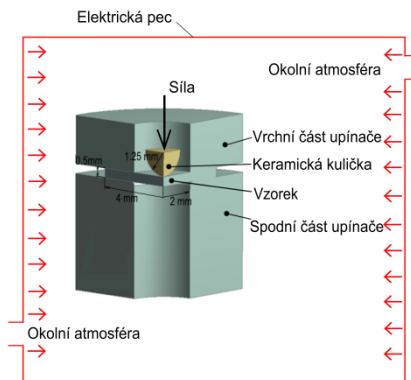
Tab. 5 Chemické složení vzorků pro přípravu okujů

Typ oceli	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Cu (%)	Sn (%)
A	0.035	0.290	0.005	0.006	0.009	0.028	0.130	0.010
B	0.010	0.240	1.140	0.006	0.011	0.050	0.030	0.010

Schématické znázornění rozměrů a uložení vzorku při této zkoušce je uvedeno na Obr. 20. Zkouška, která byla zvolena pro měření mechanických vlastností okujů, odpovídala zkoušce při konstantní rychlosti deformace. Rychlost deformace při samotném měření byla stanovena na hodnotu 0,006 mm/s.



Obr. 19 Experimentální zařízení pro realizaci SPT měření



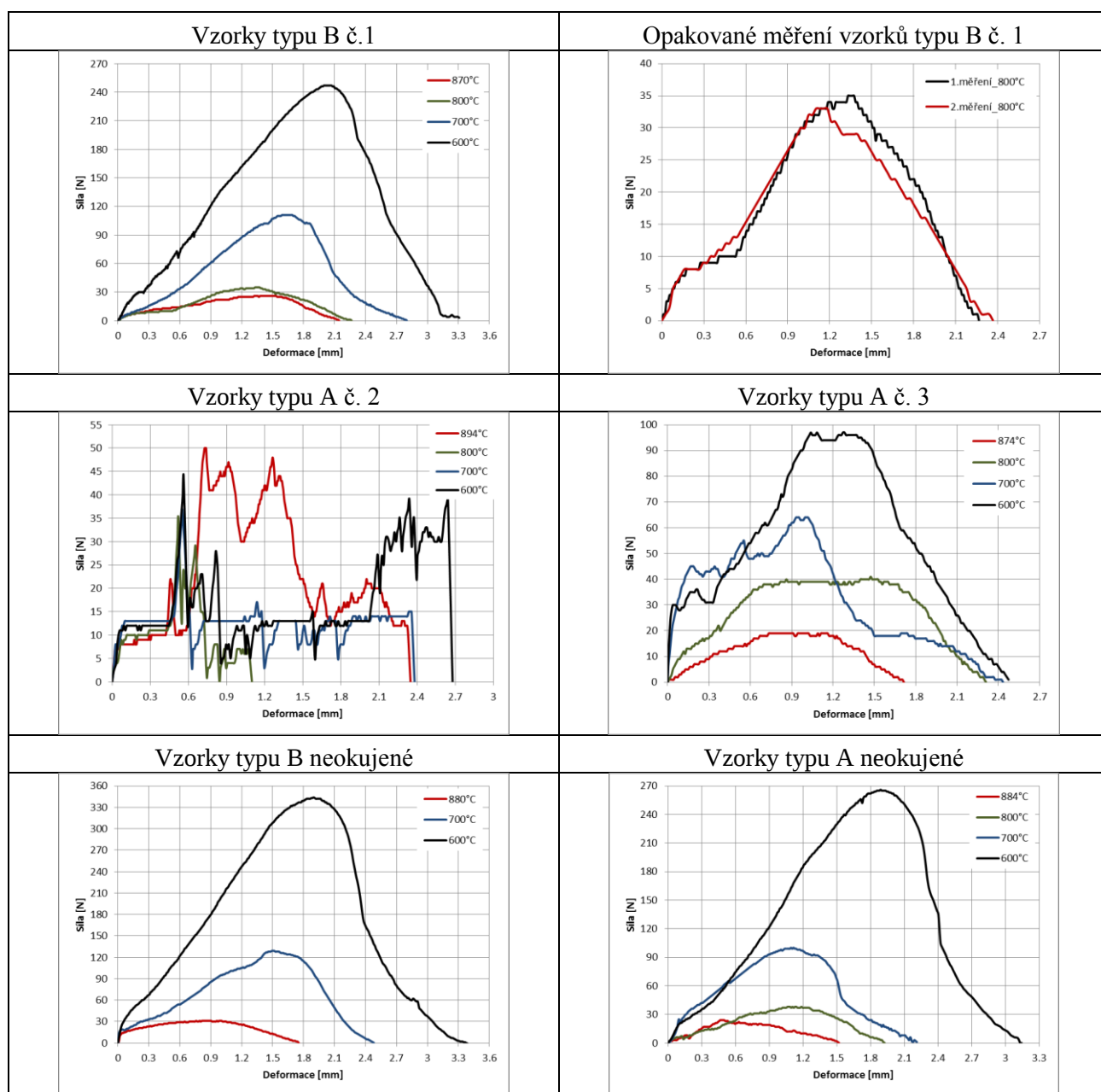
Obr. 20 Schématické zobrazení uložení vzorku a jeho rozměrů

