



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

Kvantifikace mechanismů hydraulického odstranění okují QUANTIFICATION OF HYDRAULIC DESCALING MECHANISMS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Jozef Hrabovský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Problematika odstraňování okují je významnou součástí při tváření a tepelném zpracování oceli a ocelových polotovarů. Získáváním nových informací a studiem tohoto procesu je možné zvýšit efektivitu a zlepšit kvalitu povrchů po odokujení. Tato práce je zaměřená na kvantifikaci mechanismů vysokotlakého hydraulického odstraňování okují a studium samotných chemických sloučenin, ze kterých jsou okuje složeny. K dosažení všech stanovených cílů práce a pro získání komplexního pohledu na odstraňování okují bylo použito několik experimentálních měření a výpočtových analýz. Všechna experimentální měření byla zaměřena na získání dat o zásadních vlivech a parametrech při hydraulickém odstraňování okují. Data získaná z provedených měření byla aplikována pro výpočtové analýzy, které měly za cíl odhalit hlubší souvislosti a potvrdit tak experimentální výsledky. Tuto práci je možné rozdělit na dvě základní části. První část je věnována studiu jednotlivých parametrů hydraulického paprsku. Mezi zkoumanými parametry vysokotlakého vodního paprsku byl součinitel přestupu tepla, impaktní tlak při různých režimech standardního nebo pulzujícího vodního paprsku. Experimentálně změřená data těchto parametrů byla použita pro výpočtové analýzy, které byly zaměřeny na vliv parametrů vodního paprsku na napjatost ve vrstvě okují. Další analýza vodního paprsku byla zaměřena na vliv jednotlivých částí hydraulické soustavy (jako jsou, rozvodní kolektor nebo stabilizátor) na její charakteristiky. Byly zkoumány různé typy kolektorů v kombinaci s různými druhy stabilizátorů a jejich vliv na hodnoty impaktního tlaku. Toto studium bylo podpořeno výpočtovou analýzou proudění uvnitř hydraulické soustavy. Další část této práce byla zaměřena na získání mechanických vlastností okují připravených na vzorcích z běžné konstrukční oceli a na vzorcích připravených z oceli s vyšším obsahem křemíku. Vliv jednotlivých parametrů a charakteristik byl v této práci zkoumán právě na těchto dvou typech oceli. Analýza mechanických vlastností okují byla prováděna pomocí metody tzv. protlačování malých vzorků („Small Punch Test“). Pro získání základních mechanických vlastností jako modul pružnosti, mez kluzu či mez pevnosti byla provedena optimalizace materiálových parametrů na základě změřených dat. Celá tato práce byla prováděna s cílem získat hodnotné a ucelené výsledky o vysokotlakém hydraulickém odstraňování okují a ovlivňujících faktorech i o samotných okujích.

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.



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



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRABOVSKÝ, J. *Kvantifikace mechanismů hydraulického odstranění okují*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 164 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.



PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jaroslava Horského, CSc. a že jsem všechny použité literární zdroje správně a úplně citoval.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....
podpis doktoranda



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Jaroslavu Horskému, CSc. za velmi cenné a podnětné rady, vynikající vedení při studiu i samotné práci a neocenitelné životní zkušenosti. Dále bych rád poděkoval celému kolektivu Laboratoře přenosu tepla a proudění za pomoc a podporu při studiu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a zejména manželce za silnou morální podporu a pevné rodinné zázemí.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ	11
3	TEORETICKÝ ZÁKLAD	13
3.1	Vznik a růst okují	13
3.2	Fyzikální a mechanické vlastnosti okují a jejích měření	16
3.3	Hydraulické odstraňování okují	20
3.4	Mechanismy porušování vrstvy okují	23
4	ANALÝZA HYDRAULICKÉHO ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ	27
4.1	Experimentální měření charakteristik vodního paprsku	28
4.1.1	Měření součinitele přestupu tepla	29
4.1.2	Měření impaktního tlaku	34
4.2	Výpočtové modelování vodního paprsku	40
4.2.1	Výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují	41
4.2.2	Výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují	51
4.3	Zhodnocení dosažených výsledků	57
5	ANALÝZA VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA VODNÍ PAPERSEK	62
5.1	Experimentální měření vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku	63
5.2	Výpočtová simulace vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakter vodního paprsku	73
5.3	Zhodnocení dosažených výsledků	89
6	ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OKUJÍ	92
6.1	Experimentální měření vlastností okují	93
6.1.1	Měření růstu okují	94
6.1.2	Měření mechanických vlastností okují	98
6.2	Analýza dat	107
6.2.1	Kvalitativní analýza vzorků	108
6.2.2	Rozbor změřených křivek	119
6.2.3	Optimalizace materiálových parametrů	129
6.3	Zhodnocení dosažených výsledků	148
7	DISKUZE	154
8	ZÁVĚR	161



LITERATURA	162
PUBLIKACE AUTORA	165
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	167
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	169
SEZNAM TABULEK	173

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 mikrotřlin 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. Pro odstranění terciárních okují se používají chemické nebo mechanické metody. Pro odstranění primárních a sekundárních okují se používají mechanické a zejména hydraulické metody. 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.

Výpočtová analýza je dnes běžným nástrojem pro řešení problémových situací, mezi které bezpochyby patří i odstraňování okují. Tato metoda je rychlejší a pružnější než samotný experiment. Avšak experiment je nutný jak pro získání potenciálních vstupů pro výpočtovou analýzu, tak pro ověření dosažených výsledků. Tato posloupnost je rovněž aplikována v této práci.

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 známé 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.

Analýza hydraulického odstraňování okují byla složena z experimentální a výpočetní části. Experimentální měření bylo zaměřeno na měření charakteristik vodního paprsku, měření součinitele přestupu tepla a impaktního tlaku. Tyto charakteristiky sloužily jako vstupní data pro výpočetní část analýzy, která byla rozdělena na rozbor a pochopení mechanismů vodního paprsku, simulaci hydraulického odstraňování okují z povrchu uhlíkové oceli a oceli s vyšším obsahem křemíku.

Dále byla provedena analýza vlivů působících na vodní paprsek. Opět byla rozdělena na experimentální a výpočetní část. Experimentální měření spočívalo v měření rozložení impaktního tlaku odkujovací trysky („flat jet nozzle“) při různé konfiguraci kolektorů v kombinaci s různými druhy stabilizátorů. Výpočetní část byla prováděna na základě vstupních dat získaných z experimentů a jejím cílem bylo ověřit získané experimentální výsledky. Výpočtová analýza spočívala v simulaci proudění ve stejné hydraulické soustavě, jaká byla použita při experimentálním měření.

Analýza mechanických vlastností okují se rovněž skládala z experimentální a výpočetní části. V tomto případě byly experimenty zaměřeny na růst vrstev okují, na měření odezvy

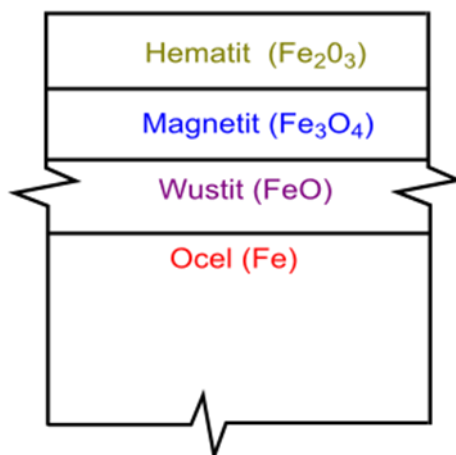
zokujených vzorků a na mechanické zatížení od zkušebního zařízení. Změřenou odezvou těchto experimentů byla závislost síly na deformaci vzorku. Výpočtová analýza této části byla soustředěna na optimalizaci parametrů materiálových vlastností zkoumaných vzorků na základě změřených závislostí. Pomocí těchto parametrů bylo možné převést závislost síly na prodloužení na typické křivky napětí versus deformace a získat tak základní mechanické vlastnosti okují, kterými jsou modul pružnosti, mez kluzu či mez pevnosti.

3 TEORETICKÝ ZÁKLAD

Nedílnou součástí všech výrobních a zpracovatelských procesů oceli je vznik okují v různých morfologických a chemických stavech. Všechny tyto modifikace byly rozděleny do tří základních skupin a to podle fáze výrobního procesu, ve které vznikly. V první fázi zpracování oceli vznikají primární okuje (primary scales), na to navazuje vznik sekundárních okují (secondary scales) a v konečné fázi výrobního procesu vznikají terciární okuje (tertiary scales). Z důvodu správného používání fundamentálních pojmů je zapotřebí vysvětlit výrazy, které se často zaměňují a považují za ekvivalentní. Pojem okuje (scale) se týká chemických sloučenin vznikajících na povrchu oceli v průběhu ohřívání v peci a při následném válcovacím procesu. Pojem oxid (oxide) je svázán s tvorbou chemických sloučenin, které vznikají na povrchu oceli, poté co provalek opustí celou válcovací trať. Dle uvedené terminologie je tato práce zaměřena na vznik a odstraňování okují.

3.1 VZNIK A RŮST OKUJÍ

Při zpracování oceli vznikají na povrchu oceli tři typy chemických sloučenin, a to: wüstit (FeO), magnetit (Fe_3O_4) a hematit (Fe_2O_3). Tyto chemické sloučeniny železa a kyslíku jsou zastoupeny v různých množstvích ve všech typech okují (primární, sekundární, terciární). Růst jednotlivých vrstev se řídí dle *LeChatelierova* principu. Vnitřní vrstvu tvoří wüstit, střední vrstva je tvořena magnetitem a vrchní vrstvu tvoří hematit (viz Obr. 3-1) [1].



Obr. 3-1 Chemické složení vrstvy okují

Jak již bylo zmíněno, primární okuje vznikají v první fázi zpracování oceli a tedy v peci při jejím ohřívání. Struktura okují je ovlivněna atmosférou v peci, která je specifická pro každou výrobu. Sekundární okuje vznikají ve fázi po vytažení oceli z pece na běžné atmosféře, tedy na vzduchu. Avšak i v tomto případě není okolní atmosféra pokaždé stejná, a proto dochází i při formaci sekundárních okují k velké různorodosti. Tloušťka sekundárních okují není příliš velká, a to z důvodu krátké oxidační doby. Maximální hodnoty tlouštěk jsou 100 μm . Terciární okuje vznikají v konečném procesu válcování, někdy jsou proto nazývány oxidy.

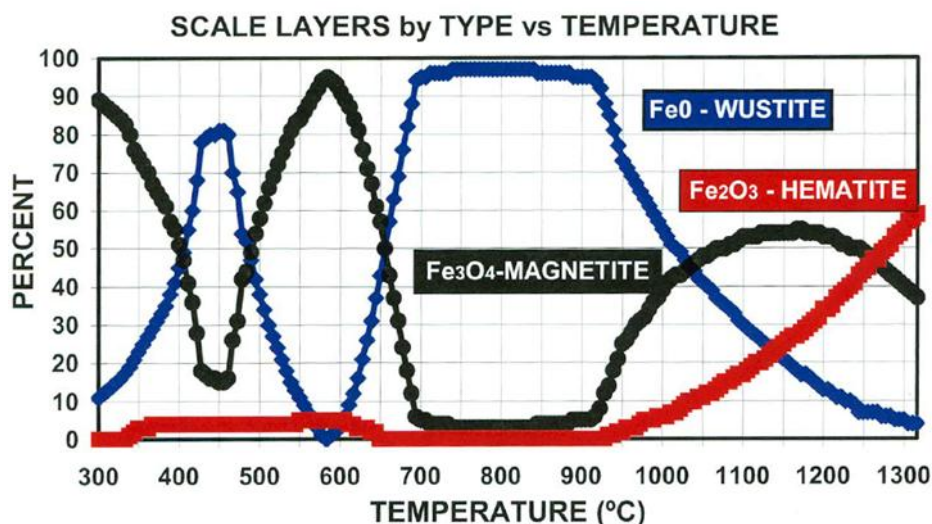
Vznik okují je neodlučitelná chemická reakce probíhající při všech procesech spojených s výrobou a zpracováním oceli. Následný růst okují je závislý na mnoha faktorech specifických pro každou výrobu. Dle Davida T. Blaževiče [1] je růst okují závislý na teplotě a čase. Tyto dva základní faktory jsou zahrnuty ve vzorci růstu okují (1).

$$W/A = K \times t^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

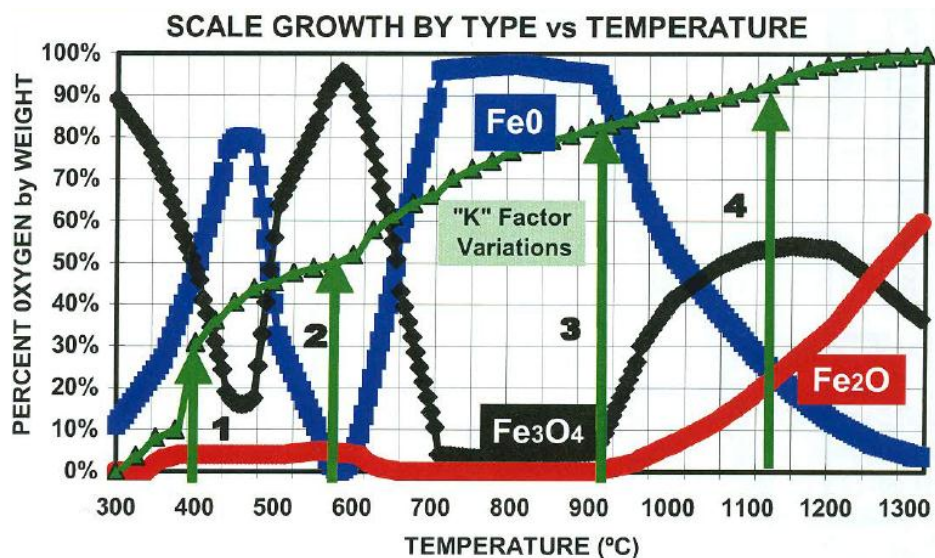
Faktor růstu okují „K“ je funkcí teploty. Tento faktor mění množství růstu okují odpovídající změnám teploty v daném výrobním procesu. „K“ faktor je možno získat měřením nebo extrapolací v různých teplotách. „K“ faktor je variabilní hodnota pro všechny typy okují vznikajících na povrchu oceli a je také specifická pro každý provoz. David T. Blaževič [1]. [1] uvádí graf znázorňující růst okují v procentech v závislosti na teplotě (viz Obr. 3-2). Tento graf je zde uveden jako ilustrativní, protože nemůže být považován za všeobecně platný. Je však názorný a dá se z něj přibližně určit procentuální podíl jednotlivých složek okují při dané teplotě. Z tohoto grafu je zřejmé, že v teplotní oblasti od 700°C do 950°C je hlavní složkou růstu okují wüstit, ostatní složky jsou v této oblasti zanedbatelné. Nad teplotu 950°C je možné pozorovat, že tloušťky všech složek okují se značně mění. V této oblasti dochází k výraznému poklesu růstu wüstitu na úkor magnetitu a hematitu. Dále je možné vypořádat, že při ohřevu je teplota okují vyšší a při výrobním procesu nižší než teplota oceli.

Pro srovnání růstu jednotlivých vrstev okují v závislosti na teplotě a „K“ faktoru růstu okují, David T. Blaževič [1] uvádí doplněný graf růstu okují. V tomto grafu je implementována křivka „K“ faktoru a je rozdělena na čtyři oblasti, které popisují náhlé změny faktoru růstu okují (viz Obr. 3-3). První oblast (po bod 1), je specifická tím, že růst magnetitu ovlivňuje celkové zvýšení vrstvy okují na hmotnostním podílu kyslíku. Pro oblast tři je specifické, že se míra růstu hematitu a magnetitu zvyšuje ale „K“ faktor má jen mírně rostoucí trend. Ve čtvrté oblasti se růst magnetitu stabilizuje a posléze začne klesat, růst

hematitu má dále rostoucí tendenci a vede k dalšímu růstu „K“ faktoru. Takto vyznačená křivka „K“ faktoru může být považována za ukazatel růstu okují v závislosti na hmotnostním podílu vázaného kyslíku a teplotě. Tato křivka v přeneseném významu udává vliv jednotlivých složek okují na celkový růst okují.



Obr. 3-2 Procentuální růst vrstev okují v závislosti na teplotě (dle Davida T. Blaževiče [1])



Obr. 3-3 Změny růstu okují (dle Davida T. Blaževiče [1])

3.2 FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI OKUJÍ A JEJÍCH MĚŘENÍ

Analýza vlastností okují je velice obtížná, a to z důvodu rozmanitosti jejich struktury. Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly, okuje se skládají ze tří vrstev o různé tloušťce a různé struktuře. Povrch okují tedy není homogenní ani izotropní, což velice stěžuje studium jejich vlastností. Dalšími překážkami je velká chemická variabilita oceli i prostředí, ve kterých okuje vznikají, vysoká teplota, při které vznikají a při které jsou také odstraňovány. To znamená, že je potřeba je studovat jako teplotně závislé. Všechny tyto parametry vedou k velkému rozptylu jejich fyzikálních a mechanických vlastností. Aby bylo možno vytvořit reprezentativní soubor vlastností, je potřeba provést mnoho měření s různými okrajovými podmínkami a ověřit je různými metodami měření. Mezi základní metody získávání vlastností okují je tahová zkouška [2], ohybová zkouška [3], [5] nebo protlačovací zkouška [6]. Všechny tyto metody jsou kombinované s numerickým výpočtem pro zjištění vlivů a závislosti jednotlivých parametrů na konečné vlastnosti okují. Pro zjišťování fyzikálních vlastností (např. tepelná vodivost, difuzivita) jsou využívány chemické či optické laserové metody [7].

Prvním krokem při zkoumání fyzikálních a mechanických vlastností okují je příprava experimentálních vzorků. Příprava je obvykle prováděna ohříváním vzorků v indukční peci při dané teplotě a dané oxidační atmosféře. Proces připravování vzorků je náročný z pohledu opakovatelnosti, která je nezbytná pro korektní průběh experimentu a vyhodnocování. Malá změna počátečních podmínek při opakování přípravy vzorku může vést ke změnám ve vytvoření jejich struktury, což může zásadním způsobem ovlivnit výsledky. Pro přípravu vzorků okují s požadovaným složením je možné použít grafy růstu okují (např. Obr. 3-3), o kterých bylo napsáno v předešlé podkapitole. Je však obtížné získat tento graf pro daný typ oceli a danou oxidační atmosféru, vyžadovalo by to další časové a finanční náklady celého experimentu. Je však nezbytné před každou přípravou vzorků okují provést citlivostní analýzu vlivu teploty a oxidační atmosféry na růst okují. Tímto procesem se v podstatě dosáhne podobného, ale zjednodušeného efektu jako v případě, kdy je vytvořen plnohodnotný graf růstu okují. Všechny tyto aspekty kladou větší nároky při opakovatelnosti výroby vzorků, která je nutná pro validaci dosažených výsledků, a je nezbytná pro uznání relevantnosti experimentu.

M. Krzyzanowski a J. H. Beynon [2] prováděli tahovou zkoušku okujených vzorků. Experiment byl rozdělen do několika kroků. V prvním kroku byla provedena příprava

vzorků, kdy byl povrch opracován pomocí brusného papíru. Následně byl vzorek zahřátý a teplota byla ustálena na požadované hodnotě, po tomto procesu byla zahájena oxidace při stanovené oxidační atmosféře. Když byl proces oxidace po stanovené době dokončen, byla oxidační atmosféra změněna v inertní, při které nedochází k dalšímu růstu okují a byl započat proces tažení vzorku. Tento experiment byl prováděn na jednom experimentálním zařízení, jehož součástí byla indukční pec, ve které byly vzorky před každou zkouškou připraveny. U těchto experimentů byl také sestaven graf růstu okují, a to tak, že po každém experimentu byl vzorek podroben mikroskopickému zkoumání pro zajištění morfologie a tloušťky vzniklých okují, z těchto údajů byl poté sestaven graf růstu okují. Křivky, které byly vneseny do tohoto grafu, měly parabolický průběh a byla stanovena rovnice růstu tloušťky okují (viz rovnice (2) a (3)).

$$\delta_{ox}^2 = \delta_{ox}^2 + k_p t_{ox} \quad (2)$$

$$k_p = 5.053 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{20419}{T}\right) \quad (3)$$

Součástí zkoumání vlastností okují v této studii byl numerický výpočet, který sloužil k získání závislosti a popisu experimentálně naměřených dat. Výpočtový model byl postaven tak, aby simuloval tahovou zkoušku za zvýšených teplot a odpovídal tak experimentu. Z modelu bylo možné vyhodnotit napjatost, přetvoření a porušení okují. Všechny mechanické vlastnosti použité v modelu byly teplotně závislé a úloha byla řešena jako osově symetrická. Fyzikální a mechanické vlastnosti použité v této práci jsou vyjádřeny analyticky a jsou uvedeny v Tab. 3-1. Porušení vrstvy okují bylo uvažováno za lineárně elastické. Za kritérium porušení vrstvy okují bylo zvolena hodnota kritického přetvoření při tahovém zatížení v celém průřezu okují. Tímto způsobem byly vyhodnocovány závislosti v procesu porušování vrstvy okují a porovnávány s dosaženými výsledky z experimentu.

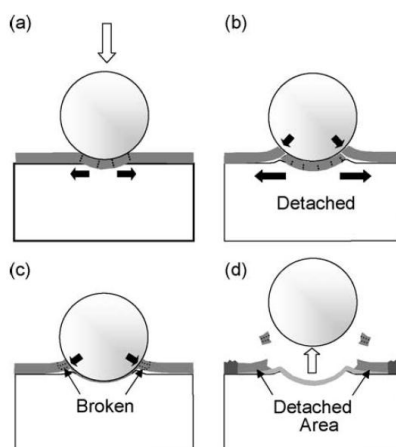
Tab. 3-1 Fyzikální a mechanické vlastnosti dle M. Krzyzanowského, J. H. Beynona [2]

Hustota [kg/m ³]	$\rho = 5.7 \times 10^3$
Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	$c_p = 674.959 + 0.297 \times T - 4.367 \times 10^{-5} \times T$ $T \in (600 - 1100^\circ\text{C})$
Tepelná vodivost [W/mK]	$\lambda = 1 + 7.833 \times 10^{-4} \times T, T \in (600 - 1100^\circ\text{C})$
Modul pružnosti [GPa]	$E = E_{ox}^0 (1 + n(T - 25)), n = -4.7 \times 10^{-4}, E_{ox}^0 = 240 \text{ GPa}$
Poissonovo číslo [-]	$\mu = 0.3$

Dosažené výsledky této analýzy prokázaly vliv rozdílných napětí pro porušení rozhraní okují a oceli v důsledku různých mechanických vlastností zkoumaných ocelí. Rozdílné chemické složení oceli mělo vliv na porušení okují při zatěžování tahem a bylo dost významné na to, aby ovlivnilo vlastnosti porušování sekundárních okují při válcování, kdy dochází k tahovým napětím.

Metodou pro zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností, kterou zvolil Y. I. Oka a kolektiv [6], byla impaktní zkouška. Zkouška byla prováděna na vzorcích s rozměrem (45x45x100mm). Vzorky byly vkládány do indukční pece s řízenou atmosférou při teplotách od 400 do 600°C. Při zkoušce byla jako indenter použita skleněná kulička o průměru (2, 3, 5 mm).

Prvním krokem experimentu bylo vytvoření grafu růstu okují (resp. úbytku oceli) v závislosti na vlhkosti oxidační atmosféry a teplotě prohřívání. Výsledky měly lineární průběh v logaritmických jednotkách. Z těchto grafů bylo také možné určit tloušťku okují, která byla nezbytná pro další kroky v experimentálním procesu. Porušení vrstvy okují v důsledku působení indenteru na vzorek v průběhu experimentu autoři popisují jako proces, při kterém vznikají první trhliny na ploše přímo pod vnikajícím indentorem, následně se okuje oddělí v celém okolí indenteru a v posledním kroku se odloupnou okuje v blízkosti vzniklého kráteru. Tento proces poškozování okují vtláčováním kuličky je znázorněn na Obr. 3-4.



Obr. 3-4 Proces porušování vrstvy okují v průběhu impaktní zkoušky (dle Y. I. Oka [6])

V průběhu experimentu bylo pozorováno, že ovlivněná oblast, která nebyla zkoumána ihned po dopadu indenteru, vykazovala rozdíl v růstu okují od neovlivněné oblasti po dobu patnácti hodin. Rozdíl spočíval v tom, že růst původních okují v ovlivněném prostoru byl zastaven na rozdíl od neovlivněné oblasti, na které pokračoval růst okují a jejich zdrsňování.

Vysvětlení tohoto efektu spočívá ve způsobu porušení vrstvy okují, které bylo vyvoláno smykovým napětím doprovázeným přetvořením povrchu oceli při tlakovém působení dopadajícího indentoru. Uvedené přetvoření povrchu bylo uvažováno jako smykové přetvoření γ_f pro porušení okují. Dalším kritériem porušení okují bylo normálové napětí σ_f . Rovnice pro obě veličiny byly následující:

$$\tau_f = G_f \gamma_f \quad \left(G = \frac{E}{2} (1 + \mu) \right) \quad (4)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad \left(\varepsilon = \frac{\gamma}{2} \right) \quad (5)$$

Experimentálně zjištěná data byla přepočtena na fyzikální a mechanické vlastnosti vrstvy okují pomocí uvedených rovnic. Výsledkem takto provedeného experimentu byly vlastnosti okují uvedené v Tab. 3-2.

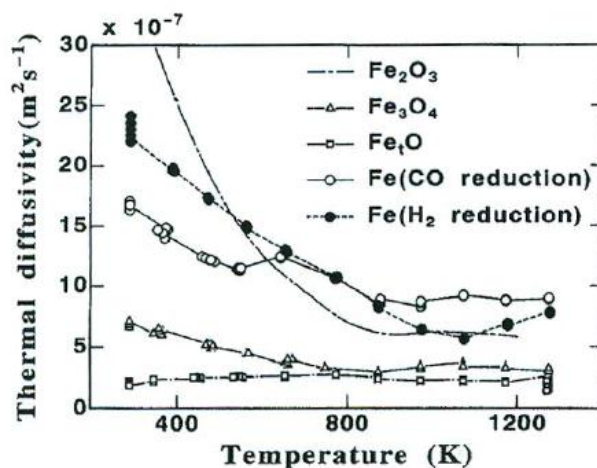
Tab. 3-2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vrstvy okují (dle Y. I. Oka [6])

<i>Smykové přetvoření [-]</i>	$\gamma_f = 0.005$
<i>Modul pružnosti v tahu [GPa]</i>	$E_f = 213$
<i>Normálové napětí [MPa]</i>	$\sigma_f = 530$
<i>Smykové napětí [MPa]</i>	$\tau_f = 410$
<i>Povrchové napětí [MPa]</i>	$\sigma_a = 74.6$

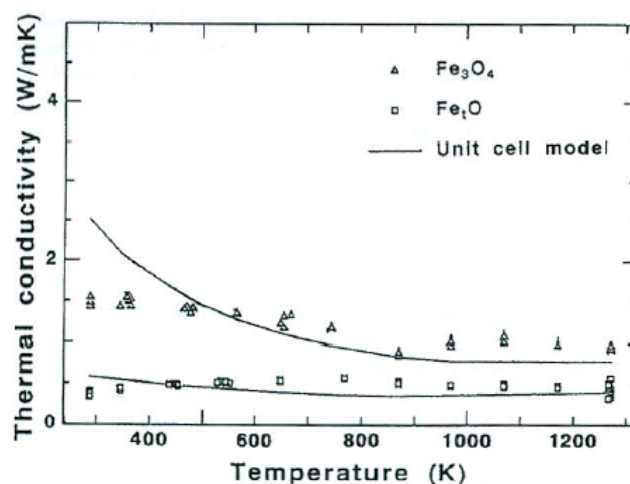
Studiem fyzikálních vlastností okují se také zabýval T. Akiyama a kol. [7], pomocí tzv. zábleskové metody. Tato metoda se používá na měření teplotní vodivosti materiálů. Princip této metody spočívá v pulzním ohřívání přední strany vzorku, na druhé straně vzorku je poté měřeno zpoždění nárůstu teploty. Tato metoda má využití v širokém spektru teplot a vodivosti. V tomto článku byly zkoumány vlastnosti čistých struktur wüstitu, magnetitu a hematitu. Jednotlivé struktury byly získány od různých světových výrobců oceli (Brazílie, Austrálie). V článku jsou uvedeny odpovídající hustoty všech struktur (viz Tab. 3-3). Dalším výstupem analýzy vzorků bylo určení teplotní vodivosti. Ukázka výsledků dosažených hodnot je na Obr. 3-5. Posledním výstupem z tohoto experimentu bylo vyhodnocení a zaznamenání výsledků tepelné vodivosti pro dané chemické struktury. Dosažené výsledky jsou uvedeny na Obr. 3-6. Z dosažených výsledků je patrný vliv teploty na fyzikální vlastnosti zkoumaných struktur (wüstit, magnetit, hematit). Je však také patrné, že hodnoty tepelné vodivosti pro wüstit jsou relativně konstantní a nedosahují vysokých hodnot.

Tab. 3-3 Hodnoty hustot odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7])

Iron	7860 kg/m ³
Wüstit	5460 kg/m ³
Magnetit	5160 kg/m ³
Hematit	5200 kg/m ³



Obr. 3-5 Teplotní vodivost odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7])



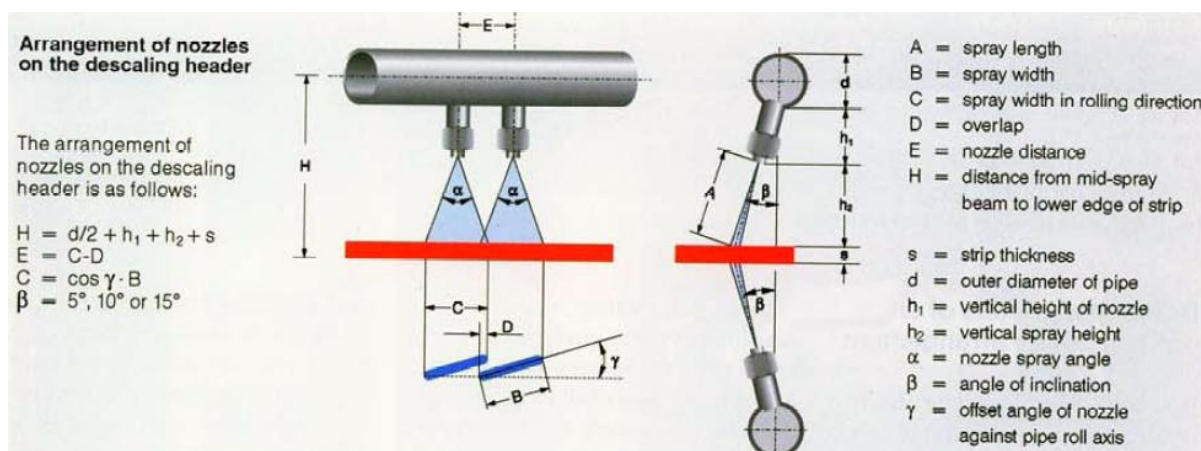
Obr. 3-6 Tepelná vodivost odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7])

3.3 HYDRAULICKÉ ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

Mezi základní metody odstraňování okují patří mechanické, chemické a hydraulické odstraňování okují. Tyto metody jsou nejrozšířenější v dosahování lepších kvalit povrchů po procesu odkujování. Ani jedna z těchto metod však není univerzální, každá z nich má své specifické použití. Použití jednotlivých metod je také závislé na výrobní fázi, ve které se

výrobek právě nachází. Hydraulické metody se používají v prvních krocích po vytažení oceli z pece (za vysokých teplot), mechanické metody se mohou také použít v této fázi, ale častěji se využívají až na konci výrobního procesu, kdy výrobek nedosahuje tak vysokých teplot, protože vysoké teploty urychlují degradaci odkujovacích kartáčů. Chemické metody mají podobné využití jako mechanické. Jejich nevýhodou je však vysoká cena spojená s produkty, které jsou jejím důsledkem, a operacemi pro její opětovné použití. Prvním produktem jsou kyseliny z mořicí lázně, druhým je kal z následné filtrace a třetí nebezpečný produkt představuje oplachová voda. Metody odstraňování okují se také odlišují dle použití v různých výrobních procesech. Mechanické odstraňování okují je nejčastěji používáno při výrobě drátů, či trubek. V tomto výrobním procesu jsou využívány i chemické metody. Hydraulické odstraňování okují se využívá při procesech, ve kterých je potřeba upravit větší povrch, a to zejména při válcování plechů, kolejnic a jiných.

Jak již bylo zmíněno, hydraulická metoda odstraňování okují představuje jednu z nejpoužívanějších metod k dosažení lepší kvality povrchu oceli při válcování za vysokých teplot. Teplota povrchu oceli může v některých případech dosahovat až 1300°C. Hydraulická soustava pro odstraňování okují je obvykle sestavena z čerpadla, které dodává vodu za vysokého tlaku (vysokotlaké čerpadlo), a potrubí, které dopravuje vodu k odkujovacím tryskám. Nejpoužívanější trysky pro odstraňování okují jsou tzv. ploché odkujovací trysky (flat jet spray nozzle). Dle J. W. Fricka [8] mezi základní charakteristiky odkujovacích trysek patří např. úhel natočení trysky - úhel ostříku, šířka stopy trysky, rozložení tlaku atd. Všechny základní charakteristiky odkujovací trysky jsou uvedeny na následujícím obrázku (viz Obr. 3-7). Všechny tyto parametry mají vliv na konečnou účinnost odkujení a tedy i na konečnou kvalitu povrchu.



Obr. 3-7 Charakteristiky odkujovacích trysek a vodního paprsku (dle J. W. Fricka [8])

Odkujovací trysky mají obvykle úhel ostříku, který také definuje šířku ostříku 22°, 26°, 30° a 40°. Trysky s těmito úhly jsou dostupné pro všechny velikosti trysek. Tlak, který je vyvozen těmito tryskami se nazývá impaktní, a je dominantním parametrem, na základě kterého je možné posoudit účinnost dané trysky. Impaktní tlak se dá spočítat podle Newtonova zákona, kde se impaktní tlak rovná podílu síly na ostříkovanou plochu [9]:

$$impact = \frac{F}{A} \quad (6)$$

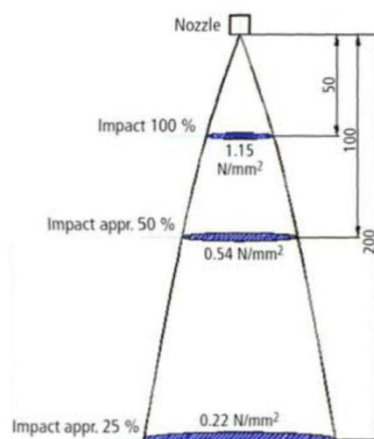
$$F = \frac{d}{dt}(m \cdot v) = \dot{m}v + m\dot{v} = V\sqrt{2p\rho} \quad (7)$$

$$dF_v = dF \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (8)$$

$$A = 2tH \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (9)$$

$$impact = \frac{F}{A} = \dot{V} \frac{\sqrt{2p\rho}}{2tH \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (10)$$

Síla, která je uvedena v čitateli, je funkcí tlaku vody a průtoku. Jednotlivé složky je možné za daných předpokladů určit dle uvedených vztahů na základě Newtonovy a Bernoulliho rovnic (rovnice 6 až rovnice 10). Základními předpoklady jsou konstantní tlak vody a konstantní rychlost proudění. Na základě těchto rovnic bude dále uveden vliv jednotlivých složek na impaktní tlak. Častým případem v provozu je situace, kdy má hydraulická soustava konstantní parametry, např. není možné zvýšit průtok v potrubí. V tomto případě je možné dosáhnout změny pouze členem ve jmenovateli, což je plocha ostříku. Změnou úhlu ostříku a šířky ostříku, které tvoří plochu, se tak dá docílit efektivnějšího účinku trysek na kvalitu odkujování. Další významnou roli má výška trysky nad povrchem, protože přímo ovlivňuje šířku ostříku a tím mění plochu ostříku. Tento parametr však není možné popsat univerzální lineární závislostí pro všechny úhly trysek, protože je ovlivněn mnoha faktory a zejména tlakem vody. Přesto je možné si udělat představu o vlivu výšky trysky nad povrchem na impaktní tlak (viz Obr. 3-8).



Obr. 3-8 Vliv výšky ostříku na impaktní tlak (dle J. W. Fricka [8])

Pokud je možné měnit parametry hydraulické soustavy a tedy tlak vody a průtok, je možné určit jejich podíl na impaktním tlaku. Z provedených analýz bylo zjištěno, že jejich podíl na impaktním tlaku je přibližně rovnocenný. Lepší představu o vlivu těchto parametrů pro daný typ trysky je možné si udělat na základě následující tabulky (viz Obr. 3-9).

Scalemaster type	Spray angle [°]	Water pressure [bars]	Water flow [l/min]	Spray jet width [mm]	Spray jet thickness [mm]	Total force [N]	Max. impact [N/mm²]
694.566.27	26	100	18.00	57	3.80	42	0.26
694.566.27	26	200	25.50	58	3.60	84	0.54
694.566.27	26	300	31.20	58	3.40	126	0.84
694.566.27	26	400	36.00	59	3.20	167	1.17

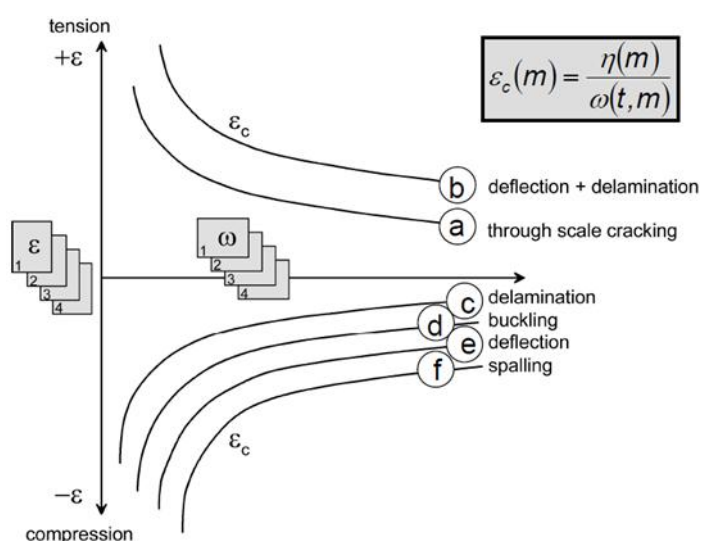
Obr. 3-9 Vliv vodního tlaku a průtoku na impaktní tlak (dle J. W. Fricka [8])

3.4 MECHANIZMY PORUŠOVÁNÍ VRSTVY OKUJÍ

Hydraulické odstraňování okují je možné rozdělit na dvě základní složky. První složka je teplotní. Reprezentuje ji teplotní gradient mezi intenzivně ochlazovanou, tenkou vrchní vrstvou a zbylou masivní horkou částí oceli vlivem studeného vodního paprsku. Druhá složka je mechanická, která je způsobena vysokým tlakem vodního paprsku. Další složka, kterou by bylo možné zařadit do skupiny hydraulického vlivu, je tzv. parní exploze, kdy se předpokládá, že dopadající kapky vody, které se dostanou do trhlin ve vrstvě okují a vlivem vysoké teploty se skokově změny v parní skupenství. Tato skupenská změna vede k explozím, které narušují vrstvu okují. Doposud není jasné, která ze složek je v procesu odkujování dominantnější a která má tedy větší vliv na kvalitu odkojeného povrchu. Informace, která by

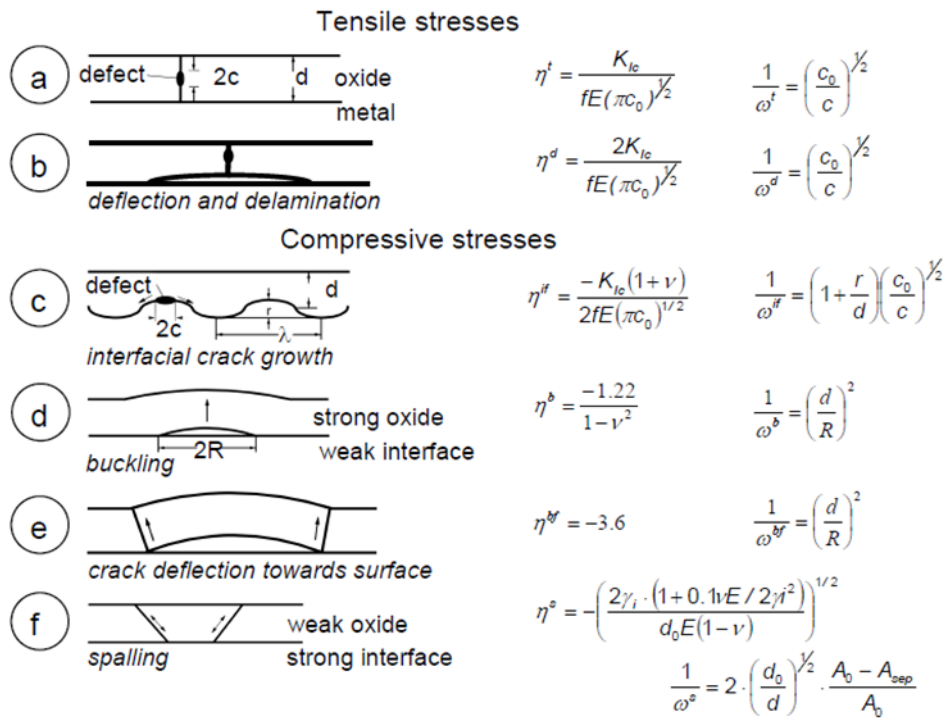
přinesla jednoznačnou odpověď na tuto otázku, by ulehčila vývoj odkujovacích soustav a vedla by k dosažení lepší kvality povrchu. Při porušování vrstvy okujů může dojít k několika mechanismům jejich porušování. Několik teorií, které pojednávají o mechanismu porušování okujů, je uvedeno níže.

M. Schütze a kol. [10] uvádí ve své práci tzv. diagram Armitt, který je založen na kritické deformační energii. V tomto diagramu je vynesena závislost kritického přetvoření pro různé typy okujů při tahovém a tlakovém napětí jako funkce tloušťky okujů. Tento diagram je užitečný pro hodnocení mechanických limitů oxidů. Dalším studiem bylo odhaleno, že vliv tloušťky okujů na napětí nemá tak jednoduchý průběh jako je v tomto grafu uvedeno. Z tohoto důvodu byl připraven nový diagram, ve kterém je celková přípustná elastická deformace vynesena na vertikální ose a na horizontální ose je uveden nový parametr „ ω “. Tento parametr zahrnuje všechny efekty vznikající v provozu, které ovlivňují vlastnosti okujů. Parametr ω nahradil v diagramu Armitt tloušťku okujů. Takto upravený diagram je označován jako EPRI a je uveden na Obr. 3-10. Diagram EPRI je založen na vrstvách, které se skládají z různých úrovní složitostí (1 až 4). První stupeň je nejméně složitý a je stejný jako Armitt diagram, tento diagram je popsán rovnicí (11) [10]. Parametr ε_c odpovídá kritickému přetvoření pro různé mechanismy porušování (m), které jsou uvedeny na Obr. 3-11. Člen rovnice $\eta(m)$ reprezentuje konstanty, které zohledňují materiálové vlastnosti a geometrii pro různé mechanismy porušování (m), které jsou nezávislé na historii. Další člen rovnice, $\omega(t,m)$, reprezentuje parametr poškození v závislosti na čase (čas t), pro všechny druhy mechanismů porušování (m). Všechny mechanismy porušování, jsou uvedeny na Obr. 3-11.



Obr. 3-10 Diagram EPRI (dle M. Schütze a kol. [10])

$$\varepsilon_c(m) = \frac{\eta(m)}{\omega(t, m)} \quad (11)$$



Obr. 3-11 Mechanizmy porušování vrstvy okují a odpovídající vztahy pro η , ω (dle M. Schütze a kol. [10])

Rovnice uvedené vedle náčrtů porušování vrstvy okují (viz Obr. 3-11) jsou vstupem pro druhou úroveň EPRI diagramu. Klíčovými parametry pro tyto rovnice jsou veličiny modul pružnosti v tahu E , lomová houževnatost K_{Ic} , energie lomové plochy γ_0 a geometrické parametry jako $(1+r/d)$. Hodnoty jednotlivých parametrů mohou být zadávány z experimentů anebo z rovnic třetí úrovně. Např. lomová houževnatost K_{Ic} se dá spočítat z následující rovnice [10]:

$$K_{Ic} = \sqrt{2E\gamma_i} \quad (12)$$

Mezi parametry třetí úrovně patří fyzická velikost vady c , která je vyjádřena rovnicí (viz rovnici 13 [10]), dále energie lomové plochy γ_0 (viz rovnici 14 [10]) zohledňující geometrické efekty (póry atd.).

$$c(t, T) = A(T) \cdot (t)n \quad (13)$$

$$\gamma_0 = \gamma_i \left(1 + \frac{0.1E}{\gamma_i} \cdot \frac{\nu}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{A_0 - A_{sep}}{A_0}\right) \quad (14)$$

Některé další geometrické parametry, které jsou funkcemi teploty a doby expozice, pak mohou být řešeny na čtvrté úrovni (např. r , λ). Tento nový koncept umožňuje zahrnout složitou závislost mezi různými odpovídajícími parametry a to náhradním parametrem ω , který komplexně popisuje rozsah vlastností na horizontální ose diagramu. Kritické hodnoty přetvoření pro různé typy porušování jsou vyneseny na vertikální ose EPRI diagramu. Kritické hodnoty přetvoření jsou srovnávány s provozními hodnotami přetvoření. Opět je i pro tuto osu možno použít metodu vrstev (úrovní). Na první úrovni je uveden součet všech přetvoření dle následující rovnice [10]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{ext} + \varepsilon_{therm} + \varepsilon_{grow,int} + \varepsilon_{grow,geo} - \varepsilon_{creep} - \varepsilon_{pseudopl} \quad (15)$$

$$\varepsilon \leftrightarrow \varepsilon_c \quad (16)$$

Ve druhé úrovni je možné vypočítat další typy přetvoření anebo je možné je dosadit přímo z experimentálních měření či provozu. V mnoha případech je velice důležitým typem přetvoření ve vrstvě okují přetvoření od teplotního gradientu. Je možné ho vyjádřit následující rovnicí [10]:

$$\varepsilon_{therm} = \Delta T (\alpha_{met} - \alpha_{ox}) \quad (17)$$

Je však důležité si uvědomit, že teplotní roztažnosti α_{met} a α_{ox} jsou tepelně závislé a že pomocí této rovnice se považuje celá soustava za elastickou, tento předpoklad je možné uvažovat při nižších teplotách. Při vyšších teplotách však může dojít k případu, kdy je kritické přetvoření nižší, než při uvažování všech složek přetvoření (i plastických). Proto byl zaveden koncept založený na rozsahu teplot, ve kterých může přispívat creep k relaxaci napětí či přetvoření v soustavě ocel, okuje. V tomto konceptu je převedena rychlost chlazení na rychlost přetvoření na základě rozdílných teplotních roztažností oceli a okují.