Realizace měření probíhala v několika postupných krocích. Prvním krokem v procesu realizace samotného experimentu byla příprava vzorků. Jak již bylo uvedeno, vzorky pocházely ze dvou rozdílných materiálů. Z těchto materiálů byly pro SPT zkoušku vysoustruženy kruhové vzorky o průměru osm milimetrů a tloušťky půl milimetru. V dalším kroku byly jednotlivé vzorky po stanovenou dobu vystaveny oxidaci v elektrické peci a byly tak vytvořeny okuje v požadované struktuře. Na základě předchozích měření byla přibližně zvolena teplota a čas oxidace vzorků pro dosažení požadované tloušťky vrstvy okují. Hodnoty doby oxidace a teploty, při které oxidace probíhala, jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Čas a teplota při oxidaci jednotlivých vzorků

Typ vzorku	Číslo vzorku	Teplota	Doba oxidace
B	1	1000 [°C]	240 [min]
A	2	1000 [°C]	240 [min]
A	3	1000 [°C]	20 [min]

Zpracování změřených dat spočívalo ve vyhodnocení naměřených záznamů síly v závislosti na deformaci, která je charakteristickým výsledkem SPT měření. Výsledky obdržené z SPT měření pro vzorky č. 1 až 3 jsou uvedeny na Obr. 21. Vzorky č. 1 až 3 se skládaly ze základního materiálu a z vrstvy okují. Aby bylo možné zjistit relevantnost změřených dat, bylo provedeno opakované měření vzorku typu B č. 1 při teplotě 800°C. Jak je z prezentovaných měření patrné, opakovatelnost byla potvrzena (viz Obr. 21). Vzorky č. 2 typ A se skládaly pouze z okují, na nichž po 240 minutách oxidace na teplotě 1000°C nezůstal žádný základní materiál. Změřené výsledky pro vzorky č. 2 typ A jsou uvedeny na Obr. 21. Aby bylo možné srovnat výsledky křemíkových a uhlíkových vzorků, byla připravena sada dalších vzorků (č. 3 typ A), kde zůstala část základního materiálu a byla vytvořena vrstva okují, stejně jako u vzorků č. 1 typ B. Výsledky pro vzorky typu A č. 3 jsou prezentovány na Obr. 21. Poslední měření probíhalo na neokujených vzorcích pro oba typy použitých materiálů. Naměřené výsledky pro neokujené vzorky typu A i B jsou uvedeny na Obr. 21. Změřené křivky síly pro jednotlivé typy vzorků při odpovídajících teplotách respektují předpokládané závislosti, kdy se zvyšující teplotou klesá velikost síly potřebné na porušení vzorku.



Obr. 21 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci

5.2 ANALÝZA DAT

Analýza dat byla rozdělena na dvě části. První část analýzy se se věnovala rozboru a zkoumání vzniklých chemických struktur na jednotlivých vzorcích podrobených SPT měření. Analýza vzniklých okují byla zkoumána kvalitativním přístupem. Kvalitativní přístup studia připravených okují jednotlivých vzorků byl prováděn dvěma způsoby. Prvním způsobem byla analýza tloušťek jednotlivých vrstev vzorku. K tomuto zkoumání byly vybrány pro každý typ oceli (typ A i B) dva vzorky. Tyto vzorky byly podrobeny detailnímu měření za pomoci elektronového mikroskopu. Při tomto zkoumání byly získány fotky jednotlivých vzorků s odpovídajícími vrstvami okují. Druhým způsobem kvalitativní analýzy, která měla

za cíl získat z několika vzorků co nejvíce informací, byla rentgenová prášková difrakce. Tato metoda měla za cíl zjistit fázové složení jednotlivých vrstev okují, jejich chemické sloučeniny a případně fyzikální vlastnosti. Rentgenová difrakce práškového materiálu byla měřena na přístroji X'Pert s využitím $\text{CoK}\alpha$ záření.

Druhá část analýzy dat byla zaměřena na rozbor jednotlivých změřených křivek síla vs. deformace získaných při SPT zkouškách. Pro zásadní a nejobtížnější analýzu dat, která spočívala v převodu změřených průběhů síla vs. deformace na křivky napětí vs. přetvoření, bylo nutné použít optimalizační úlohu. Samotná optimalizační analýza byla provedena v programu ANSYS.