4 ANALÝZA HYDRAULICKÉHO ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

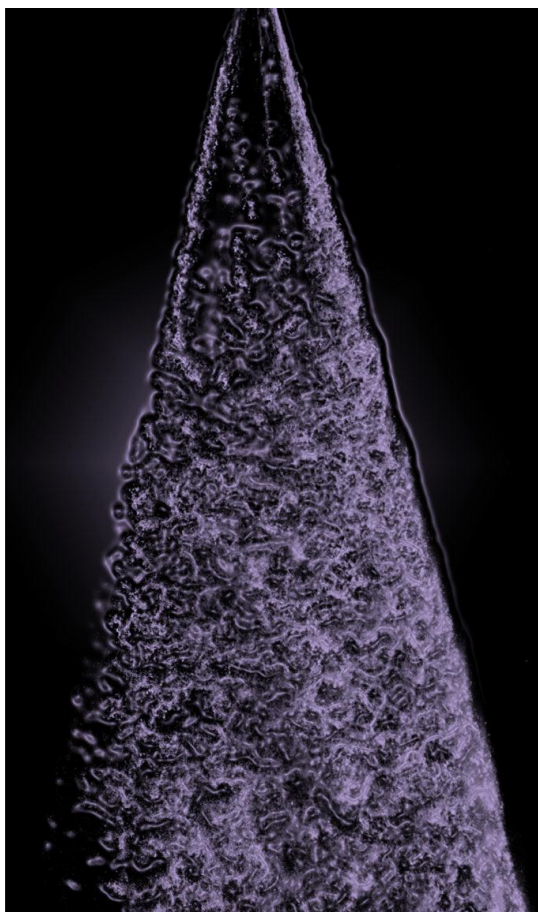
Analýza hydraulického odstraňování okují byla provedena pro podrobný rozbor a popis tohoto procesu. Proces hydraulického odstraňování okují je velice specifický a komplikovaný. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí zkoumat tento problém komplexně. Komplexní analýza spočívala v rozdělení zkoumání na experimentální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

Experimentální část analýzy spočívala v měření charakteristik vodního paprsku. Experimentální měření bylo dále rozděleno na dvě zásadní části, dle vlivu na samotný proces odkujování. V první skupině experimentů byl měřen dynamický vliv vodního paprsku, kterým je tzv. impaktní tlak. V druhé skupině byl měřen teplotní vliv vodního paprsku, který vytváří teplotní gradient přes vrstvu okují a oceli. Teplotní gradient je způsobený intenzitou chlazení povrchu. Intenzita chlazení byla zaznamenána měřením součinitele přestupu tepla. Výsledky z obou typů měření byly dále použity pro výpočtovou část jako vstupní data.

Výpočetní část analýzy byla prováděna pomocí konečnoprvkového programu Ansys. Opět byla rozdělena do dvou skupin. První část výpočtů byla zaměřena na analýzu hydraulického odstraňování okují, kde byl proveden rozklad tohoto problému na mikro a makro hledisko. Ve druhé části výpočtového modelování byla vytvořena simulace hydraulického odstraňování okují a srovnána s experimentálním měřením.

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK VODNÍHO PAPRSKU

Experimentální měření charakteristik vodního paprsku bylo prováděno v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Experimenty byly provedeny na experimentálních zařízeních sestavených ve stejné laboratoři. 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. 4-1) a na pulzujícím vodním paprsku (viz Obr. 4-2). Standardní paprsek vody je charakteristický konstantním tlakem v potrubí, potažmo v celém průběhu měření. Pulzující vodní paprsek se vyznačuje proměnným tlakem v potrubí. Oba typy vodních paprsků jsou zobrazeny na Obr. 4-1 resp. Obr. 4-2.



Obr. 4-1 Standardní vodní paprsek



Obr. 4-2 Pulzující vodní paprsek

4.1.1 Měření součinitele přestupu tepla

Při hydraulickém odstraňování okují dochází k intenzivnímu odvodu tepla z horkého povrchu. Tento přenos tepla probíhá zejména prostřednictvím mechanismu tzv. konvekce. Tento mechanismus je popsán Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) \quad (18)$$

Při hydraulickém odstraňování okují je součinitel přestupu tepla (HTC) závislý na typu odkujovací trysky, tlaku vody a její teplotě, teplotě povrchu okují, výšky trysky od povrchu a rychlosti průjezdu oceli pod vodním paprskem. Vlivy jednotlivých parametrů byly popsány v kapitole 3.3.

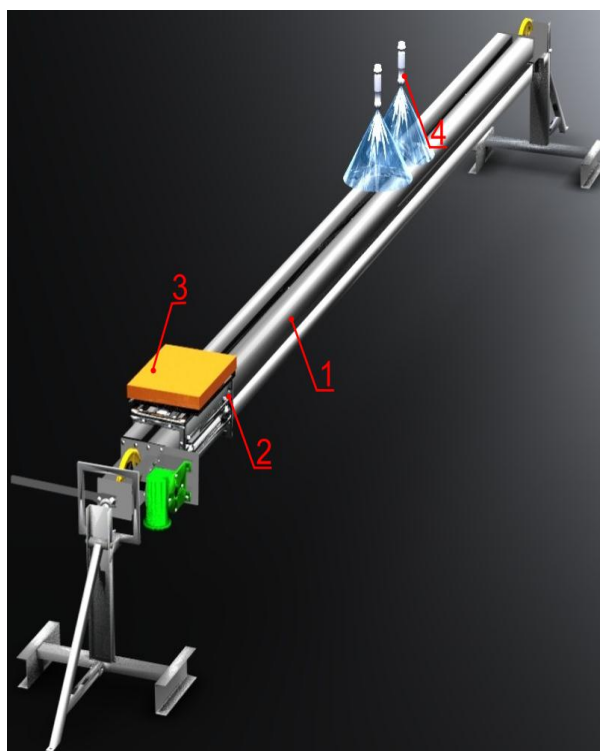
Návrh experimentu:

Experimentální měření bylo připraveno k zjištění vlivu tlaku vody v hydraulické soustavě na průběh HTC a její konečnou hodnotu. Proměnným parametrem při těchto experimentech byla tedy hodnota tlaku vody a zkoumanou veličinou byl průběh HTC. Experimenty byly prováděny při třech hodnotách tlaku (15 MPa, 30 MPa, 45 MPa). Vliv tlaku vody v hydraulické soustavě byl vyšetřován pro dva typy vodního paprsku. Prvním typem byl standardní vodní paprsek, který působí konstantní silou, resp. konstantním impaktním tlakem na povrch vzorku. Druhým typem vodního paprsku byl pulzující paprsek, který vyvolává časově proměnné tlakové zatížení povrchu vzorku. Pulzace vodního paprsku byla vyvolána pomocí ultrazvukového pulsátoru. Ten byl umístěn před vstup do kolektoru se stabilizátorem a odkujovací tryskou. Experimentální měření pulzujícího vodního paprsku bylo prováděno ve spolupráci s AVČR Ostrava. Jak je vidět z porovnání standardního (nepulzujícího) a pulzujícího paprsku (viz Obr. 4-1 a Obr. 4-2), pulzující paprsek je složen z nekompaktních shluků vodních kapek o různé velikosti. Tyto kapky vytvářejí při dopadu na povrch rázovou vlnu. Tento způsob dopadajícího vodního paprsku se nazývá „water hammer effect“. Působení standardního vodního paprsku by se dalo klasifikovat jako statické, kdežto zatížení od pulzujícího paprsku jako dynamické. Při všech experimentech byla použita plochá odkujovací tryska („flat jet nozzle“).

Realizace měření:

Měření součinitele přestupu tepla bylo provedeno na zařízení, které je schematicky zobrazeno a popsáno na Obr. 4-3. Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, experimentální měření bylo prováděno pro dva typy vodních paprsků. Pro standardní typ vodního paprsku je hydraulická soustava složena z vysokotlakého vodního potrubí, kolektoru se stabilizátorem a odkujovací trysky. Toto zařízení je uvedeno na Obr. 4-4. Pro pulzující vodní paprsek bylo nutné tuto soustavu rozšířit o ultrazvukový pulsátor, který byl namontován před kolektor se stabilizátorem. Takto upravená hydraulická soustava je zobrazena na Obr. 4-4. 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.

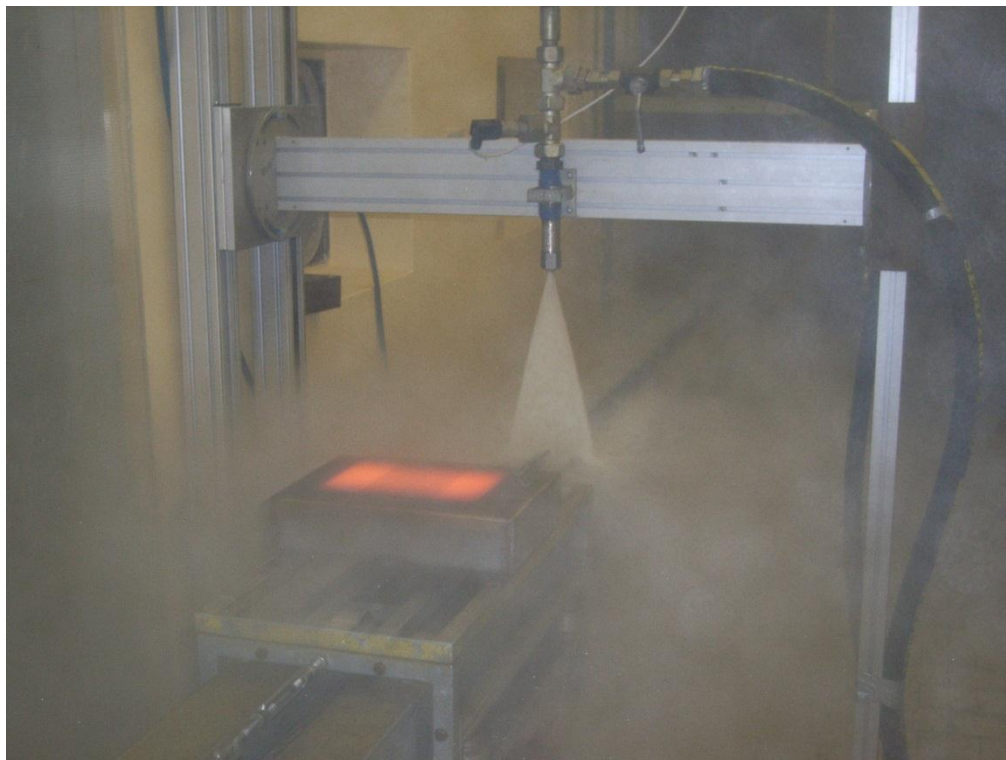
Experimentální měření, která byla prováděna za daných podmínek, jsou uvedena v Tab. 4-1. Pro měření vlivu tlaku vody na hodnoty HTC bylo připraveno celkem šest měření. Tři měření byly prováděny na standardním typu vodního paprsku a tři měření při pulzujícím vodním paprsku. Vstupní hodnoty jednotlivých experimentů jsou prezentovány v Tab. 4-1.



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



Obr. 4-3 Experimentální zařízení pro měření HTC v Laboratoři přenosu tepla a proudění



Obr. 4-4 Měření HTC při standardním typu vodního paprsku



Obr. 4-5 Měření HTC při pulsujícím typu vodního paprsku

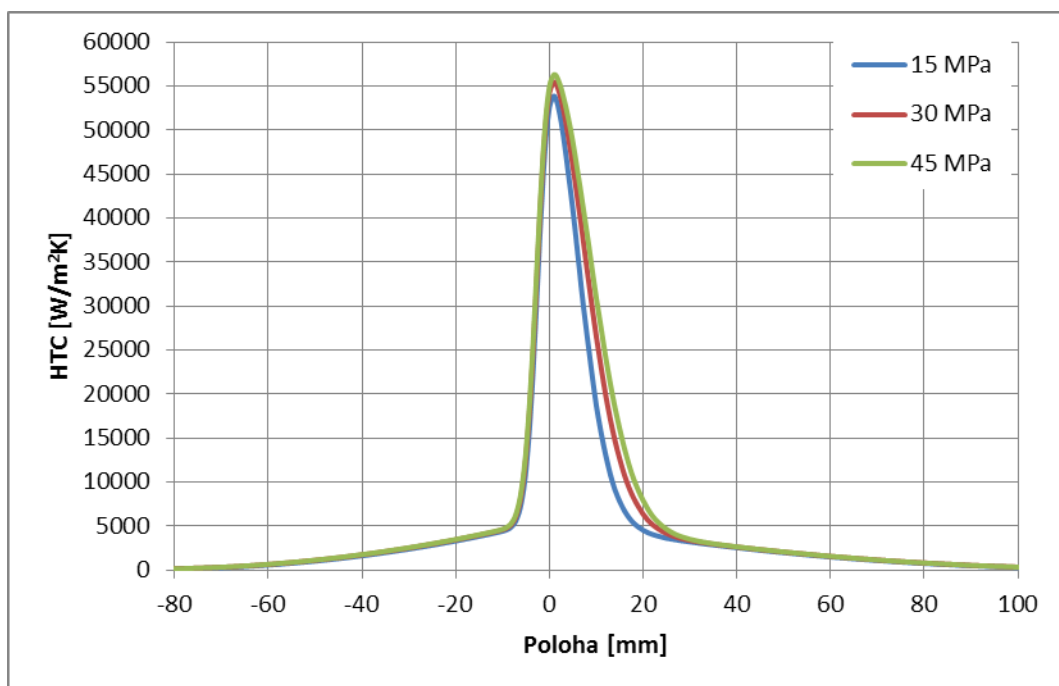
Tab. 4-1 Tabulka experimentů HTC se změřenými veličinami

Experiment	Vzdálenost trysky	Tlak	Rychlost	Počáteční teplota	Teplota vody
	[mm]	[MPa]	[m/s]	[°C]	[°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

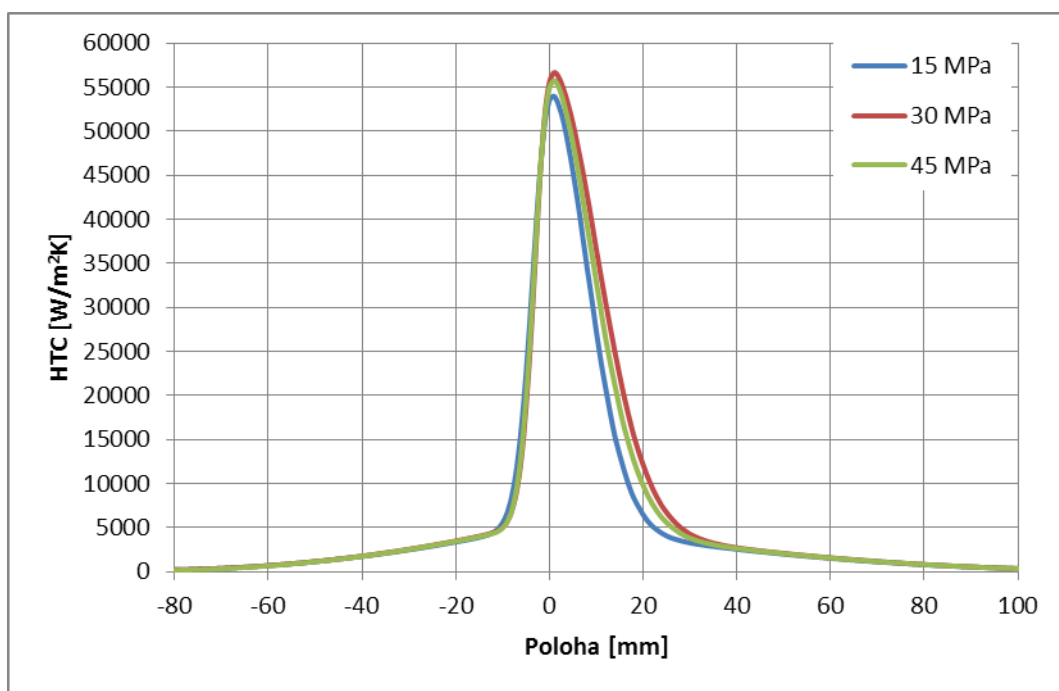
Zpracování a vyhodnocení naměřených dat:

Jak bylo uvedeno v předchozím odstavci, výsledkem experimentálního měření HTC je záznam teplot a polohy vzorku. Zpracování naměřených dat spočívá v převedení zaznamenaných průběhů teplot z jednotlivých termočlánků na hodnoty intenzity chlazení charakterizované součinitelem přestupu tepla (HTC). Transformace průběhů teplot byla prováděna tzv. inverzní úlohou, pomocí které jsou změřená data přepočítána na tepelný tok a součinitel přestupu tepla. Inverzní úloha, má v tomto případě na základě známých (změřených) teplot nalézt odpovídající hodnoty součinitele přestupu tepla, které naměřené průběhy způsobily. Tento přepočet byl prováděn dle metodiky vyvinuté v Laboratoři přenosu tepla a proudění (M. Pohanka [11]). Výstupem takto provedeného měření a následné transformace je graf funkce součinitele přestupu tepla. Maximální hodnota HTC odpovídá okamžiku průjezdu teplotního senzoru pod ostřikem.

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. 4-6. 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 je prezentován na Obr. 4-7. 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. 4-6 Hodnoty HTC pro standardní vodní paprsek



Obr. 4-7 Změřené hodnoty HTC pulzujícího paprsku

4.1.2 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 popsán v kapitole 3.3, kde byl definován jako podíl síly (která je funkcí tlaku a průtoku vody) a plochy na kterou dopadá (stopa trysky).

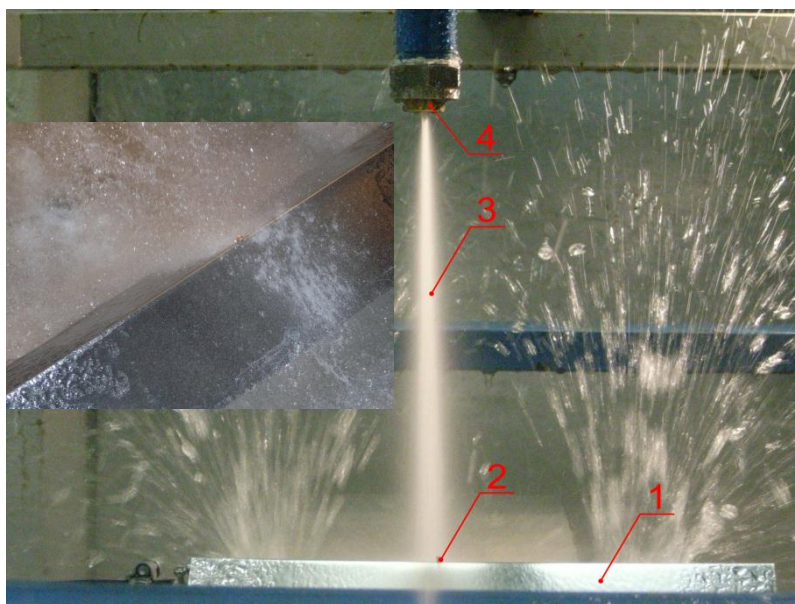
Návrh experimentu:

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. Oba typy vodního paprsku byly vyvozeny na stejných hydraulických soustavách, jako tomu bylo při měření HTC.

Realizace měření:

Měřicí zařízení pro stanovení velikosti impaktního tlaku od paprsku vody je zobrazeno na Obr. 4-8. Toto zařízení se skládá z ocelového těla, do kterého je vsazen tenzometrický snímač. Tělo experimentálního zařízení je poháněno elektromotorem, jehož prostřednictvím se může pohybovat ve dvou na sobě kolmých rovinách. 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 (viz Obr. 4-8). 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.

Pro měření vlivu tlaku vody na průběh impaktního tlaku bylo připraveno celkem šest měření. Tři měření byla prováděna na standardním typu vodního paprsku a tři měření při pulzujícím vodním paprsku. Vstupní hodnoty jednotlivých experimentů a změřených vstupních parametrů jsou uvedeny v Tab. 4-2.



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

Obr. 4-8 Experimentální měření impaktního tlaku pro danou trysku



Obr. 4-9 Experimentální měření impaktního tlaku pro pulzující vodní paprsek

Tab. 4-2 Tabulka experimentů impaktního tlaku se změřenými veličinami

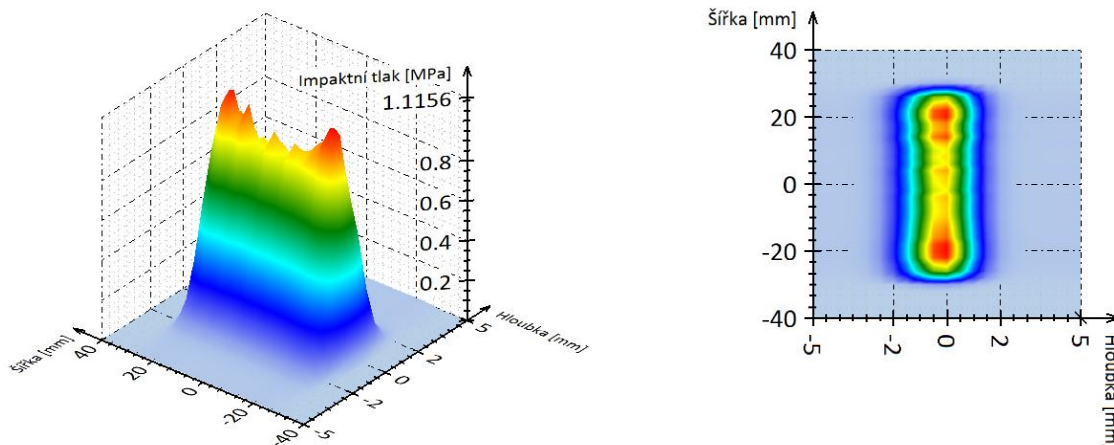
Experiment	Vzdálenost trysky	Tlak	Objemový průtok	Průměr senzoru
	[mm]	[MPa]	[l/min]	[mm]
1	100	15	43	2
2	100	30	60	2
3	100	45	75	2
pulzace				
1	100	15	43	2
2	100	30	60	2
3	100	45	75	2

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat:

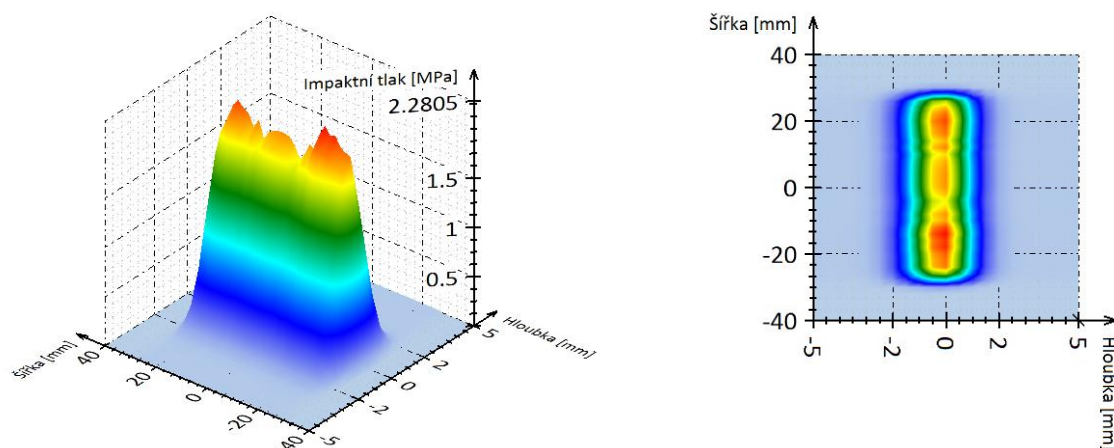
Měření impaktního tlaku vyvolaného odpovídajícím vodním paprskem ovlivněným hydraulickou soustavou včetně odkujovací trysky bylo měřeno tenzometrickým snímačem o průměru 2 mm. Měření probíhalo ve dvou na sebe kolmých směrech, proto byla měřená hodnota impaktního tlaku proměnná na aktuální poloze snímače. 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. Ideální by bylo při měření impaktního tlaku používat senzor s minimálním průměrem a tedy minimální plochou. 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. 4-10 až Obr. 4-12. Srovnání změřených hodnot impaktního tlaku pro všechny konfigurace jsou zobrazeny na Obr. 4-13. Jak je vidět ze srovnání jednotlivých křivek, maximální hodnoty impaktního tlaku respektují velikost tlaku vody v hydraulické soustavě. Změřené a následně přepočítané hodnoty pulzujícího vodního paprsku jsou uvedeny na Obr. 4-14 až Obr. 4-16. Srovnání jednotlivých konfigurací pro pulzující vodní paprsek je prezentováno na Obr. 4-17. 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

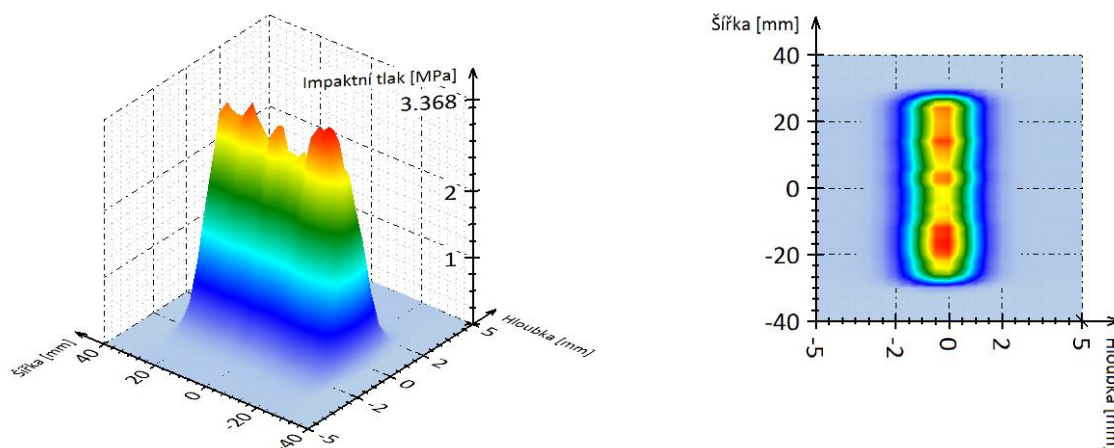
vidět, že vyšších hodnot bylo dosaženo ve všech měřených konfiguracích pro standardní vodní paprsek zhruba o 0,5 MPa při stejné šířce stopy trysky. Hloubka stopy trysky byla při standardním typu vodního paprsku pro všechny měřené tlaky zhruba stejná, při pulzujícím vodním paprsku se hloubka stopy se zvyšujícím tlakem vody zkracovala.



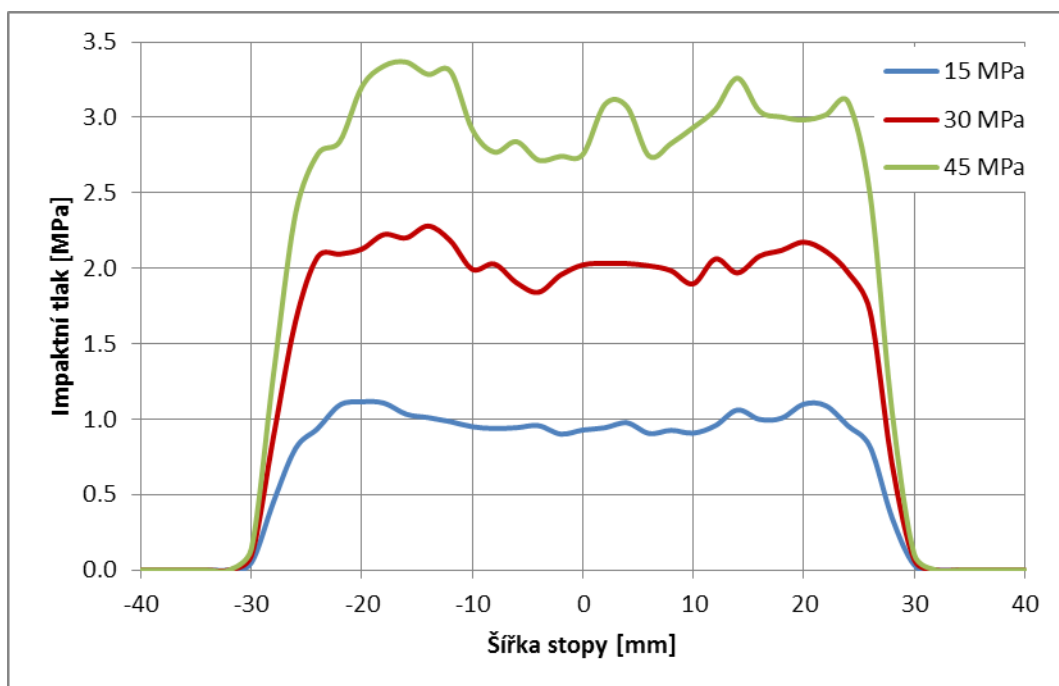
Obr. 4-10 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 15 MPa



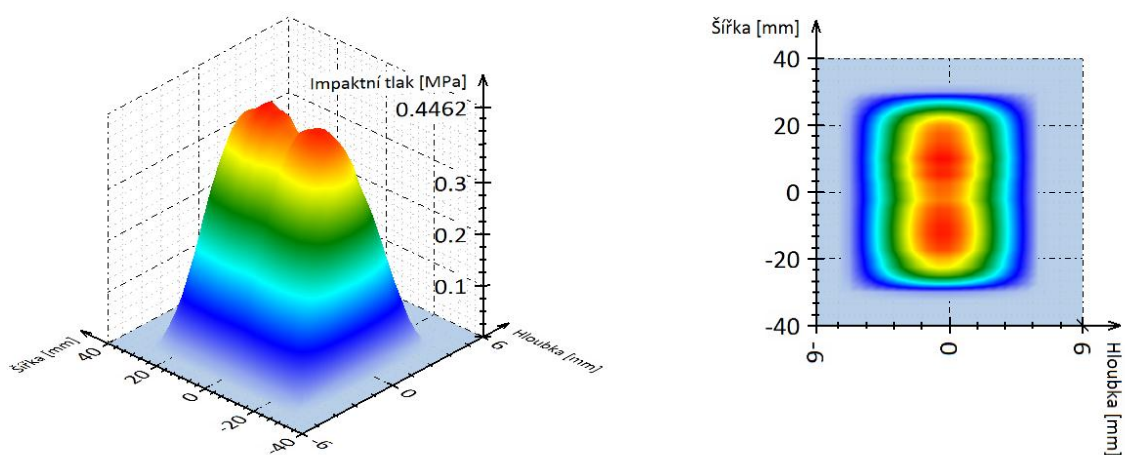
Obr. 4-11 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 30 MPa



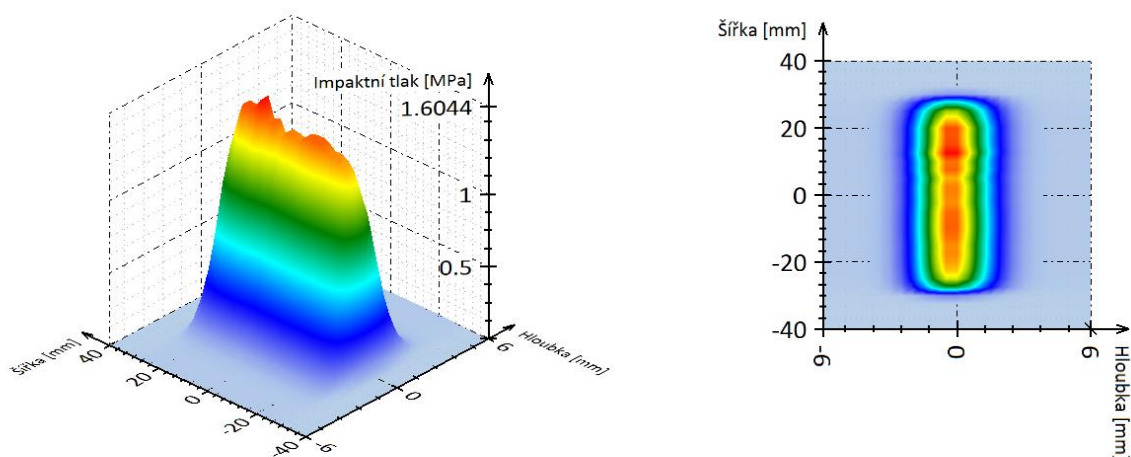
Obr. 4-12 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 45 MPa



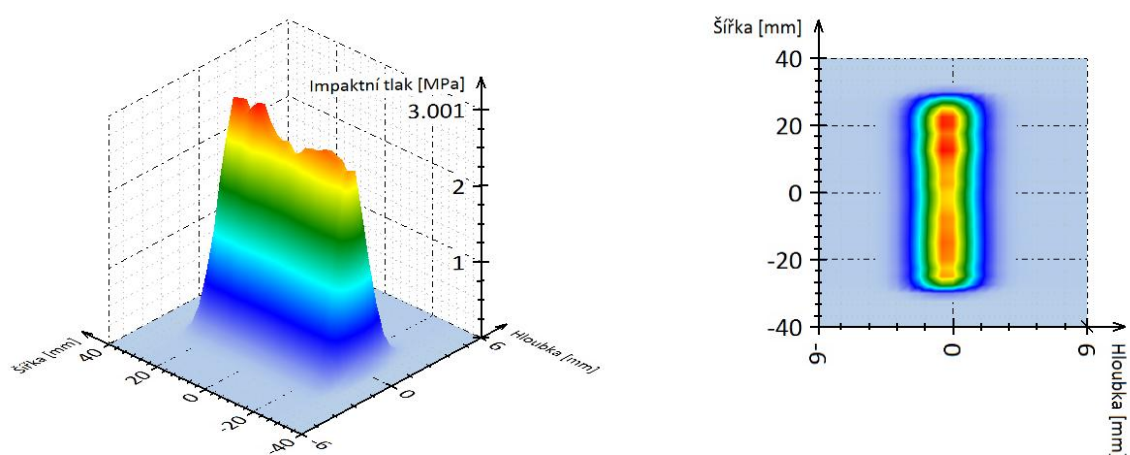
Obr. 4-13 Změřené hodnoty impaktního tlaku



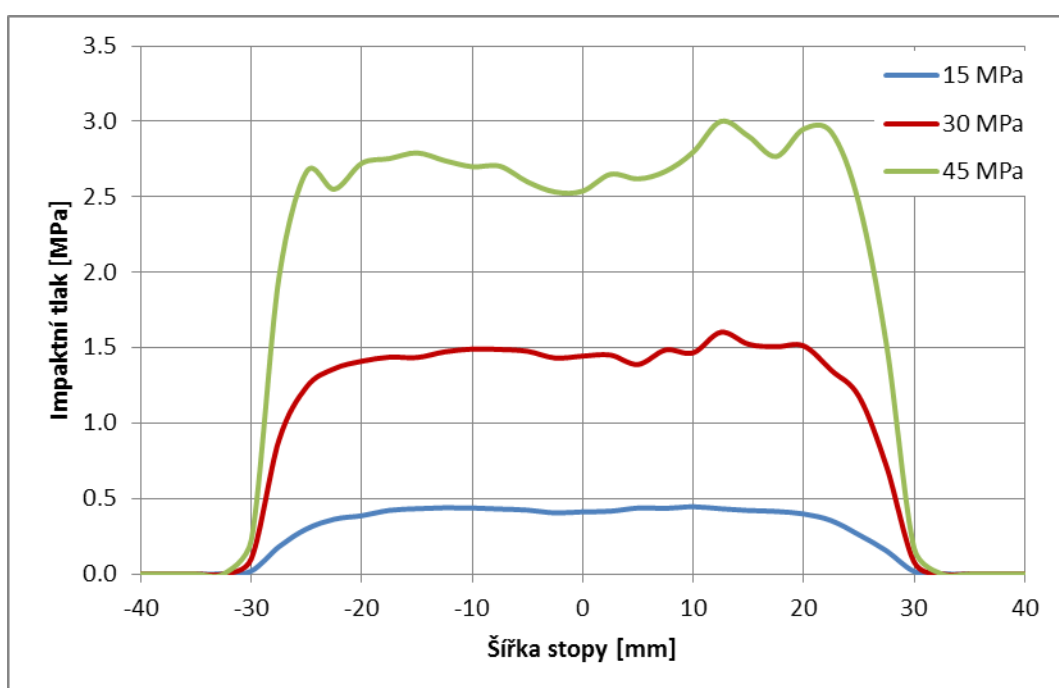
Obr. 4-14 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 15 MPa



Obr. 4-15 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 30 MPa



Obr. 4-16 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 45 MPa



Obr. 4-17 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci

4.2 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 a simulaci 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. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, 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.

Cílem výpočtové simulace hydraulického odstraňování okují bylo modelování prakticky provedených experimentálních měření standardního typu vodního paprsku popsanych v kapitole 4.1.1 a 4.1.2. Výpočtová analýza byla tedy zaměřena na simulaci vlivu impaktního tlaku a působení teplotního vlivu prostřednictvím HTC. Výpočtová simulace byla vyšetřována z hlediska teplotně napjatostní analýzy a strukturní analýzy.

Model geometrie pro oba typy výpočtového modelování byl připraven s ohledem na geometrii vzorků používaných při experimentálním měření v Laboratoři přenosu tepla a proudění.

4.2.1 Výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují

Hlavním cílem této analýzy bylo srovnání vlivu teplotní a mechanické složky při hydraulickém odstraňování okují z povrchu oceli z makro a mikro hlediska. Jak již bylo v úvodu zmíněno, mechanismus odkujování byl dekomponován na termální a mechanickou část. Pro makro hledisko byly stanoveny jako podstatné veličiny průběh funkce součinitele přestupu tepla a to konkrétně pro termální části analýzy. Pro mechanickou to byl průběh impaktního tlaku vodního paprsku od dané odkujovací trysky a při daném tlaku. Obě tyto veličiny byly obdrženy z reálného experimentu. Stanovení podstatných veličin pro mikro hledisko kvantitativně odpovídalo předchozím uvedeným veličinám pro makro hledisko. Kvalitativně byly rozdílné, protože vycházely z výpočtového modelování uvedeného v článku [12]. Hodnoty přestupu tepla a impaktního tlaku odpovídaly a reprezentovaly jednu vodní kapku. Takto stanovené podstatné veličiny byly zohledněny ve výpočtové analýze a bylo provedeno srovnání jejich vlivů při numerické simulaci hydraulického odkujovacího procesu.

Metodika řešení:

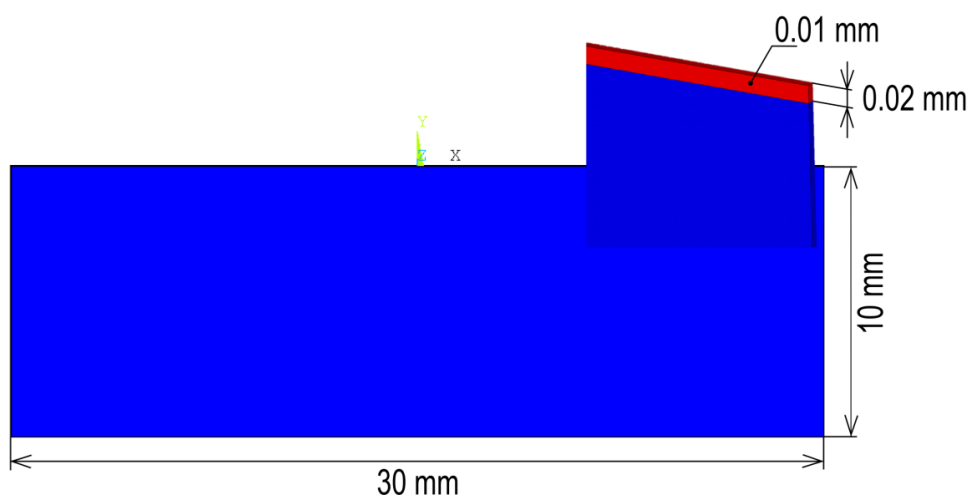
Metodologie výpočtu byla zvolena na základě stanoveného cíle. Výpočtové modelování, které bylo aplikováno jako metoda řešení bylo prováděno z makro a mikro hlediska. Oba přístupy přinesly kvalitativně stejné výsledky, které bylo možné srovnat. Pro oba přístupy byla použita stejná metodika výpočtu. U 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. Tento postup byl aplikován jak pro makro, tak pro mikro hledisko. Obdržené výsledky provedených výpočtových analýz byly následně zpracovány a prezentovány v této práci.

- ***Model geometrie a topologie***

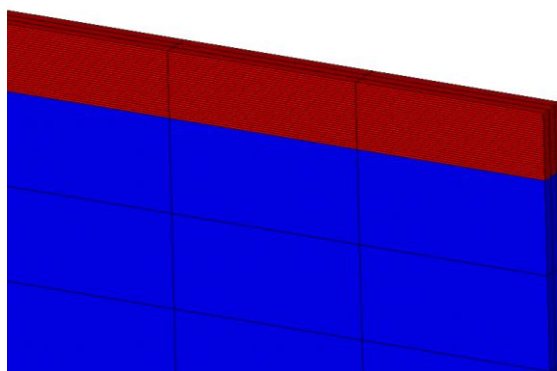
Model geometrie byl připraven na základě předchozích výpočtů s ohledem na geometrii vzorků používaných v Laboratoři přenosu tepla a proudění při odkujovacích experimentech nebo při měření součinitelů přestupu tepla. Model geometrie je složen ze dvou částí. První

robustní část tvořil základní materiál (ocel) a druhou část tvořila tenká vrstva okují. Vrstva okují nebyla dále členěná a byla souvislá. Tato struktura byla stejná pro obě hlediska. Geometrickými rozměry se však lišily (viz Obr. 4-18 a Obr. 4-20). Pro jednoznačnou definici jednotlivých vrstev byla v modelu definována červená barva, která reprezentuje vrstvu okují s odpovídajícími materiálovými vlastnostmi a modrá barva reprezentující základní materiál.

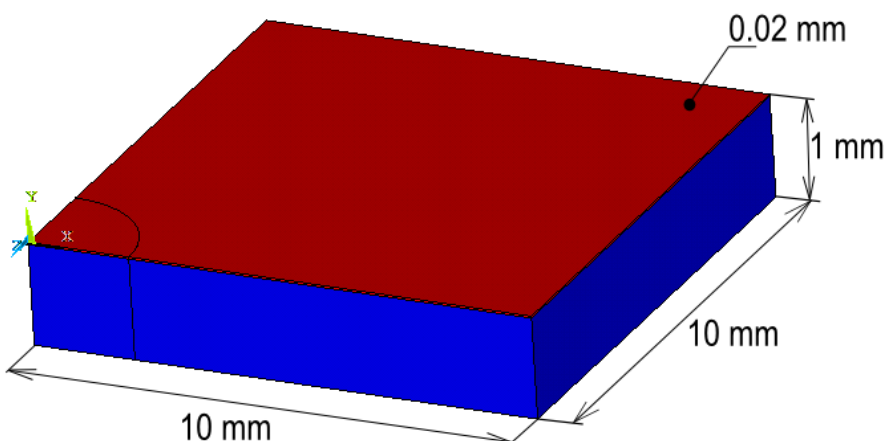
Model topologie byl vytvořen pomocí tzv. diskretizace modelu, čemuž odpovídá vytvoření sítě, tak aby bylo možné s dostatečnou rozlišovací úrovní popsat zkoumané veličiny a jevy. Pro teplotní – transientní úlohu byl pro diskretizaci zvolen lineární teplotní prvek „solid 70“ [13]. Tento prvek má pouze jeden stupeň volnosti, kterým je teplota. Pro statickou strukturní analýzu byl zvolen odpovídající strukturní prvek „solid 185“ [13] s lineární bázovou funkcí. Tento prvek disponuje třemi stupni volnosti, kterými jsou posuvy ve třech směrech. Oba tyto typy prvků byly použity jak pro model topologie makro hlediska, tak pro model topologie mikro hlediska. Počet prvků sítě vytvořené pro makro hledisko odpovídalo počtu 231 000, pro mikro hledisko 97 980 lineárních prvků. Odpovídající modely topologie jsou uvedeny na Obr. 4-19 a Obr. 4-21.



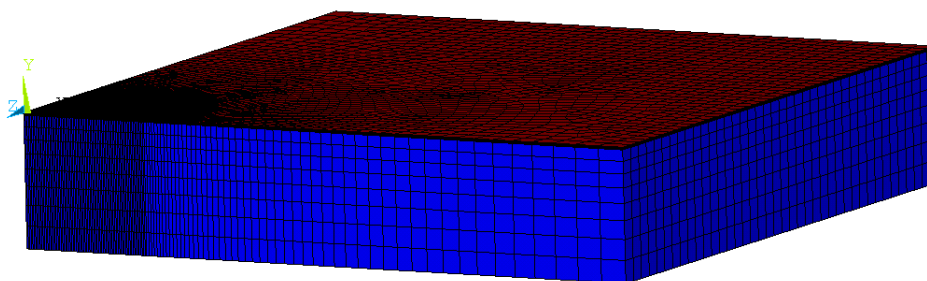
Obr. 4-18 Model geometrie pro makro hledisko



Obr. 4-19 Model topologie pro makro hledisko (detail)



Obr. 4-20 Model geometrie pro mikro hledisko



Obr. 4-21 Model topologie pro mikro hledisko

• Model materiálu

Model geometrie je složen ze dvou typů materiálů, proto bylo potřeba pro oba zadat materiálové vlastnosti. Z důvodu kombinace teplotní a strukturní úlohy byly použity materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě. Materiálové vlastnosti použité pro ocel přibližně odpovídají hodnotám pro konstrukční ocel S235 [14][15]. Materiálové vlastnosti vrstvy oxidů odpovídají hodnotám pro wüstit (FeO) [2][4]. Hodnoty materiálových vlastností pro oba materiály jsou uvedeny níže (viz Tab. 4-3 resp. Tab. 4-4). Pro postihnání plastického chování byl použit bilineární materiálový model s izotropním zpevněním.

Tab. 4-3 Fyzikální a mechanické vlastnosti konstrukční oceli [14][15]

Teplota	Tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Hustota	Modul pružnosti	Poissonův poměr
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[1/°C]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
20	513	12.6	15.8e-6	7800	2.1e11	0.3
100	514	14.0	16.5e-6	7780	2.1e11	0.3
700	580	24.7	19.1e-6	7570	2.7e10	0.3
800	593	26.4	19.4e-6	7540	1.9e10	0.3
900	605	27.8	19.6e-6	7510	1.4e10	0.3
1000	616	29.2	19.8e-6	7480	9.5e9	0.3

Tab. 4-4 Fyzikální a mechanické vlastnosti wüstitu [2][4]

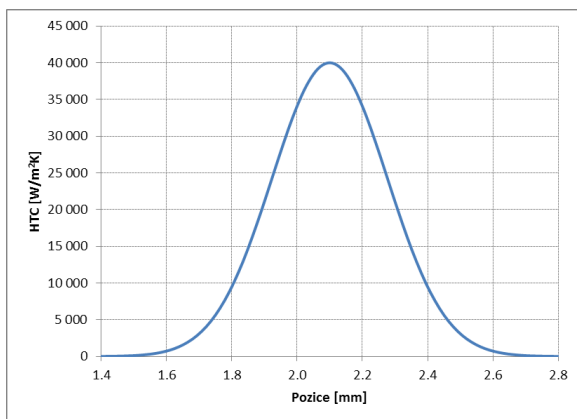
Teplota	Tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Hustota	Modul pružnosti	Poissonův poměr
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[1/°C]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
20	-	-	12.0e-6	5700	2.4e11	0.3
100	-	-	12.0e-6	5700	2.3e11	0.3
700	883	1.7	12.0e-6	5700	1.6e10	0.3
800	913	1.8	12.0e-6	5700	1.5e10	0.3
900	942	1.9	12.0e-6	5700	1.4e10	0.3
1000	972	2.0	12.0e-6	5700	1.3e10	0.3

- **Model okrajových podmínek a zatížení**

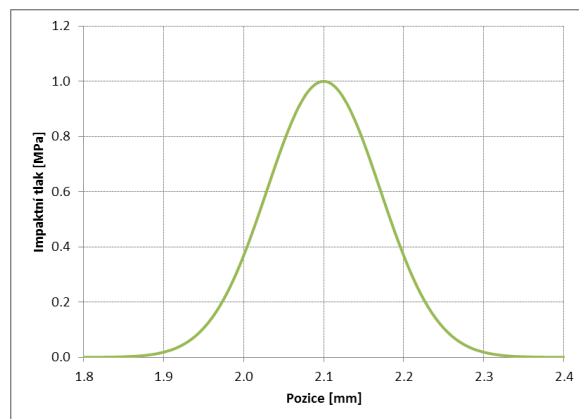
Tato kapitola je rozdělena na dvě části, a to okrajové podmínky pro makro hledisko a okrajové podmínky pro mikro hledisko. Okrajové podmínky pro obě tyto části jsou dále rozděleny na zatížení pro teplotní a pro strukturální analýzu.

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. Vstupními daty pro zatížení jsou data obdržena z experimentálního měření, jehož metodika měření byla popsána v kapitole 4.1.1 a 4.1.2. Pro teplotní úlohu byl použit průběh funkce HTC v závislosti na poloze (viz Obr. 4-22). Zatížením vstupujícím do strukturální úlohy byl průběh funkce impaktního tlaku vodního paprsku na poloze (viz Obr. 4-23)

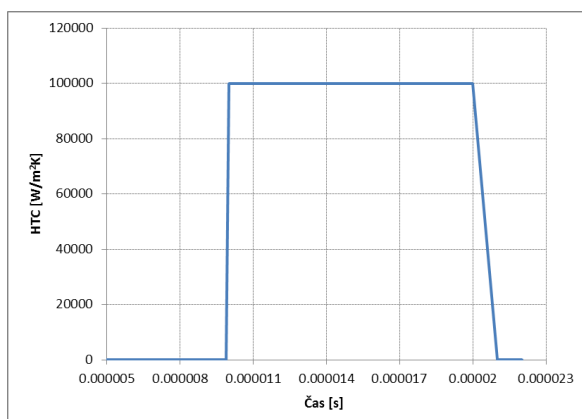
Stejně jako v předchozím případě byly pro mikro hledisko teplotní okrajové podmínky stanoveny konstantní hodnotou teploty modelu, která byla 1000°C. Obdobným způsobem jako u předchozího případu simulovaly reálné chování teplotně a mechanicky zatěžovaného vzorku. Příslušným plochám byly omezeny odpovídající posuvy. Pro teplotní úlohu byl použit linearizovaný průběh HTC v závislosti na čase (viz Obr. 4-24). Zatížením vstupujícím do strukturální úlohy byl linearizovaný průběh impaktního tlaku vodního paprsku na čase (viz Obr. 4-25). Obě zatížení jak pro teplotní, tak pro strukturální úlohu jsou velice rychlé děje a pohybují se řádově v μs .



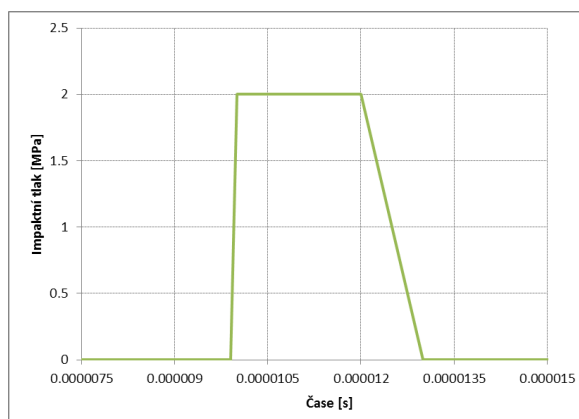
Obr. 4-22 Průběh funkce HTC vodního paprsku



Obr. 4-23 Průběh funkce impaktního tlaku vodního paprsku



Obr. 4-24 Průběh funkce HTC vodní kapky



Obr. 4-25 Průběh funkce impaktního tlaku vodní kapky

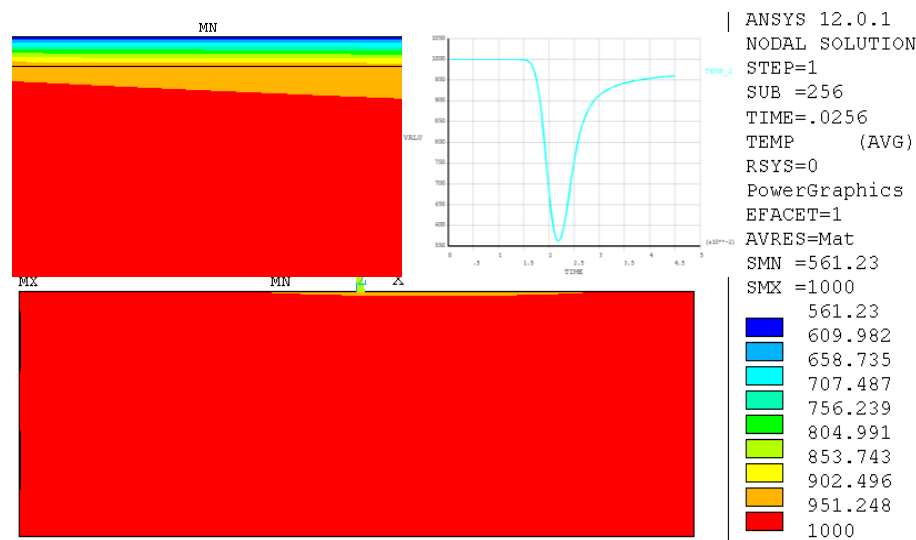
Výsledky výpočtové analýzy

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. Výsledky jsou prezentovány na Obr. 4-27 až Obr. 4-29. 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. Výsledky této analýzy jsou uvedeny na Obr. 4-30 až Obr. 4-32. Shrnutí

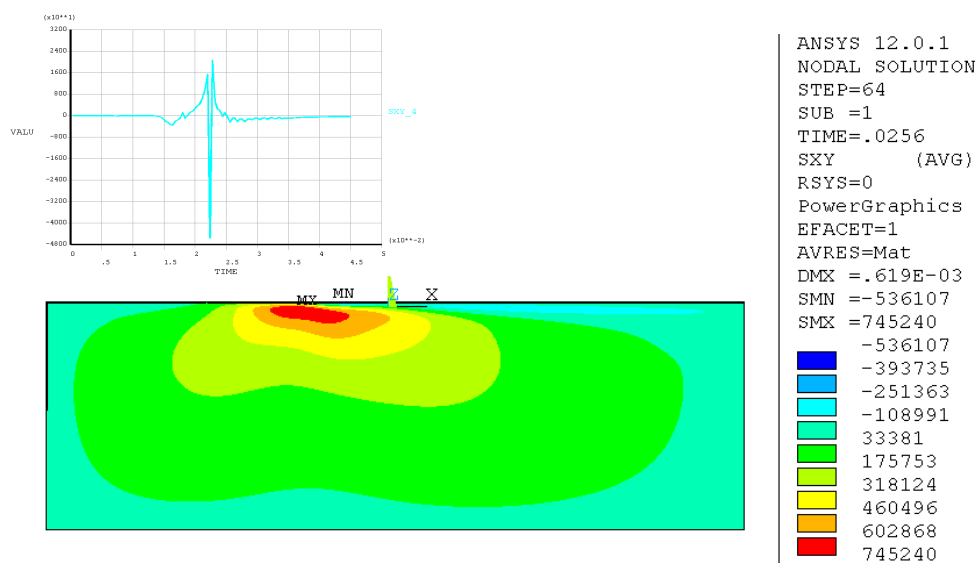
dosažených výsledků a srovnání jednotlivých složek napětí pro oba přístupy jsou prezentovány na Obr. 4-34 resp. Obr. 4-35.

• Makro hledisko – teplotní analýza

V tomto případě byl zkoumán vliv teplotní složky reprezentovaný průběhem funkce HTC na pokles teplot ve vzorku. Výsledkem byl průběh teploty vzorku a průběh napětí vyvolaný teplotním zatížením.



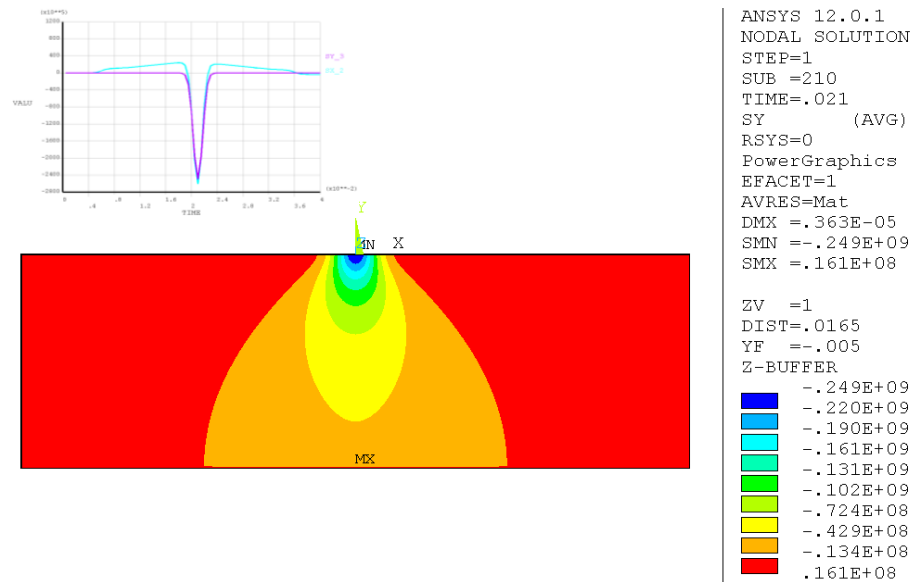
Obr. 4-26 Průběh teploty ve vzorku pro makro hledisko



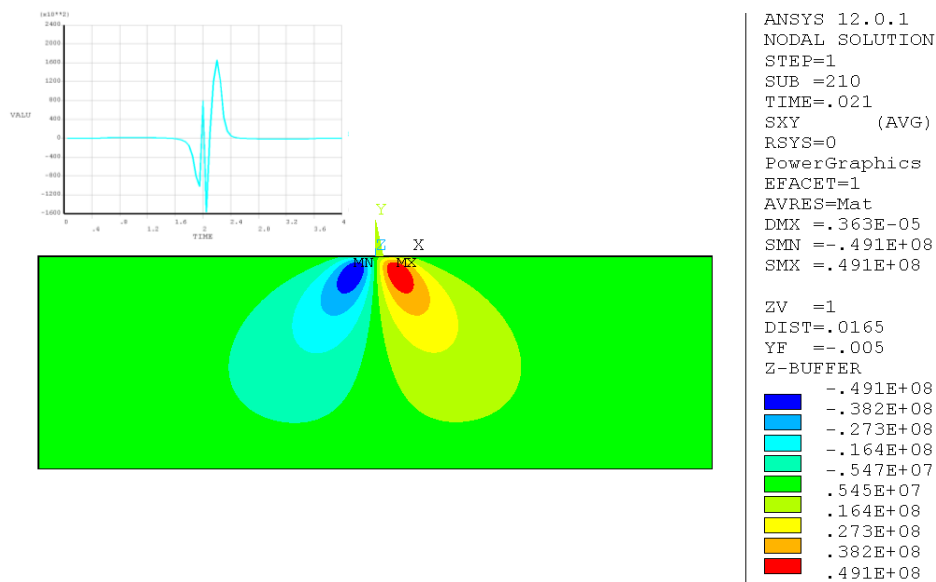
Obr. 4-27 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko

• Makro hledisko – strukturní analýza

V případě strukturní analýzy byl zkoumán vliv mechanické složky vodního paprsku, která je reprezentována průběhem funkce impaktního tlaku. Výsledkem této analýzy byl průběh napětí vyvolaný mechanickým zatížením.



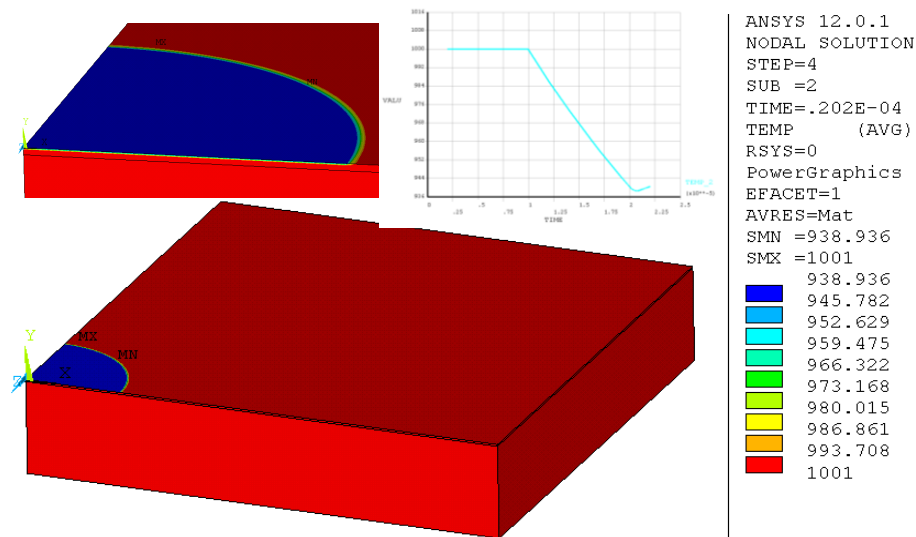
Obr. 4-28 Napětí ve směru Y (ve směru působení impaktního tlaku) ve vzorku pro makro hledisko



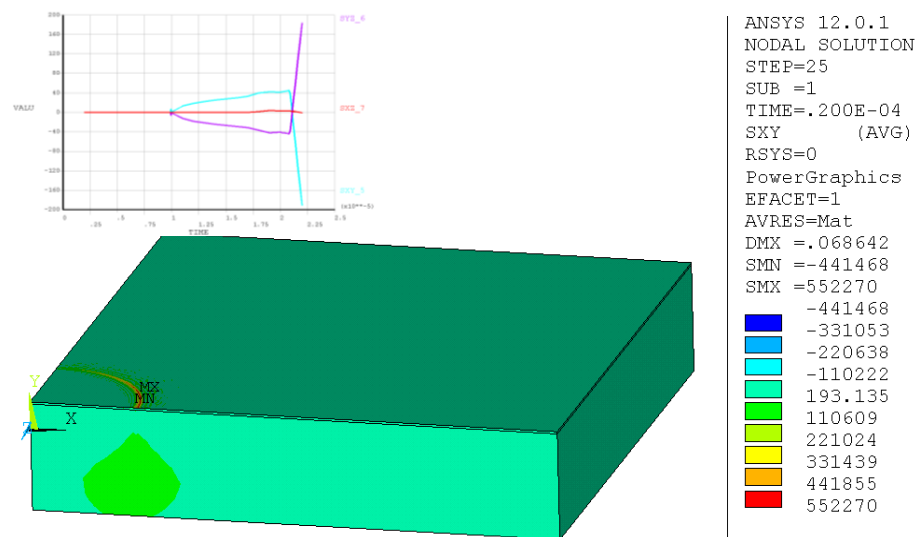
Obr. 4-29 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko

• Mikro hledisko – teplotní analýza

Teplotní analýza z mikro hlediska, měla za cíl vyšetřit vliv teplotní složky dopadající kapky vody, reprezentovaný průběhem funkce HTC. Výsledkem byl průběh teploty vzorku a průběh napětí vyvolaný teplotním zatížením.



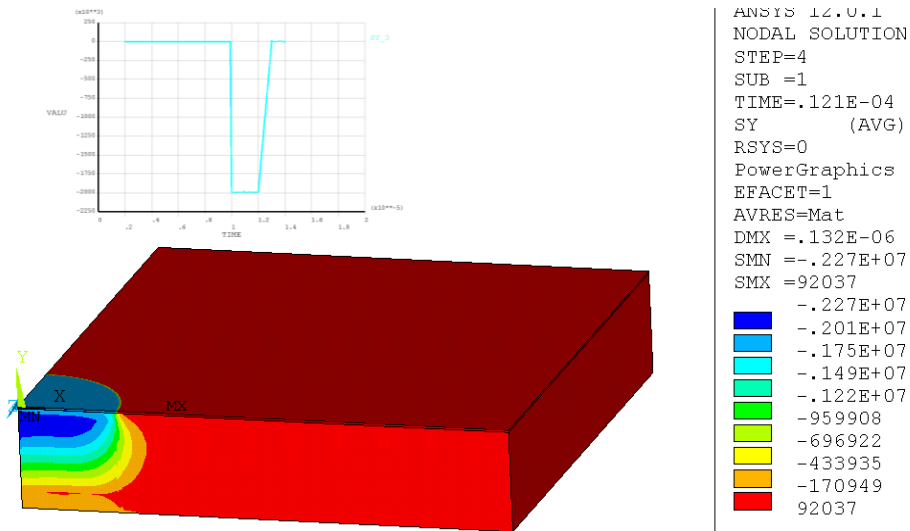
Obr. 4-30 Průběh teploty ve vzorku pro mikro hledisko



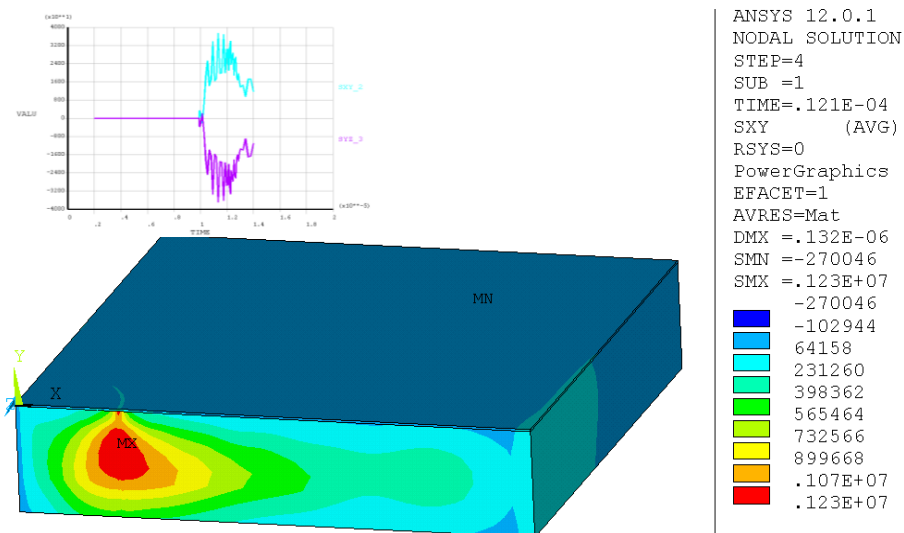
Obr. 4-31 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko

• Mikro hledisko – strukturní analýza

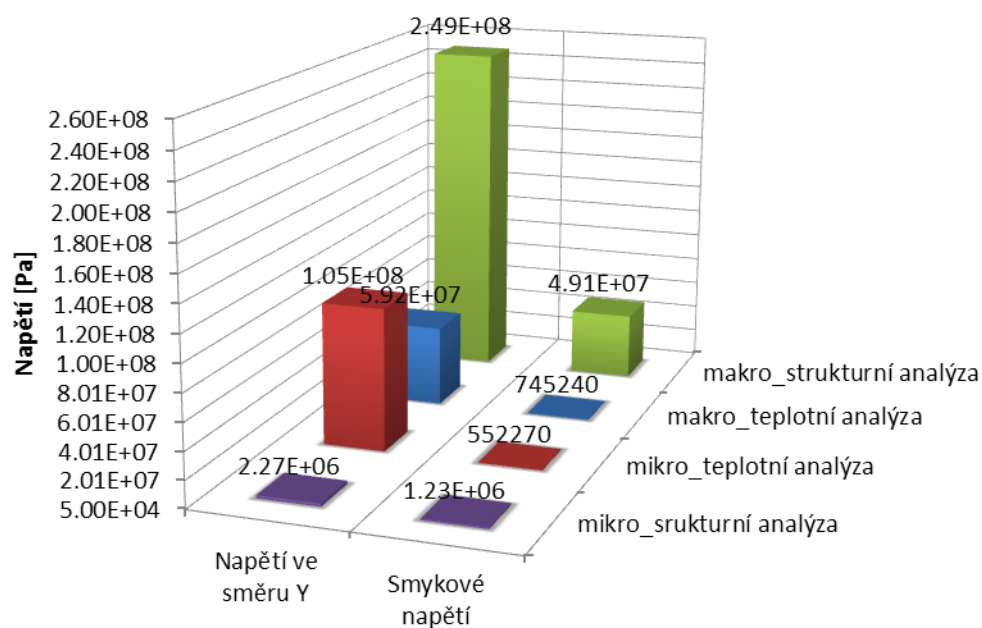
Strukturní analýza pro mikro hledisko, zkoumala vliv mechanické složky dopadající kapky vody, která vyvolává odpovídající velikost impaktního tlaku. Výsledkem této analýzy byl průběh napětí.



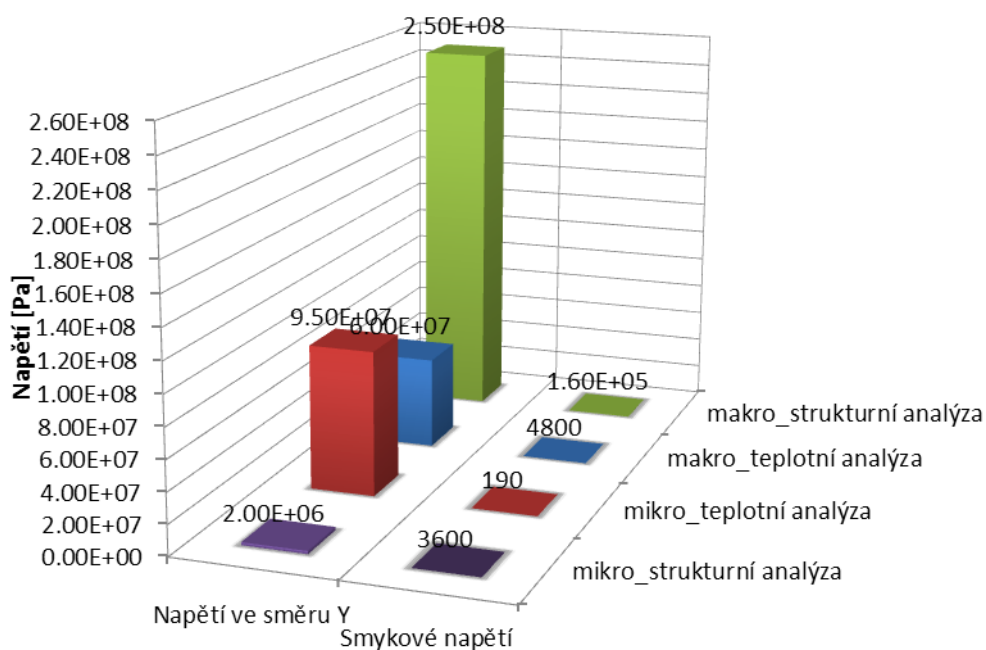
Obr. 4-32 Napětí ve směru Y (ve směru působení impaktního tlaku) ve vzorku pro makro hledisko



Obr. 4-33 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko



Obr. 4-34 Vyhodnocení složek napětí v základním materiálu pro všechny analýzy



Obr. 4-35 Vyhodnocení složek napětí v okujích pro všechny analýzy

4.2.2 Výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují

Výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují měla za cíl simulovat reálné experimentální měření odstraňování okují, které bylo provedeno v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Experiment byl složen ze tří etap měření. První měření bylo zaměřeno na odstraňování okují při vysokém hydraulickém tlaku. Toto experimentální měření bylo prováděno na dvou typech vzorků. Prvním typem byla klasická uhlíková ocel, druhým typem vzorku byla ocel s vyšším obsahem křemíku. Pro oba typy vzorků byla po experimentálním měření vyhodnocena kvalita odkujeného povrchu. Druhé měření mělo za cíl stanovit hodnotu impaktního tlaku, vyvolaného použitou vysokotlakou hydraulickou soustavou, zejména odkujovací tryskou. Při třetím měření byl proveden experiment pro zjištění funkce HTC dané vysokotlaké odkujovací soustavy. Výsledky měření impaktního tlaku a HTC byly použity ve výpočtovém modelování jako vstupní data.

Výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují byla analyzována z hlediska teplotně napjatostní analýzy a strukturní analýzy. Pro teplotně napjatostní analýzu byly použity teplotní okrajové podmínky a to teplota vzorku, definovaná funkce součinitele přestupu tepla. Pro strukturní analýzu byly zavedeny odpovídající okrajové podmínky s ohledem na podmínky použité při experimentech a zatížení funkcí průběhu impaktního tlaku, vyvolaného dopadajícím vodním paprskem. Zatížení, které bylo aplikováno v teplotně napjatostní i ve strukturní analýze, odpovídalo naměřeným hodnotám z výše uvedených experimentů.

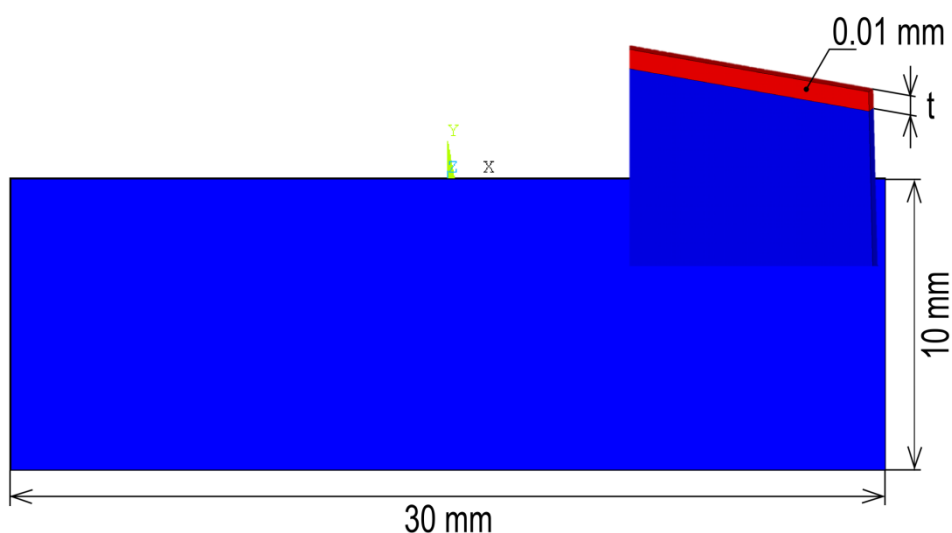
Metodika řešení:

Metodika řešení daného problému, byla zvolena s ohledem na fyzikální podstatu vstupních dat. Jak již bylo uvedeno v předešlém odstavci, výpočtová simulace byla rozdělena na dvě části. První část analýzy zahrnovala teplotně napjatostní analýzu. V tomto případě byly aplikovány teplotní okrajové podmínky, kterými byly změřené hodnoty funkce HTC a teploty vzorku při experimentálním měření. Tato úloha byla řešena jako transientní teplotní analýza. Výsledkem této simulace bylo rozložení teplotního pole vlivem teplotního zatížení. Na základě vypočteného teplotního pole byla provedena deformačně napjatostní analýza, která ukázala vliv teplotního zatížení na napjatost v tělese. Druhá část analýzy byla zaměřena na strukturní analýzu, která zahrnovala vliv mechanického zatížení reprezentovaného odpovídajícím impaktním tlakem vyvolaným dopadajícím vodním paprskem. Výsledkem této simulace byla napjatost v tělese.

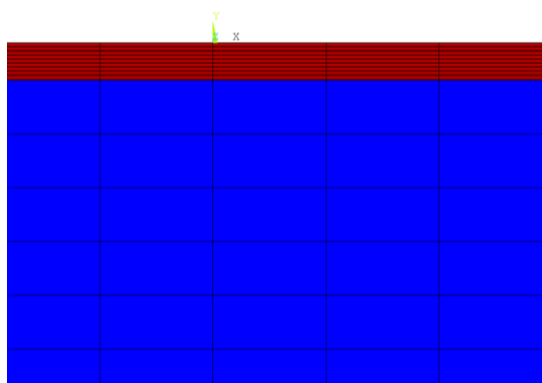
- **Model geometrie a topologie**

Model geometrie, který byl použit pro tuto simulaci, geometricky odpovídal modelu, který byl prezentován v předchozí kapitole jako model geometrie pro makro hledisko (viz Obr. 4-36). Model byl postaven stejně jako v předchozím případě, geometrie byla složena 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. Tloušťka t reprezentovala skutečnou tloušťku vrstvy okují změřenou na experimentálních vzorcích ($45\mu\text{m}$ resp. $21,7\mu\text{m}$). Model geometrie byl složen ze dvou vrstev (ocel, okuje), pro oba byly použity odpovídající materiálové charakteristiky.

Model topologie taktéž odpovídal modelu topologie prezentovanému v předchozí kapitole pro makro hledisko. Pro teplotní – transientní úlohu byl pro vytvoření odpovídající kvality sítě zvolen lineární teplotní prvek „solid 70“ [13]. Pro statickou strukturní analýzu byl zvolen odpovídající strukturní prvek „solid 185“ [13]. Počet prvků sítě 231 000 byl použit pro dostatečně definovanou diskretizaci (viz Obr. 4-37).



Obr. 4-36 Model geometrie



Obr. 4-37 Model topologie (detail)

- **Model materiálu**

Jak již bylo uvedeno, model geometrie sestával ze dvou vrstev. První vrstvu tvořil základní materiál, kterým byla ocel. Druhou vrstvu tvořila vrstva okují. Pro obě vrstvy byly použity odpovídající materiálové charakteristiky. Řešení teplotní a strukturní úlohy vyžadovalo použití materiálových charakteristik závislých na teplotě. Ve výpočtové simulaci byly uvažovány dva modely materiálu, které reprezentovaly materiálové charakteristiky experimentálních vzorků (konstrukční ocel, a ocel s vyšším obsahem křemíku). Vzorky vyrobené z konstrukční oceli byly označeny jako „C-plate“. Vzorky vyrobené z oceli s vyšším obsahem křemíku byly označeny jako „Si-plate“. Výpočtová simulace byla provedena pro oba typy oceli, stejně jako experimentální měření. Materiálové charakteristiky použité pro dané typy oceli odpovídaly oceli 11 366 [16] resp. P690QL2 [17]. Materiálové charakteristiky vrstvy okují pro ocel „11 366“ odpovídaly hodnotám pro wüstit (FeO) [2][4], „P690QL2“ hodnotám pro silikon [18]. Pro vrstvu oceli i okují byl použit lineárně elastický model materiálu. Hodnoty materiálových vlastností použitých pro výpočtovou simulaci jsou uvedeny v tabulkách (viz Tab. 4-5 a Tab. 4-6).

Tab. 4-5 Fyzikální a mechanické vlastnosti pro oba typy oceli [16][17]

Ocel 11 366						
Teplota	Tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Hustota	Modul pružnosti	Poissonův poměr
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[1/°C]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
20	513	54.5	-	7850	2.06e11	0.3
100	514	52.0	11.6e-6	7780	2.01e11	0.3
700	580	33.0	19.1e-6	7570	1.39e11	0.3
800	593	31.0	19.4e-6	7540	1.28e11	0.3
900	605	30.0	19.6e-6	7510	1.16e11	0.3
1000	616	29.0	19.8e-6	7480	1.03e11	0.3
Ocel P690QL2						
20	513	55.0	-	7850	2.14e11	0.3
100	514	52.0	15.8e-6	7780	2.08e11	0.3
700	580	33.0	19.1e-6	7570	1.51e11	0.3
800	593	31.0	19.4e-6	7540	1.39e11	0.3
900	605	30.0	19.6e-6	7510	1.27e11	0.3
1000	616	29.0	19.8e-6	7480	1.14e11	0.3

Tab. 4-6 Fyzikální a mechanické vlastnosti okují [2][4][18]

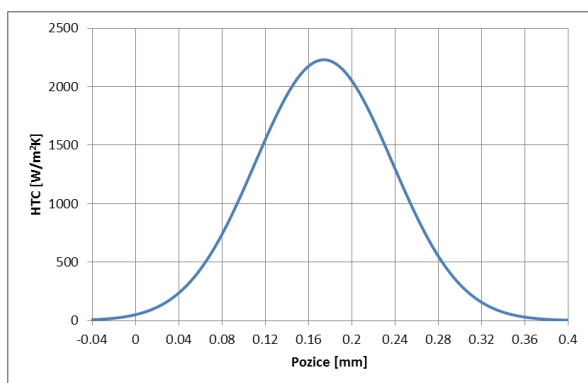
wüstit						
Teplota	Tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Hustota	Modul pružnosti	Poissnův poměr
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[1/°C]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
20	-	10.0	-	5700	1.30e11	0.36
100	-	9.5	11.0e-6	5700	1.26e11	0.36
700	883	6.5	16.0e-6	5700	9.50e10	0.36
800	913	6.0	16.0e-6	5700	9.00e10	0.36
900	942	4.0	17.0e-6	5700	8.50e10	0.36
1000	972	2.0	17.5e-6	5694	7.90e10	0.36
silikon						
20	-	3.5	-	2329	1.79e11	0.28
100	-	3.3	8.0e-6	2329	1.79e11	0.28
700	883	1.8	11.5e-6	2329	1.35e11	0.28
800	913	1.5	12.0e-6	2329	1.28e11	0.28
900	942	1.3	13.0e-6	2329	1.20e11	0.28
1000	972	1.0	14.0e-6	2320	1.13e11	0.28

- **Model okrajových podmínek a zatížení**

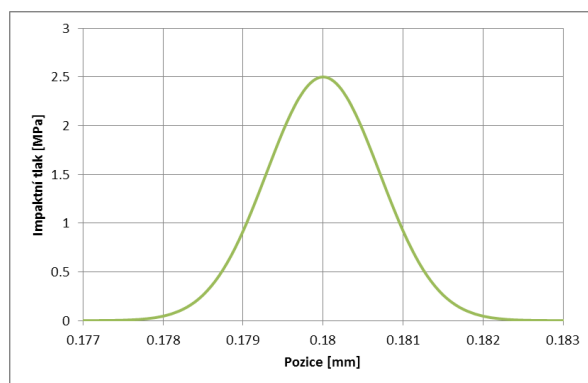
Model okrajových podmínek byl sestaven z experimentálního měření. Model okrajových podmínek spočíval v uložení geometrického modelu tak, aby odpovídal skutečnému zachycení všech odpovídajících stupňů volnosti zkoumané soustavy.

Model zatížení byl připraven pro teplotní a strukturní úlohu separátně. Teplotní zatížení odpovídalo změřeným teplotám vzorků a zejména změřeným průběhům součinitele přestupu tepla (HTC). Průběh HTC je uveden na Obr. 4-38.

Pro strukturní analýzu, která reprezentovala vliv mechanické složky vodního paprsku, byly změřeny funkce impaktního tlaku. Změřené průběhy impaktního tlaku jsou prezentovány na Obr. 4-39. Hodnoty okrajových podmínek a hodnoty zatížení byly pro oba typy vzorků (konstrukční a křemíková ocel) stejné.



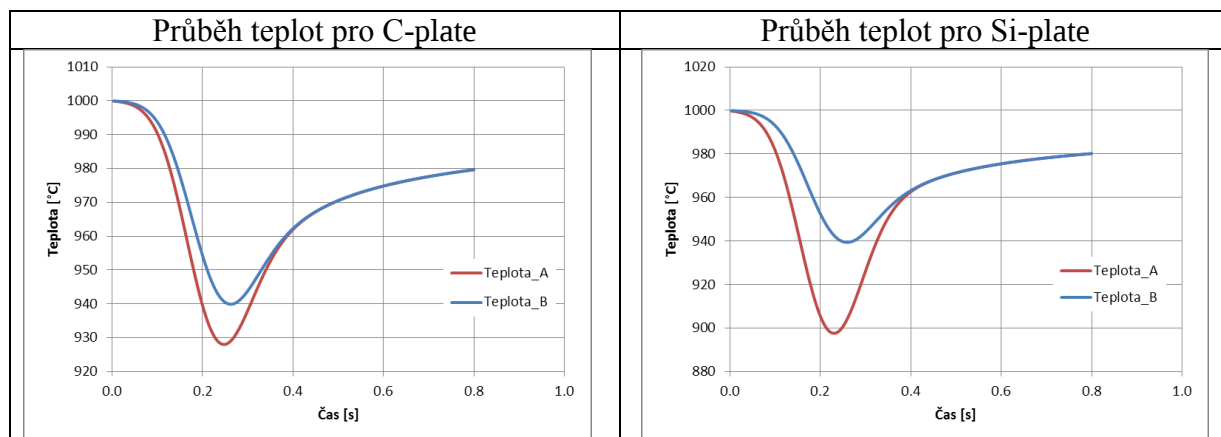
Obr. 4-38 Změřený průběh HTC (teplotní zatížení)



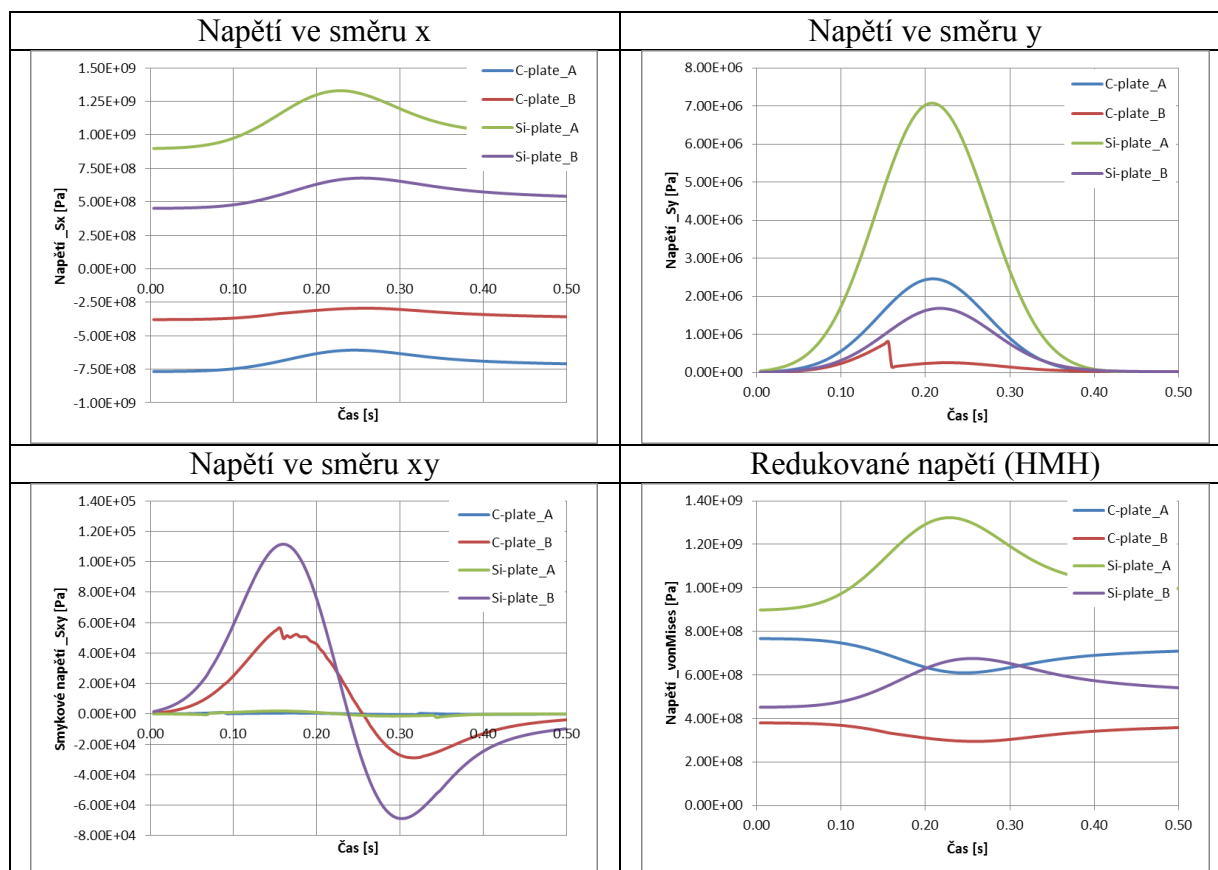
Obr. 4-39 Změřený průběh impaktního tlaku (mechanické zatížení)

Výsledky výpočtové analýzy

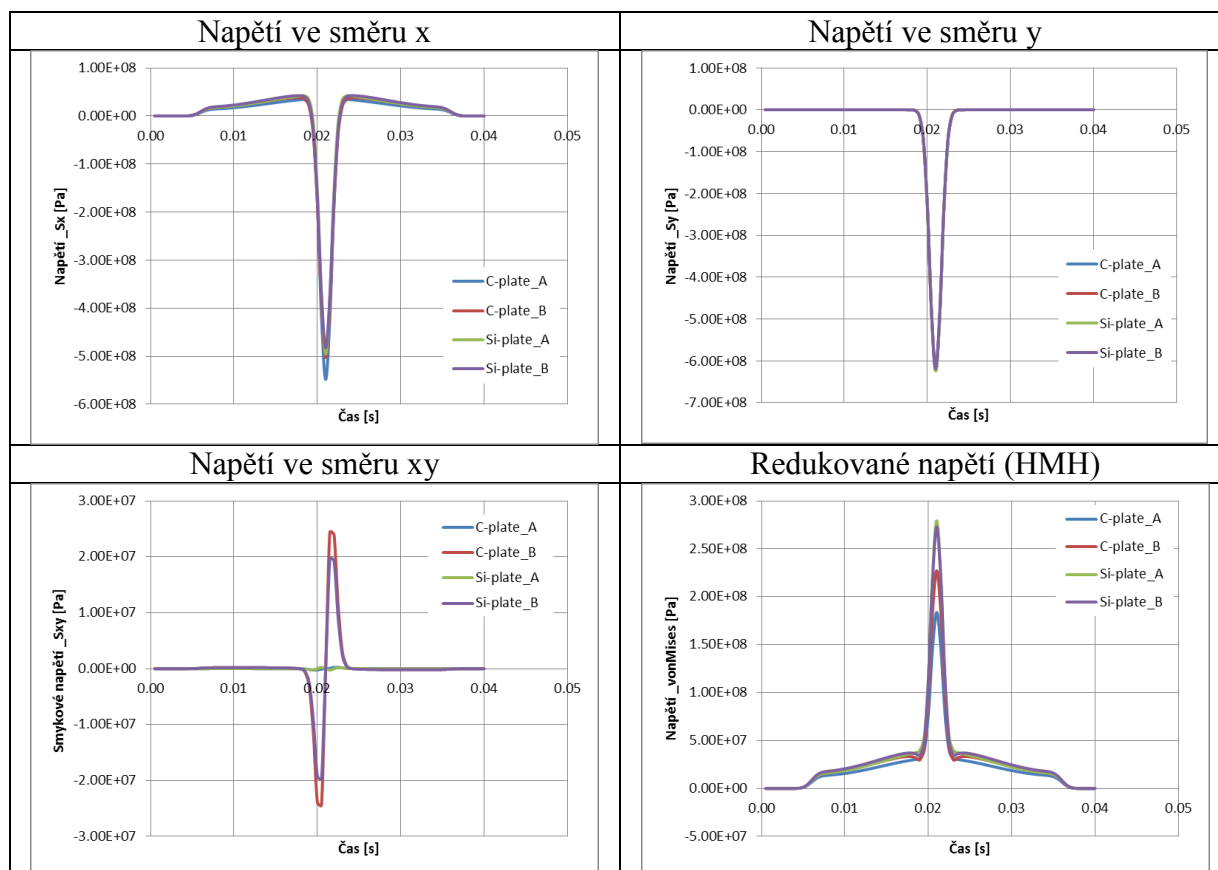
Výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují, byla rozdělena na simulaci teplotního zatížení vlivem HTC a mechanického zatížení vlivem impaktního tlaku. Výsledky výpočtové simulace byly vyhodnocovány ve dvou místech. První místo bylo na povrchu okují, druhé místo bylo na rozhraní ocel-okuj. Tato místa byla zvolena proto, aby bylo možné popsat napjatost jak na povrchu okují, kde dochází k bezprostřednímu kontaktu s dopadajícím paprskem vody, tak na rozhraní okují a oceli, kde se zkoumá kvalita povrchu oceli po procesu odkujování. Níže uvedené výsledky jsou tedy prezentovány vždy pro dva typy experimentálních desek a dvě místa vyhodnocení (místo A - povrch okují, místo B – rozhraní okuj, ocel). Dosažené výsledky jsou prezentovány ve dvou tabulkách dle analýzy, ze které byly obdrženy. V první tabulce jsou uvedeny výsledky teplotní analýzy a na ní navazující strukturní analýzy, kde bylo zatížení aplikováno prostřednictvím průběhu HTC. Ve druhé tabulce jsou prezentovány výsledky strukturní analýzy, ve které bylo zatížení aplikováno funkcí impaktního tlaku působícího na povrch oxidů.



Obr. 4-40 Průběh teplot ve vzorcích



Obr. 4-41 Výsledky teplotně – napjatostní analýzy



Obr. 4-42 Výsledky strukturní analýzy

4.3 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 konečnoprvkovém programu Ansys.

Experimentální analýza hydraulického odstraňování okují byla prováděna měřením dvou základních a zároveň nejvýznamnějších charakteristik vodního paprsku z pohledu mechanismů porušování vrstev okují. První měřenou charakteristiku představoval součinitel přestupu tepla, charakterizující intenzitu chlazení povrchu vzorku a odvod tepla. Měření bylo prováděno pro dva typy vodního paprsku, standardního a pulzujícího. Vliv součinitele přestupu tepla byl měřen v závislosti na velikosti tlaku vody v hydraulické soustavě. Nezávislou proměnnou při experimentálním měření byl tedy tlak vody, který byl stanoven na 15 MPa, 30 MPa a 45 MPa. Při těchto hodnotách tlaku vody byl změřen součinitel přestupu tepla pro oba typy vodního paprsku. Měření součinitele přestupu tepla bylo prováděno se stejným typem odkujovací trysky. Změřené a vyhodnocené výsledky jsou prezentovány na Obr. 4-6 resp. Obr. 4-7. 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 ve vodní komoře před odkujovací tryskou.