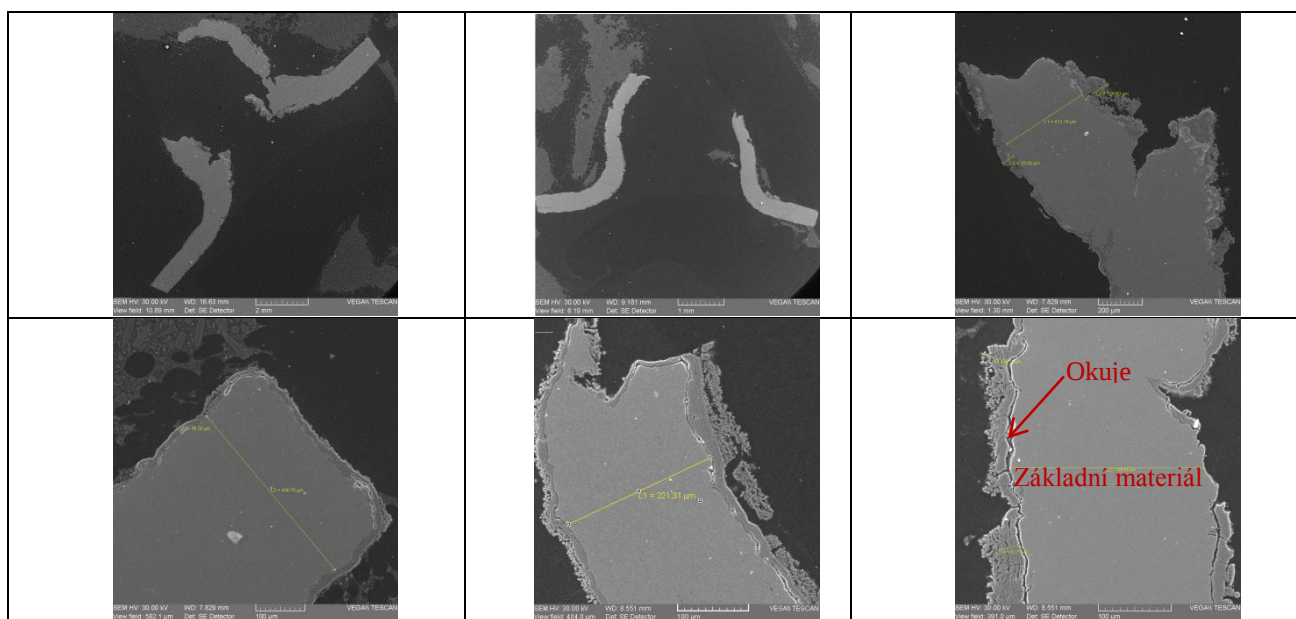
5.2.1 Kvalitativní analýza

Cílem kvalitativní analýzy vzorků bylo prozkoumat strukturu jednotlivých vzorků měřených při SPT zkouškách. Pomocí této analýzy byly zjišťovány tloušťky jednotlivých vrstev, jejich struktura, fázové složení a fyzikální vlastnosti, k nimž patřila zejména hustota odpovídajících chemických sloučenin. Kvalitativní analýza byla prováděna ve dvou krocích. Prvním krokem byla analýza tlouštěk jednotlivých vrstev. Pro tento případ byly vybrány dva vzorky typu A a dva vzorky typu B. Zkoumání tlouštěk bylo prováděno elektronovým mikroskopem značky VEGA-TESCAN. Druhým krokem kvalitativní analýzy vzorků byl rozbor fázového složení jednotlivých vrstev a chemických struktur okují, ke kterému byla použita rentgenová prášková difrakce (XRD). Pro XRD analýzu byl vybrán jeden vzorek z každé skupiny experimentů. Výsledky XRD analýzy přinesly detailní obraz o vzniklých chemických strukturách po procesu oxidace při okolních atmosférických podmínkách, teplotě 1000°C a následného ohřevu na odpovídající teplotu při SPT měření. XRD analýza přinesla informace a fyzikální vlastnosti jednotlivých chemických sloučenin, kterými jsou krystalová mřížka nebo hustota.

Ukázka záznamu z měření pod elektronovým mikroskopem je zobrazena na Obr. 22. Postup při XRD analýze byl následující: jemně namletý prášek byl nanesen v tenké vrstvě na křemíkovou nedifraktující monokrystalovou podložku. U prášku došlo k náhodné orientaci částic a materiál se choval jako polykrystalický. Tím byla dodržena podmínka pro vhodné použití tohoto typu analýzy. Prášková difrakce byla měřena v rozsahu úhlů $10\text{--}125^\circ$ s velikostí kroku $0,008^\circ$ a dobou měření 30s na jeden krok. Z celého rozsahu měřených úhlů byl získán difraktogram, který určil přesný obraz struktury zkoumaného materiálu. Z jejich rozboru byly získány výsledky XRD analýzy, které přinesly obraz o fázovém složení jednotlivých vzorků okují, jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Fázové složení okují pro odpovídající typy vzorků

Typ vzorku	Číslo vzorku	Magnetit	Hematit	Wüstit
B	1	55.8 hm. %	30.3 hm. %	13.9 hm. %
A	2	52.3 hm. %	47.7 hm. %	-
A	3	0.9 hm. %	99.1 hm. %	-



Obr. 22 Vzorky typ B číslo 1 měřeny při teplotě 700°C

Po provedení XRD analýzy bylo možné pro získané struktury vyhodnotit některé jejich fyzikální vlastnosti. Pro jednotlivé chemické sloučeniny byly vyhodnoceny odpovídající hodnoty hustoty (viz Tab. 8) a parametry krystalových mřížek (viz Tab. 9).