V experimentální analýze hydraulického odstraňování okují byla druhou měřenou a neméně významnou charakteristikou hodnota impaktního tlaku. Impaktní tlak charakterizuje mechanickou složku vodního paprsku dopadajícího na povrch vzorku. Experimentální měření bylo prováděno na stejné hydraulické soustavě se stejnou odkujovací tryskou. Měření hodnot impaktního tlaku bylo stejně jako při měření součinitele přestupu tepla měřeno v závislosti na velikosti tlaku vody v hydraulické soustavě. Velikost tlaku vody byla opět stanovena na

hodnoty 15 MPa, 30 MPa a 45 MPa. Všechny tyto režimy byly měřeny jak se standardním typem vodního paprsku, tak s pulzujícím vodním paprskem. Volba pulzujícího vodního paprsku byla uvažována z důvodu měření tzv. „water hammer“ efektu, který je vyvolán velkým množstvím vodních kapek na povrch vzorku. Jednou z možností jak vyvolat tento efekt je právě pomocí pulzujícího vodního paprsku, který obsahuje větší množství vodních kapek, než standardní vodní paprsek. Změřené výsledky průběhů impaktního tlaku pro standardní typ vodního paprsku jsou zobrazeny na Obr. 4-10 až Obr. 4-13, výsledky pro pulzující vodní paprsek jsou uvedeny na Obr. 4-14 až Obr. 4-17. 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 ovlivněn 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 ve vodní komoře. 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 rozdělena na zkoumání jednotlivých vlivů vodního paprsku a na samotnou simulaci hydraulického odstraňování okují. Hlavní vlivy vodního paprsku byly odhaleny a potvrzeny experimentální analýzou. Prvním ze zkoumaných vlivů byl teplotní vliv vodního paprsku, který je reprezentován hodnotou součinitele přestupu tepla. Teplotní vliv vodního paprsku způsobuje gradient teplot mezi vrstvou okují a základním materiálem, ten následně vyvolává rozdílnou napjatost v obou materiálech i vlivem rozdílné teplotní roztažnosti materiálů, která vede k porušení vrstvy okují a jejích následnému porušování. Teplotní vliv vodního paprsku vyvolává jeden ze základních mechanismů odstraňování okují. Druhý ze zkoumaných vlivů byl mechanický

vliv, který je reprezentován hodnotou impaktního tlaku vyvolaného vodním paprskem. Impaktní tlak působí na vrstvu okují definovanou tlakovou silou, která opět způsobuje rozdílnou napjatost ve vrstvě okují a základním materiálem a dochází k porušování vrstvy okují. Mechanický vliv vodního paprsku patří k dalším základním a nejvýraznějším mechanismům odstraňování okují. Oba tyto mechanismy jak teplotní, tak mechanický byly vyšetřovány z tzv. makro hlediska a mikro hlediska. Makro hledisko odpovídalo standardnímu typu vodního paprsku, a tedy hodnoty součinitele přestupu tepla a hodnoty impaktního tlaku byly uvažovány pro měřený kompaktní vodní paprsek. Mikro hledisko bylo zaměřeno na vliv jedné vodní kapky, a proto uvažované hodnoty součinitele přestupu tepla a impaktního tlaku odpovídaly pouze jedné dopadající kapce vody. Mikro hledisko bylo orientováno na zkoumání tzv. „water hammer“ efektu, který je možné vyvolat pulzujícím vodním paprskem, jak bylo potvrzeno experimentální analýzou. 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. Obdržené výsledky jsou shrnuty jak pro ocelovou část vzorku, tak pro okuje na Obr. 4-34 resp. Obr. 4-35. 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. Aplikované hodnoty zatížení pro makro hledisko, byly změřeny při obdobných experimentálních měřeních, jaké byly popsány v této kapitole. Hodnoty zatížení pro mikro hledisko odpovídaly hodnotám získaným z literatury. I navzdory odlišným hodnotám zatížení bylo dosaženo dobré shody experimentální a výpočtové analýzy.

Další výpočtová analýza hydraulického odstraňování okují byla zaměřena na samotnou simulaci procesu hydraulického odstraňování okují za vysokého tlaku. Simulace odstraňování okují spočívala v modelování skutečných odkujovacích experimentů prováděných na dvou typech vzorků. První vzorek byl z konstrikční oceli, druhý vzorek z oceli s vyšším obsahem

křemíku. Z praktické zkušenosti a experimentálních měření bylo zjištěno, že okuje vytvořené na konstrukční oceli jsou snadněji odstranitelné než okuje vytvořené na oceli s vyšším obsahem křemíku. Z tohoto důvodu byla připravena tato simulace, která měla za cíl vyšetřit vliv teplotního namáhání prostřednictvím součinitele přestupu tepla a mechanického namáhání způsobeného impaktním tlakem na oba typy vzorků potažmo oba typy okují. Výsledky teplotně napjatostní analýzy jsou prezentovány na Obr. 4-41 a výsledky strukturní analýzy jsou uvedeny na Obr. 4-42. Opět byly výsledky vyhodnocovány jak ve vrstvě okují tak v základním materiálu (resp. na rozhraní okuje a oceli). Jak je vidět na průběhu teplot na povrchu a na rozhraní okuj-ocel, prohřátí vrstvy okují po tloušťce je rovnoměrnější pro vzorek z uhlíkové oceli než pro vzorek vyrobený z oceli s vyšším obsahem křemíku. To je způsobeno rozdílnou teplotní vodivostí jednotlivých typů okují. Teplotní gradient, který vznikl mezi povrchem okují a rozhraním okuj-ocel, je jedním z důvodů rozdílných hodnot napjatostí mezi prvním a druhým typem vzorku. Větší teplotní gradient pro vzorek z oceli s vyšším obsahem křemíku způsobil vyšší hodnoty napětí než u vzorku z konstrukční oceli. Tato skutečnost naznačuje, že u vzorků s obsahem křemíku by docházelo k vyšším hodnotám napětí v objemu oxidů. Tento výsledek nelze považovat za určující kritérium o průběhu a kvalitě procesu odkujení. A to z toho důvodu, že mechanické vlastnosti okují, které vznikají na povrchu ocelí s vyšším obsahem křemíku, mají také podstatně vyšší hodnoty mechanických vlastností. To znamená, že dosažené hodnoty napětí nemusí postačovat k tomu, aby došlo k porušení vrstvy okují. Naproti tomu, nižší hodnoty napětí získané pro desku z konstrukční oceli mohou vzhledem k mechanickým vlastnostem přibližně odpovídajícím wüstitu postačovat k narušení vrstvy okují. Aby bylo možné toto tvrzení ověřit, bylo by potřeba změřit dané mechanické charakteristiky odpovídajících oxidů. Další významný vliv na dosažené výsledky měly uvažované mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev okují. V obou případech byly použity fyzikální a mechanické vlastnosti pouze jedné chemické sloučeniny, i když vrstva okují se skládá z několika chemických sloučenin s rozdílnými vlastnostmi. Výsledky napětí obdržené pro mechanické zatížení vyvolané vlivem impaktního tlaku působícího kolmo na povrch vzorku jsou rovnoměrnější a vyrovnanější než v předchozím případě. Je to způsobeno silovým zatížením vyvolaným průběhem impaktního tlaku, který je v podstatě konstantní. U teplotně napjatostní analýzy je vzorek zatěžován deformačně vlivem měnících se teplot a vlivem rozdílných součinitelů roztažnosti. Deformační zatížení je zpravidla významnější pro napjatost v tělese. Tato skutečnost je zde potvrzena tím, že hodnoty napětí ve směru x (podél okují) jsou při

deformačním zatížení (teplotně-napjatostní analýza) o řád vyšší než při silovém zatížení (strukturní analýza). Hodnota napětí ve směru x je pro porušení soudržnosti oxidů podstatná. Hodnoty redukovaného napětí jsou při deformačním zatížení rovněž vyšší. Tyto výsledky tedy potvrzují, že vliv teploty v průběhu odkujování má podstatný podíl na konečné kvalitě povrchu vzorku. Proto je důležité znát hodnotu součinitele přestupu tepla a dalších parametrů dopadajícího vodního paprsku pro co nejefektivnější využití při procesu odstraňování okují.

5 ANALÝZA VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA VODNÍ PAPRSEK

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 odkújeného povrchu. Vliv hlavních parametrů na charakteristiky vodního paprsku a konečnou kvalitu odkújeného povrchu byl popsán v kapitole 3.3. V té samé kapitole jsou na Obr. 3-7 zobrazeny a popsány parametry, kterými je možné nejjednodušším způsobem ovlivnit charakter vodního paprsku a jeho efektivitu pro danou hydraulickou soustavu. Pokud není hydraulická soustava pevně definována, je možné zvolit jednotlivé komponenty a dosáhnout tak optimálních parametrů pro danou situaci. Jak již bylo napsáno, vysokotlaká hydraulická soustava je v jednoduchosti složena z vysokotlakého čerpadla, potrubí, kolektoru, stabilizátoru a odkújovací trysky. Všechny tyto komponenty mají určitý podíl a vliv na charakter vodního paprsku. Z experimentálních měření a provozních zkušeností má zásadní vliv typ odkújovací trysky (nejčastěji se používá plochá „flat jet nozzle“ odkújovací tryska). 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 odkújovací 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. Proto bylo nutné věnovat pozornost i vlivu tohoto člena. 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.

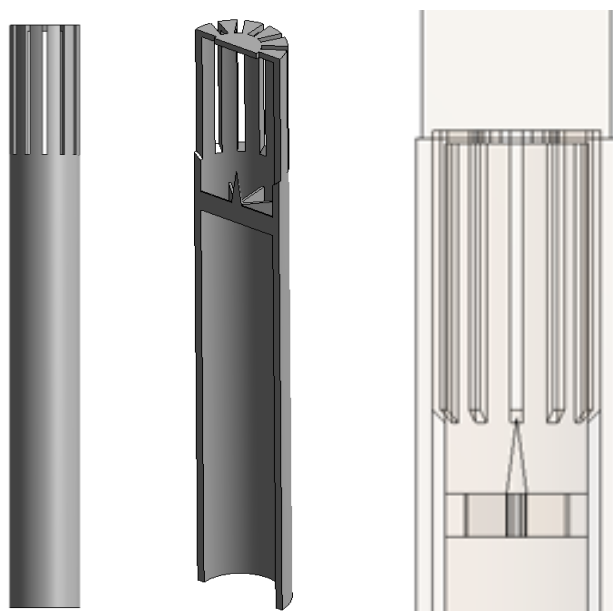
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLIVU KOLEKTORU A STABILIZÁTORU NA CHARAKTER VODNÍHO PAPRSKU

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 popsané v kapitole 4.1.2. 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.

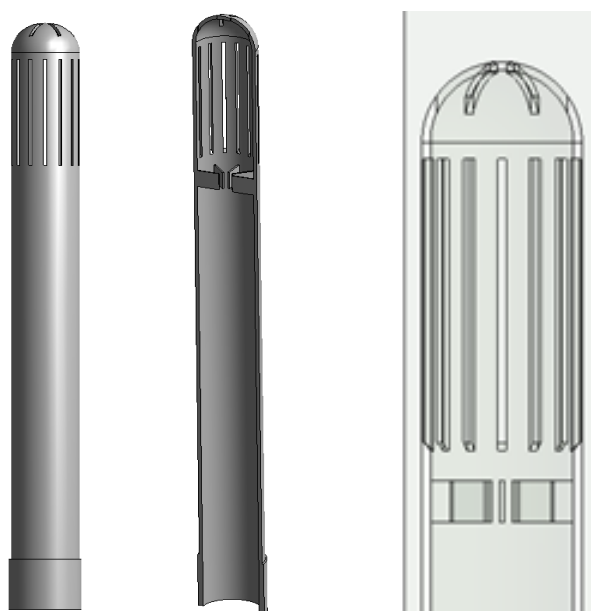
Návrh experimentu:

Experimentální měření bylo připraveno tak, aby bylo dosaženo stanovených cílů, tedy zjištění vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku. 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. 5-1 a Obr. 5-2. Při experimentálním měření byly dále použity různé konfigurace kolektorů. Prvním typem kolektoru bylo přímé přívodní potrubí, druhým typem byl ocelový válec o daných rozměrech. Další konfigurace byly připraveny tím, že přívodní potrubí bylo nastaveno v několika úhlech a to konkrétně 0° přímá varianta, 90° zahnutá varianta. Schématická zobrazení všech konfigurací kolektorů jsou uvedena na Obr. 5-3 až Obr. 5-5. Jednotlivé konfigurace a varianty trysek, stabilizátorů a

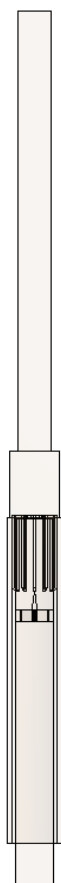
kolektorů při experimentálním měření jsou uvedeny v Tab. 5-1. Aby byl vyloučen vliv pozice stabilizátoru byl při některých měřeních nastaven na polohu 0° (měření číslo 1,5,6,7) a při měřeních (2,3,4) byl pootočen o 180° . Experimentální měření 6 a 7 jsou totožná a byla provedena z důvodu opakovatelnosti a relevantnosti měřených výsledků.



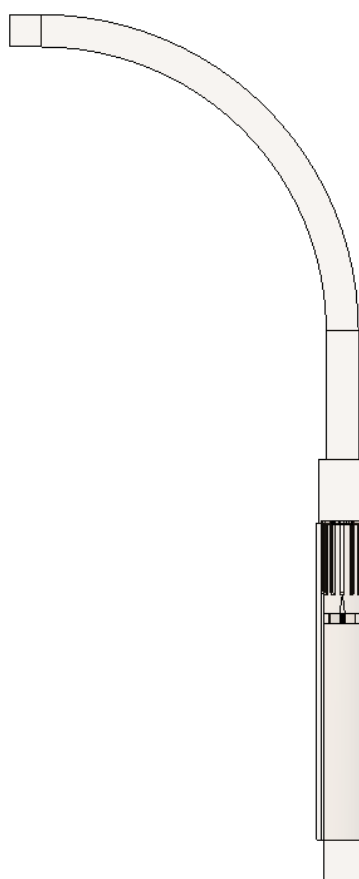
Obr. 5-1 Konstrukce stabilizátoru typu A



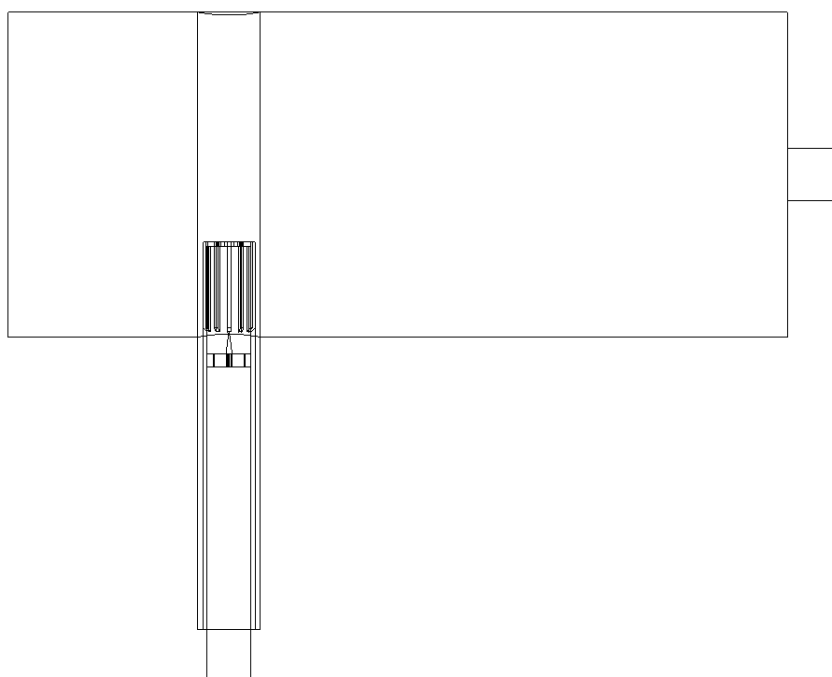
Obr. 5-2 Konstrukce stabilizátoru typu B



Obr. 5-3 Přímý kolektor 0°



Obr. 5-4 Zahnutý kolektor 90°



Obr. 5-5 Válcový kolektor

Tab. 5-1 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°

Realizace měření:

Jednotlivé vlivy konfigurace kolektorů a geometrie stabilizátorů byly zkoumány prostřednictvím měření rozložení a velikosti impaktního tlaku. K tomuto měření bylo použito stejné experimentální zařízení jako v případě měření impaktního tlaku v závislosti na tlaku vody v hydraulické soustavě popsané v kapitole 4.1.2. Popis experimentálního zařízení použitého k tomuto účelu již byl uveden na Obr. 4-8. 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. 5-6 až Obr. 5-8.

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. Měření objemového průtoku probíhalo následujícím způsobem. Po nastavení požadovaných hydraulických vlastností a ustálení vodního paprsku bylo spuštěno měření času. Při provádění experimentů se využívá zdroj vody (vodní nádrž o rozměrech 2,0x0,98x1,7). Na vodní nádrži se nacházela průhledná trubička (viz Obr. 5-9), ze které bylo možné odečíst aktuální výšku hladiny vody. Po ukončení daného experimentu bylo rovněž ukončeno měření času. Ze změřeného časového intervalu a rozdílu výšky hladiny před začátkem experimentu a po jeho ukončení, byl dopočten objemový průtok pro odpovídající hydraulickou konfiguraci.



Obr. 5-6 Konfigurace s přímým kolektorem (0°)



Obr. 5-7 Konfigurace se zahnutým kolektorem (90°)



Obr. 5-8 Konfigurace s válcovým kolektorem

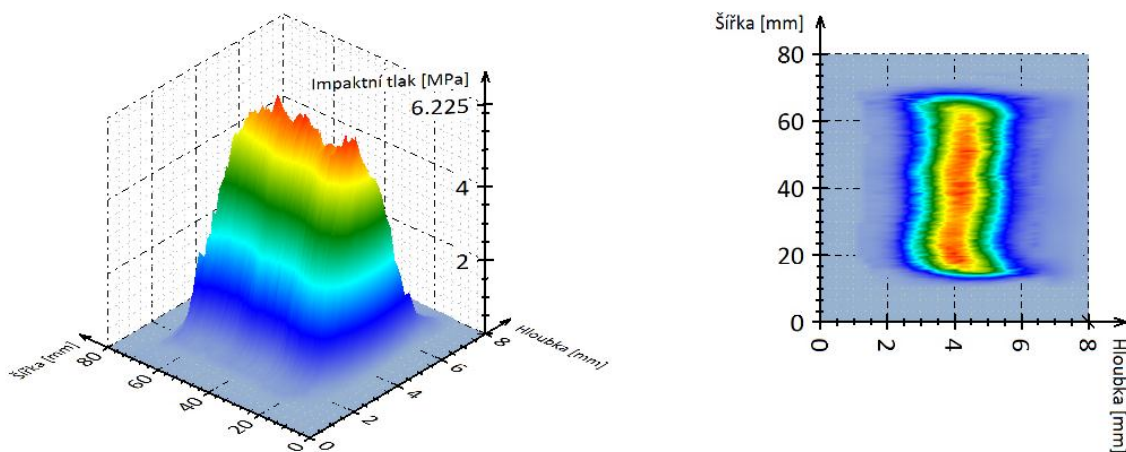


Obr. 5-9 Měření času a sloupce vody na vodní nádrži

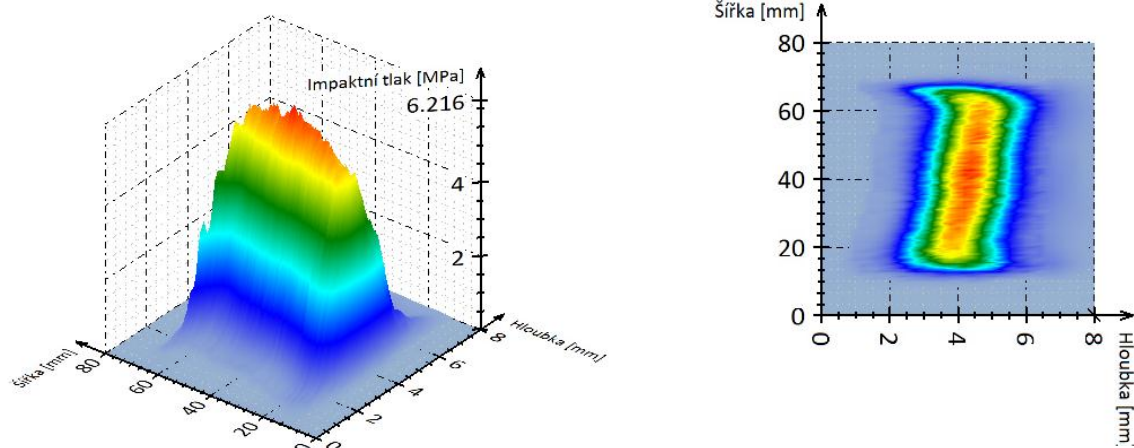
Zpracování a vyhodnocení naměřených dat:

Při měření vlivu kolektoru a stabilizátoru byla jako závislá proměnná měřena hodnota impaktního tlaku. Metodika měření a vyhodnocení impaktního tlaku již byla popsána v kapitole 4.1.2. Při zpracování naměřených dat v tomto případě bylo postupováno obdobným způsobem. Měření probíhalo prostřednictvím tenzometrického snímače o průměru 2 mm. Zpracování naměřených dat spočívalo v přepočtu hodnot impaktního tlaku odpovídající průměru snímače na hodnoty impaktního tlaku odpovídající snímači s nulovou plochou. 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.

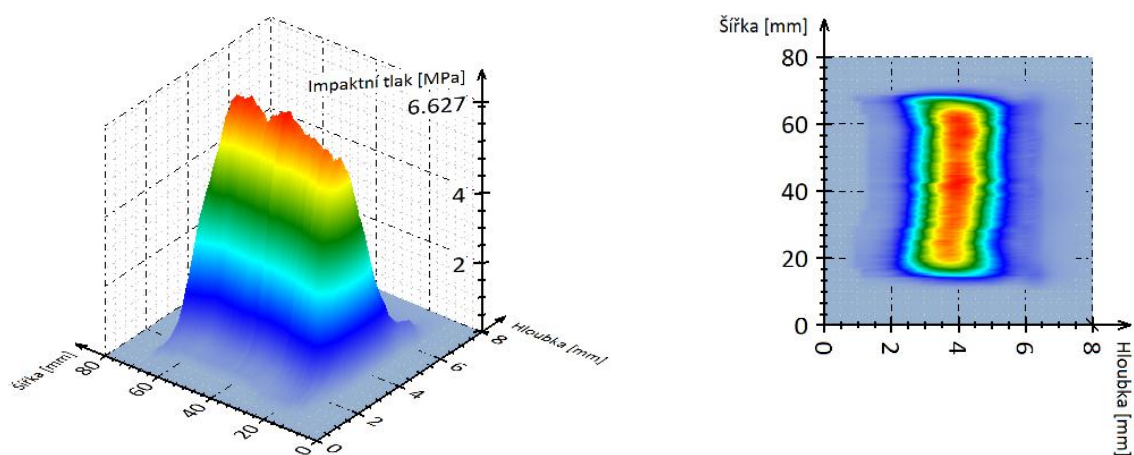
Vliv kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku byl měřen na dvou typech odkujovacích trysek. Z naměřených a následně vyhodnocených prostorových dat bylo zjištěno, že obě trysky vytvářely tenkou stopu, která dosahovala hloubku zhruba 4 mm a šířku 60 mm pro typ trysky 1 resp. 70 mm pro 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. Průběh a rozložení změřených hodnot impaktního tlaku jednotlivých měření jsou uvedeny na Obr. 5-10 až Obr. 5-16. 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. 5-17 pro typ trysky 1 a pro typ trysky 2 na Obr. 5-18.



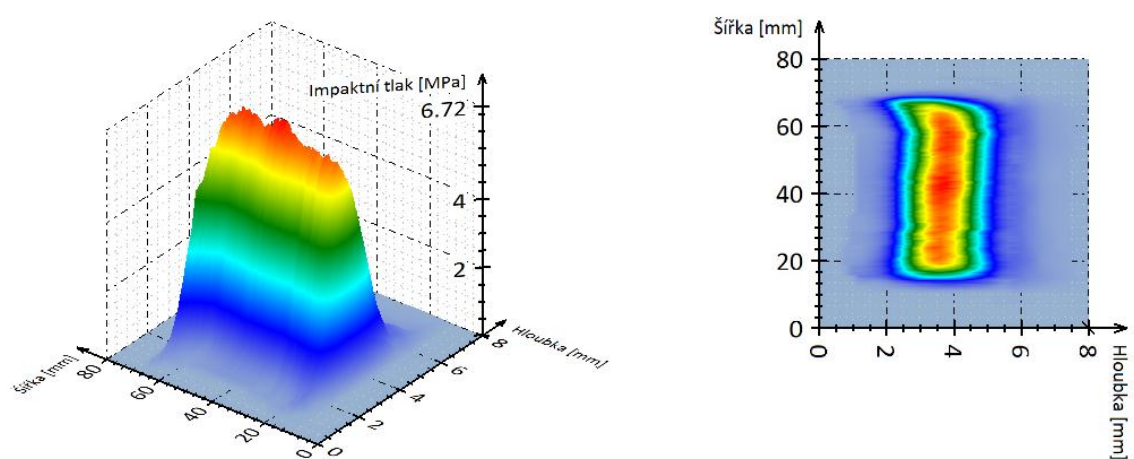
Obr. 5-10 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 1



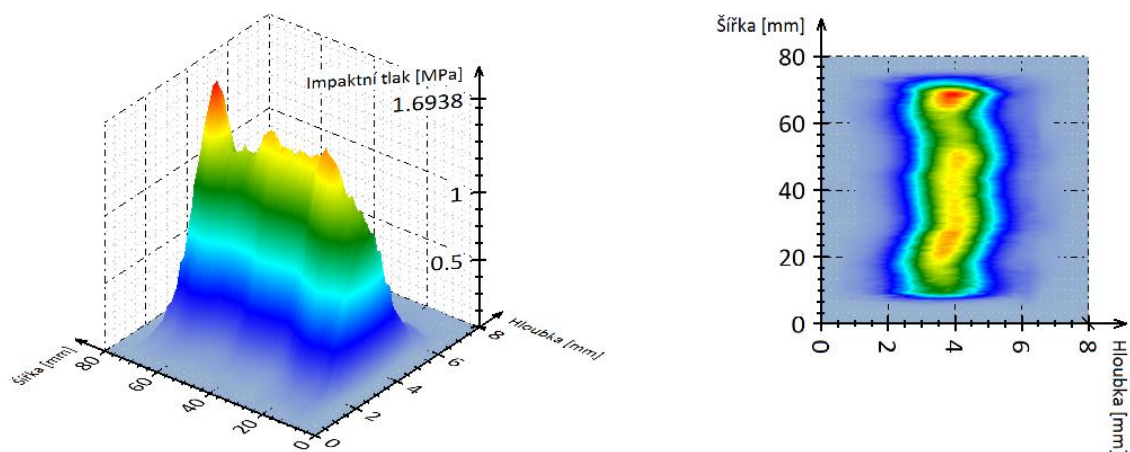
Obr. 5-11 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 2



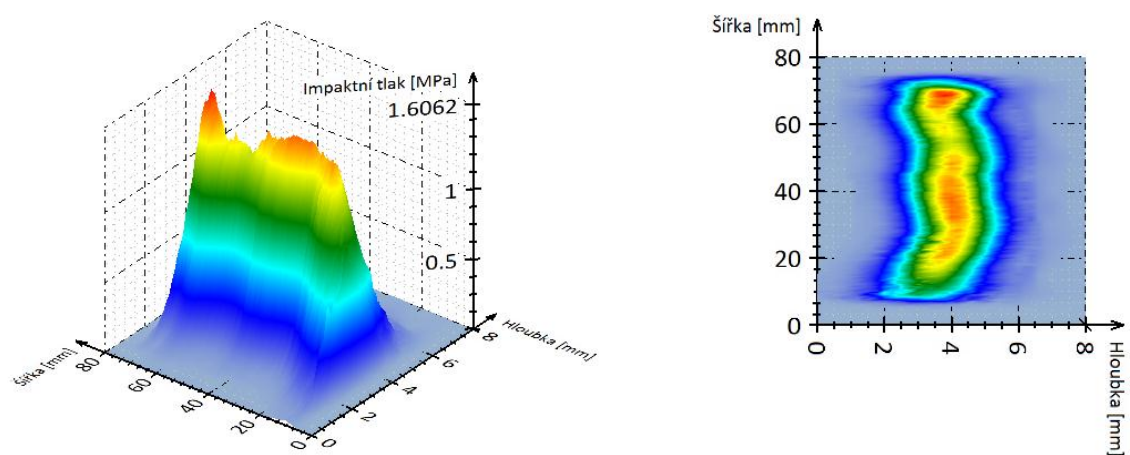
Obr. 5-12 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 3



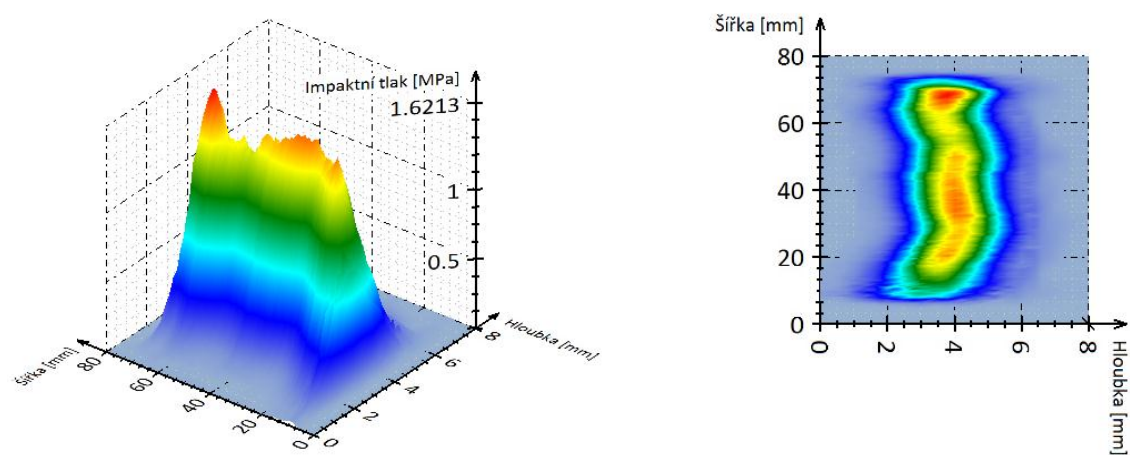
Obr. 5-13 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 4



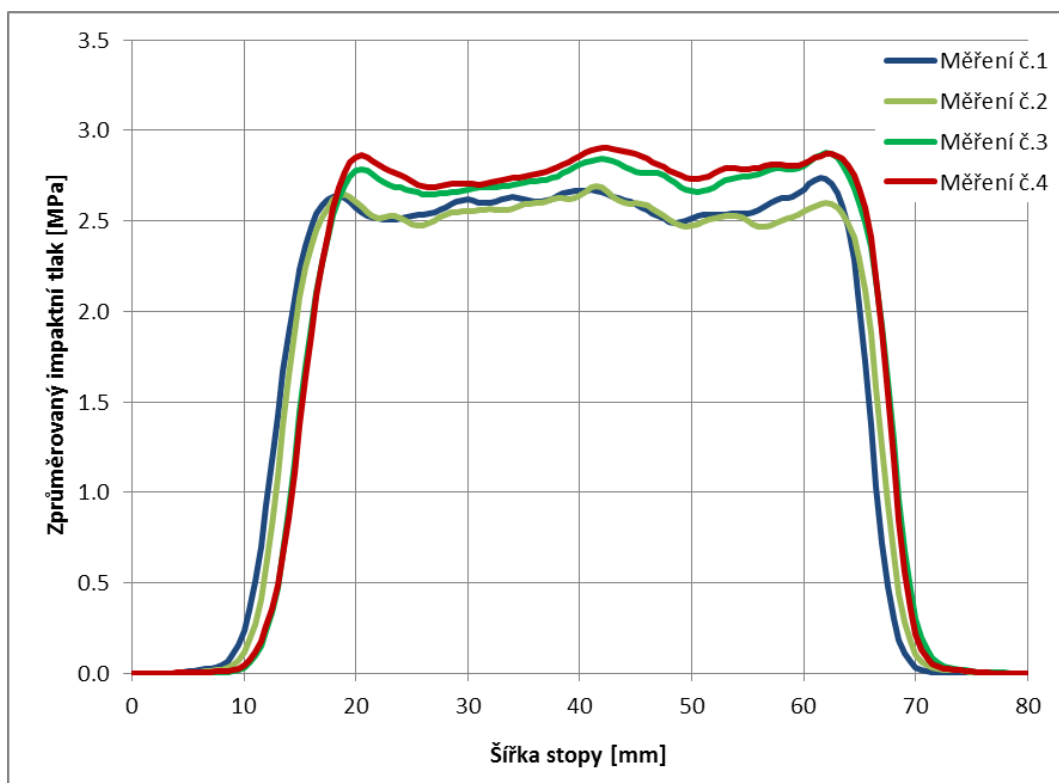
Obr. 5-14 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 5



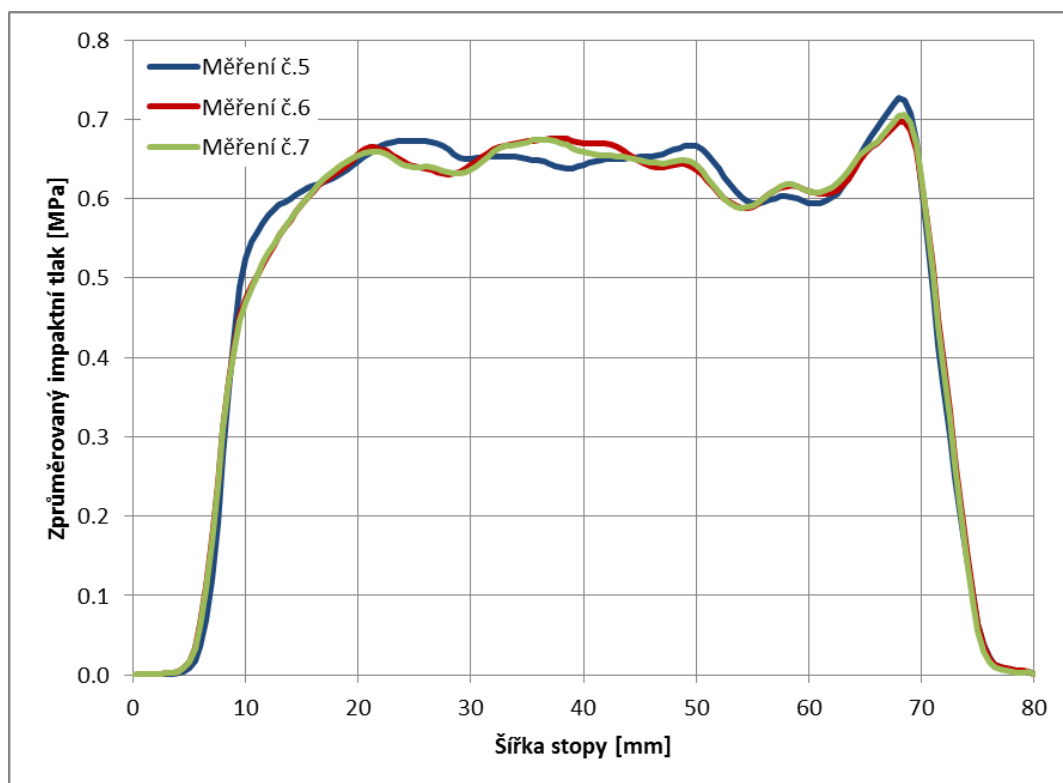
Obr. 5-15 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 6



Obr. 5-16 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 7



Obr. 5-17 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 1



Obr. 5-18 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 2

5.2 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. Metoda CFD je široce používaným nástrojem při řešení různých inženýrských problémů v oblasti proudění tekutin, přenosu tepla, hmoty, chemické reakce, spalování atd. Tuto metodu je možné použít při modelování jednofázového (např. proudění tekutiny v uzavřeném prostoru), či multifázového proudění (např. proudění jedné tekutiny a následné míchání s jinou tekutinou). Další možností a neméně důležitou funkcí je modelování interakce proudění se strukturní analýzou (FSI) [19]. 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 ve vodní komoře se stabilizátorem na základě experimentálních měření uvedených v předchozí kapitole. Výpočtové modelování bylo prováděno pro zjištění vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku. Další výpočtová simulace byla zaměřena na zkoumání vlivu polohy stabilizátoru uvnitř kolektoru. Pomocí CFD analýzy je možné řešit dva typy úloh, přímé a nepřímé úlohy. Přímé úlohy jsou specifické tím, že na začátku řešení jsou jasné definovány okrajové počáteční podmínky a na konci se získá jejich jednoznačné řešení. V nepřímé (inverzní) úloze je potřeba na základě známých výsledků zjistit příčiny, které je způsobily. Přímá úloha v CFD znamená zadání vstupních okrajových a počátečních podmínek, na jejichž základě je možné získat představu např. o vlivu geometrie na základní proudové charakteristiky, jakými jsou rozložení tlaku, rychlostí nebo tlakové ztráty. Tento přístup odpovídá analýze vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku. Na začátku řešení jsou experimentálně změřené okrajové a počáteční podmínky, na konci byl zjišťován vliv konfigurace komponent na hydraulické charakteristiky vodního paprsku. Je tedy možné říci, že tato výpočtová simulace (CFD) byla řešena jako přímá úloha.

Metodika řešení:

Výpočtová simulace proudění byla prováděna na základě experimentálních měření popsaných v předchozí kapitole. Byla tedy připravena pro analýzu vlivu kolektoru a stabilizátoru na proudové charakteristiky vodního paprsku. Ve výpočtové simulaci byl rovněž analyzován vliv polohy stabilizátoru uvnitř válcového kolektoru. CFD analýza použitá pro simulaci proudění byla připravena tak, aby bylo možné popsat proudění vody uvnitř kolektoru a stabilizátoru. CFD analýza byla tedy zaměřena na vnitřní proudění, ve kterém nebylo uvažováno mísení vody se vzduchem.

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. 5-2). Okrajové a počáteční podmínky odpovídaly zaznamenaným hodnotám při experimentálním měření. Vliv kolektoru a stabilizátoru byl analyzován při tlaku vody 25 MPa uvnitř hydraulické soustavy, stejně jako při měření. Vliv dvou typů trysek, které byly taktéž použity při měření, nebyl v CFD simulaci uvažován. Pro zjištění vlivu polohy stabilizátoru byly připraveny modely odpovídající válcové vodní komoře v kombinaci se stabilizátorem typu B ve třech různých polohách. Jednotlivé CFD výpočty pro zjištění vlivu polohy stabilizátoru jsou uvedeny v Tab. 5-3. Analýza vlivu polohy stabilizátoru byla prováděna při tlaku vody 25 MPa resp. 20 MPa.

Tab. 5-2 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°

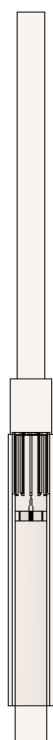
Tab. 5-3 CFD analýza polohy stabilizátoru ve válcové vodní komoře

Simulace	Stabilizátor	Tlak vody	Poloha stabilizátoru	Kolektor
1	B	25 MPa	1	Válcový
2	B	25 MPa	2	Válcový
3	B	25 MPa	3	Válcový
4	B	20 MPa	1	Válcový
5	B	20 MPa	2	Válcový
6	B	20 MPa	3	Válcový

- **Model geometrie a topologie**

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“). Model pro CFD analýzu neobsahoval doménu odpovídající trysce. Modely jednotlivých proudových domén odpovídajících konfigurací jsou uvedeny na Obr. 5-19 až Obr. 5-26.

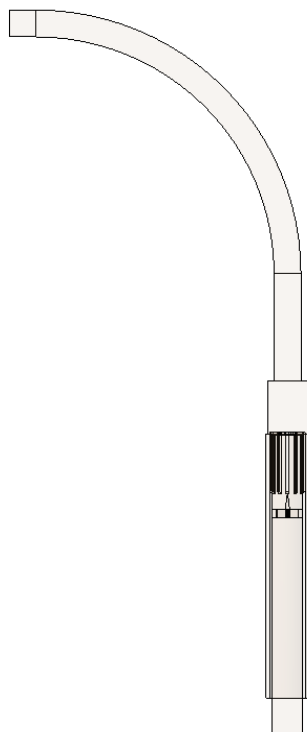
Model topologie byl vytvořen prostřednictvím sítě prvků, kterými byla vyplněna odpovídající proudová doména. Při tvorbě sítě pro CFD analýzu byly aplikovány prvky několika základních tvarů: tetrahedrony, prizmy a pyramidy. Všechny tyto tvary elementů, byly použity ve všech případech. Pro proudovou doménu, která odpovídala válcové vodní komoře, bylo použito pro tvorbu sítě celkem 1014041 elementů, pro přímý kolektor bylo použito 548015 prvků a pro zahnutou vodní komoru 541949 prvků. Všechny konfigurace kolektorů a sítí jsou uvedeny na Obr. 5-27 až Obr. 5-30. Pro přesnější a kvalitnější popis mezní vrstvy v oblasti stěn kolektoru či stabilizátoru byla vytvořena zjemněná síť pomocí funkce „inflation“ to znamená, že byla ke stěnám zjemněná plynulým přechodem tak, že nejjemnější elementy byly u stěny a s rostoucí vzdáleností od stěny proudové domény se jejich velikost plynule zvětšovala.



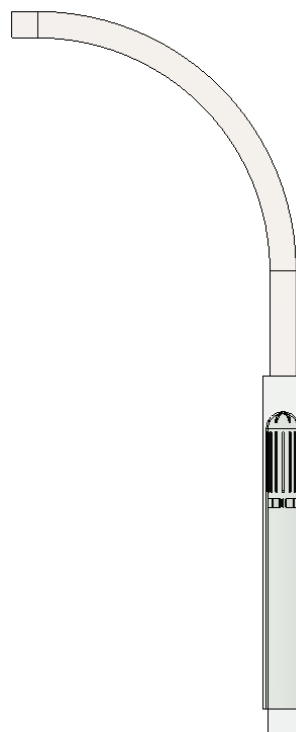
Obr. 5-19 Proudová doména s přímým kolektorem a stabilizátorem A



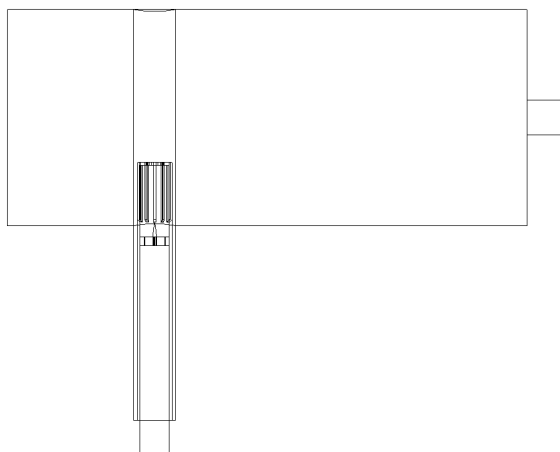
Obr. 5-20 Proudová doména s přímým kolektorem a stabilizátorem B



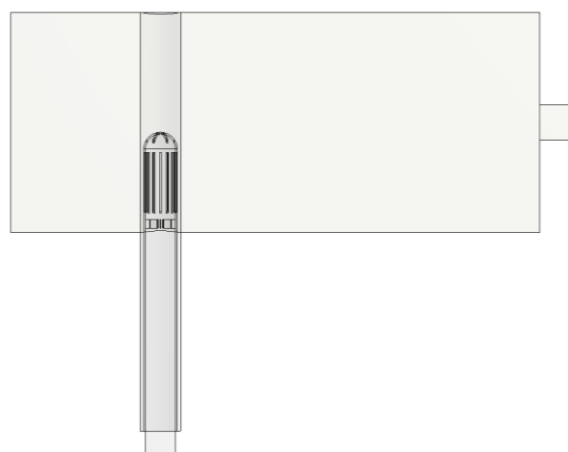
Obr. 5-21 Proudová doména se zahnutým kolektorem a stabilizátorem A



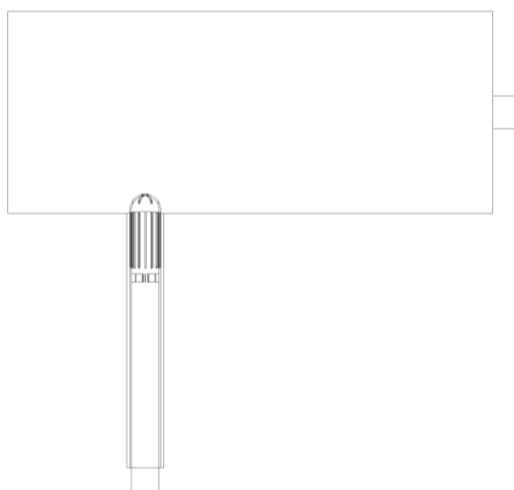
Obr. 5-22 Proudová doména se zahnutým kolektorem a stabilizátorem B



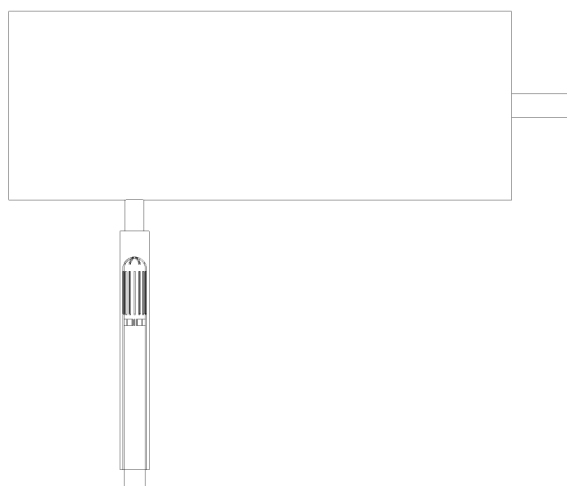
Obr. 5-23 Proudová doména s válcovým kolektorem a stabilizátorem A



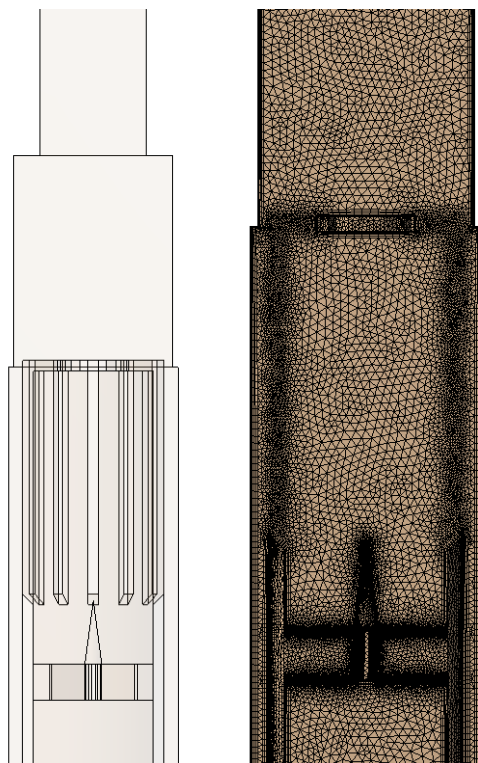
Obr. 5-24 Proudová doména s válcovým kolektorem a stabilizátorem B (poloha stabilizátoru č. 1)



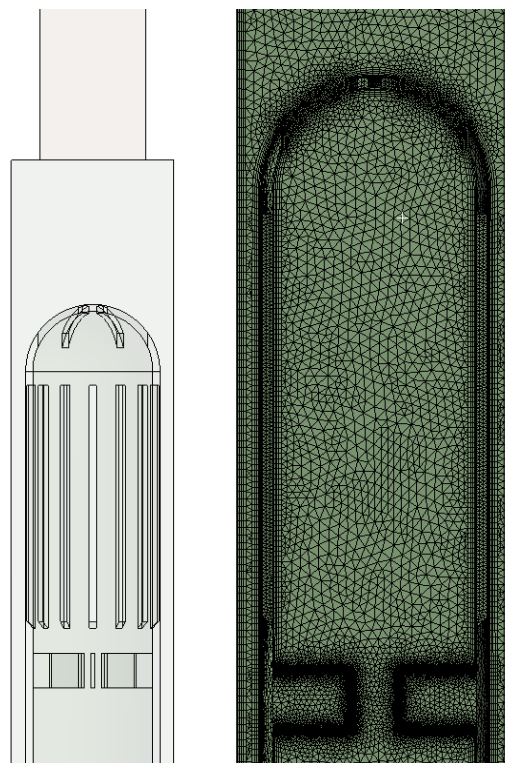
Obr. 5-25 Poloha stabilizátoru č. 2 při analýze vlivu polohy stabilizátoru



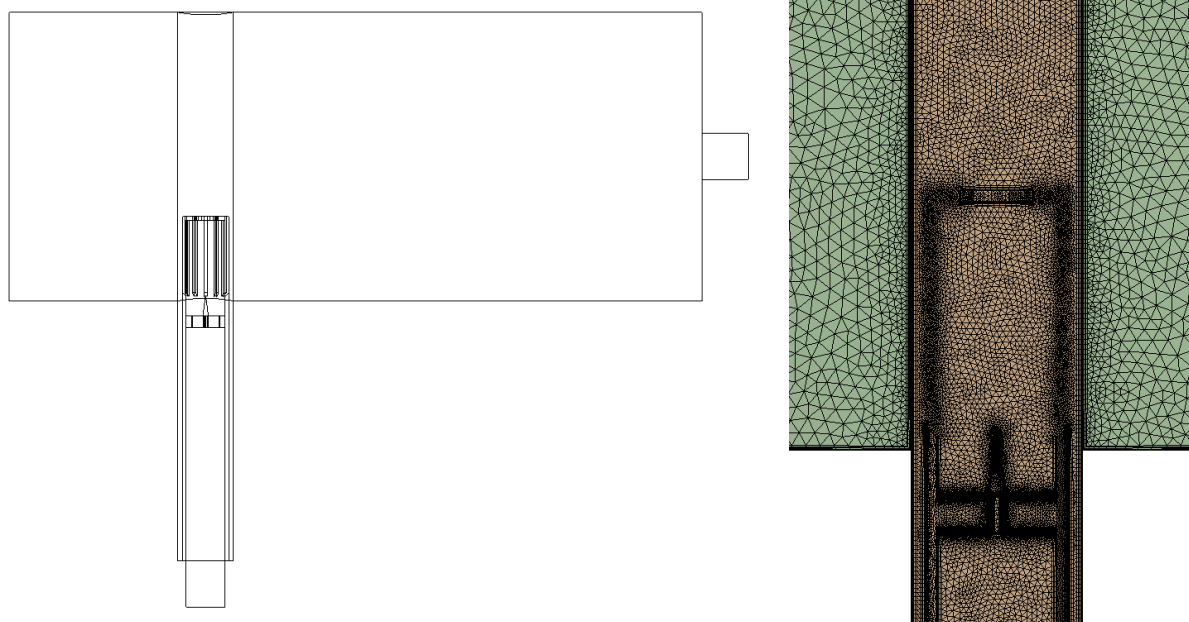
Obr. 5-26 Poloha stabilizátoru č. 2 při analýze vlivu polohy stabilizátoru



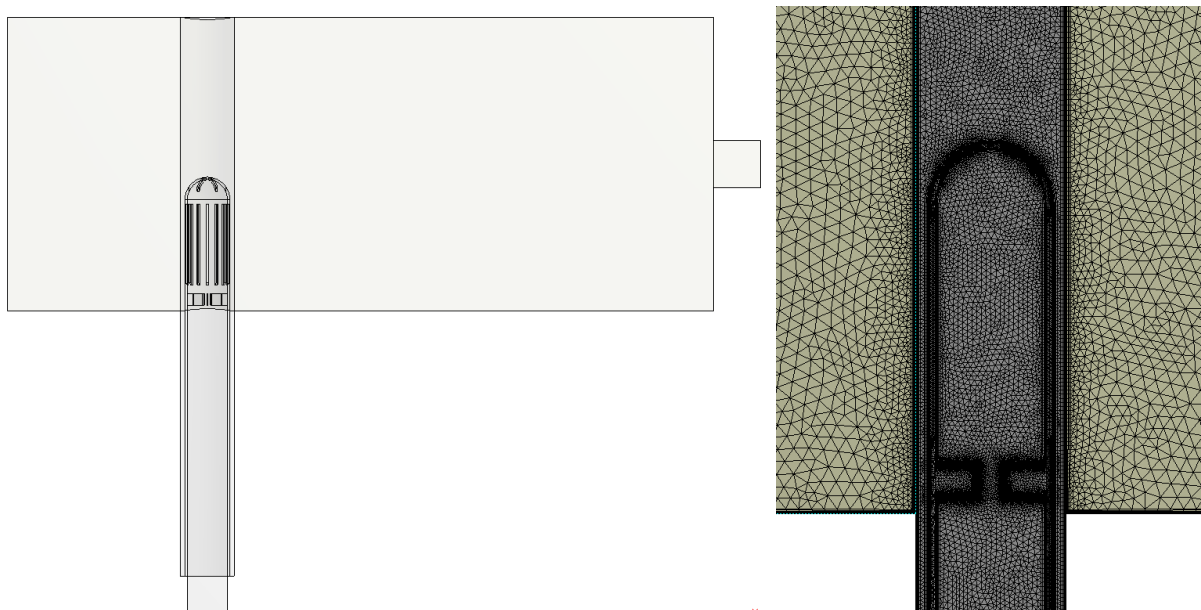
Obr. 5-27 Model topologie pro přímý i
zahnutý kolektor a stabilizátor A



Obr. 5-28 Model topologie pro přímý i
zahnutý kolektor a stabilizátor B



Obr. 5-29 Model topologie pro válcový kolektor a stabilizátor A



Obr. 5-30 Model topologie pro válcový kolektor a stabilizátor B

- **Model materiálu**

Model materiálu byl v tomto případě velice jednoduchý, protože obsahoval pouze jeden materiál, kterým byla voda. Uvažované fyzikální vlastnosti vody byly aplikované pro všechny CFD analýzy a tedy pro všechny konfigurace hydraulické soustavy. Fyzikální vlastnosti vody použité při CFD analýze jsou uvedeny v Tab. 5-4.

Tab. 5-4 Fyzikální vlastnosti vody definované pro proudovou doménu [19]

Referenční teplota	Tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Hustota	Molární hmotnost	Dynamická viskozita
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[1/K]	[kg/m ³]	[kg/kmol]	[kg/m.s]
25	4181.7	0,6069	2.57e-4	997	18.02	8.899e-4

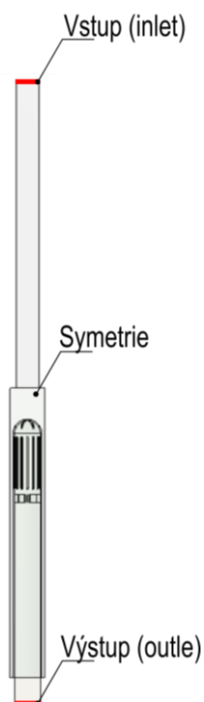
- **Model okrajových a počátečních podmínek**

Tato část byla modifikována z modelu okrajových podmínek a zatížení na model okrajových a počátečních podmínek, protože při CFD analýzách se na začátku úlohy definují okrajové a počáteční podmínky, není možné aplikovat zatížení ve smyslu, ve kterém je definováno u konečnoprvkových analýz (viz kapitola 4.2.1).

Model okrajových a počátečních podmínek byl založen na hodnotách změřených při experimentální analýze. Jak již bylo uvedeno, proudová doména byla definována jejím vstupem („inlet“), rovinou symetrie („symmetry“) a výstupem („outlet“) viz Obr. 5-31. Vstup do proudové domény byl tvořen plochou umístěnou na vstupním potrubí do kolektoru. Na

vstup byl jako okrajová podmínka zadán hmotnostní průtok, který byl přepočten ze změřeného objemového průtoku odpovídajícího jednotlivým odkujovacím tryskám (typ 1 a 2) při odpovídajícím tlaku vody. Změřený objemový průtok při tlaku vody 25 MPa byl 2,31 l/s a při tlaku 20 MPa byl 2,45 MPa. Přepočtené hodnoty hmotnostního průtoku byly 1,155 m³/s resp. 1,225 m³/s. Další okrajová podmínka aplikovaná na model topologie byla symetrie, která definovala rovinu symetrie modelu. V analýze byla uvažována pouze polovina proudové domény, druhá polovina byla nahrazena podmínkou symetrie. Poslední okrajovou podmínkou byl statický tlak, který byl aplikován na výstup z proudové domény. Uvažovaná hodnota statického tlaku byla rovna 0 MPa. Výstup z domény odpovídal krátké přímé části kolektoru, na kterou v reálném experimentu navazovala odkujovací tryska.

Počáteční podmínky, které byly zadány před výpočtem, taktéž odpovídaly hodnotám změřeným při experimentálním měření. Prvním typem počáteční podmínky byla teplota vody stanovená na hodnotu 25°C. Tato hodnota byla použita ve všech CFD analýzách. Druhou počáteční podmínkou byl referenční tlak, který odpovídal tlaku vody v hydraulické soustavě. Tato hodnota byla pro CFD analýzy se stabilizátorem A stanovena na hodnotu 25 MPa a pro stabilizátor B na hodnotu 10 MPa.



Obr. 5-31 Model okrajových podmínek

Výsledky výpočtové analýzy

Výpočtová simulace vlivu kolektoru a stabilizátoru na charakteristiky vodního paprsku byla rozdělena na dvě části. První část analýzy byla připravena dle experimentálního měření a měla za cíl analyzovat proudění uvnitř kolektoru a zjistit tak vliv jednotlivých konfigurací kolektoru a stabilizátoru. Druhá část analýzy byla zaměřena na studium vlivu polohy stabilizátoru umístěného ve válcové vodní komoře, v tomto případě byla taktéž použita vstupní data změřená při experimentální analýze.

Pro obě části 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. 5-5 a Tab. 5-6. 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 19, 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.

$$\text{ztrátový_koeficient} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (19)$$

Tab. 5-5 Zkoumané veličiny při CFD analýze vlivu kolektoru a stabilizátoru

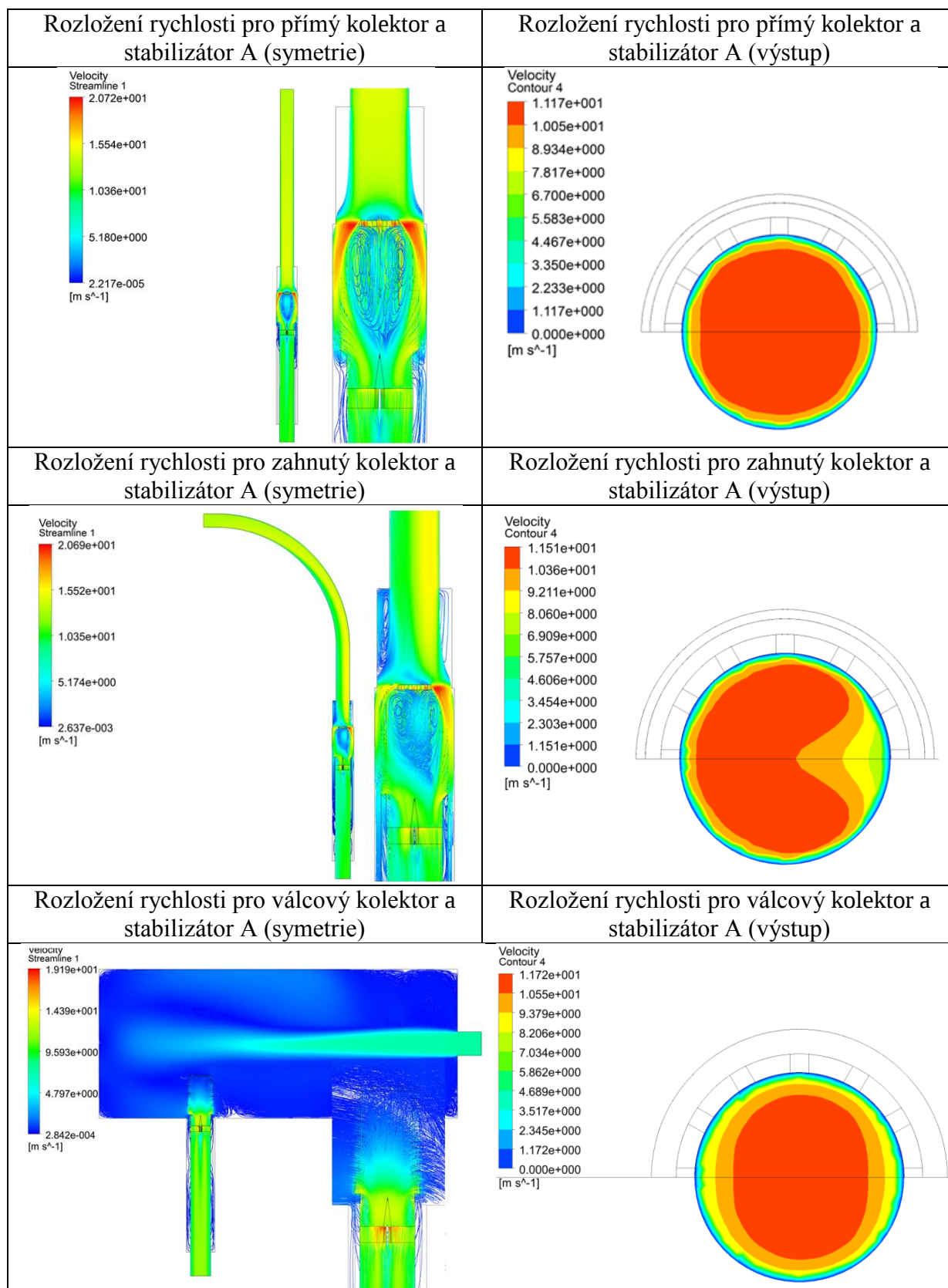
Stabilizátor A					
Kolektor	Celkový tlak na vstupu	Celkový tlak na výstupu	Rychlost na vstupu	Rychlost na výstupu	Ztrátový koeficient
	[MPa]	[MPa]	[m/s]	[m/s]	[-]
Válcový	0.1395	0.0534	7.42	10.20	3.143
Přímý 0°	0.2357	0.0529	13.13	10.20	2.126
Zahnutý 90°	0.2428	0.0531	13.13	10.20	2.208
Stabilizátor 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

Tab. 5-6 Zkoumané veličiny při CFD analýze vlivu polohy stabilizátoru

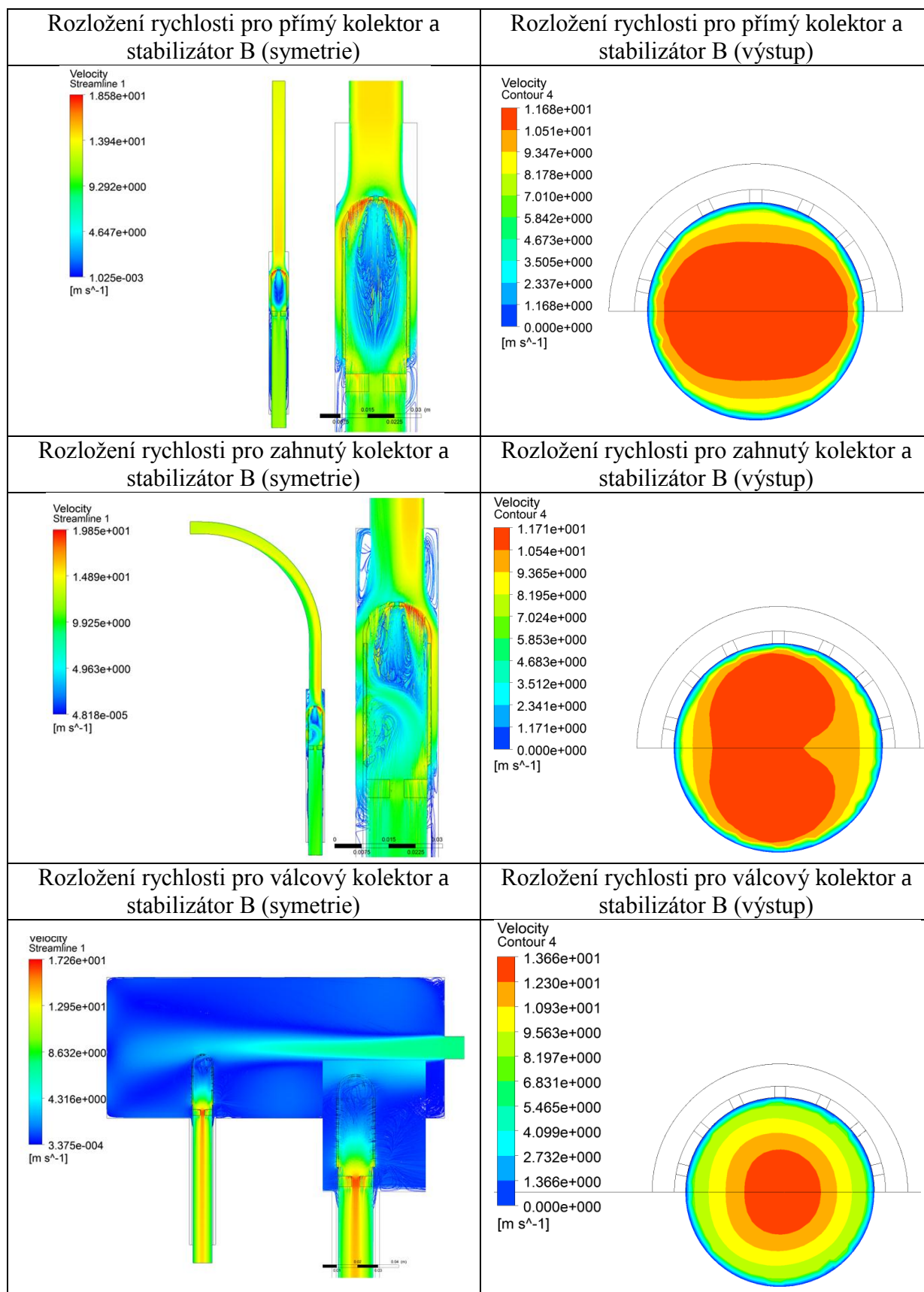
25 MPa					
Pozice stabilizátoru	Celkový tlak na vstupu	Celkový tlak na výstupu	Rychlost na vstupu	Rychlost na výstupu	Ztrátový koeficient
	[MPa]	[MPa]	[m/s]	[m/s]	[-]
1	0.1468	0.0542	7.42	10.21	3.379
2	0.2171	0.0533	7.41	10.20	5.978
3	0.2679	0.0534	8.18	10.20	6.431
20 MPa					
1	0.1646	0.0609	7.86	10.82	3.364
2	0.2471	0.0598	7.86	10.82	6.076
3	0.3043	0.0599	8.67	10.82	6.516

Jak již bylo napsáno, velkou výhodou CFD analýzy je výborné prostorové zobrazení výsledků, na kterých je možné si vytvořit prostorovou představu o proudění kapaliny uvnitř odpovídající geometrické konfigurace. Pro tento účel byly prezentovány výsledky, které zobrazují proudnice vyjadřující rychlosti proudění v proudové doméně. Na těchto výsledcích je rovněž možné pozorovat vliv kolektoru na vodní paprsek. Rozložení rychlosti v celé proudové doméně a na výstupu je pro přímý kolektor velice rovnoměrné a symetrické. Na rozdíl od toho je u zahnutého kolektoru rozložení rychlosti deformované a tedy ovlivněné odpovídajícím úhlem zahnutí a ani stabilizátor už takto ovlivněný proud vody nedokáže dostatečně usměrnit, proto je rozložení rychlosti na výstupu také asymetrické. Vliv jednotlivých typů kolektorů je tedy prezentován na rozložení rychlosti přes výstupní část pro všechny uvažované konfigurace na Obr. 5-34 a Obr. 5-35.

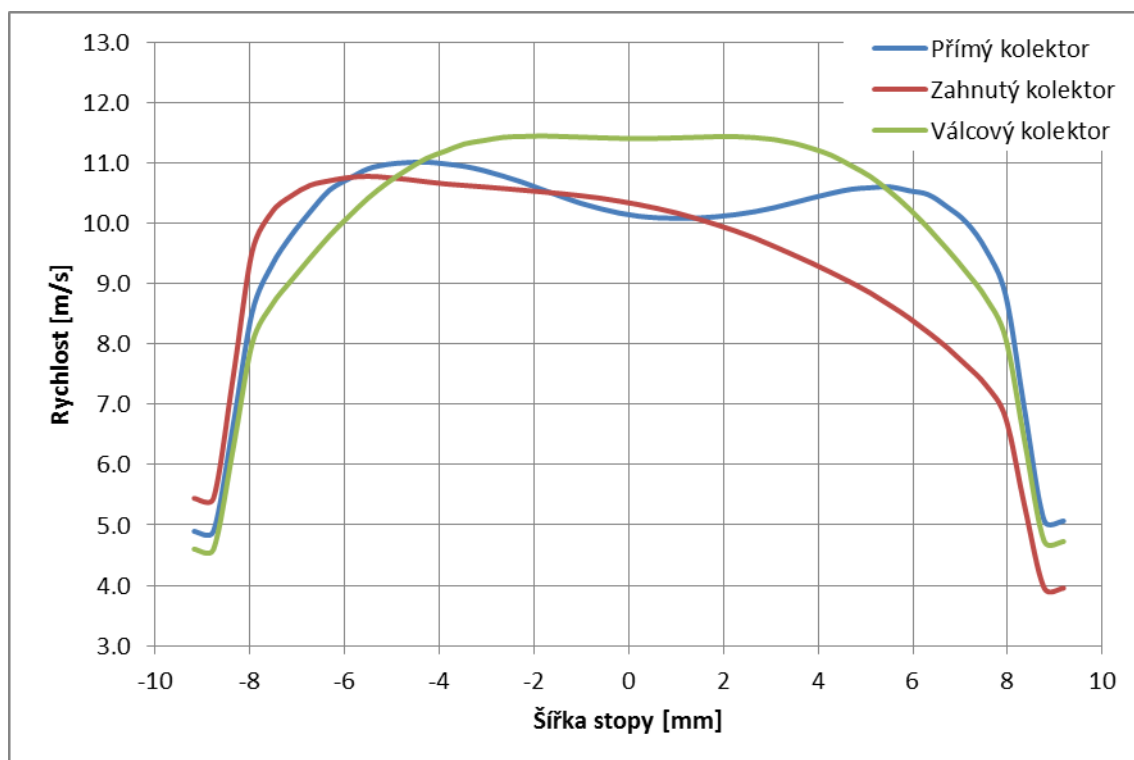
Vyhodnocení výsledků pro analýzu zabývající se vlivem polohy stabilizátoru uvnitř kolektoru bylo provedeno stejným způsobem jako v předešlém případě. Vliv jednotlivých konfigurací byl prezentován na srovnání rychlostí v odpovídající proudové doméně a zejména ve srovnání rozložení rychlostí na výstupu z domény. Dosažené výsledky pro tuto analýzu jsou uvedeny na Obr. 5-38 a Obr. 5-39.



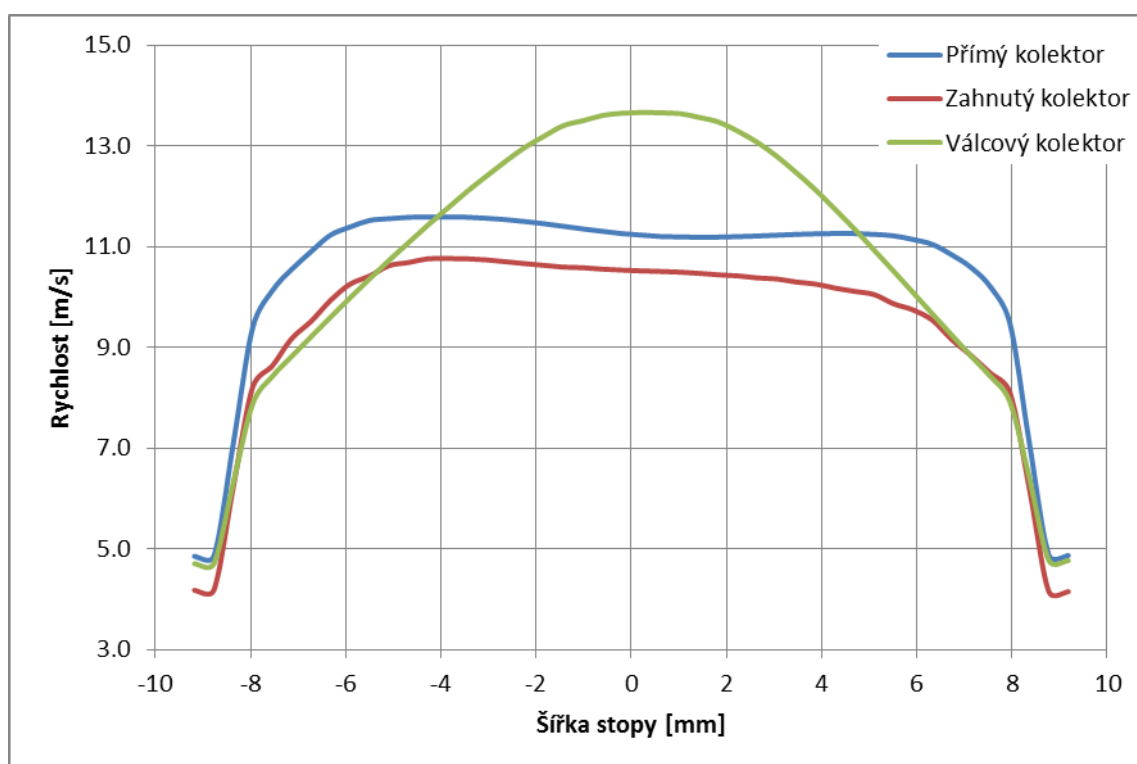
Obr. 5-32 Výsledky rozložení rychlosti pro stabilizátor A



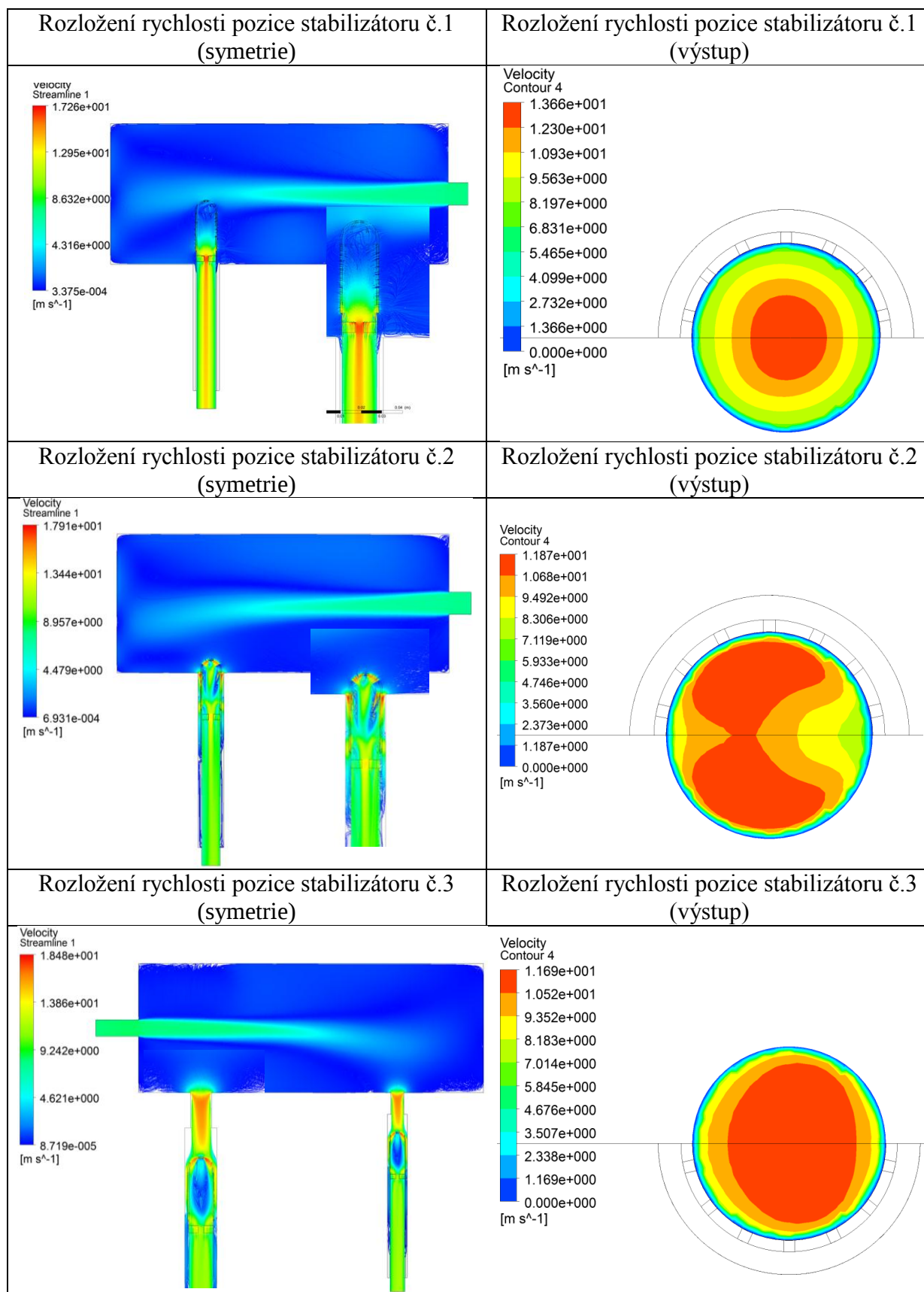
Obr. 5-33 Výsledky rozložení rychlosti pro stabilizátor B



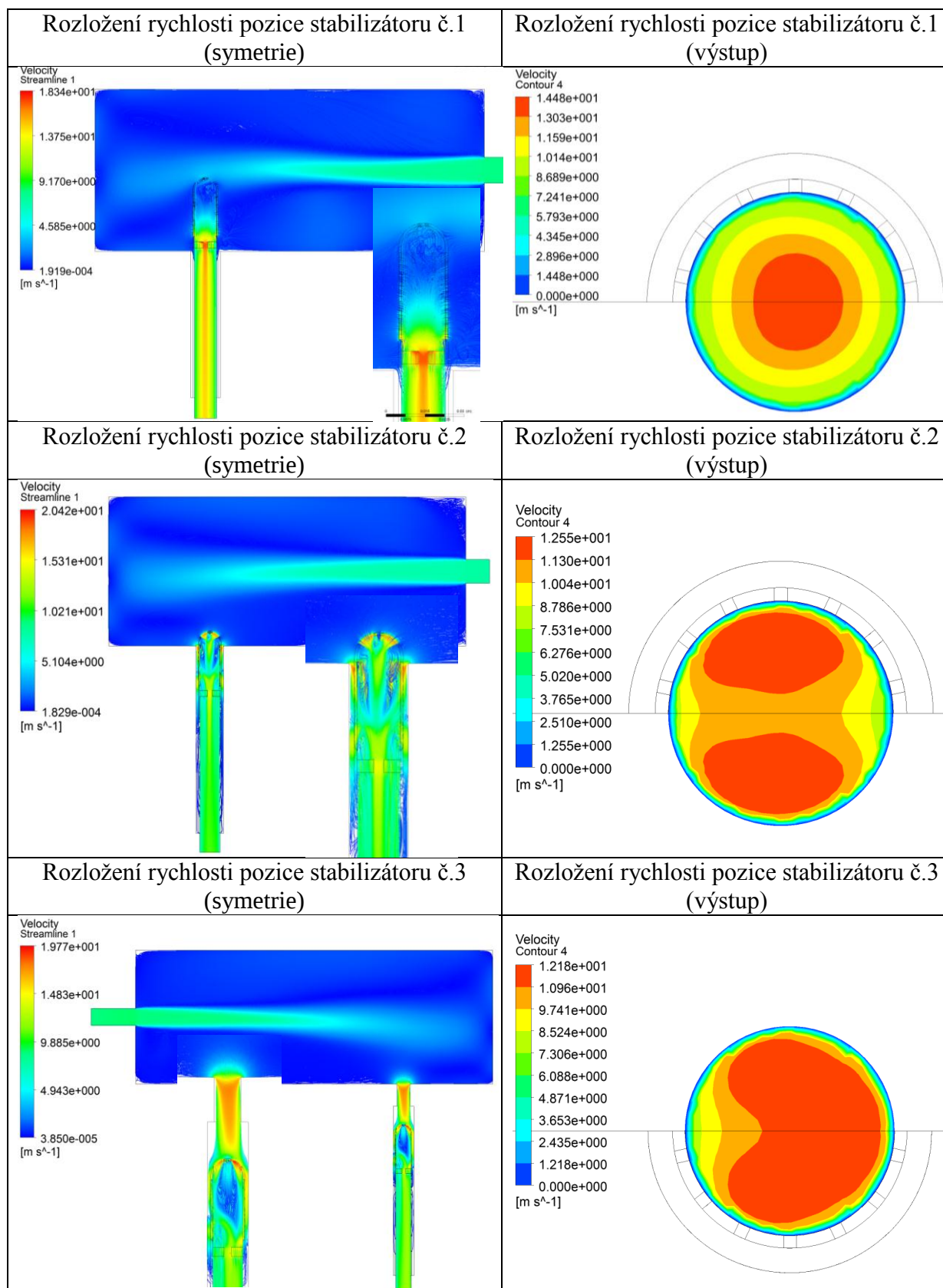
Obr. 5-34 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro stabilizátor A



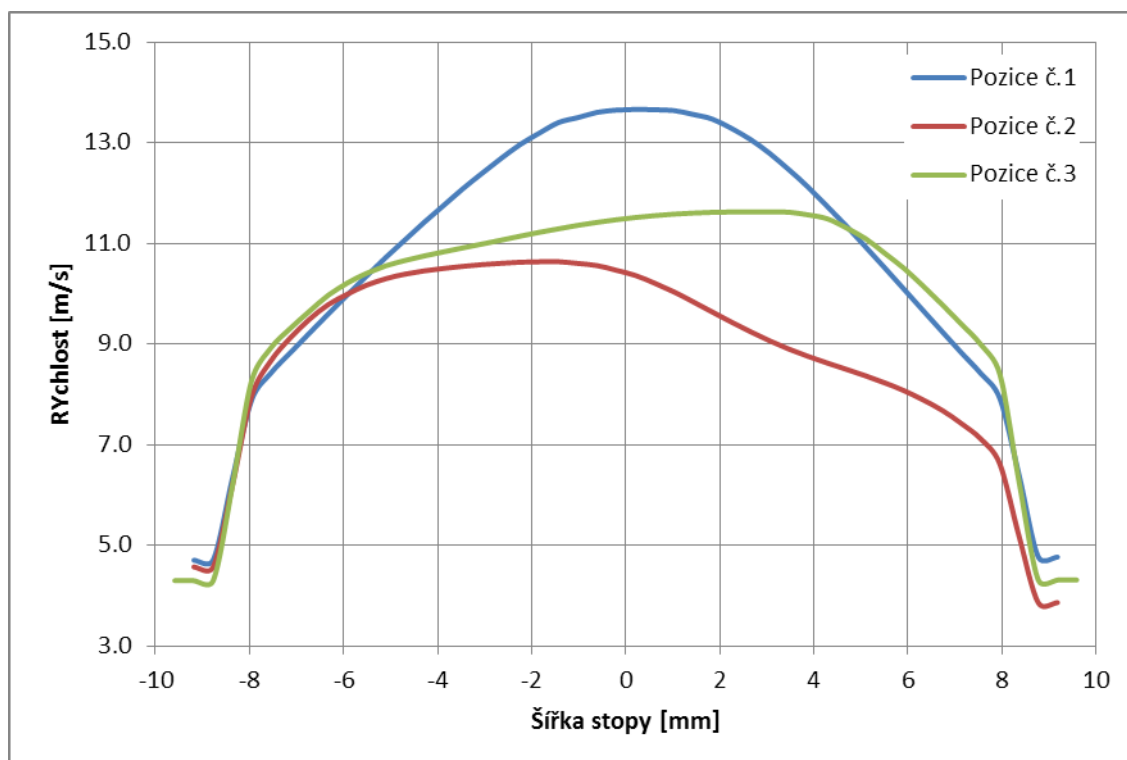
Obr. 5-35 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro stabilizátor B



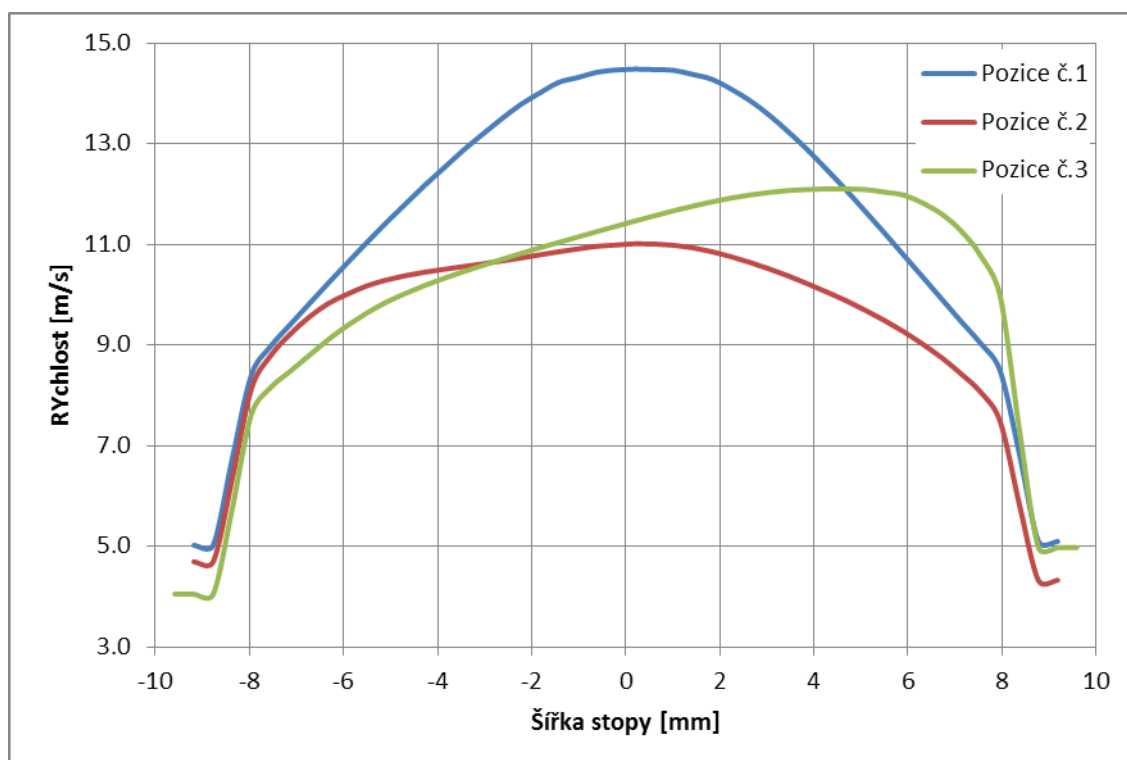
Obr. 5-36 Výsledky rozložení rychlosti pro tlak vody 25 MPa



Obr. 5-37 Výsledky rozložení rychlosti pro tlak vody 20 MPa



Obr. 5-38 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro tlak vody 25 MPa



Obr. 5-39 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro tlak vody 20 MPa

5.3 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. Zkoumání vlivu kolektoru a stabilizátoru bylo prováděno jak experimentálním měřením, tak výpočtovou analýzou pomocí numerického modelování metodou CFD.

Prvním způsobem analýzy vlivu kolektoru a stabilizátoru na vodní paprsek bylo experimentální měření. Při experimentálním měření byly použity dva typy odkujovacích trysek s rozdílnou hodnotou průtoku, dále byly použity tři typy kolektorů a dva druhy stabilizátorů. Vliv jednotlivých konfigurací připravených z uvedených komponent byl měřen na rozložení impaktního tlaku. Byla tedy použita stejná experimentální aparatura jako při měření impaktního tlaku popsaná v předchozí kapitole. 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 rozložení impaktního tlaku pro odpovídající konfiguraci bylo uvedeno na Obr. 5-10 až Obr. 5-16. Prostorové zobrazení výsledků ukazuje symetrii v případě trysky typu 1 se stabilizátorem A nebo určitou míru asymetrie v případě kombinace trysky typu 2 v kombinaci se stabilizátorem B. Tato asymetrie, která je jasně viditelná na rozložení impaktního tlaku, mohla být způsobena výrobní nepřesností jedné z použitých komponent. Srovnání dosažených hodnot impaktního tlaku všech konfigurací je prezentováno na Obr. 5-17 a Obr. 5-18. Z těchto výsledků je vidět, že jsou při použití válcového kolektoru změřené hodnoty impaktního tlaku nižší než při přímé nebo zahnuté vodní komoře. 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 kuželem s navazujícími žebry, dosahuje lepšího stabilizačního efektu při usměrňování proudu vody vstupující do odkujovací trysky. Což má vliv na konečné rozložení a pravidelnost tvaru vodního paprsku. 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 byly v prvním případě zaměřeny na simulaci experimentálního měření, kdy byly vytvořeny proudové domény odpovídající všem konfiguracím hydraulické soustavy uvažované při experimentální analýze. Ve druhém případě byly provedeny CFD analýzy s cílem zjistit vliv polohy stabilizátoru uvnitř kolektoru na vodní paprsek. 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. Pro vyhodnocení a dobrou prostorovou představu o proudění uvnitř proudové domény bylo pro jednotlivé konfigurace prezentováno rozložení rychlosti v rovině symetrie proudové domény a taktéž na průřezu z výstupu. Tyto výsledky jsou uvedeny na Obr. 5-32 a Obr. 5-33. Z těchto výsledků je dobře patrný vliv jak kolektoru, tak samotné geometrie stabilizátoru. Pro přímý vodní 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 vodní komory. 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. Rozložení rychlosti pro stabilizátor A bylo oproti původnímu kruhovému tvaru mírně zploštěné do elipsy podobné pro stabilizátor B a přímý kolektor. Výsledky rozložení rychlosti pro válcový kolektor a stabilizátor B naopak ukázaly místo eliptického tvaru více kruhové rozložení. Další parametr, který byl vyhodnocován ve všech provedených CFD analýzách pro všechny uvažované konfigurace, se nazýval ztrátový koeficient. Ztrátový koeficient udává velikost odporu, který klade geometrie odpovídající konfigurace vůči proudění. Vypočtené hodnoty

ztrátového koeficientu jednotlivých konfigurací jsou uvedeny v Tab. 5-5. 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.

CFD analýza zaměřená na zkoumání vlivu polohy stabilizátoru ve vodní komoře, byla prováděna pro válcový kolektor a stabilizátor B. Celkem bylo připraveno šest CFD analýz. Tři analýzy byly modelovány s tlakem 25 MPa a tři s tlakem 20 MPa. Zkoumány byly celkem tři polohy stabilizátoru, první poloha odpovídala referenční poloze (stejná jako v předchozích případech CFD analýza a při experimentálním měření). Ostatní dvě polohy stabilizátoru byly posunuty vůči referenční poloze ve směru proudu. Pro tyto CFD analýzy byly vyhodnocovány stejné parametry jako v předchozím případě. Bylo tedy sledováno rozložení rychlosti v oblasti symetrie a na výstupu z proudové domény. Prostorové výsledky jednotlivých poloh stabilizátoru jsou uvedeny na Obr. 5-36 a Obr. 5-37. Z těchto výsledků je vidět, že referenční poloha stabilizátoru je z pohledu rovnoměrnosti rozložení rychlosti nejlepší. V případě polohy 2 a 3 je rozložení rychlosti nerovnoměrné a zdeformované. Ze srovnání hodnot bezrozměrného ztrátového koeficientu, který byl pro všechny polohy stabilizátoru a tlaky opět vyhodnocen, je jasné patrné, že referenční poloha stabilizátoru je nejvýhodnější. Největší odpor při proudění kapaliny klade poloha stabilizátoru 3 a znamená to, že jsou v tomto případě i nejvyšší ztráty na všech proudových charakteristikách. Pro polohu 3 vůči poloze 1 (referenční) je ztrátový součinitel téměř dvojnásobný. Hodnoty ztrátového součinitele všech poloh stabilizátoru jsou uvedeny v Tab. 5-6.

Ze všech provedených analýz vlivu kolektoru a stabilizátoru a vyhodnocených výsledků je jasné patrný vliv těchto komponent na výsledné charakteristiky vodního paprsku a tedy i na konečnou kvalitu odkujení.

6 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. Byla tedy provedena analýza jednotlivých částí hydraulické odkujovací soustavy s cílem studia konkrétních komponent a nastavení pro dosažení optimálních podmínek při samotném procesu odstraňování okují. 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. Velice rozmanité provozní podmínky, při kterých je vyráběna a zpracovávána široká paleta různých legovaných ocelí všech jakostí, jsou rozlehlou základnou pro vznik okují, které vytvářejí nepřehlednou oblast fyzikálních a mechanických vlastností těchto struktur. Z tohoto důvodu je nezbytné se věnovat jejich studiu a hledání možností, jak tuto širokou skupinu zjednodušit, prozkoumat a popsat pro dosažení efektivního způsobu odstraňování všech typů okují a dosáhnout tak lepší kvality okujeného povrchu oceli.

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 [19]. 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. Dalším důvodem pro volbu uhlíkové oceli bylo její široké využití. 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 [21]. Oba typy oceli a zejména chemické sloučeniny, které byly vytvořeny na jejich povrchu po zokujení, byly podrobeny zkoumání jednotlivých fyzikálních a mechanických vlastností.

6.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OKUJÍ

Pro zjišťování a měření fyzikálních a mechanických vlastností okují se používá několik metod. Nejčastěji používané techniky byly popsány v kapitole 3.2. Mezi nejpoužívanější metody patří zejména tahová zkouška nebo ohybová zkouška. Všechny tyto metody patří mezi standardní metody, které se používají i při měření mechanických vlastností ocelí nebo jiných materiálů. Měření mechanických vlastností však přináší několik problémů, které komplikují jakoukoli metodu měření. Mezi základní problémy patří složitá příprava vzorků s odpovídajícími okujemi, vysoká teplota při měření, nehomogenita, nestabilita struktur měřených sloučenin atd. Překonávání všech těchto problémů extrémně zvyšuje časovou a finanční náročnost celého experimentálního měření. Vzhledem k těmto komplikacím je tedy jasné, že experimentální měření mechanických vlastností je nutné předem rozdělit do několika kroků. Prvním krokem je náročná příprava vzorků, která vyžaduje samostatnou experimentální část věnovanou měření vzniku a růstu okují v daných podmínkách pro dosažení požadovaných struktur okují. V tomto případě je možné sestavit graf růstu okují. Druhým krokem je samotné měření mechanických vlastností pomocí zvolené metody. Následným krokem je analýza vytvořených a měřených chemických struktur. Tato práce spočívá v kvalitativní analýze na vzorcích pod optickým nebo elektronovým mikroskopem, nebo také spektrální analýze či rentgenové práškové difrakci. Posledním krokem je vyhodnocení a zpracování změřených výsledků. Náročnost této části analýzy záleží na zvolené metodě měření.

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 okují probíhalo v několika krocích, které byly popsány v předchozím odstavci. Samotné přípravě vzorků pro SPT předcházelo měření růstu okují pro daný materiál a za daných laboratorních podmínek. Pro zjišťování struktury vytvořených okují, 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 okují byla věnována vyhodnocování a analýze změřených dat, která je pro zvolenou metodu absolutně nezbytná.

6.1.1 Měření růstu okují

Experimenty, které byly připraveny pro zkoumání závislosti růstu okují v prostředí Laboratoře přenosu tepla a proudění, měly za cíl zjistit vliv tloušťky vzorku na tvorbu a růst okují v daných podmínkách. Na základě těchto měření poté vytvořit určitý obraz o vlivu konkrétního prostředí a tím zajistit vstupní podmínky pro další experimenty týkající se vrstev okují. Rychlost a tvorba okují je velice specifický chemický proces závislý na mnoha faktorech. Podstata a růst okují byla popsána v kapitole 3.2. V této kapitole byly také popsány jednotlivé faktory ovlivňující jejich růst. Jak již bylo napsáno v předchozím odstavci, tento krok je nutný pro přípravu samotných vzorků pro realizaci SPT měření a zároveň je možné ho považovat za základní charakteristiku daných okují.