Tab. 8 Vypočtené hodnoty hustoty

Typ vzorku	Číslo vzorku	Magnetit	Hematit	Wüstit
B	1	5225.3 kg/m ³	5278.4 kg/m ³	5929.3 kg/m ³
A	2	5197.1 kg/m ³	5275.2 kg/m ³	-
A	3	5198.5 kg/m ³	5275.6 kg/m ³	-

Tab. 9 Změřené parametry krystalové mřížky

Vzorek	Parametry mřížky	a/Å	b/Å	c/Å	alfa/°	beta/°	gamma/°
B	Magnetit	8.3804	8.3804	8.3804	90	90	90
	Hematit	5.0376	5.0376	13.714	90	90	120
	Wüstit	4.3173	4.3173	4.3173	90	90	90
A	Magnetit	8.3955	8.3955	8.3955	90	90	90
	Hematit	5.0333	5.0333	13.745	90	90	120
	Magnetit	8.3948	8.3948	8.3948	90	90	90
A	Hematit	5.0333	5.0333	13.744	90	90	120

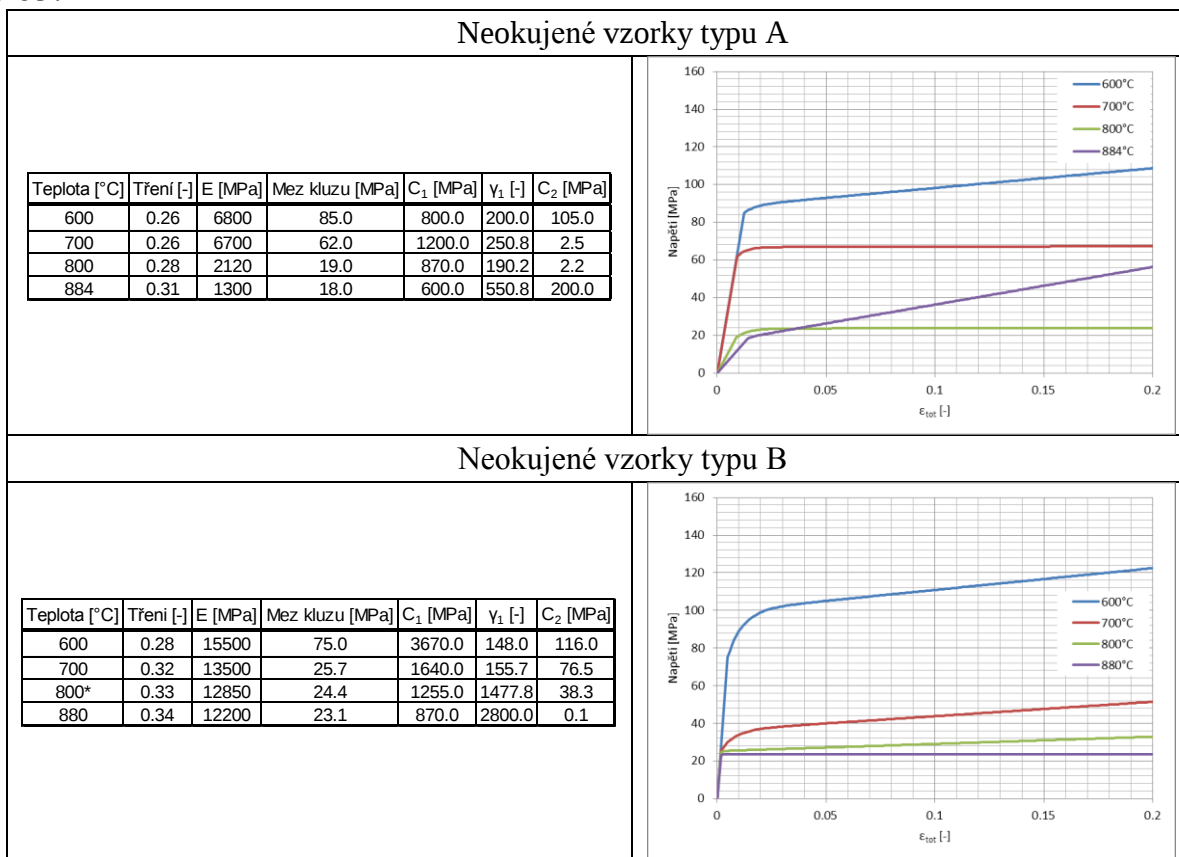
5.2.2 Optimalizace materiálových parametrů

Výsledkem SPT experimentů byla pro každý vzorek změřená závislost síly na deformaci. Jak již bylo v úvodu této kapitoly napsáno, SPT zkouška se dá považovat za analogickou zkoušku ke konvenční tahové zkoušce. Aby to však platilo, je nutné převést změřené závislosti síly na deformaci na křivky napětí vs. přetvoření, které charakterizují odezvu materiálu při mechanickém zatěžování daného materiálu. Základními a zároveň nejvýznamnějšími parametry této křivky jsou potom mez kluzu a mez pevnosti. Hledáním vhodných parametrů pro převod hodnot síly na mezi kluzu a síly na mezi pevnosti na mez kluzu resp. mez pevnosti se věnovalo mnoho autorů, kteří prezentovali několik empirických vztahů. Mezi nejznámější autory patří např. Mao et al.

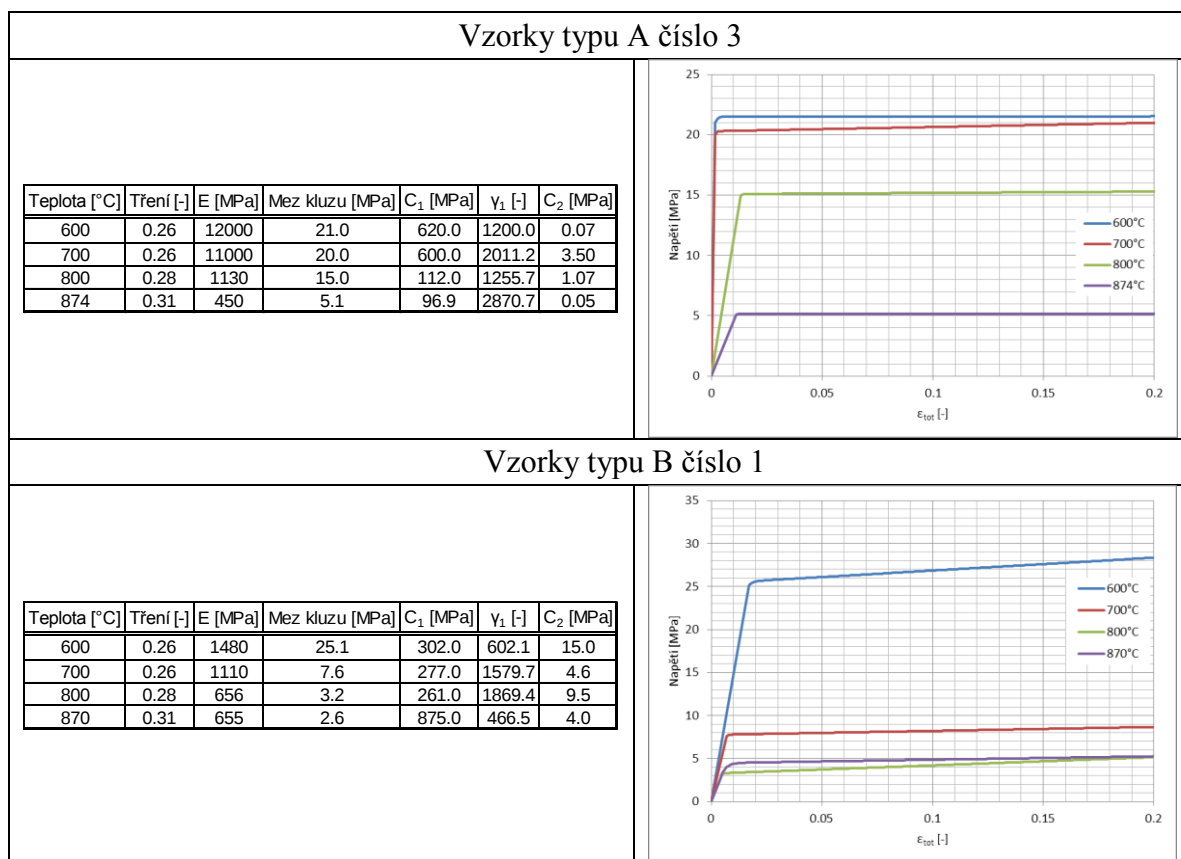
Cílem optimalizace materiálových parametrů tedy bylo nalézt vhodné parametry pro převod změřených křivek na křivky popisující mechanickou odezvu materiálu na zatížení. Metodika řešení byla založena na optimalizaci hledaných parametrů pro převod změřených křivek síla vs. deformace na křivky napětí vs. přetvoření. Pro

optimalizační úlohu byl zvolen výpočtový program Ansys Workbench, ve kterém byla zároveň provedena simulace SPT měření s návazností na optimalizační algoritmus. Řešení probíhalo v několika krocích. V prvním kroku byl vytvořen model odpovídající skutečnému geometrickému uspořádání při SPT zkoušce. Ve druhém kroku byly zvoleny parametry pro optimalizační úlohu. Volba modelu materiálu byla omezená možnostmi programu a možnostmi jejich parametrizace. Jako nejvhodnější kandidát z pohledu parametrizace byl zvolen Chabocheův kinematický model zpevnění. Tento model materiálu je možné definovat podle počtu kinematických zpevnění, pomocí nichž je možné modelovat různé chování materiálu. V tomto případě byl zvolen dvou – kinematický Chabocheův model s hodnotou $\gamma_2=0$ [8] [9]. Tento model materiálu je schopen popsat elasto-plastickou křivku a v tomto tvaru byl definován čtyřmi parametry. Mezi tyto parametry patří hodnota meze kluzu a materiálové konstanty C_1 , γ_1 a C_2 . Jako další parametry pro optimalizační úlohu byly zvoleny modul pružnosti a koeficient tření mezi indentorem a vzorkem.