Návrh experimentu:

Experimentální měření bylo provedeno tak, aby na vzorcích připravených z jednoho typu oceli bylo možné zjistit vliv laboratorních podmínek na rychlost růstu okují. Proměnným parametrem byla v tomto případě rozdílná tloušťka vzorků. V Tab. 6-1 jsou uvedeny konkrétní tloušťky a hmotnosti měřených vzorků před oxidací. Pro výrobu vzorků byla zvolena běžná konstrukční ocel. Všechny měřené vzorky byly vytvořeny ze stejného materiálu. Tento typ oceli velice dobře oxiduje, protože neobsahuje významné množství legujících prvků, které by tento proces zpomalovaly. Návrh experimentu spočíval ve volbě vhodného typu materiálu, který byl příbuzný s materiálem použitým v předchozích analýzách a zejména se shodoval s typem oceli použité pro přípravu vzorků pro měření mechanických vlastností. V další části návrhu byla zvolena elektrická pec, jejíž teplotní rozsah umožňuje ohřev nad 1000°C. Při samotném procesu okujení nebyla vytvářena žádná speciální atmosféra uvnitř pece. Po provedení oxidace byla pro měření hmotnosti vzorku zajištěna dostatečně citlivá laboratorní váha a pro měření vytvořených tlouštěk okují byl použit elektromagnetický snímač. Takto připravený a zajištěný návrh experimentu byl následně proveden.

Tab. 6-1 Počáteční parametry jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8
Tloušťka vzorku [mm]	1.95	1.49	1	0.98	1.95	0.54	0.54	1.49
Hmotnost [g]	58.51	45.92	31.36	30.65	58.22	16.29	16.05	46.19

Realizace měření:

Realizace experimentálního měření probíhala následujícím způsobem. Byly vybrány čtyři ocelové vzorky, které měly stejné rozměry (20x2 mm), jak již však bylo uvedeno, jednotlivé vzorky měly rozdílnou tloušťku (viz Tab. 6-1). Tloušťka vzorků byla jedinou řízenou proměnnou. Pro dodržení základních zásad a pro dosažení relevantnosti výsledků byly použity dva vzorky pro každou tloušťku. Všechny vzorky byly ze stejného materiálu a tedy se stejnými materiálovými vlastnostmi. Materiálové vlastnosti vzorků odpovídaly běžné konstrukční oceli. Před samotným experimentem byly jednotlivé vzorky zváženy na laboratorní váze s přesností 0,01g (viz Tab. 6-1). Po provedení několikanásobného měření tlouštěk a hmotností jednotlivých vzorků byly vzorky vloženy do elektrické pece, ve které byla nastavena teplota 1000°C. Doba expozice vzorků byla šedesát minut. V peci byla přirozená atmosféra bez převahy oxidačních nebo naopak inertních prvků. Po vytažení a vychladnutí vzorků byly změřeny tloušťky vrstvy sekundárních okují a primárních okují pomocí elektromagnetického snímače. Následně byla opět změřena hmotnost jednotlivých vzorků i s okujemi. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v Tab. 6-2.

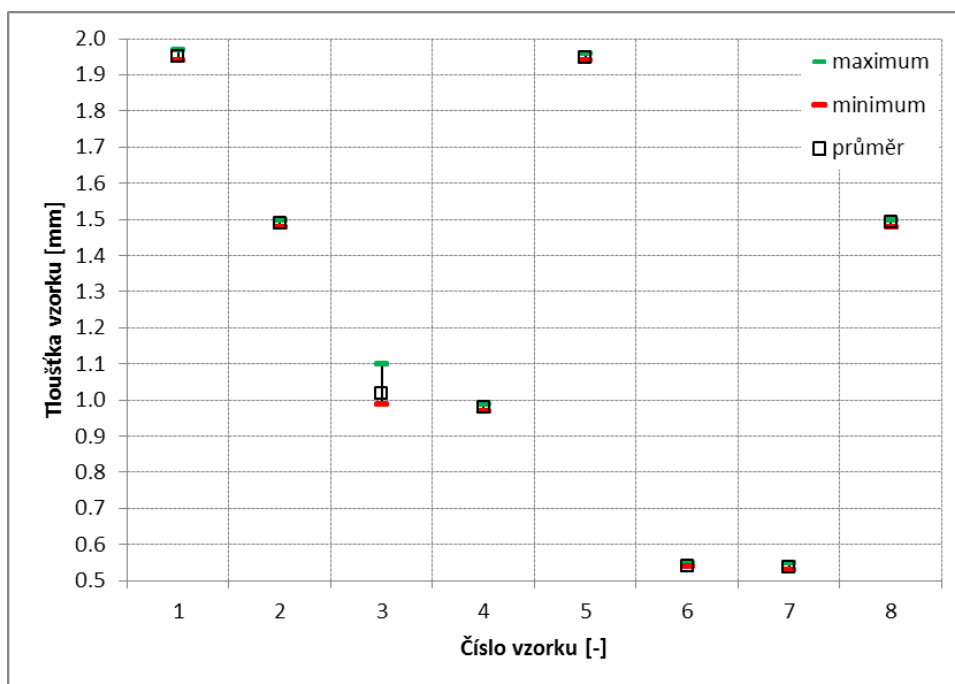
Zpracování a vyhodnocení naměřených dat:

Vyhodnocením naměřených dat bylo možné získat určitou představu o vlivu laboratorních podmínek při růstu okují pro zvolený typ materiálu. Různé uspořádání jednotlivých vzorků v procesu měření a vyhodnocování mělo za cíl dodržet tzv. randomizaci, která vylučuje vnesení chybné závislosti výsledků na pořadí měřených vzorků. Výsledky tohoto měření prokázaly rychlost růstu okují v laboratorních podmínkách. Průměrná rychlost růstu okují byla v tomto případě 0,008 mm/min. Tuto informaci je možné použít při další přípravě vzorků okují o požadované tloušťce. Tuto hodnotu lze samozřejmě použít pouze pro vzorky ze stejného materiálu a při stejných podmínkách jaké byly vytvořeny v laboratorních podmínkách. Z výsledků je dále patrné, kolik oceli se proměnilo při růstu okují, a jak se změnila hmotnost vzorku. Ve všech případech hmotnost vzrostla a to z důvodu vzniku nových chemických struktur. Tento jev se dá jednoduše vysvětlit tak, že vznikem nových chemických struktur typu FeO, Fe₃O₄ nebo Fe₂O₃ a dalších po oxidaci železa se objem zásadně zvětší (zvětší se tloušťka vzorku) a tím vzroste hmotnost celého vzorku. Hodnoty hustoty vzniklých chemických sloučenin jsou zhruba 5000 kg/m³ (viz Tab. 3-3). Zvětšení objemu vzorku při zachování řádově stejných hodnot hustoty jednotlivých vrstev se projevuje ve zvýšené hmotnosti vzorku oproti původní hmotnosti základního materiálu. Výsledky dále

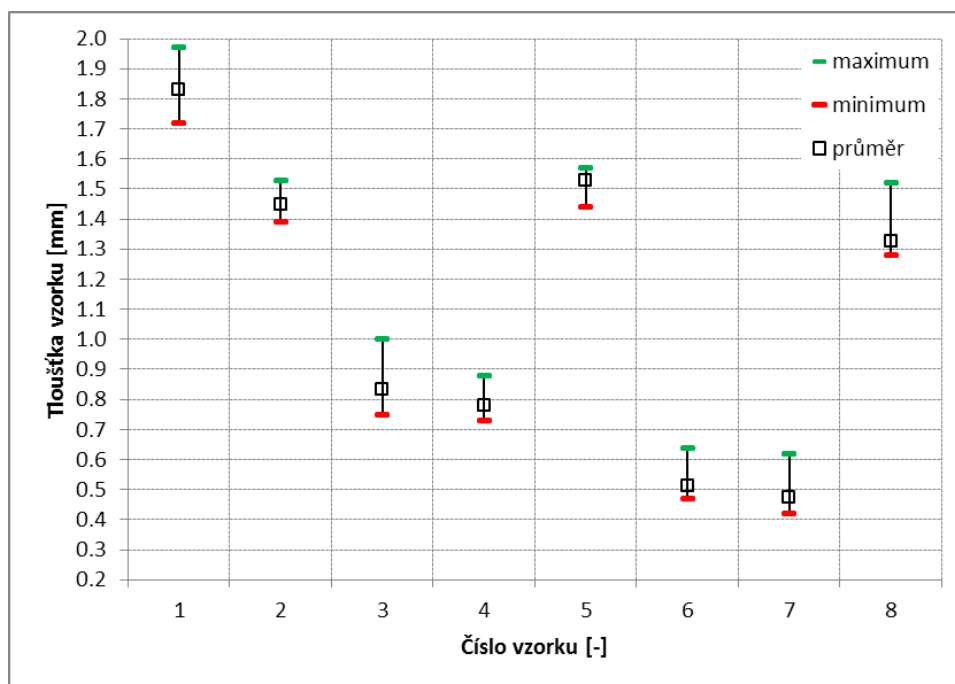
ukázaly, že u vzorků s větší tloušťkou došlo k výraznější redukci základního materiálu než u vzorků s menší tloušťkou (viz Obr. 6-2). Průměrná hodnota nárůstu hmotnosti činila přibližně 4,81 g. Hodnota nárůstu hmotnosti je u vzorků rozdílná (Obr. 6-3), není možné vysledovat nějakou závislost tloušťky vzorku na nárůstu hmotnosti. Celková změřená tloušťka vrstvy okují pro jednotlivé vzorky je uvedena na Obr. 6-4. Z těchto výsledků bylo zjištěno, že střední hodnota tloušťky okují pro všechny vzorky je 0,477 mm. Všechny tyto informace je možné použít při další přípravě vrstev okují pro obdobný typ oceli v Laboratoři přenosu tepla a proudění.

Tab. 6-2 Změřené parametry jednotlivých vzorků po oxidaci

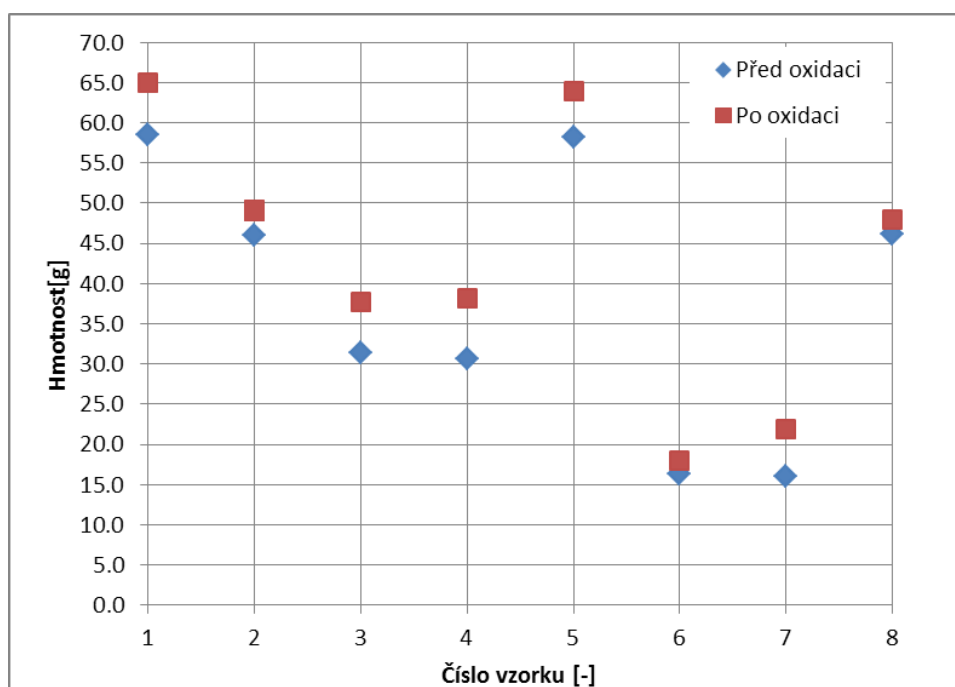
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8
Celková tloušťka [mm]	2.28	1.95	1.38	1.27	2.05	0.93	0.86	1.80
Tloušťka oceli [mm]	1.81	1.44	0.82	0.77	1.54	0.49	0.46	1.30
Hmotnost [g]	65.04	49.12	37.72	38.15	63.87	17.98	21.87	47.92



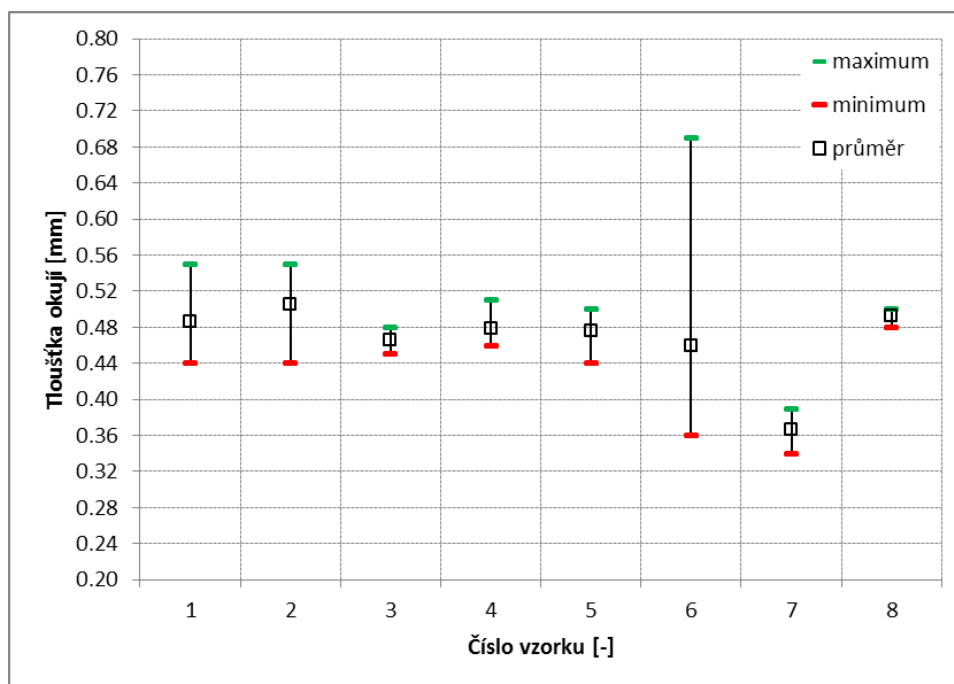
Obr. 6-1 Tloušťka základního materiálu před oxidací



Obr. 6-2 Tloušťka základního materiálu po oxidaci



Obr. 6-3 Hmotnost jednotlivých vzorků před a po oxidaci



Obr. 6-4 Tloušťky okují jednotlivých vzorků

6.1.2 Měření mechanických vlastností okují

Jak již bylo v úvodu kapitoly uvedeno, pro zjišťování mechanických vlastností okují byla zvolena protlačovací zkouška na malých vzorcích (SPT). Tato zkouška se používá zejména v energetickém průmyslu, kdy je potřeba zjistit mechanické vlastnosti materiálu, který byl vystaven působení vlivu prostředí či zatížení bez významného poškození daného zařízení.

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. A to proto, že je možné zjistit stejné materiálové charakteristiky jako u tahové zkoušky. Zkouška při konstantní rychlosti deformace se označuje jako SPT-CDR (constant deflection rate) [22]. Druhým typem SPT zkoušky je protlačování vzorku při konstantní síle. Výsledkem této zkoušky je poté časový průběh prodloužení na čase. Tento typ zkoušky se používá jako creepová zkouška, je označována SPT-CF (constant force) [22]. Pro obě zkoušky je charakteristické, že se vzorek protlačuje až do mezního stavu porušení. Obvyklým indentorem je ocelová nebo keramická kulička. Výhodou těchto zkoušek je malý rozměr vzorku a možnost měření za vysokých teplot.

Návrh experimentu:

Experimentální měření mechanických vlastností okují bylo připraveno tak, aby bylo možné změřit požadované mechanické charakteristiky na dvou typech oceli, respektive okují vzniklých na zvolených vzorcích. Pro přípravu vzorků byly zvoleny dva typy oceli, první typ (typ A) představovala běžná uhlíková ocel, jejíž chemické vlastnosti přibližně odpovídaly materiálu 11 308 [19]. Druhým zvoleným typem (typ B), byla ocel s vyšším obsahem křemíku. Její chemické složení odpovídalo typu oceli používané v elektrotechnice, označení této oceli je M47-FP [21]. Oba typy oceli byly podrobeny chemickému rozboru a jejich přesné chemické složení je uvedeno v Tab. 6-3. Chemické složení oceli má významný vliv na rychlost růstu okují, dále na jejich strukturu a chemické vazby vytvořené mezi základním materiálem nebo jednotlivými vrstvami okují. Jak již bylo výše napsáno, volba těchto dvou typů oceli byla záměrná na základě předchozích výpočtů. Na základě zkušeností z provádění odkujovacích experimentů v Laboratoři přenosu tepla a proudění a zkušeností z provozu se dá říct, že běžná uhlíková ocel je charakteristická rychlým růstem okují (tento jev byl potvrzen v předchozí kapitole 6.1.1) a jejich relativně jednoduchým odstraňováním. Naproti tomu ocel obsahující vyšší podíl křemíku je typická pomalejším růstem okují, ale také vytvářením silnějších vazeb se základním materiálem a tedy jejich významně horším odstraňováním. Pro získání hlubších poznatků o těchto dvou extrémních případech chování okují byly připraveny experimenty pro zjištění jejich fyzikálních a mechanických vlastností.

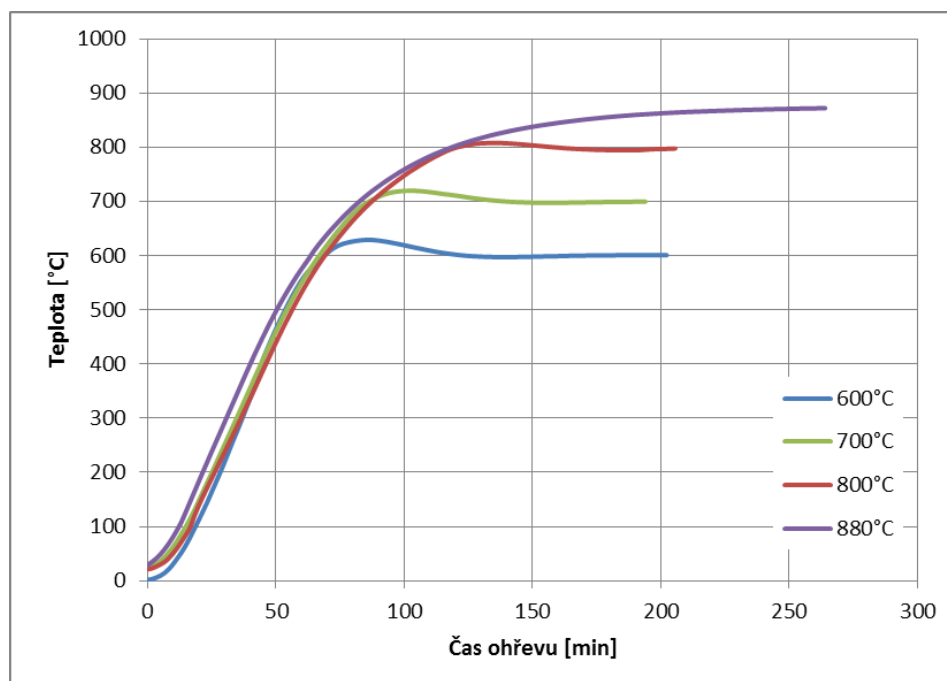
Tab. 6-3 Chemické složení vzorků pro přípravu okují

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

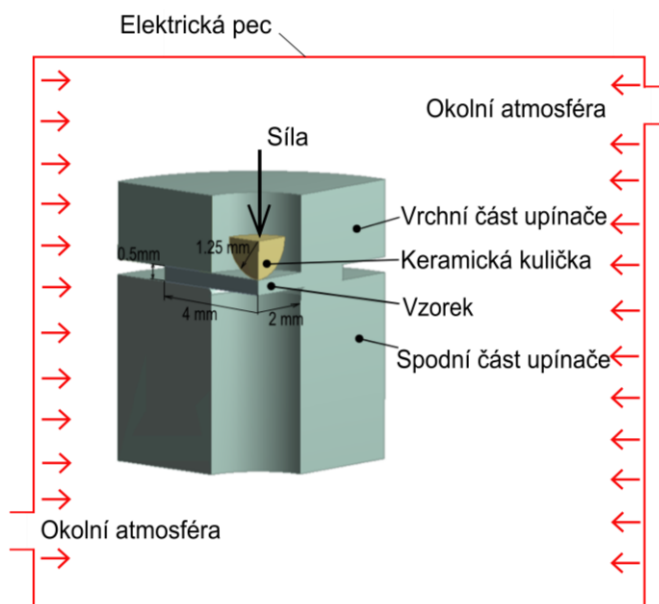
Měření mechanických vlastností zvolenou metodou probíhalo na AV ČR. SPT měření byla prováděna na strojích konstrukce ÚFM AV ČR (viz Obr. 6-5). Teplota během zkoušky byla udržována konstantní v rozmezí $\pm 0,5$ °C. Záznam teplot při měření jednoho ze vzorků je zobrazeno na Obr. 6-6. Schématické znázornění rozměrů a uložení vzorku při této zkoušce je uvedeno na Obr. 6-7. Zkouška, která byla zvolena pro měření mechanických vlastností okují, odpovídala zkoušce při konstantní rychlosti deformace. Rychlost deformace při samotném měření byla stanovena na hodnotu 0,006 mm/s.



Obr. 6-5 Experimentální zařízení pro realizaci SPT měření



Obr. 6-6 Záznam ohřevu vzorků před SPT



Obr. 6-7 Schématické zobrazení uložení vzorku a jeho rozměrů

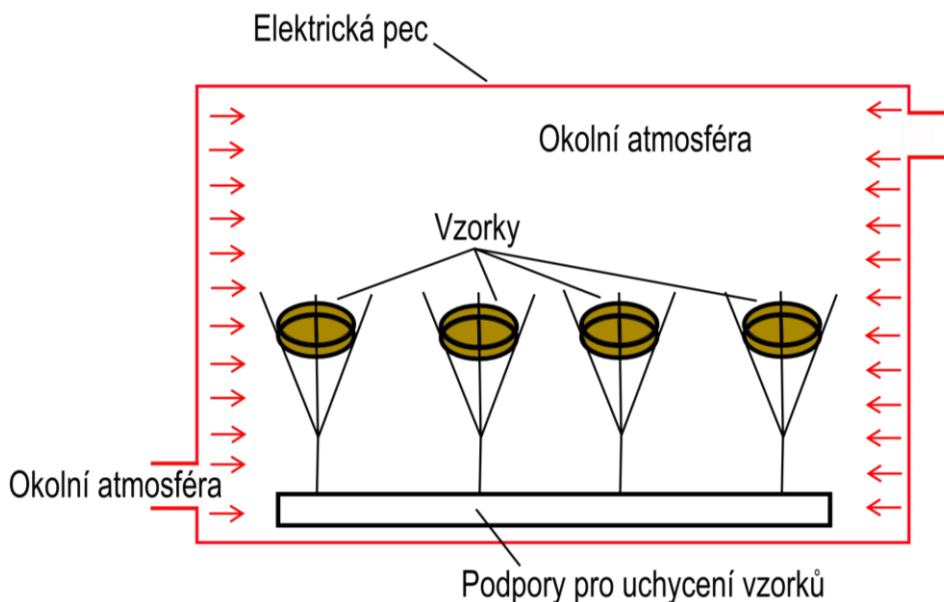
Realizace měření:

Realizace měření probíhala v několika postupných krocích. Prvním krokem v procesu realizace samotného experimentu byla příprava vzorků. Schématické zobrazení procesu okujení v elektrické peci je prezentováno na Obr. 6-8. 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 (viz Obr. 6-7). V dalším kroku byly jednotlivé vzorky po stanovenou dobu vystaveny oxidaci v elektrické peci a byly tak vytvořeny okuje v požadované struktuře. Pro tento krok byly využity informace získané z předchozího experimentu, který byl popsán v kapitole 6.1.1. Na základě těchto 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. 6-4. Jak je vidět, oxidace probíhala při různém časovém intervalu, čímž byly také vytvořeny různé tloušťky vrstev okují. Pro materiál typu A, byla provedena dvě samostatná SPT měření. Při oxidaci vzorku typu A po dobu 240 min, bylo dosaženo zokujení v celém průřezu. Proto byla vytvořena druhá varianta oxidace stejného typu materiálu po kratší dobu s cílem vytvoření pouze vrstvy okují na základním materiálu. Samotné SPT měření probíhalo za zvýšených teplot (600-900°C) na všech připravených vzorcích. V posledním kroku experimentu byly změřeny také vzorky obou materiálů bez vrstvy okují, tedy samotná ocel. Tato měření byla prováděna za stejných teplot jako u vzorků s vrstvami okují a sloužila ke zjištění mechanických vlastností základního materiálů.

Naměřené hodnoty je pak možné porovnat s hodnotami zokujených vzorků. Z těchto srovnání je pak na první pohled vidět rozdíly v mechanických vlastnostech. Rychlost posuvu při měření jednotlivých vzorků byla stanovena na hodnotu 0,006 mm/s. Tato rychlost odpovídala pohybu horního táhla vůči rámu měřicího zařízení. Rychlost průhybu vzorku byla měřena snímačem dráhy Hottinger-Baldwin. Toto měření v sobě zahrnuje i elastickou deformaci spodního táhla, která je při měření malých sil, jako tomu bylo v tomto případě, zanedbatelná. Pohyb horního táhla experimentálního zařízení byl zajištěn krokovým motorem od firmy Microcon. Kontroler M1486 používaný v tomto zařízení integruje v jednom obvodu plně programovatelné řízení krokového motoru i univerzální řídicí funkce (vstupy/ výstupy) a umožňuje tak realizovat kompletní řízení stroje. Maximální rychlost krokového motoru je 40 000 kroků/s. Snímání síly a průhyb vzorku se provádí programem CDR6. Jeho autorem je RNDr. Karel Milička, DrSc. Je to speciální program vyvinutý pro provádění SPT zkoušek při konstantní rychlosti pohybu.

Tab. 6-4 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]

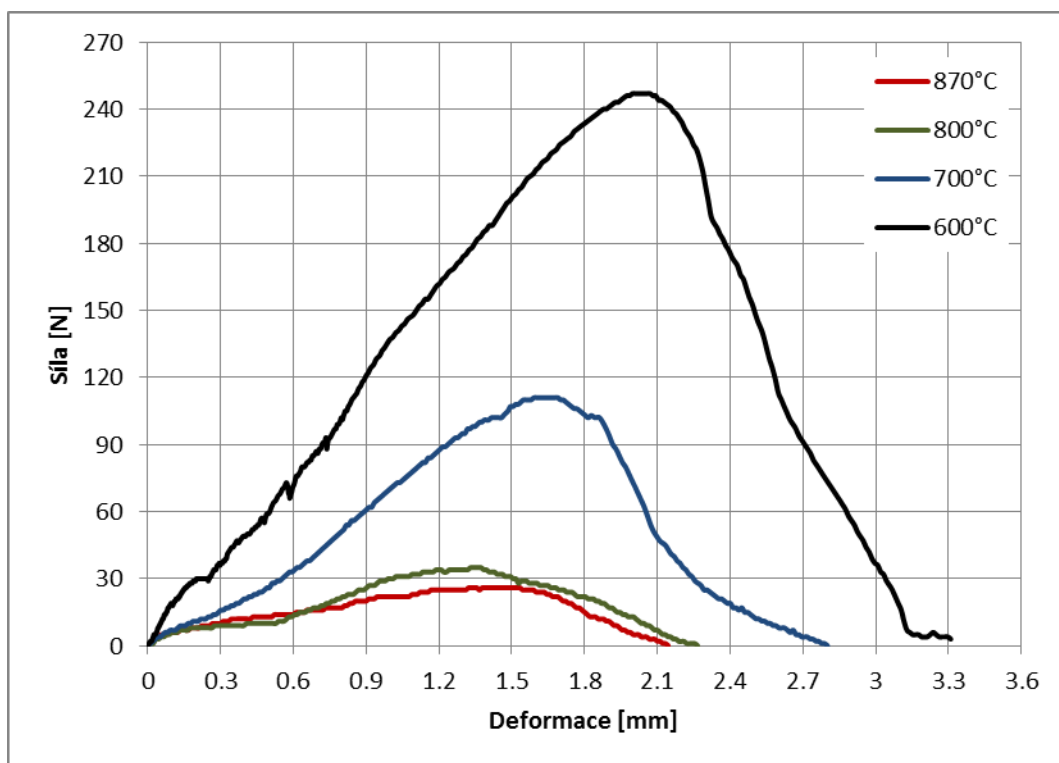


Obr. 6-8 Schématické znázornění procesu okujení

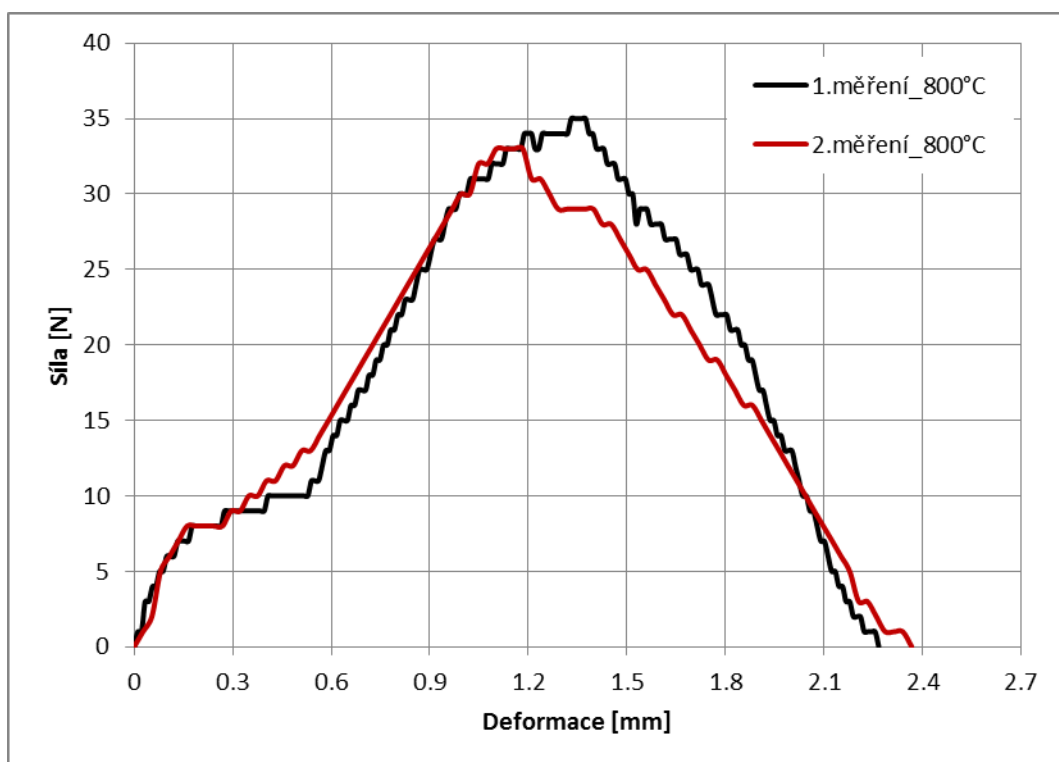
Zpracování a vyhodnocení naměřených dat:

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. 6-9. 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. 6-10). 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. 6-11. 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. 6-12. Poslední měření probíhalo na neokujených vzorcích pro oba typy použitých materiálů. Naměřené výsledky pro vzorky typu B jsou uvedeny na Obr. 6-13. Výsledky dosažené pro druhý typ vzorků typu A jsou prezentovány na Obr. 6-14. Změřené křivky síly pro jednotlivé typy vzorků při odpovídajících teplotách respektují předpokládané závislosti, kdy se zvyšující teplotou klesá velikost síly potřebné na porušení vzorku. Při porovnání opakovaných měření vzorků typu B uvedených na Obr. 6-10 byla vyhodnocena plocha pod oběma křivkami. Hodnotu rozdílu těchto ploch je možné považovat za přibližnou přesnost resp. rozptyl měření při provádění SPT. Rozdíl velikosti ploch pro tyto dvě křivky činil přibližně 3%.

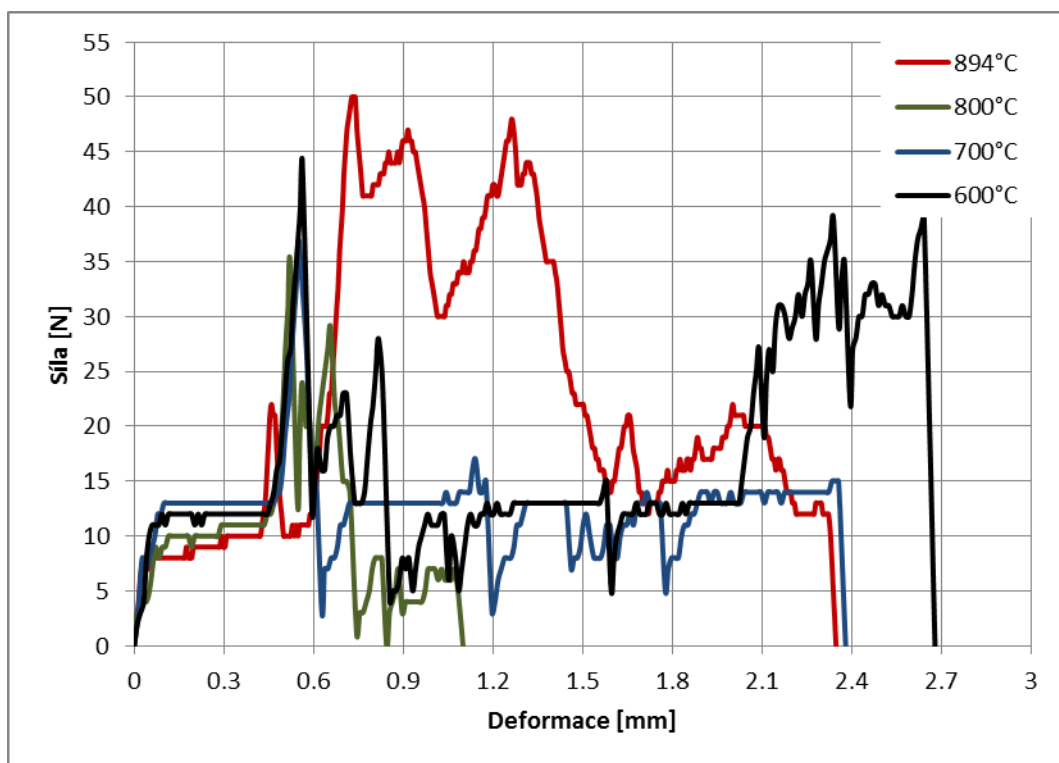
SPT měřením byla získána závislost síly vs. deformace pro jednotlivé vzorky za daných teplot. Tyto informace jsou velice důležitými charakteristikami měřených vzorků, je však potřeba z těchto změřených křivek získat mechanické vlastnosti. To znamená, že je potřeba tyto křivky transformovat na klasickou závislost napětí vs. přetvoření. Tím je dosaženo požadovaného cíle a to získání základních mechanických veličin pro daný vzorek. Tomuto postupu bude věnována další kapitola.



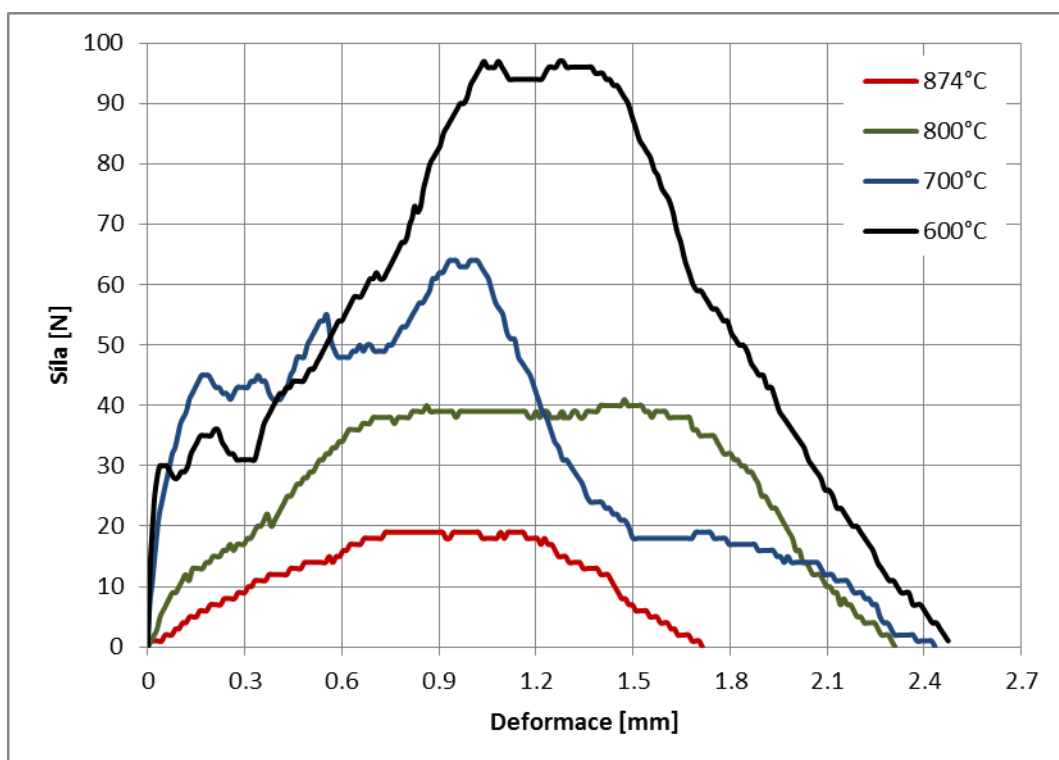
Obr. 6-9 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku B č.1



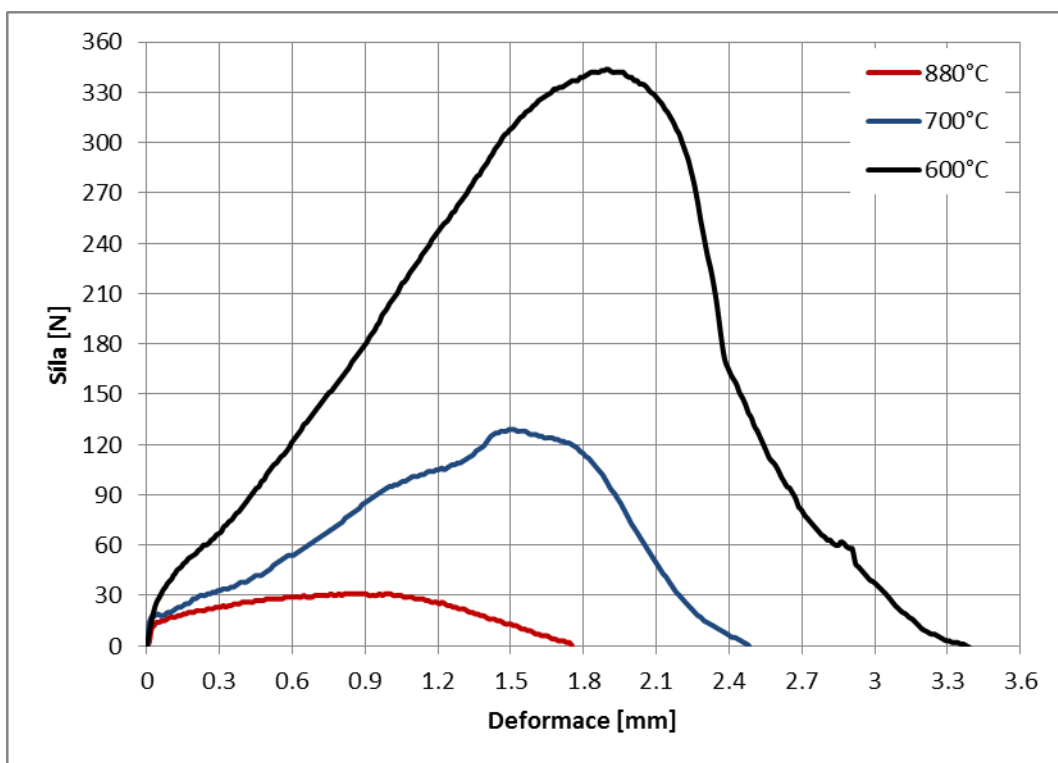
Obr. 6-10 Opakované měření vzorků typu B č. 1



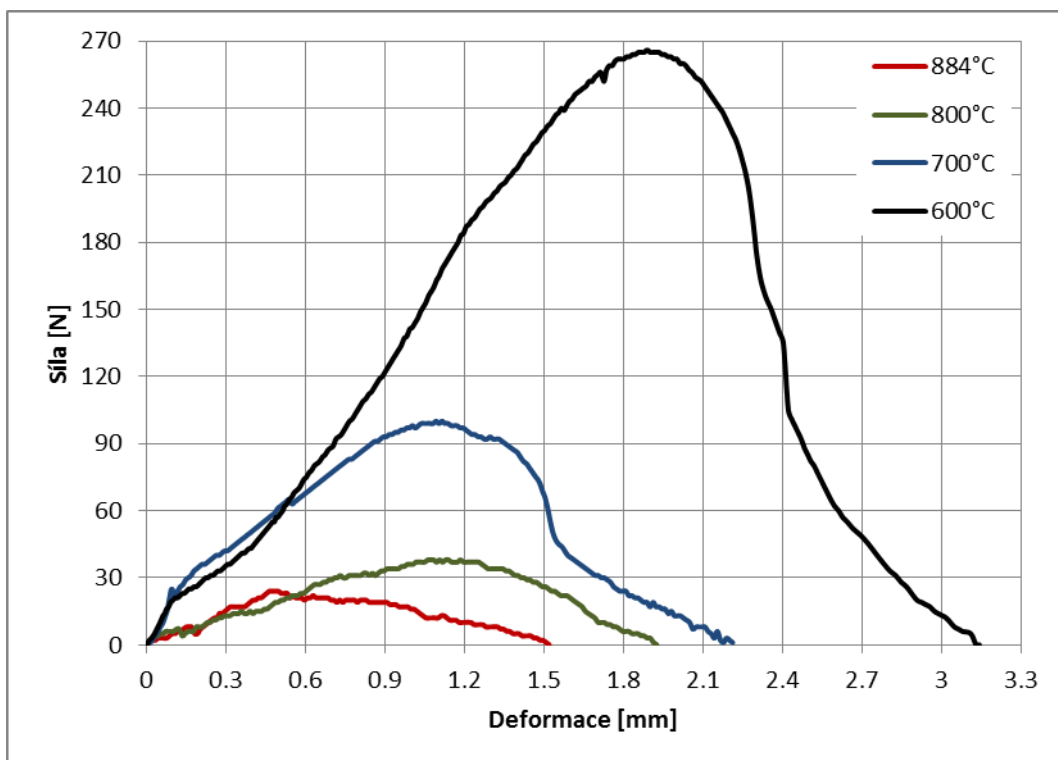
Obr. 6-11 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku A č. 2



Obr. 6-12 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku A č. 3



Obr. 6-13 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro základní materiál vzorků typu B



Obr. 6-14 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro základní materiál vzorků typu A

6.2 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 rozbor jednotlivých křivek bylo použito opět několik metod. K analýze základních charakteristik změřených křivek, k nimž patří síla a deformace na mezi kluzu (F_e , u_e), nebo síla a deformace na mezi pevnosti (F_m , u_m), byly zvoleny grafické metody („two tangents method“, „offset method“) [23]. Pro hlubší rozbor a analýzu křivek byly použity empirické vztahy získané z literatury. Tyto vztahy byly použity pro vyhodnocení lomových charakteristik zkoumaných vzorků. Jednou z takto získaných lomových charakteristik byla hodnota J_{IC} integrálu, která vyjadřuje lomovou houževnatost. Empirické vztahy použité pro vyhodnocení lomových charakteristik byly např. prezentovány autory: J. Kameda, X. Mao [24] nebo J. H. Bulloch [25]. 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. Převod křivek je možné považovat za nepřímou úlohu. Na začátku řešení byly známy změřené hodnoty síly a deformace na jejichž základě bylo nutné zjistit mechanické vlastnosti daného materiálu, které definují křivku napětí závislou na přetvoření. Samotná optimalizační analýza byla provedena v konečnoprvkovém programu ANSYS. V tomto programu byl připraven výpočtový model odpovídající danému SPT měření, ve kterém bylo zvoleno několik proměnných, kterými byla řízena cílová funkce. Zvolené parametry odpovídaly základním materiálovým charakteristikám, jako jsou modul pružnosti, mez kluzu atd.

6.2.1 Kvalitativní analýza vzorků

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. Úprava vybraných vzorků potřebných pro elektronový mikroskop byla provedena ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství na VUT FSI. Výsledky analýzy tlouštěk jednotlivých vrstev byly následně použity při optimalizaci materiálových parametrů, jejichž hlavním cílem byl převod změřených závislostí síly vs. deformace na křivky napětí vs. přetvoření. Druhým krokem kvalitativní analýzy vzorků byl rozbor fázového složení jednotlivých vrstev a chemických struktur okují, ke kterému byla použita rentgenová prášková difrakce (XRD). Tato analýza byla opět prováděna na Ústavu materiálových věd a inženýrství na VUT. Pro XRD analýzu byl vybrán jeden vzorek z každé skupiny experimentů. Celkem tedy byly této analýze podrobeny tři vzorky. Jeden vzorek pro typ B a dva vzorky pro typ A každý pro odpovídající dobu oxidace. 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.