Výsledky optimalizace materiálových parametrů pro jednotlivé vzorky při odpovídajících teplotách jsou prezentovány na Obr. 23 a Obr. 24. Data z SPT měření neokujeného vzorku typu B při teplotě 800°C byla poškozená a nebylo možné je dále použít, proto byly materiálové parametry pro tuto teplotu odhadnuty pomocí lineární interpolace z dat pro 700°C resp. 880°C. Hodnoty optimalizovaných parametrů neokujených vzorků byly aplikovány jako materiálové vlastnosti odpovídajícího základního materiálu při optimalizaci vzorků typu B číslo 1 a typu A číslo 3.



Obr. 23 Optimalizované parametry a křivky napětí vs. přetvoření pro neokujené vzorky



Obr. 24 Optimalizované parametry a křivky napětí vs. přetvoření pro okujené vzorky

5.3 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola byla věnována analýze mechanických vlastností okují. Cílem této analýzy bylo prozkoumat náročnost měření mechanických vlastností okují, zvolit metodu měření, provést měření na zokujených vzorcích, analyzovat typy připravených okují a získat jejich mechanické vlastnosti.

Pro analýzu mechanických vlastností okují byla zvolena metoda s názvem „Small Punch Test“. Pro experimentální měření byly zvoleny dva typy oceli (konstrukční ocel, ocel s vyšším obsahem křemíku). Celkem bylo připraveno pět sad měření. První sada měření byla provedena na nezokujených vzorcích z konstrukční oceli (typ A) v rozmezí teplot 600°C až 880°C, druhá sada byla provedena za stejných podmínek na vzorcích z oceli s vyšším obsahem křemíku (typ B). Pro třetí sadu měření byly vybrány vzorky typu A, které byly při teplotě 1000°C po dobu 240 minut zokujeny při okolní atmosféře skrz celý průřez. Záznamy síly v závislosti na deformaci pro tyto vzorky byly velice nesouvislé s několika extrémy. Z těchto záznamů je možné usuzovat, že se vzorek skládal z několika vrstev okují, které byly v průběhu protlačování prolamovány. Čtvrtá sada měření byla prováděna na vzorcích typu B, které byly vystaveny stejným oxidačním podmínkám jako vzorky z předešlé sady. Tyto vzorky nebyly zokujeny v celém průřezu, ale obsahovaly základní materiál a vrstvu okují. Aby bylo možné částečně srovnat jednotlivé vzorky a jejich změřené charakteristiky, byla připravena pátá sada měření ze vzorků typu A, byla opět vystavena oxidačním podmínkám avšak po dobu 20 minut, aby byla

zajištěna stejná struktura vzorku, jako u vzorků typu B. Pro získání představy o přesnosti a opakovatelnosti měření bylo provedeno měření zokujeného vzorku typu B při teplotě 800°C opakovaně. Rozdíl ploch pod těmito křivkami měřenými opakovaně byl přibližně 3%.

V dalším kroku byla provedena kvalitativní analýza zokujených vzorků po SPT měření. Cílem této analýzy bylo změřit tloušťky jednotlivých vrstev (základního materiálu, vrstev okují) pro všechny typy vzorků, zjistit jejich chemické složení a odpovídající fyzikální vlastnosti. Bylo zjištěno, že zokujené vzorky typu A dosahovaly tloušťek 0,6 mm až 0,628 mm a tloušťky vrstev okují dosahovaly hodnot 150 μm až 270 μm . Naproti tomu zokujené vzorky typu B měly celkovou tloušťku v rozsahu 0,5 mm až 0,57 mm a vrstvy okují dosahovaly tloušťek 25 μm až 80 μm . Z těchto výsledků je vidět, že má chemické složení vliv na rychlost a růst okují. U běžné konstrukční oceli bez legujících prvků, dochází k podstatně rychlejší oxidaci vzorku a tedy rychlejšímu růstu okují. Pro typy ocelí, které obsahují správné legující prvky je rychlost růstu okují podstatně menší. Informace o chemickém složení jednotlivých vrstev okují připravených na obou typech oceli a zjištění jejich fyzikálních vlastností byla zvolena fázová analýza vzorků pomocí práškové rentgenové difrakce. Výsledky kvalitativní analýzy přinesly informace o složení zokujených vzorků typu A, které se skládaly zejména z hematitu a magnetitu. U vzorků typu B byly zjištěny všechny tři základní typy chemických sloučenin, ze kterých se okuje skládají. Nejvyšší podíl dosahoval magnetit, poté hematit a nejmenší podíl na složení měl wüstit. Z analýzy těchto chemických sloučenin bylo zjištěno, že hematit má hexagonální krystalovou mřížku, magnetit a wüstit mají kubickou krystalovou mřížku. Dá se předpokládat, že jednotlivé chemické sloučeniny byly vrstveny dle Lechatelierova principu: základní materiál, wüstit, magnetit a hematit. Ze získaných krystalových mřížek a vrstvení jednotlivých chemických sloučenin v okujích, je možné částečně vysvětlit příčinu rozdílné náročnosti odstraňování vrstev okují u vzorků z konstrukční oceli (typ A) a vzorků z oceli s vyšším obsahem křemíku (typ B). U vzorků typu A, na kterých byly připraveny okuje, byl největší podíl hematitu, který má hexagonální krystalovou mřížku, kdežto u vzorků typu B byly zastoupeny všechny chemické sloučeniny. Hematit a wüstit mají kubickou mřížku stejně jako základní materiál, proto může vzniknout mezi těmito chemickými sloučeninami a základním materiálem pevnější vazba než mezi hematitem (hexagonální mřížka) a základním materiálem. Tento závěr byl zjištěn na malém počtu vzorků a pro jeho širší platnost by bylo potřeba provést větší počet měření.

Dalším krokem analýzy mechanických vlastností okují bylo zpracování a vyhodnocení změřených křivek síly v závislosti na deformaci. Pro získání mechanických vlastností z naměřených křivek při SPT zkouškách na zkoumaných typech vzorků byla připravena optimalizační úloha ve výpočtovém programu Ansys Workbench. Optimalizační úloha měla ve spojení s numerickou analýzou za cíl najít vhodné materiálové parametry tak, aby odezva při protlačování vzorků co nejlépe odpovídala změřeným křivkám síla vs. deformace. Jako model materiálu byl pro

tento účel zvolen Chabocheův kinematický model s dvěma kinematickými částmi a $\gamma_2=0$. Celkem bylo optimalizováno šest parametrů, mezi kterými byly čtyři parametry Chabocheova modelu, modul pružnosti a koeficient tření mezi vzorkem a keramickou kuličkou. Při nalezení vhodných parametrů bylo možné rekonstruovat celou deformačně – napětovou křivku. Dále byla na základě optimalizace zjištěna hodnota meze kluzu a hodnota modulu pružnosti. Při optimalizaci materiálových parametrů byla hlídána odezva síly na deformaci do maximální změřené síly, tomu odpovídala i rekonstruovaná deformačně – napětová křivka. Pro zjištění odchylky změřené a optimalizované křivky síly v závislosti na deformaci, byla provedena integrace obou křivek. Integrací křivek byla získána odpovídající plocha pod křivkami a jejich rozdílem byla definována odchylka optimalizačního procesu. Optimalizační proces byl v prvním kroku prováděn pro neokujené vzorky, v tomto případě dosahoval maximální rozdíl ploch pod křivkami 10%. Ve druhém kroku byly optimalizovány materiálové parametry pro zokujené vzorky, které byly složeny jak ze základního materiálu, tak z vrstev okují. Při této optimalizaci byly jako materiálové vlastnosti použity parametry získané v předchozím kroku. Samotná optimalizace potřebných materiálových parametrů byla tedy prováděna pouze pro vrstvy okují. V tomto případě byly odchylky ploch mezi změřenými a optimalizovanými křivkami pro vzorky typu A do 9% a pro vzorky typu B do 50%. Tyto vysoké odchylky byly způsobeny malou tloušťkou vrstvy okují vzniklou na povrchu vzorku typu B, optimalizované parametry byly tedy silně ovlivněny mechanickými vlastnostmi základního materiálu. Pro ověření získaných mechanických vlastností okují pro typ vzorku B, by bylo vhodné provést další měření.

6 ZÁVĚR

Všechny dosažené výsledky, které byly získány z experimentálního měření nebo výpočetní analýzy měly za cíl poskytnout ucelený pohled na problematiku odstraňování okují, zejména hydraulického odstraňování okují. Jednotlivé analýzy poukázaly na širokou a hlavně nelineární problematiku, jakou tento proces představuje. Na základě prezentovaných výsledků a provedených analýz bylo nastíněno, že k řešení a hledání souvislostí je zapotřebí multidisciplinární přístup. V této práci bylo připraveno několik námětů pro dosažení a upřesnění přístupu k řešení složitého procesu odstraňování okují. Jak bylo zjištěno z výsledků získaných při simulaci odkujovacího procesu, napjatost vyvolaná teplotním vlivem vodního paprsku je silně závislá na topologii a složení vrstvy okují. Při využití změřených mechanických vlastností pro dva typické zástupce oceli (konstrukční ocel, křemíková ocel) by bylo možné připravit nové výpočtové modely založené na konkrétních mechanických veličinách vrstev okují a použít konkrétně změřené hodnoty zatížení vlivem vodního paprsku. Tímto procesem by bylo možné ještě podrobněji analyzovat okujovací proces a získat tak informace o jeho chování. Toto je jeden z námětů, ve kterém by bylo možné navázat na výsledky a závěry této práce.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIENHARD IV, J.H., V LIENHARD V, J.H. A heat transfer text book. Third edition. Cambridge, Massachusetts, U.S.A., Appendix A, 2002
- [2] ČSN EN 1993-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – část 1
- [3] M. KRZYZANOVSKI, J. H. BEYNON, Modeling the boundary conditions for thermo-mechanical processing-oxide scale behaviour and composition effects, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 8 , 927-945, 2000
- [4] M. SCHÜTZE, Mechanical properties of oxide scales, Oxidation of metal, Vol. 44, Nos. 1/2, 1995
- [5] ČSN 41 1308, Ocel obvyklých jakostí k tažení a tváření za studena
- [6] Selection of electrical steel for magnetic cores, AK Steel ,[cit. 10. 03. 2012]
http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/Mag_Cores_Data_Bulletin.pdf
- [7] L. IVÁN, P. DYMÁČEK, Optimalizace materiálových parametrů při simulaci protlačovací zkoušky na miniaturních discích, ANSYS konference, Frymburk 6.-8. Října 2010
- [8] R. HALAMA, H. ROBOVSKÁ, a kol., Stanovení konstant Chabocheova nelineárního kinematického modelu zpevnění, 9th International scientific conference, Applied mechanics, Malenovice, Czech Republic, 2007
- [9] R. HALAMA, Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů, Habilitační práce, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009