Příprava vzorků a analýza tlouštěk:

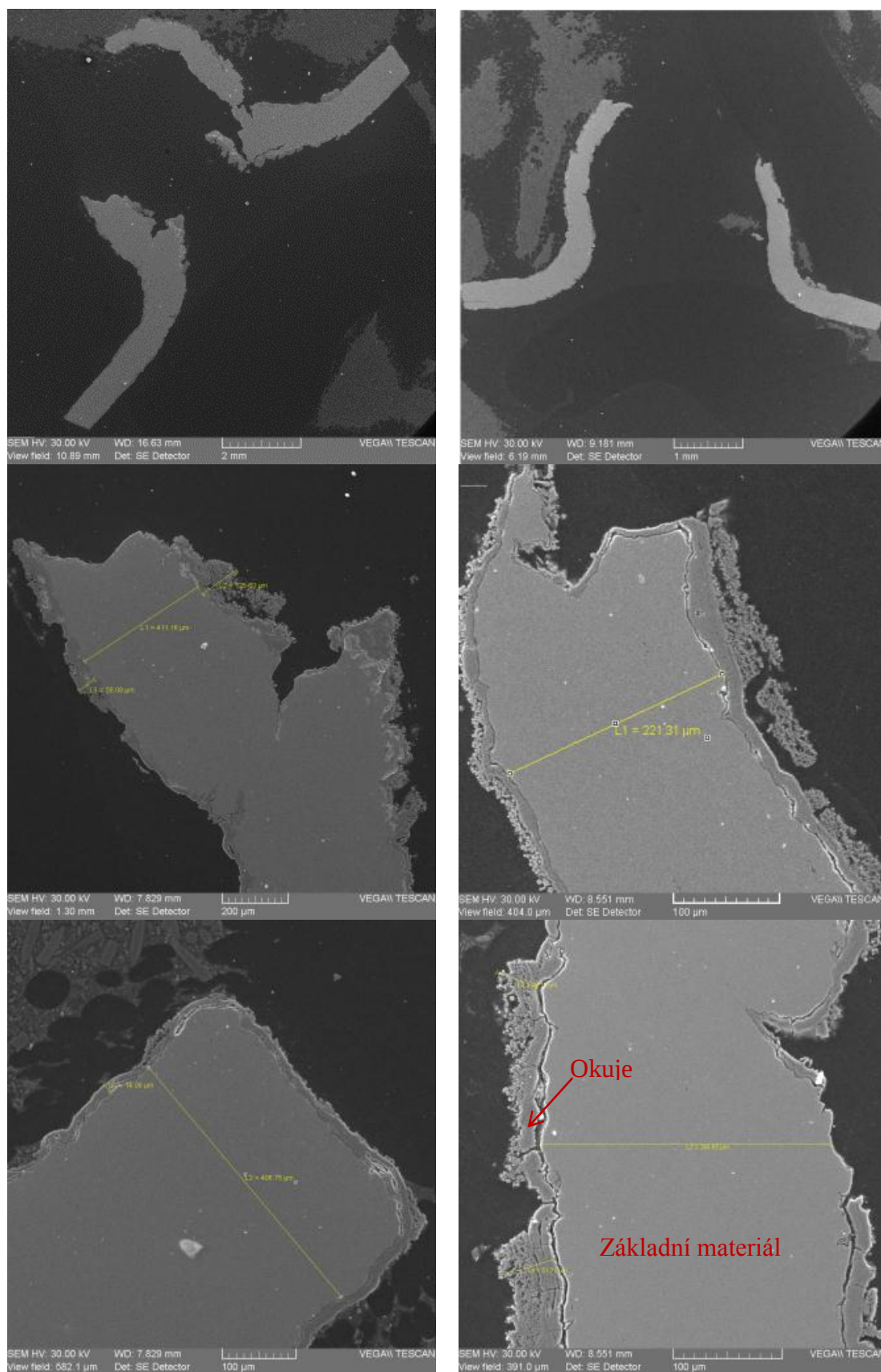
Vzorky použité pro SPT měření prošly několika fázemi přípravy. V první fázi byly vloženy do elektrické pece při teplotě 1000°C po přesně definovaný časový interval. Atmosféra uvnitř pece nebyla žádným způsobem řízena, šlo tedy o přirozenou oxidaci za vysokých teplot. Při takto nastavených oxidačních podmínkách byly připraveny vzorky pro SPT měření. Jak již bylo napsáno, byly zkoumány dva typy oceli. Pro vzorek typu B byla připravena skupina vzorků o pěti kusech. Oxidační podmínky pro tuto skupinu vzorků vedly k vytvoření struktury, která obsahovala základní materiál a vrstvy okují o určité tloušťce. Znamená to tedy, že původně ocelové vzorky nebyly zokujené přes celou tloušťku. Pro vzorky typu A byla připravena skupina vzorků o čtyřech kusech, které byly zokujené přes

celý průřez a skládaly se tedy pouze z okují. Neobsahovaly žádný základní materiál. Poslední třetí skupina vzorků, připravených rovněž z materiálu typu A, byla podrobena kratšímu oxidačnímu intervalu s cílem vytvoření stejné struktury vzorků, jako tomu bylo pro typ B. Byla tedy vytvořena struktura se základním materiálem a vrstvami okují. Takto připravené vzorky, byly v další fázi vloženy do experimentálního zařízení pro SPT. Před samotným procesem měření byly vzorky opět ohřáty na požadovanou teplotu (600°C - 880°C). Po provedení protlačovací zkoušky byly vzorky dále analyzovány. Zobrazení jednotlivých vzorků po SPT měření je prezentováno na Obr. 6-15.

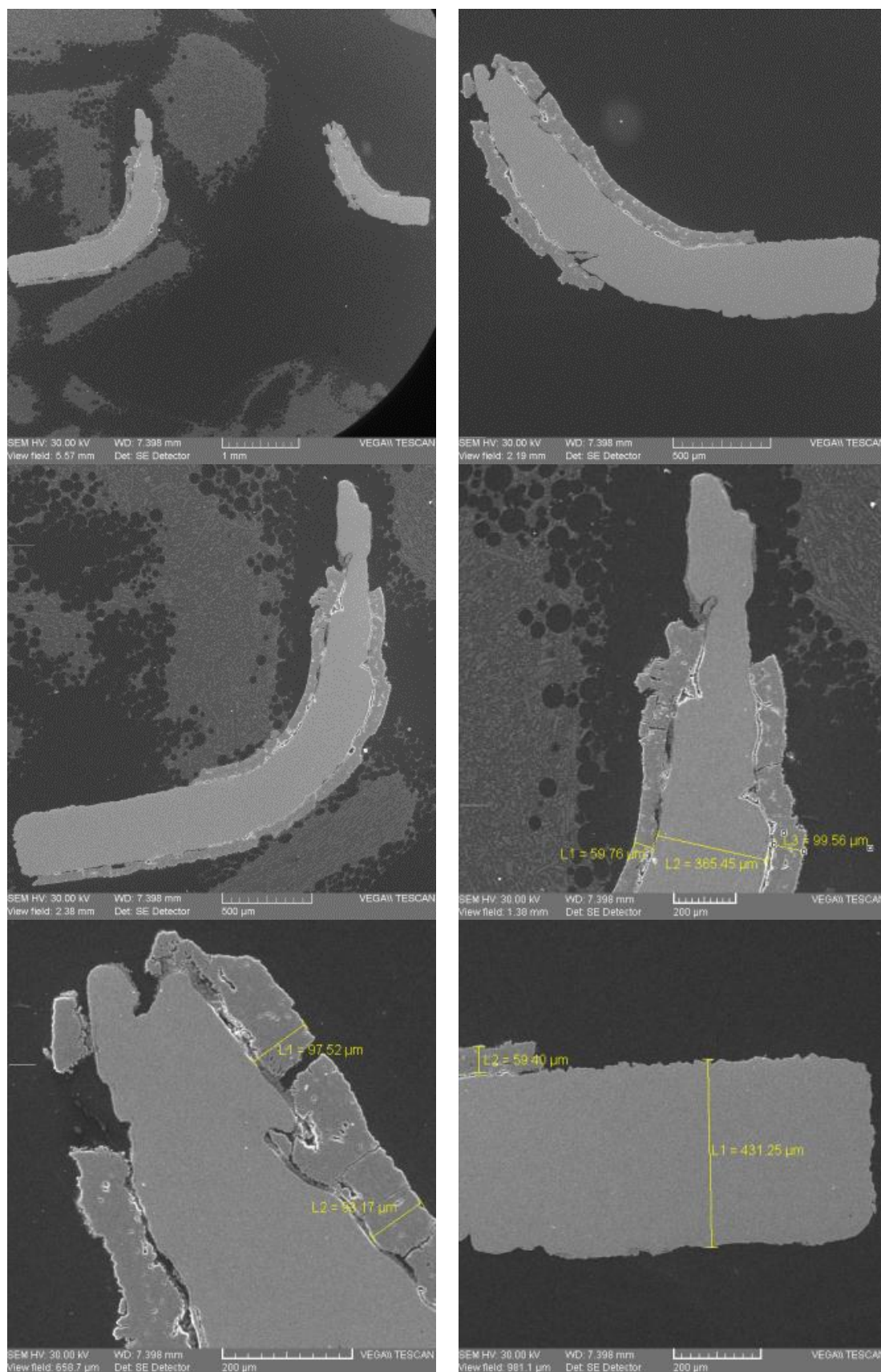
Vzorky typu B číslo 1 (s vrstvou okují)			
600°C	700°C	800°C	870°C
			
Vzorky typu A číslo 2 (jen okuje)			
600°C	700°C	800°C	894°C
			
Vzorky typu A číslo 3 (s vrstvou okují)			
600°C	700°C	800°C	874°C
			

Obr. 6-15 Tvar jednotlivých vzorků po SPT měření

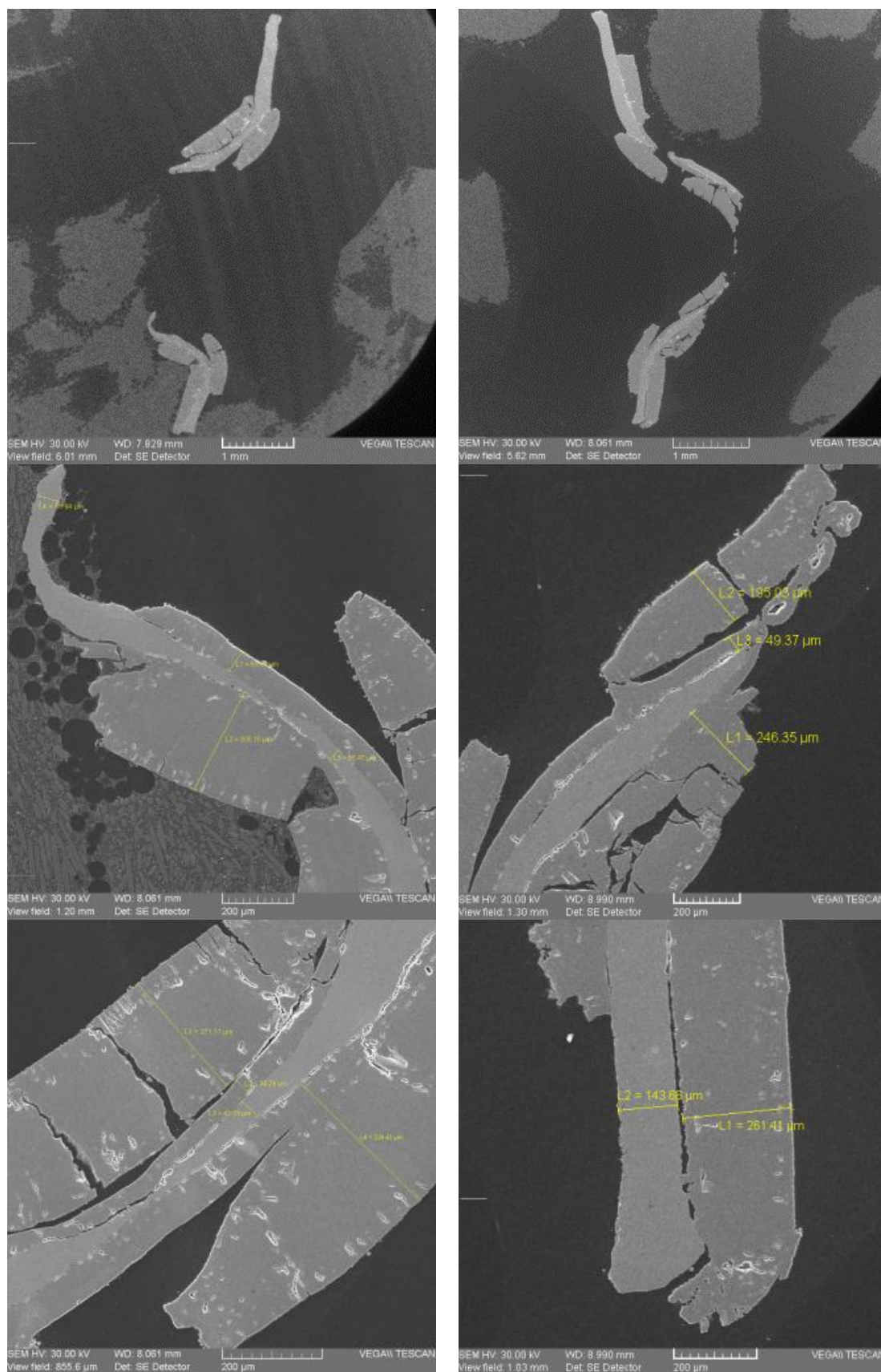
Vzorky typu B číslo 1 a typu A číslo 3, byly po provedení SPT měření podrobeny analýze tloušťek jednotlivých vrstev. Pro tuto analýzu byly vybrány z obou typů vzorků dva reprezentativní členové. Tyto celkem čtyři vzorky byly opatrně rozřezány diamantovým kotoučem na dvě části, které byly zalité do průhledných plastových válečků. Tyto válečky byly na straně řezu vyleštěny a následně nauhličeny. Takto připravené vzorky byly podrobeny měření tloušťek jednotlivých vrstev pod elektronovým mikroskopem. Záznam z měření pod elektronovým mikroskopem je zobrazen na Obr. 6-16 až Obr. 6-19. Vyhodnocení změřených výsledků jednotlivých vrstev pro odpovídající typ vzorku je uvedeno na Obr. 6-20 a Obr. 6-21.



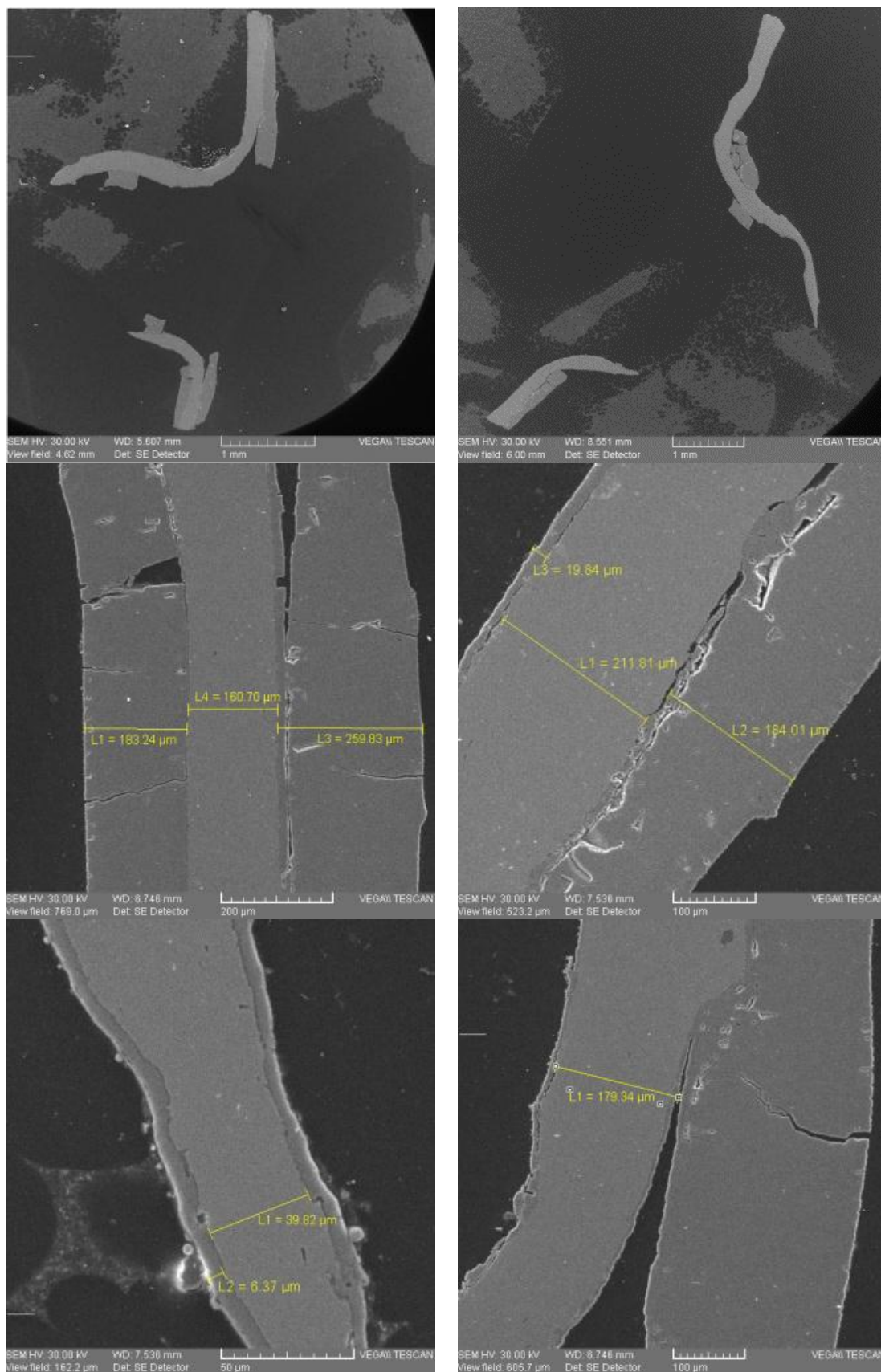
Obr. 6-16 Vzorky typ B číslo 1 měřeny při teplotě 700°C



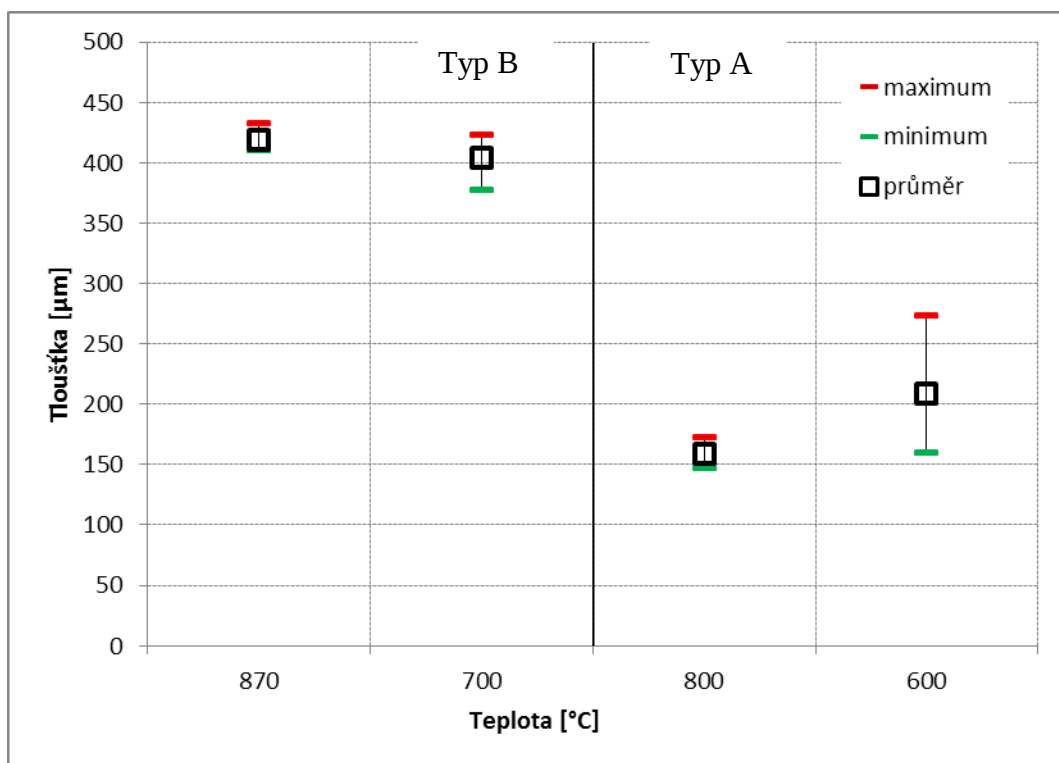
Obr. 6-17 Vzorky typ B číslo 1 měřeny při teplotě 870°C



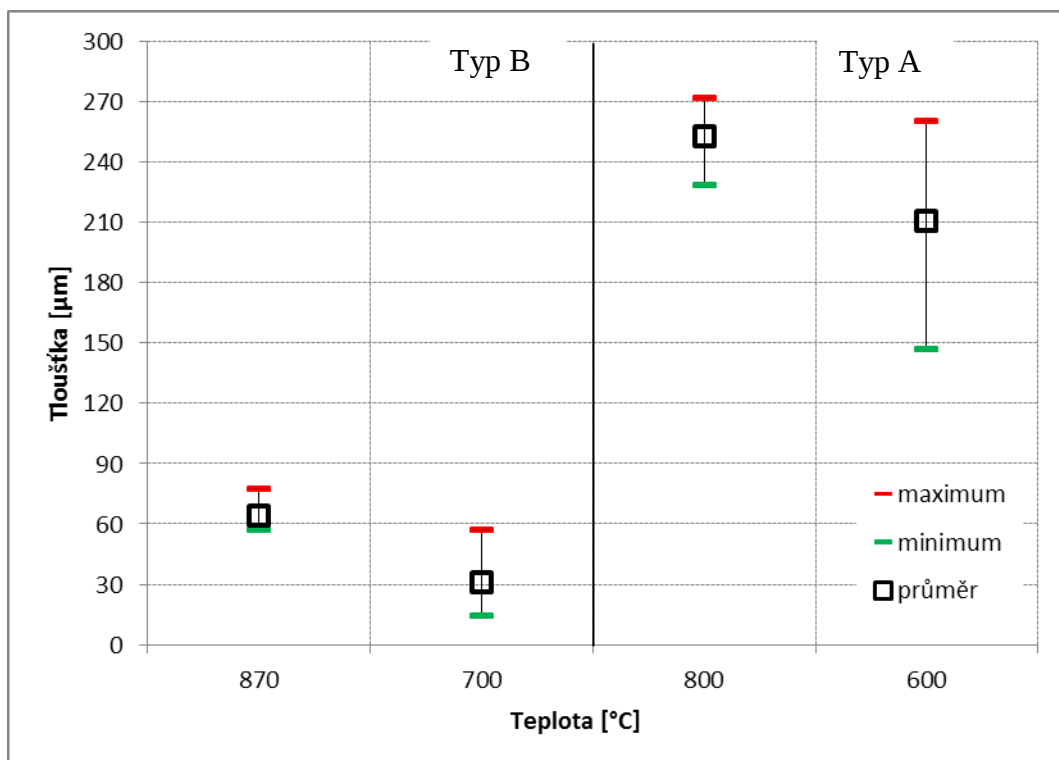
Obr. 6-18 Vzorky typ A číslo 3 měřeny při teplotě 600°C



Obr. 6-19 Vzorky typ A číslo 3 měřeny při teplotě 800°C



Obr. 6-20 Změřené tloušťky základního materiálu



Obr. 6-21 Změřené tloušťky vrstev okují

Fázová analýza vzorků:

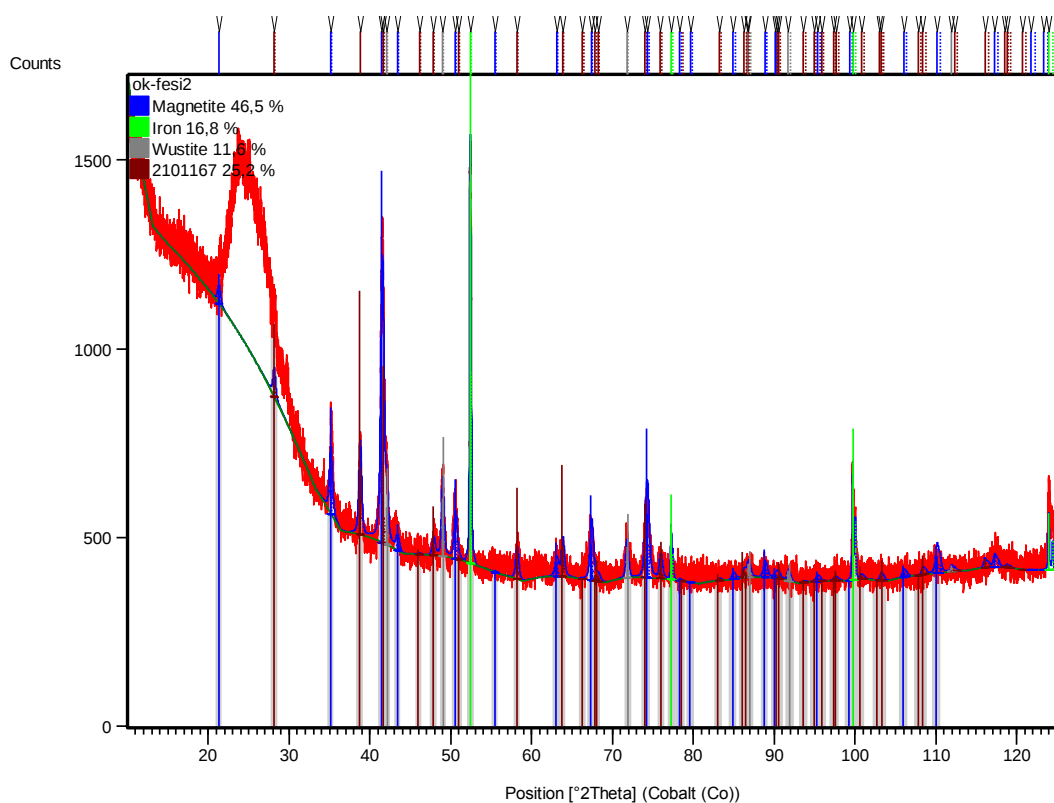
Pro kvalitativní analýzu vzorků byla dále provedena fázová analýza chemických struktur (okují) vytvořených při oxidaci. Pro tuto analýzu byly zvoleny tři vzorky, jeden z každého souboru. Jak již bylo v úvodu kapitoly napsáno, pro fázovou analýzu okují byla zvolena rentgenová prášková difrakce (XRD) na přístroji X'Pert od firmy Philips s využitím $\text{CoK}\alpha$ záření. Tato metoda práškové difrakce využívá jako zdroj rentgenky. Její funkční část tvoří dvě elektrody pod vysokým napětím a ve vysokém vakuu. Z wolframového drátku – katody vylétávají tepelné elektrony urychlované elektrickým polem a dopadají vysokou rychlostí na intenzivně chlazenou anodu. Po dopadu na anodu elektrony emitují spojitě (brzdné nebo bílé) a nespojitě (charakteristické) záření. Před samotnou fázovou analýzou byly z vybraných vzorků seškrábány vrstvy okují, které byly následně rozemlety na jemný prášek. Po této přípravné fázi byla provedena samotná fázová analýza. Zařízení použitá v tomto případě pro měření práškové difrakce využívají Bragg-Brentanovo uspořádání na odraz. Rentgenka, rovinný vzorek i detektor se nachází na fokusační kružnici. Během měření se mění vzdálenost mezi vzorkem a rentgenkou. Výstupní data měření jsou v podobě difraktogramu, který udává intenzitu pulzů v závislosti na úhlu. Roviny difrakce jsou znázorněny různě intenzivními liniemi v příslušných úhlech odpovídajících geometrii krystalografické mříže. Difraktogramy jsou pro každou látku jedinečné a umožňují kvalitativní i kvantitativní fázovou analýzu. Fáze jsou tabelovány a soustředěny v databázích. Samotná kvalitativní analýza byla provedena pomocí programu HighScorePlus (HS+) a databáze JCPDS PDF-4. Principem vyhodnocení záznamu je co nejpřesnější určení difrakční linie od $K_{\alpha 1}$ čáry a její srovnání uživatelem s databází kandidátů, které navrhuje počítač. Chyba této metody dosahuje ± 1 hm% a detekční limit je 2 hm%.

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 $10\text{--}125^\circ\text{C}$ s velikostí kroku $0,008^\circ$ a dobou měření 30s na jeden krok. Se změnou úhlu materiál difraktoval na krystalografických difrakčních rovinách, které se projevovaly nárůstem intenzity záření dopadajícího na detektor. Z celého rozsahu měřených úhlů byl získán difraktogram, který určil přesný obraz struktury zkoumaného materiálu. Změřené difraktogramy pro jednotlivé vzorky jsou prezentovány na Obr. 6-22 až Obr. 6-24. Z jejich

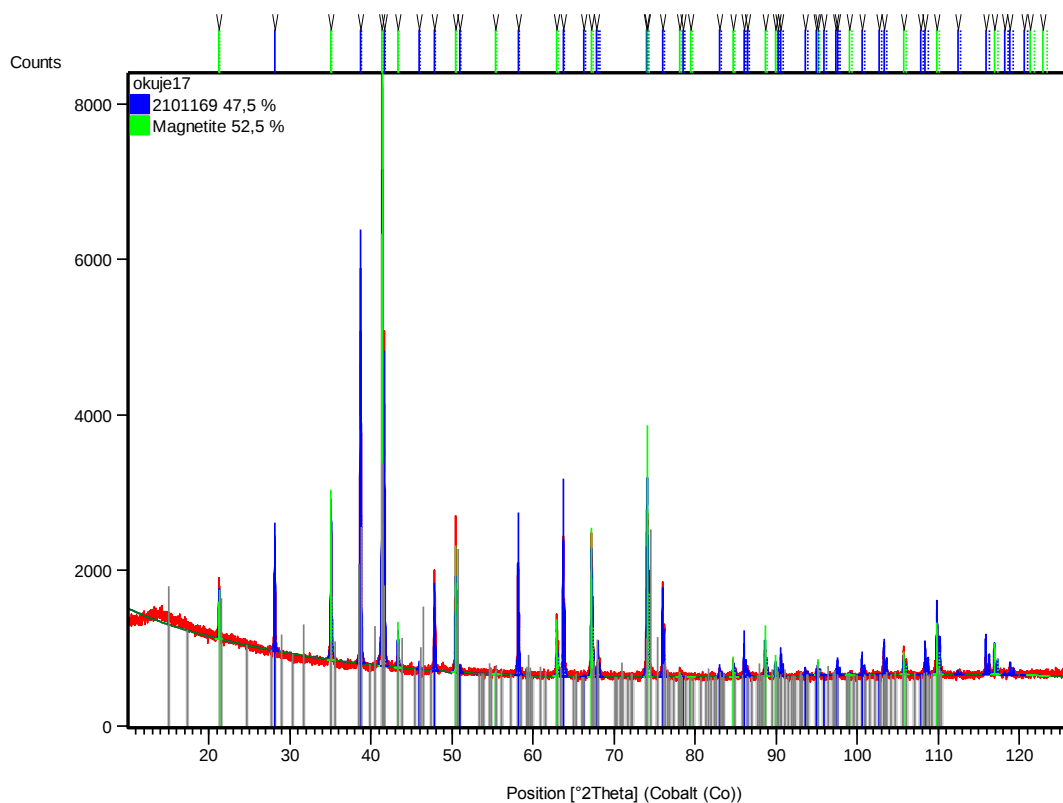
rozboru byly získány výsledky XRD analýzy, které přinesly obraz o fázovém složení jednotlivých vzorků okují, jsou uvedeny v Tab. 6-5.

Tab. 6-5 Fázové složení okují pro odpovídající typy vzorků

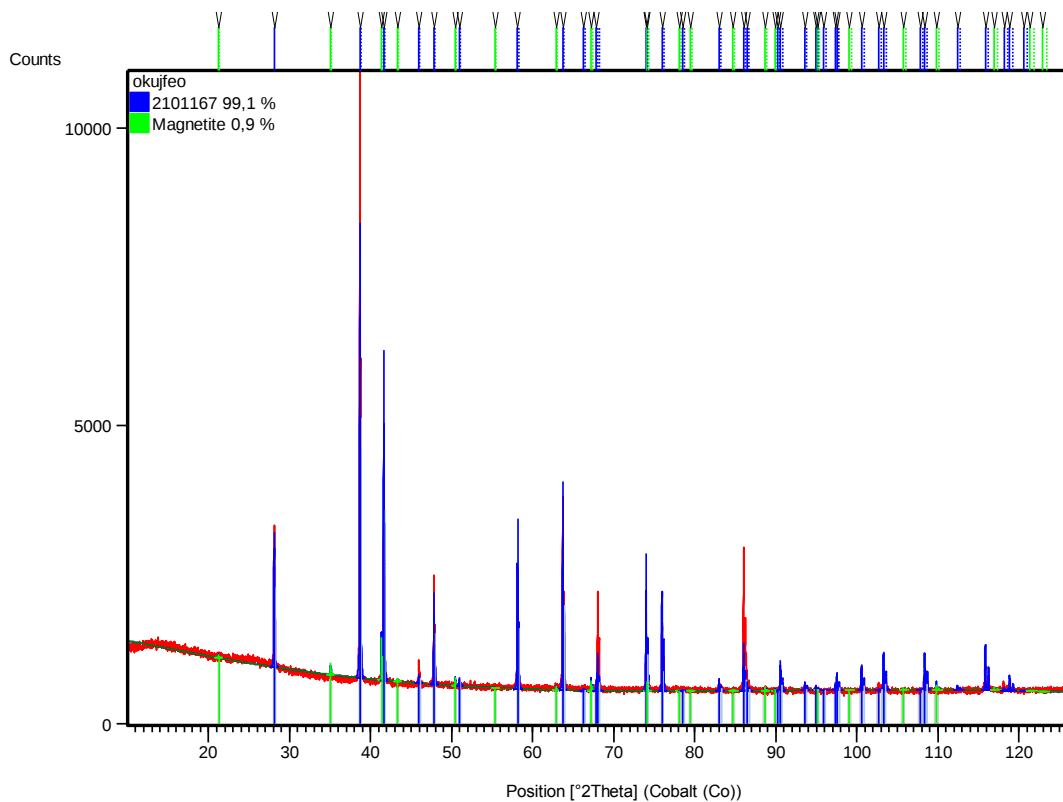
Typ vzorku	Číslo vzorku	Magnetit	Hematit	Wüstit
B	1	55.8 hm. %	30.3 hm. %	13.9 hm. %
A	2	52.3 hm. %	47.7 hm. %	-
A	3	0.9 hm. %	99.1 hm. %	-



Obr. 6-22 Difraktogram pro typ vzorku B číslo 1



Obr. 6-23 Difraktogram pro typ vzorku A číslo 2



Obr. 6-24 Difraktogram pro typ vzorku A číslo 3

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. 6-6) a dále parametry krystalových mřížek jednotlivých struktur (viz Tab. 6-7). Krystalová mřížka udává základní představu o vnitřním uspořádání a stavbě krystalických materiálů. Je definována pravidelným uspořádáním atomů nebo iontů v prostoru dle daného geometrického uspořádání a souměrnosti. Nejmenší geometrický element (rovnoběžnostěn), jehož opakováním je možné vytvořit celou krystalovou mřížku, se nazývá elementární buňka. Elementární buňka je definována parametry mřížky, mezi které patří: tři úseky a , b , c na souřadných osách a tři úhly α , β , γ mezi souřadnými osami. Celkem je definovaných sedm základních krystalografických soustav a v nich čtrnáct typů elementárních buněk. Mezi elementární buňky patří: prosté, prostorově středěné, plošně středěné a bazálně středěné. Kovy nejčastěji krystalizují v krychlové plošné (fcc) nebo prostorově (bcc) středěné mřížce a v mřížce (hcp), která je šesterečně těsně uspořádaná. Ve všech případech jde o prostorové mřížky s vysokou souměrností a jednotlivé atomy se v určitých směrech vzájemně dotýkají. Jednotlivé typy krystalových mřížek ovlivňují i vlastnosti kovových materiálů. Kovy s mřížkou fcc (Ni, Al, aj.) se např. vyznačují dobrou tvárností za tepla i za studena, kovy s mřížkou bcc (mezi něž patří i Fe α) mají tvařitelnost i houževnatost horší. Různá hustota obsazení jednotlivých směrů a rovin atomy v témže krystalu způsobuje anizotropii vlastností krystalických látek (např. modulu pružnosti, teplotní roztažnosti, tepelné a elektrické vodivosti, magnetických vlastností aj.) [26]. Z výsledků získaných pro jednotlivé struktury bylo změřeno, že magnetit a wüstit mají kubickou (krychlovou) mřížku, kdežto hematit má hexagonální (šesterečnou) mřížku.

Tab. 6-6 Vypočtené hodnoty hustoty pro jednotlivé typy struktur

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	-

Ze získaného přehledu jednotlivých krystalových mřížek pro odpovídající struktury okují, je možné usuzovat na trend, který byl pozorován v případě vzorků typu A, kdy dochází k jednoduššímu odstraňování okují z povrchu oceli než je tomu u vzorků typu B. Tento jev, by bylo možné částečně vysvětlit krystalovou mřížkou jednotlivých vrstev okují, které vznikají na odpovídajících typech vzorků. Na vzorcích typu A vznikly chemické sloučeniny

magnetit a převážně hematit, který má hexagonální krystalovou mřížku. Je možné předpokládat, že základní materiál má však kubickou mřížku. To znamená, že tyto dvě struktury spolu nevytváří tak silnou vazbu vlivem rozdílné stavby krystalové mřížky, jako je tomu u vzorku typu B, u kterého vznikly všechny tři základní struktury okují s převažujícím obsahem magnetitu a wüstitu, které mají kubickou mřížku stejně jako základní materiál.

Tab. 6-7 Změřené parametry krystalové mřížky zkoumaných struktur

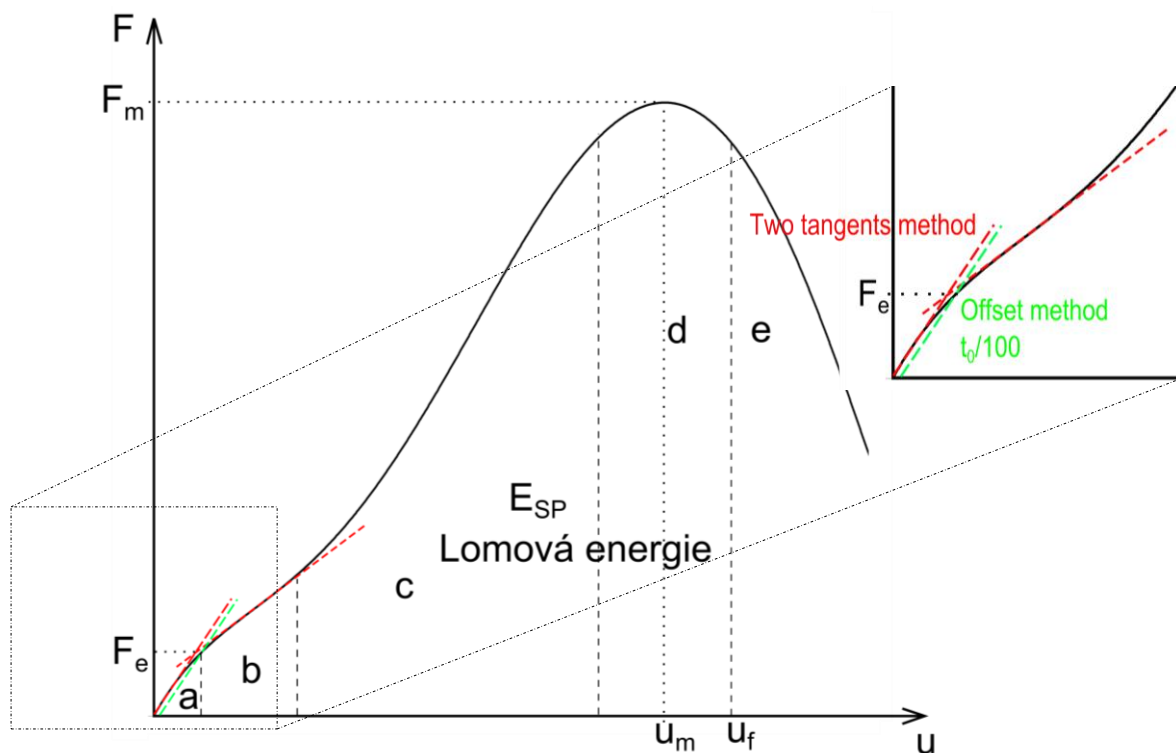
Vzorek	Parametry mřížky	a/ Å	b/ Å	c/ Å	alfa/ °	beta/ °	gama/ °
B	Magnetit	8.3804	8.3804	8.3804	90	90	90
	Hematit	5.0376	5.0376	13.714	90	90	120
	Wüstit	4.3173	4.3173	4.3173	90	90	90
A	Magnetit	8.3955	8.3955	8.3955	90	90	90
	Hematit	5.0333	5.0333	13.745	90	90	120
A	Magnetit	8.3948	8.3948	8.3948	90	90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

6.2.2 Rozbor změřených křivek

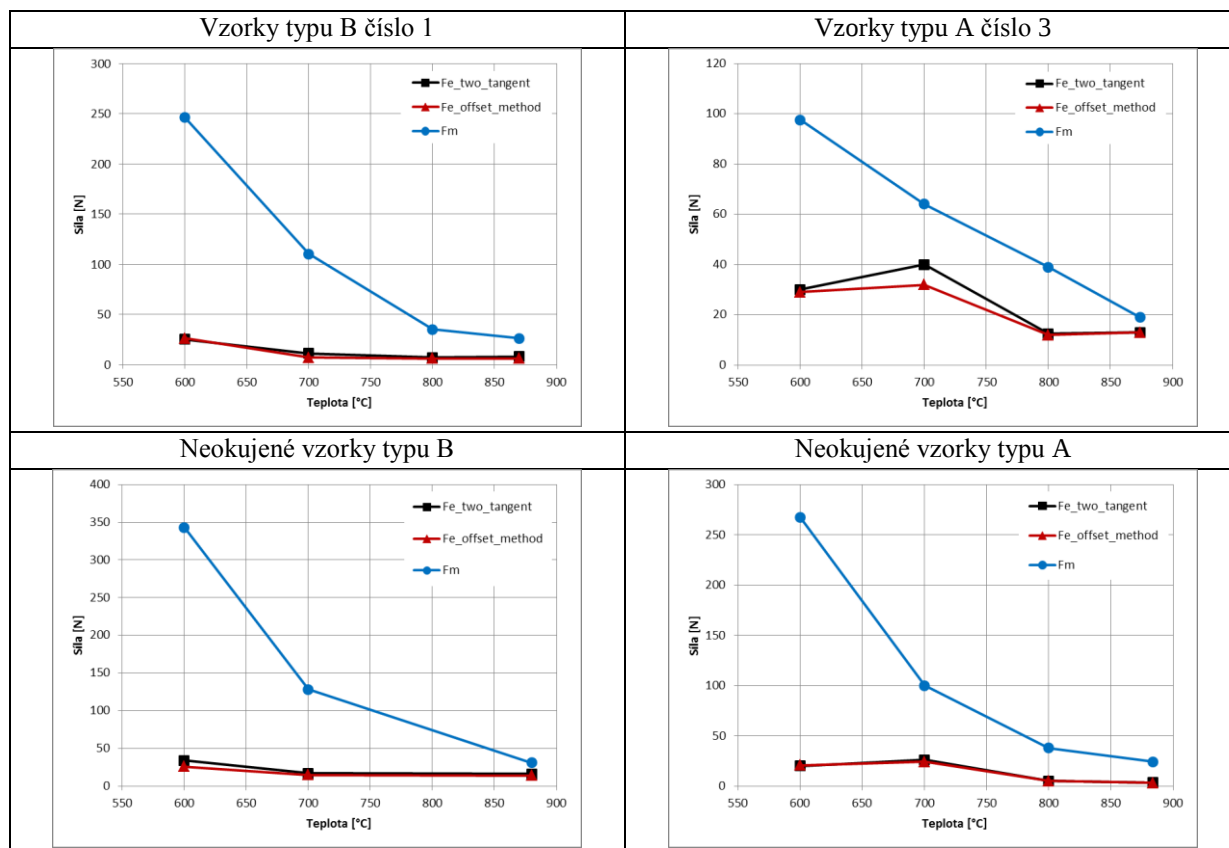
Cílem rozboru změřených křivek síly v závislosti na deformaci bylo získat co nejvíce možných informací a zejména mechanických vlastností a charakteristik pro zkoumané typy vzorků. Pro rozbor křivek bylo zvoleno několik metod. Mezi základní metody patřily grafické metody, matematické a metody založené na empirických vztazích. Za pomoci těchto metod bylo možné zjistit některé z mechanických charakteristik, jako jsou síla na mezi kluzu (F_e), nebo energie potřebná pro porušení vzorku (E_{sp}) či dokonce hodnota lomové houževnatosti (J_{lc}) pro daný vzorek. Rozbor změřených křivek z SPT měření, které byly uvedeny na Obr. 6-9 až Obr. 6-14 byl aplikován na všechny vzorky kromě vzorků typ A číslo 2, které byly složeny pouze z okují. Změřené průběhy síly v závislosti na poloze pro tyto vzorky nemají kontinuální průběh a neodpovídají charakteristickému tvaru. Několik výrazných špiček, které jsou patrné u všech průběhů pro tento typ vzorků, je pravděpodobně způsobeno strukturou vzorku, která byla tvořena jednotlivými vrstvami chemických sloučenin. Při jejich porušování tak docházelo ke značnému nárůstu síly. Proto by se dalo usuzovat, že počet zaznamenaných špiček odpovídá počtu porušených vrstev okují pro odpovídající vzorek. Z tohoto důvodu nebylo možné tyto křivky zařadit do skupiny, kterou je možné standardním způsobem analyzovat.

Analýza mechanických charakteristik:

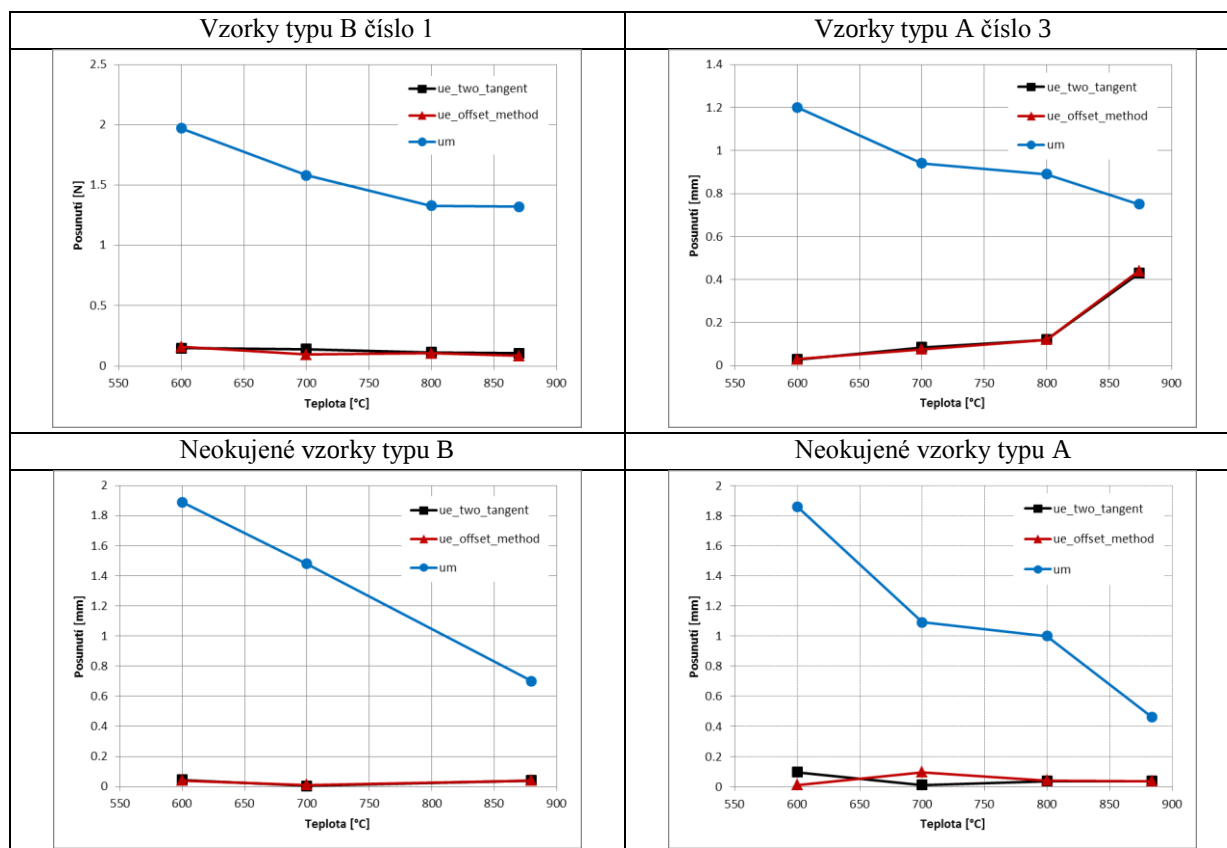
Analýze mechanických charakteristik byly podrobeny změřené průběhy pro vzorky typu A číslo 3, typ B číslo 1 a také změřené průběhy pro neokujené vzorky obou typů materiálů. Jak již bylo napsáno, analyzovány byly charakteristické záznamy síly v závislosti na deformaci získané z SPT měření. Tuto charakteristickou křivku (viz Obr. 6-25) je možné rozdělit na pět významných oblastí (a až e). První oblast charakterizuje elastické chování materiálu. Druhá oblast popisuje plastické chování. Třetí oblast křivky definuje deformační zpevnění materiálu. Ve čtvrté oblasti začíná docházet ke geometrickému změkčení a také k rozvoji poškození. V poslední páté oblasti dojde k meznímu stavu porušení (vzorek je protržen). K porušení vzorku může dojít v různých oblastech v závislosti na tuhosti daného vzorku. Ze změřené křivky síla vs. deformace je možno určit několik zásadních bodů a analyzovat tak některé mechanické charakteristiky. Mezi tyto parametry patří F_e – síla na mezi kluzu, F_m – maximální síla, u_m – lomové protažení. Dále je také možno určit lomové charakteristiky jako lomovou energii. Všechny tyto charakteristiky popisují mechanické chování odpovídajícího materiálu a je možné je použít k dalšímu vyhodnocení mechanických vlastností. K odečtu hodnoty síly na mezi kluzu (F_e) byly použity dvě grafické metody. Obě tyto metody vedou k získání stejné veličiny, ale ne vždy vedou ke stejné hodnotě této veličiny. Proto, aby bylo možné srovnat odchylku při použití těchto metod, byla hodnota síly na mezi kluzu vyhodnocována oběma metodami. První grafická metoda je tzv. „two tangent method“ [23]. Je charakteristická tím, že pro získání požadované veličiny se použije průsečík dvou tangent sestrojených v oblasti „a“ a oblasti „b“ (viz Obr. 6-25). Z průsečíků těchto dvou tangent je pak možné zjistit hodnotu síly na mezi kluzu. Nevýhodou této metody je nejednoznačné určení sklonu tangenty v oblasti „b“, které může být způsobeno nevýrazným průběhem. Tato nejednoznačnost konstrukce tangenty, tak může způsobit určitou nepřesnost při odečítání hledané hodnoty. Druhou grafickou metodou je tzv. „offset method“ [23]. Tato metoda je definována průsečíkem přímky, která je sestavena jako tangenta k elastické oblasti („a“ viz Obr. 6-25) a následně posunutá o hodnotu $t_0/100$. Hodnotě t_0 odpovídá počáteční tloušťka vzorku. Průsečík takto sestavené přímky s křivkou síla vs. deformace jednoznačně určí hodnotu síly na mezi kluzu. S pomocí těchto dvou grafických metod byly vyhodnoceny hodnoty síly na mezi kluzu (F_e) při odpovídající deformaci (u_e) pro jednotlivé křivky z SPT měření. Takto získané výsledky jsou prezentovány na Obr. 6-26 a Obr. 6-27.