ABSTRACT

The issue of descaling is an important part of the forging and heat treatment of steel and semi products of steel production. Rising of new information and study of this process can increase efficiency and improve the surface quality after descaling. This thesis is focused on the mechanisms of the high pressure hydraulic descaling qualification and study of the chemical compounds of which the scales grown. To achieve all goals of this work and to get a comprehensive view of descaling process, few experimental measurements and numerical analyses were performed. All experimental measurements were focused on obtaining data about fundamental parameters and effects of the hydraulic descaling. The data obtained from measurements were applied to numerical analyses, which aimed to discover a deeper relation and to confirm the experimental results. This thesis can be divided into two main parts. The first part is devoted to parameters of the water jet study. The main studied characteristics of the high pressure hydraulic water jet were heat transfer coefficient and impact pressure at different modes such as standard or pulsating water jet. Experimentally measured data of these parameters were applied in numerical analyses. The numerical analyses were focused on studying the impact of the water jet parameters on the stresses in the oxide scale layers. A further water jet analysis was focused on the influence of the individual parts of the hydraulic system (such as water chamber or stabilizer) on its characteristics. In this part different types of the water chambers in combination with different types of stabilizers on the impact pressure values were investigated. These measurements were supported by fluid flow analysis through the hydraulic system. The second part of this work was focused on getting mechanical properties of the oxide scales from specimens prepared from standard structural steel and specimens from silicon steel. In this thesis, the influence of various parameters and characteristics was studied on these two types of steel. Mechanical properties of oxide scale structures were carried out by the Small Punch Test method. To obtain the fundamental mechanical properties such as Young's modulus, yield strength and ultimate strength, material parameters based on the measured data were optimized. The whole work was carried out in order to get valuable and comprehensive results about high pressure hydraulic descaling process and influencing factors as well as about oxide scales themselves.

CURRICULUM VITAE

Surname / First name **Hrabovský Jozef**
 E-mail(s) **jozef.hrabovsky@seznam.cz**

Work experience

Dates 20. 5. 2009 - now
 Name and address of employer **L.K. Engineering**
 Occupation or position held FEM structural and thermal analyst
 Main activities and responsibilities Design of products and numerical analyses focused on the turbochargers and the nuclear power plants and energetic industry.

Dates July 2008 – now
 Name and address of employer **Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering Brno**
 Occupation or position held FEM structural and thermal analyst
 Main activities and responsibilities Cooperation on the project solving and active participation on the experiments

Dates November 2008 – June 2009
 Name and address of employer **Rie, s. r. o., Research Innovation Expertise**
 Occupation or position held FEM structural and thermal analyst
 Main activities and responsibilities Numerical calculations

Education

Dates September 2008 - 2012
 Principal subjects Mechanical engineering
 Diploma thesis: The Quantification of the Hydraulic Descaling Mechanisms
 Name and type of organisation providing education and training Faculty of Mechanical Engineering Brno
 Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering Brno
 Level in national or international classification Ph. D. Studies

Dates September 2003 – 2008
 Title of qualification awarded Ing.
 Principal subjects Mechanical engineering
 Diploma thesis: Optimization Analysis of Brake Wheel
 Name and type of organisation providing education and training Faculty of Mechanical Engineering Brno
 Level in national or international classification Master studies

Personal skills and competences

f-assessment European level (*)	Understanding		Speaking		Writing
	Listening	Reading	Spoken interaction	Spoken production	
English	B2	B2	B2	B2	B2
German	A2	A2	A2	A2	A1

(*) Common European Framework of Reference (CEF) level

Computer skills and competences MS Windows, MS Office, Statgraphics, Mathcad, Autocad, Minitab, Ansys, Adina, Rstab- Solid Works, Solid Edge, PRO Engineer, Catia, Inventor