Obr. 6-25 Průběh síly v závislosti na deformaci z SPT měření



Obr. 6-26 Vyhodnocení charakteristických hodnot síly na mezi kluzu a síly na mezi pevnosti

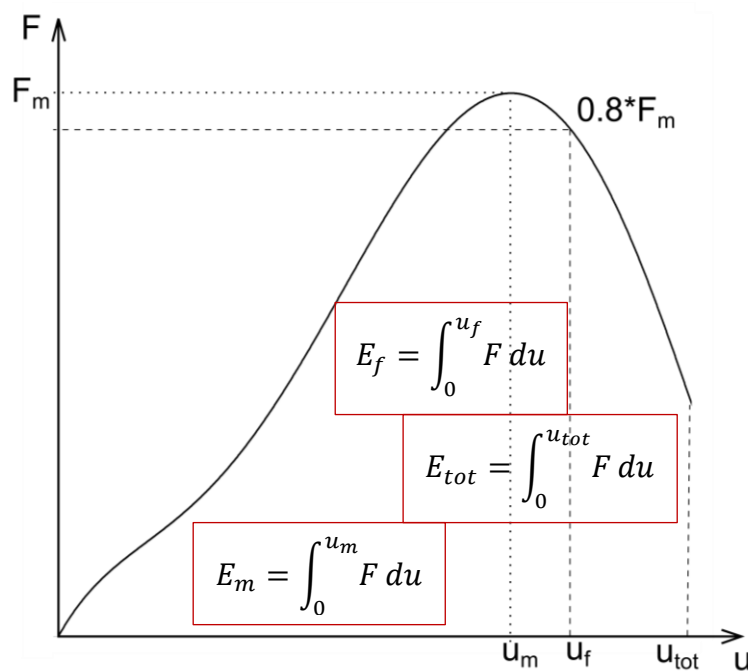


Obr. 6-27 Vyhodnocení charakteristických hodnot deformací na mezi kluzu a deformací na mezi pevnosti

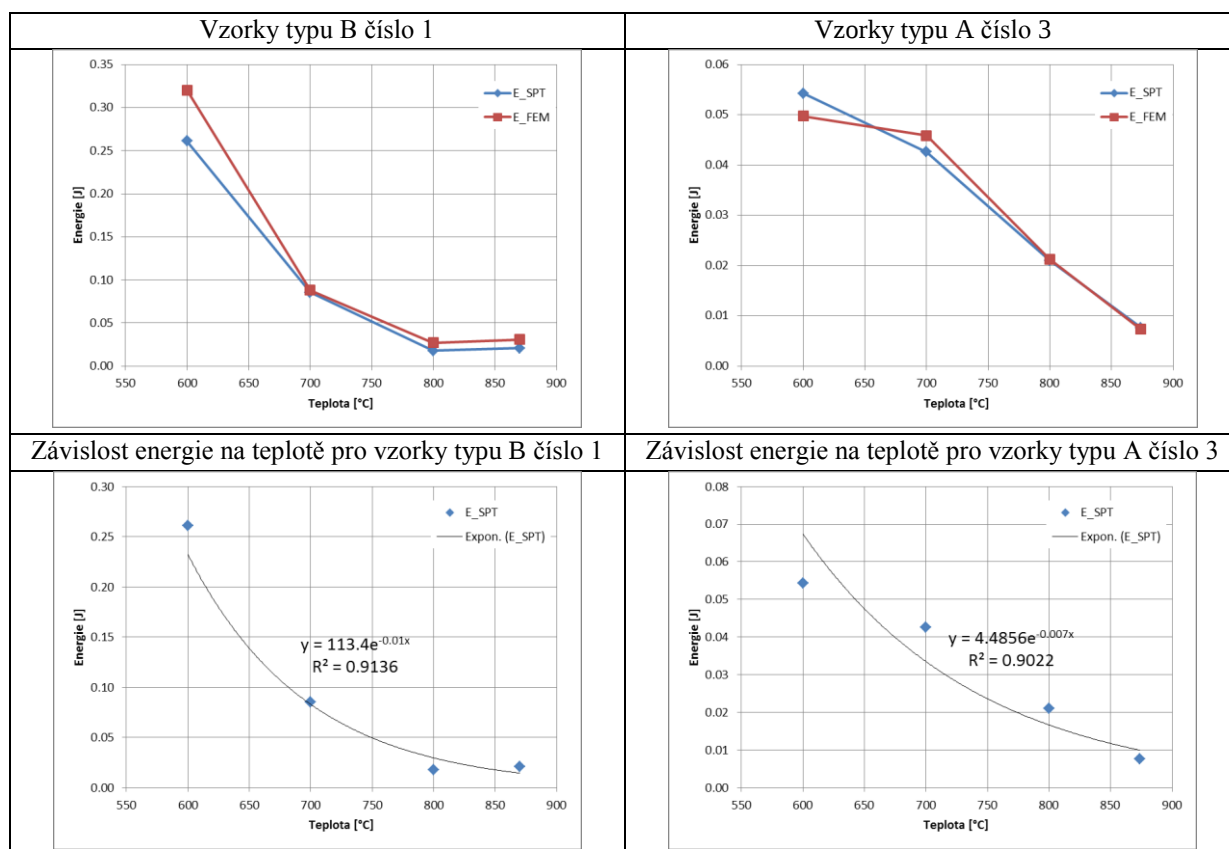
Analýza lomových charakteristik:

Analýza lomových charakteristik získaných ze změřených křivek síla vs. deformace pomocí SPT měření je v tomto případě založena zejména na empirických vztazích získaných z literatury. Cílem této analýzy bylo odhadnout základní lomové charakteristiky pro měřené vzorky na základě empirických vztahů. Výsledky této analýzy mají pouze informativní charakter, protože byly vyhodnoceny na základě vztahů získaných pro jiný typ vzorků měřených za jiných podmínek. Aby bylo možné ověřit použitelnost těchto vztahů na vzorky typu A a typu B z této práce, bylo by potřeba připravit ověřovací měření zaměřené na zkoumání lomových charakteristik, jako je např. rázová zkouška anebo připravit simulaci založenou na metodě konečných prvků, která by byla schopná modelovat děje potřebné k ověření lomových vlastností při odpovídajících podmínkách. Těmito způsoby by bylo možné korelovat výsledky získané z SPT měření a vyhodnotit je pomocí zvolených empirických vztahů nebo objevit nové konstanty potřebné pro získání nových empirických vztahů popisujících požadované lomové vlastnosti.

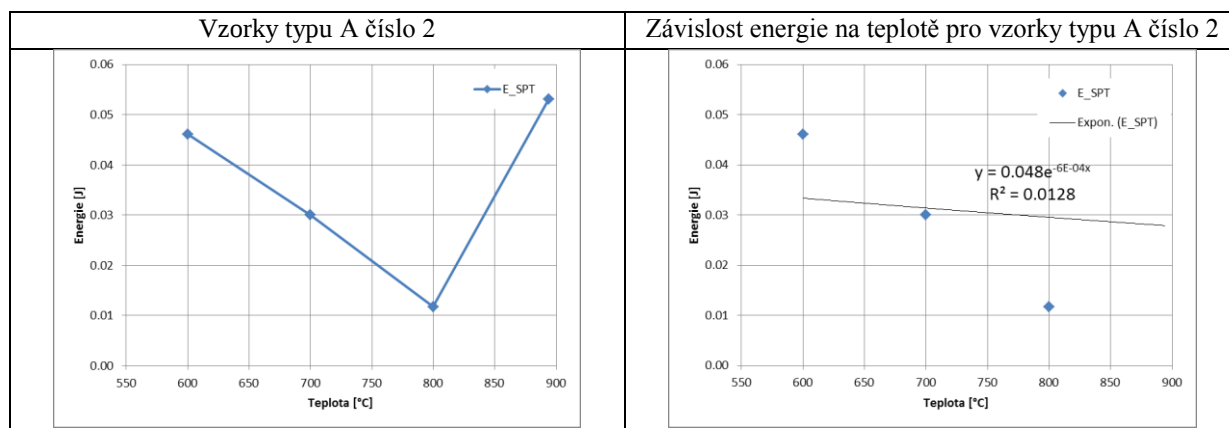
Vyhodnocování lomových charakteristik bylo provedeno v několika krocích. V prvním kroku byla vyhodnocena lomová energie z plochy pod změřenou křivkou síla vs. deformace z SPT měření. Vyhodnocení velikosti plochy pod křivkou je možné provádět na základě několika předpokladů. První předpoklad je, že se uvažuje celý průběh křivky i s oblastí, která definuje velikost síly potřebné na dolomení vzorku [27]. Tato oblast je reprezentována písmenem „e“ a je znázorněná na Obr. 6-25. Další možností vyhodnocení lomové energie je uvažovat oblast pod křivkou do hodnoty $0,8 \cdot F_m$ [27]. Tato hodnota odpovídá přibližně místu, kdy dojde k porušení vzorku. Poslední možností vyhodnocení lomové energie, je uvažovat oblast pod křivkou síla vs. deformace do hodnoty F_m [27]. V tomto místě je dosažena maximální hodnota síly při SPT měření. Všechny možnosti vyhodnocení plochy pod změřenou křivkou jsou uvedeny na Obr. 6-28. Pro vyhodnocení lomové energie pro vzorky typu A číslo 3 a typu B číslo 1, byla použita poslední možnost a tedy, že byla vyhodnocena oblast pod křivkou do hodnoty F_m . Vyhodnocení lomové energie bylo provedeno do této maximální hodnoty síly z toho důvodu, aby bylo možné srovnat velikosti energií pro reálně změřené křivky síly v závislosti na deformaci z SPT měření s křivkami získanými z numerické simulace tohoto procesu, která bude popsána v další podkapitole. Numerická simulace SPT byla prováděna právě do hodnoty F_m . Pro vzorky typu A číslo 2, byla taktéž vyhodnocena hodnota lomové energie. V tomto případě byla použita celá oblast pod změřenými křivkami, protože nebylo možné ze změřeného průběhu najít jednoznačnou hodnotu odpovídající síle F_m . Vyhodnocení lomových energií ze změřených křivek pro odpovídající vzorky bylo provedeno v programu MATLAB. Vyhodnocení spočívalo ve výpočtu určitého integrálu změřené křivky síly se spodní hranicí deformace odpovídající hodnotě 0 (počátek měření) až po horní hranici, která odpovídala pro vzorky typu A číslo 3 a typu B číslo 1 hodnotě deformace při maximální síle (u_m). Pro vzorky typu A číslo 2 byl určitý integrál počítán s dolní hranicí 0 a horní hranicí deformace, která odpovídala hodnotě u_{tot} . Výpočty určitých integrálů, které odpovídají lomové ploše všech popsanych možností, jsou uvedeny na Obr. 6-28. Tento způsob vyhodnocení lomové energie byl aplikován jak na změřené křivky, tak na křivky získané z numerické simulace. Vyhodnocení těchto energií bylo provedeno i pro neokujené vzorky obou typů. Srovnání dosažených výsledků pro jednotlivé vzorky je prezentováno na Obr. 6-29 až Obr. 6-31.



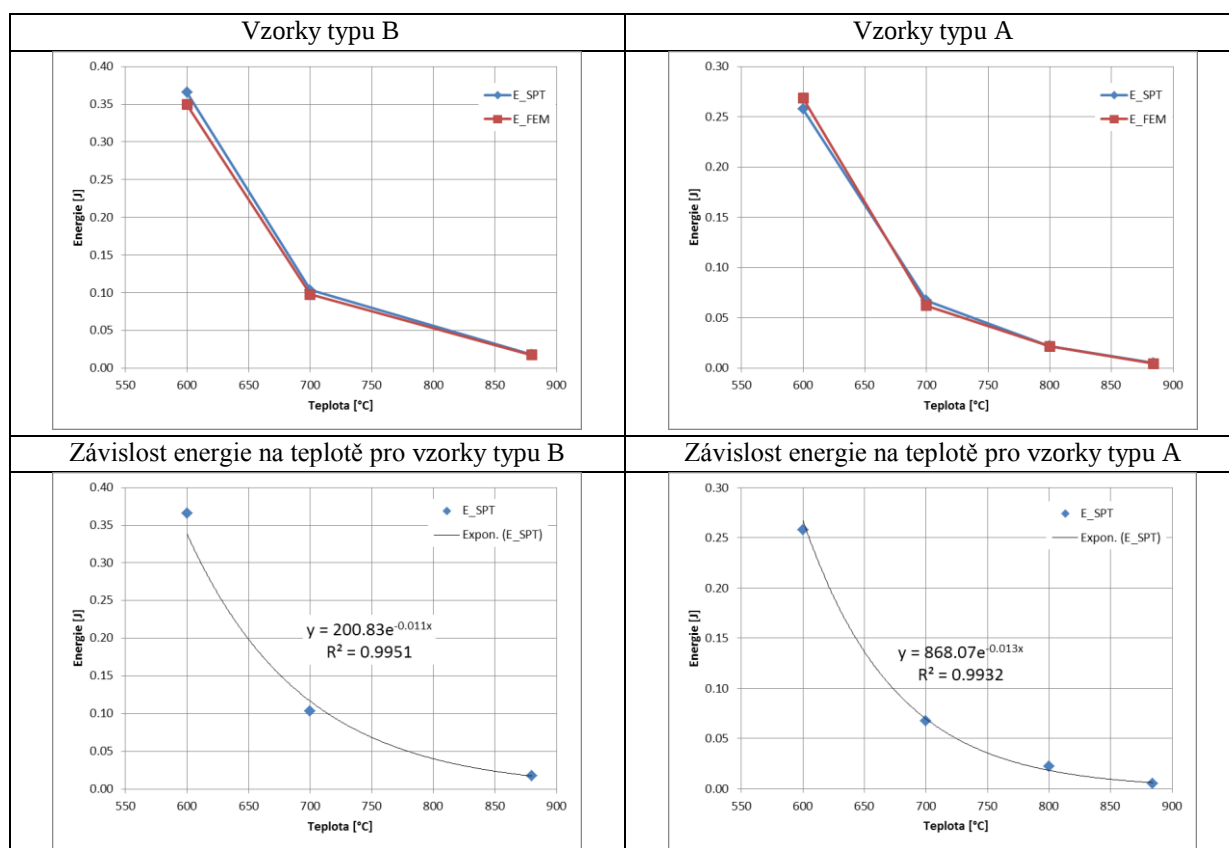
Obr. 6-28 Možnosti vyhodnocení lomové energie z SPT měření



Obr. 6-29 Srovnání energií z SPT měření a numerické simulace pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3



Obr. 6-30 Srovnání energií z SPT měření pro vzorky typu A číslo 2



Obr. 6-31 Srovnání energií z SPT měření a numerické simulace pro neokoujené vzorky typu B a typu A

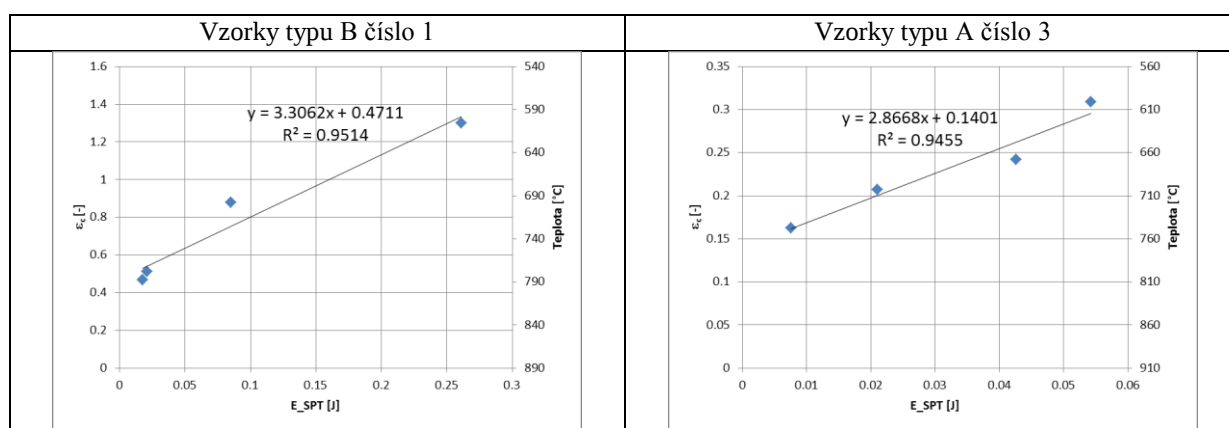
V dalším kroku analýzy lomových charakteristik bylo využito stávajících teorií popisujících proces porušování vzorku při SPT měření. Problematické vyhodnocování lomových vlastností na základě SPT měření se věnuje mnoho autorů, mezi nejznámější, ze kterých bylo čerpáno i v této práci, patří X. Mao at al., nebo J. H. Bulloch. Podle základních teorií vzniká při SPT měření ve vzorku biaxiální napětí a přetvoření [25]. Dle Mao at al. je možné z křivek síla vs. deformace určit hodnotu lomového přetvoření ε_{qf} z hodnoty u_f

odečtené ze změřených křivek (viz rovnice 20 [24]). J. H. Bulloch prezentoval několik takových empirických vztahů pro zkoumané typy materiálů, kdy definoval kritickou hodnotu biaxiálního přetvoření ε_c na základě lomové energie získané z oblasti pod křivkou síla vs. deformace. Jeden z těchto vztahů je uveden níže (viz rovnice 21 [25]).

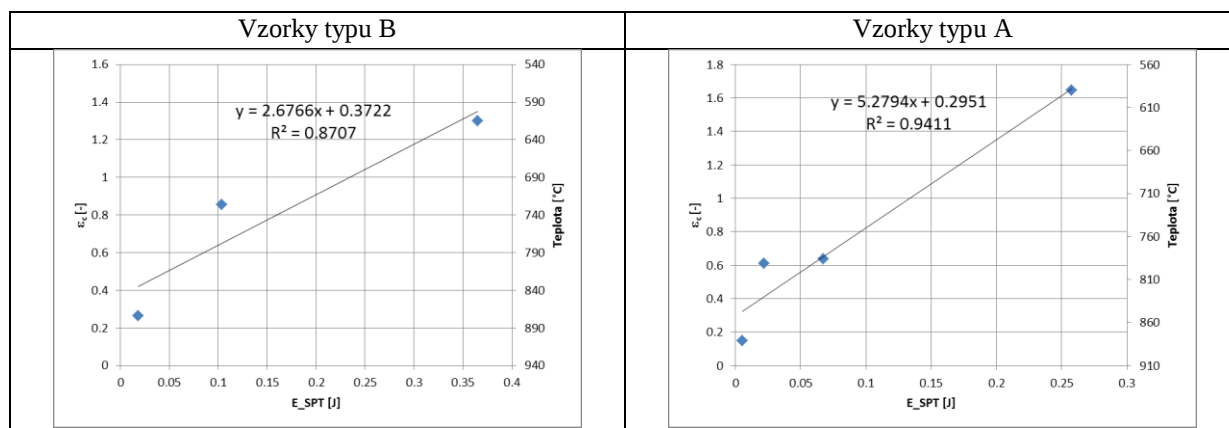
$$\varepsilon_{qf} = 0.12 \left(\frac{\delta}{t_0} \right)^{1.72} \quad (20)$$

$$\varepsilon_c = 0.54 E_{SP} - 0.024 \quad (21)$$

Všechny tyto empirické vztahy byly získány pro určité typy materiálů při daných podmínkách. Proto je potřeba je při použití za jiných podmínek ověřit. Tato práce nebyla zaměřena na získávání lomových charakteristik, a proto byly tyto vztahy použity bez ověření, výsledky jsou proto pouze informativní. Další překážkou při vyhodnocování lomových charakteristik z měřených vzorků bylo složení jednotlivých vzorků. Vzorky typu A číslo 3 a vzorky typu B číslo 1 byly složeny jak z vrstvy základního materiálu, tak z vrstvy okují. Z tohoto důvodu nebylo možné jednoduše oddělit vliv jednotlivých vrstev na lomové vlastnosti, protože se jedná při porušení vzorku o plastické chování. Hodnoty kritických přetvoření byly taktéž vyhodnoceny pro neokujené vzorky. Výsledky kritických hodnot přetvoření dle uvedených rovnic pro jednotlivé vzorky jsou prezentovány na Obr. 6-32 a Obr. 6-33. Také byly obdobně vyhodnoceny lineární závislosti mezi hodnotou lomové energie a lomového přetvoření jak to prováděl J. H. Bulloch.



Obr. 6-32 Vyhodnocení kritické hodnoty přetvoření v závislosti na lomové energii pro vzorky typu B číslo 1 a typu A číslo 3



Obr. 6-33 Vyhodnocení kritické hodnoty přetvoření v závislosti na lomové energii pro neokoujené vzorky typu B a typu A

Posledním krokem při analýze lomových charakteristik získaných z SPT měření bylo vyhodnocení lomové houževnatosti. Lomovou houževnatost je možné definovat jako odpor materiálu proti iniciaci a růstu trhliny. Lomová houževnatost může být definována jedinou hodnotou příslušného parametru např. K_{Ic} , δ_c nebo J_{Ic} [28]. Jednotliví autoři zabývající se vyhodnocováním lomových charakteristik, udávají převod změřených hodnot z SPT měření na lomovou houževnatost J_{Ic} . Parametr J_{Ic} má oproti K_{Ic} výhodu v tom, že je možné popsat nejen elastické chování v okolí trhliny ale i elasto-plastické. Mao at al. uvádí vztah na výpočet lomové houževnatosti J_{Ic} na základě kritického přetvoření ϵ_c , popsáno v předchozím odstavci (viz rov. 22 in [29]). Další autoři jako Suzuki et al. (viz rov. 23 in [29]) nebo Lee at al. (viz rov. 24 in [29]) uvádí vlastní empirické vztahy pro výpočet lomové houževnatosti ze změřených dat při SPT.

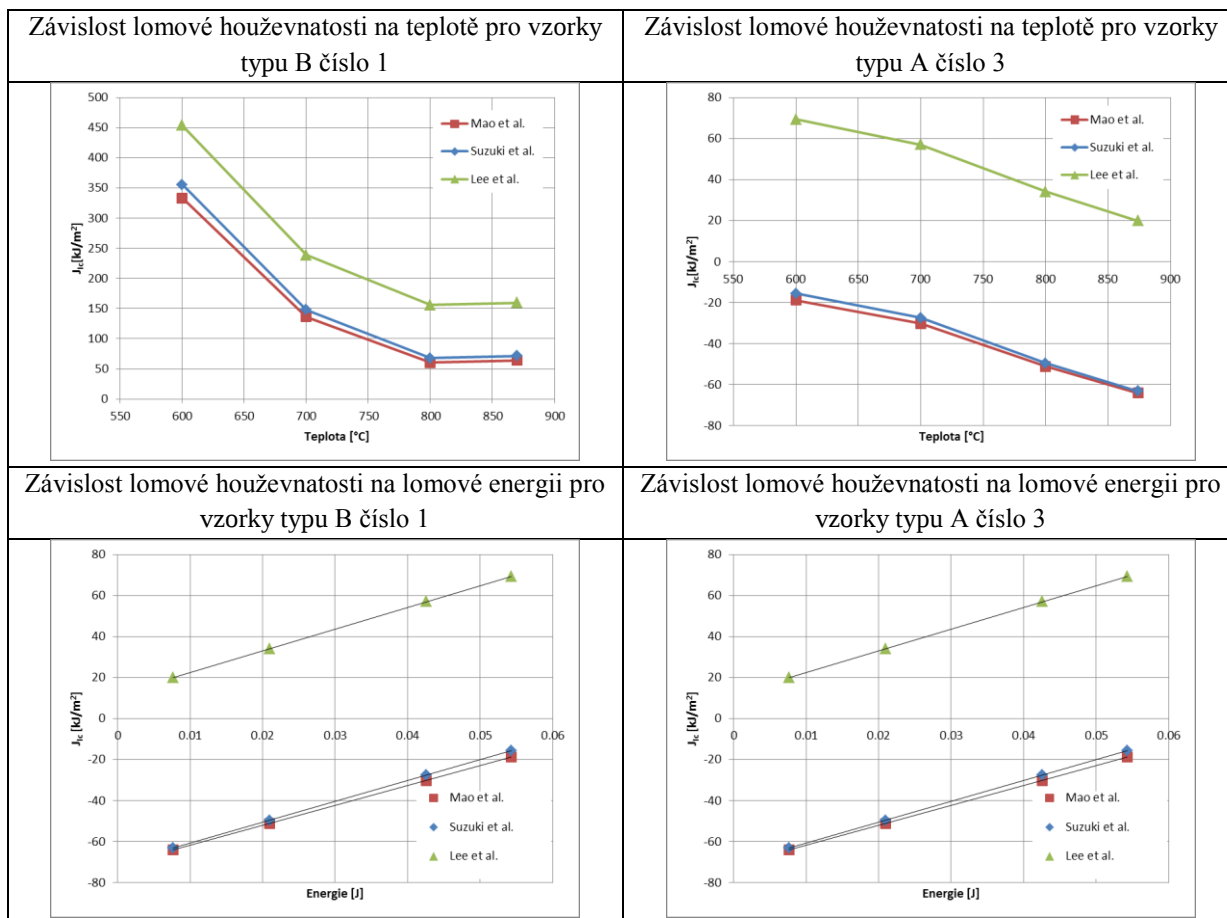
$$J_{Ic} = 339\epsilon_c - 119 [kJ/m^2] \quad (22)$$

$$J_{Ic} = 357\epsilon_c - 121 [kJ/m^2] \quad (23)$$

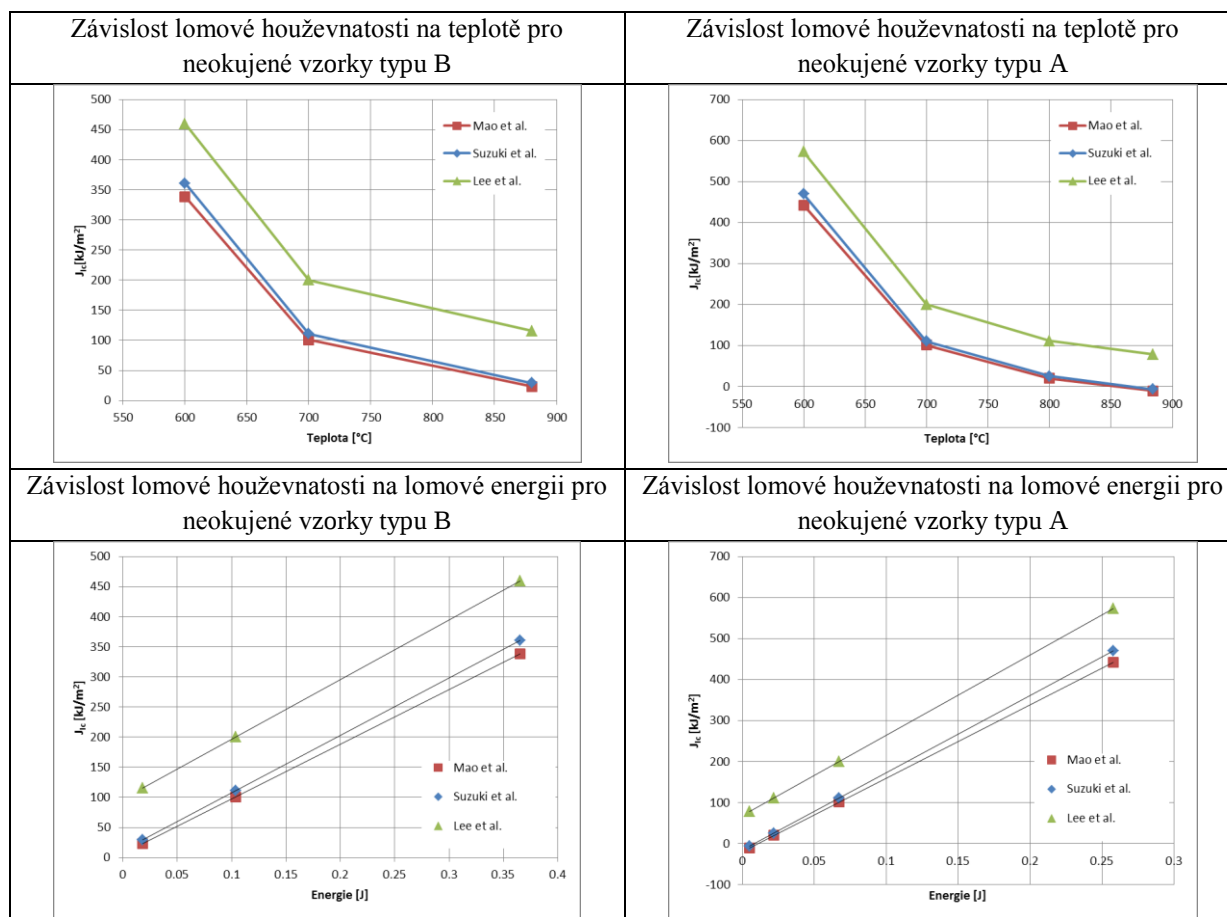
$$J_{Ic} = 370\epsilon_c - 40 [kJ/m^2] \quad (24)$$

Tyto empirické vztahy byly opět získány pro konkrétní typ oceli a při konkrétních okrajových podmínkách, proto je nutné je ověřit a korelovat se skutečným měřením. Jak již bylo napsáno, nebylo cílem hledat správné korelační koeficienty pro získání lomových charakteristik ani provádět k tomu potřebné kroky. Empirické vztahy prezentované uvedenými autory byly aplikovány na aktuální vzorky bez ověření. Proto jsou získané hodnoty pro použité vzorky pouze informativní. Stejně jako v předchozím případě, kdy byly vyhodnocené hodnoty kritického přetvoření dle empirických vztahů, tak i v tomto případě

nebylo možné rozdělit hodnoty lomové houževnatosti pro vrstvu okují a základního materiálu. Pro vzorky typu A číslo 3 a vzorky typu B číslo 1, jsou prezentovány výsledky pro vzorek jako celek. Dále byly hodnoty lomové houževnatosti vyhodnoceny pro neokoujené vzorky při všech měřených teplotách. Získaná data jsou uvedena na Obr. 6-34 a Obr. 6-35. Stejně jako v předchozím případě při vyhodnocování kritického přetvoření, tak i při vyhodnocení lomové houževnatosti byly vytvořeny lineární závislosti mezi lomovou energií a lomovou houževnatostí.



Obr. 6-34 Vyhodnocení lomové houževnatosti pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3



Obr. 6-35 Vyhodnocení lomové houževnatosti pro neokoujené vzorky typu B typu A

6.2.3 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., který uvádí vztah pro přepočet meze kluzu na základě známé hodnoty síly na mezi kluzu a počáteční tloušťce vzorku (viz rov. 25 in [30]) nebo také empirický vztah na přepočet meze pevnosti na základě stejných parametrů (viz rov. 26 in [30]). Tyto empirické vztahy byly opět získány pro určitý typ vzorků

definované tloušťky a měřené při daných podmínkách. Aby bylo možné je ověřit a prohlásit za použitelné i v tomto případě, bylo nutné provést přepočet změřených křivek síly v závislosti na deformaci na křivky napětí v závislosti na přetvoření a získat vlastní koeficienty pro tyto rovnice. Získané koeficienty bylo poté možné srovnat s prezentovanými rovnicemi a zjistit jejich použitelnost. Toto srovnání není nezbytné, je pouze informativní. Obecně je možné říci, že pro převod síly na mez kluzu a síly na mez pevnosti je potřeba nalézt pro každý typ vzorku koeficienty, které se doplní do základních vztahů (viz rov. 27 resp. 28 [31]).

$$\sigma_y = 360 \left(\frac{F_e}{t_0^2} \right) \quad (25)$$

$$\sigma_u = 130 \left(\frac{F_m}{t_0^2} \right) - 320 \quad (26)$$

$$\sigma_y = \alpha \left(\frac{F_e}{t_0^2} \right) \quad (27)$$

$$\sigma_u = \alpha \left(\frac{F_m}{t_0^2} \right) - \beta \quad (28)$$

Cílem optimalizace materiálových parametrů tedy bylo nalézt vhodné parametry pro převod změřených křivek na křivky popisující mechanickou odezvu materiálu na zatížení. Pro hledání vhodných parametrů a možnost získání základních charakteristik, kterými jsou mez pevnosti a mez kluzu byl použit výpočtový program Ansys Workbench verze 14.0, který v sobě zahrnuje i možnosti optimalizace. Při klasické SPT zkoušce prováděné na vzorcích z oceli, jsou většinou známe charakteristiky dané oceli (jako např. modul pružnosti, mez kluzu, mez pevnosti) z konvenční tahové zkoušky, na základě kterých je možné korelovat SPT měření s tahovou zkouškou. Protože v tomto případě bylo prováděno SPT měření na okujených vzorcích, tyto základní charakteristiky nebyly známe, proto bylo nutné je zařadit mezi hledané parametry při optimalizaci. Náročnost samotných výpočtů byla zvýšená vysokou nelineárností úlohy, protože šlo o reprodukci celé elasto – plastické křivky pro daný materiál, při uvažování několika kontaktů.

Metodika řešení:

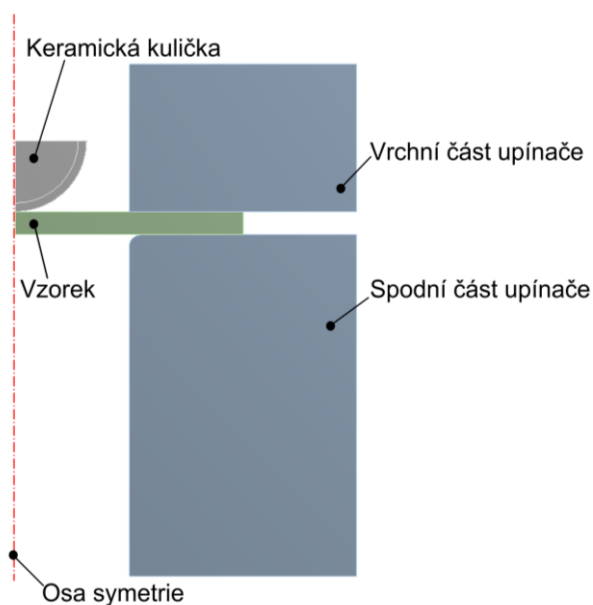
Metodika řešení byla založena na optimalizaci hledaných parametrů pro převod změřených křivek síla vs. deformace na křivky napětí vs. přetvoření. Pro optimalizační úlohu byl zvolen výpočtový program Ansys Workbench, ve kterém byla zároveň provedena simulace SPT měření s návazností na optimalizační algoritmus. 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. Počet parametrů byl závislý na modelu materiálu, který byl zvolen pro popis chování materiálů. 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 zvolených kinematických zpevnění, pomocí nichž je možné modelovat různé chování materiálu. V tomto případě byl zvolen dvou – kinematický Chabocheův model s hodnotou $\gamma_2=0$ [32][33]. 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. Celkem tedy bylo zvoleno šest parametrů. Pro optimalizaci těchto parametrů byl použit „toolbox“ s názvem „Direct optimization“, který je součástí zvoleného výpočetního programu. Tento toolbox v sobě obsahuje optimalizační metody. Pro tento případ byla zvolena tzv. „screening“ metoda. Tato metoda je vhodná zejména pro rychlý odhad hledané závislosti s vysokým počtem vstupních parametrů. Jde o ne-iterativní přímou metodu s kvazi náhodným generátorem čísel založeným na Hammersleyho algoritmu. Hammersleyho vzorkovací algoritmus je kvazi náhodný generátor čísel s velmi malým rozdílem a používá se pro kvazi Monte –Carlo simulace. Nízký rozdíl sekvence je definován jako sled bodů, které aproximují rovnoměrným rozložením multi-dimenzionální krychli optimálním způsobem. Dalo by se říci, že návrhový prostor je obydlený rovnoměrně těmito sekvencemi, vzhledem k inherentnímu vzorkování metody Monte Carlo, rozměrnost v tomto případě nepředstavuje problém. To znamená, že počet návrhových bodů neroste exponenciálně s počtem vstupních parametrů. Konvenční Hammersleyův algoritmus je konstruován pomocí radikální inverzní funkce [35]. Pomocí této metody byla prováděna samotná optimalizační úloha, jež na základě výsledků z numerické simulace SPT zkoušky měnila vstupní parametry, kterými byly materiálové charakteristiky a koeficient tření dle výstupních parametrů, kterými byly hodnoty sil

získaných z experimentálního měření tak, aby bylo dosaženo optimální odezvy. Numerická simulace byla řízena hodnotami posuvů získaných z měření a optimalizační algoritmus měl za cíl měnit vstupní parametry tak, aby při daném posuvu bylo dosaženo nejpřesnější hodnot síly. Při vyčerpání optimalizačních cyklů byli vybráni nejlepší kandidáti pro popis chování materiálu s ohledem na změřenou křivku síla vs. deformace. Optimalizační úloha byla prováděna pro všechny změřené křivky vzorku B číslo 1, vzorku A číslo 3 a neokujených vzorků. Vzorky typu A číslo 2 nebylo možné zahrnout do optimalizační úlohy z důvodu nejednoznačných a nesourodých záznamů jednotlivých křivek.

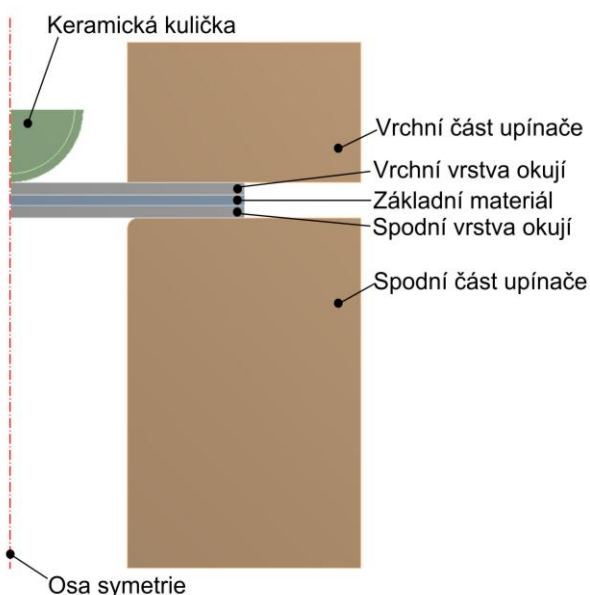
- ***Model geometrie a topologie***

Model geometrie pro numerickou simulaci potažmo optimalizační úlohu byl postaven na základě skutečné geometrie části experimentálního zařízení z SPT zkoušek. Pro výpočtový model byla uvažována horní a spodní část upínače, dále vzorek s definovanou tloušťkou, která byla pro každý vzorek změřena a indentor (keramické kuličky) viz Obr. 6-36 resp. Obr. 6-37. Celá úloha byla řešena jako dvourozměrná, a proto i model geometrie byl připraven jako dvourozměrný osově symetrický. Skutečný model byl osově symetrický, proto bylo možné toto zjednodušení aplikovat a významně snížit výpočetní náročnost úlohy s ohledem na relevantnost popisu materiálových vlastností daného vzorku. Jednotlivé komponenty byly souvislé a odpovídaly svými vlastnostmi reálným podmínkám. Jako první byl postaven model pro neokujené typy vzorků. Na tomto modelu byla provedena optimalizační úloha pro nalezení vhodných parametrů popisujících materiálové chování odpovídajícího vzorku a byla provedena transformace změřené křivky síla vs. deformace na křivku napětí vs. přetvoření. Neokujené vzorky bylo nutné přepočítat jako první a to z toho důvodu, že vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3 obsahovaly jak základní materiál, tak vrstvu okují. Model geometrie pro okujené vzorky byl upraven tak, aby odpovídal skutečnému modelu při SPT měření. Úprava spočívala v rozdělení geometrie vzorku na tři části. Horní a spodní část odpovídala vrstvě okují, prostřední část reprezentovala základní materiál. Tloušťky jednotlivých vrstev byly definovány na základě měření z elektronového mikroskopu, jsou prezentovány na Obr. 6-20 resp. Obr. 6-21. Všechny vrstvy byly opět modelovány jako souvislé a homogenní. Jednotlivé komponenty výpočtového modelu geometrie byly spojeny prostřednictvím kontaktních ploch. Kontaktní plochy tedy byly definovány mezi spodní a vrchní částí vzorku se spodní resp. horní částí upínače. Další kontakt byl poté definován mezi vrchní částí vzorku a indentorem. Všechny kontakty byly nastaveny jako kontakty se třením.

Součinitel tření mezi vzorkem a upínačem byl definován hodnotou 0,5. Součinitel tření mezi vzorkem a indentorem byl jedním z uvažovaných parametrů, a proto nabýval pro každý vzorek jiné hodnoty (v rozmezí 0,23 – 0,34). Odpovídající modely geometrie jsou prezentovány na Obr. 6-36 a Obr. 6-37.

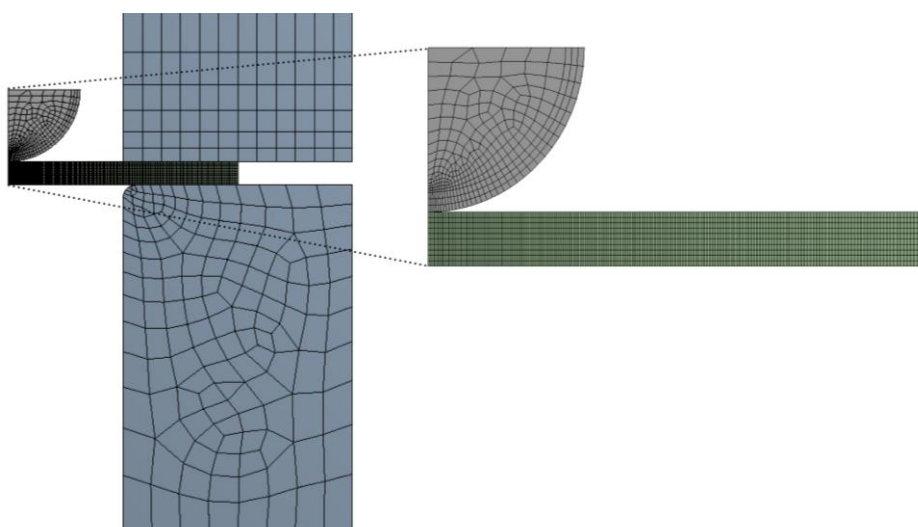


Obr. 6-36 Model geometrie pro neokujené vzorky

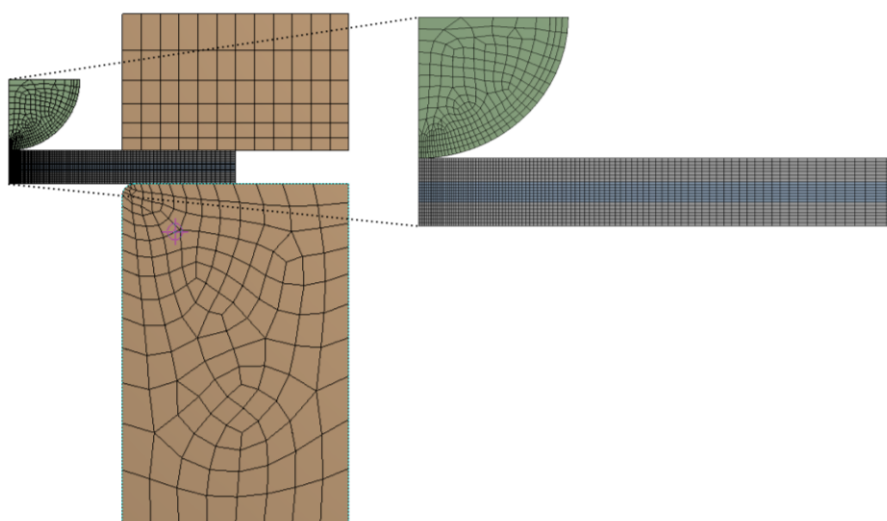


Obr. 6-37 Model geometrie pro vzorky s vrstvou okují

Model topologie byl připraven vhodnou diskretizací modelu geometrie s využitím axisymetrických prvků (osově symetrické) „PLANE 182“ [35]. Tyto prvky jsou lineární, se čtyřmi uzly, které mají dva stupně volnosti: posunutí ve směru x a směru y. Pro vytvoření modelu topologie na kontaktních plochách byly použity prvky „CONTA 172“ a „TARGE 169“ [35]. Oba tyto prvky jsou rovinné a používají se na tvorbu kontaktních dvojic. Všechny tyto typy prvků byly použity ve všech modelovaných případech. Pro vytvoření sítě pro neokoujené vzorky bylo použito 2538 prvků. Pro tvorbu modelu topologie se vzorky typu B číslo 1 a typu A číslo 3 bylo použito 2601 prvků. Zobrazení jednotlivých modelů topologie pro neokoujené a okoujené vzorky je uvedeno na Obr. 6-38 resp. Obr. 6-39.



Obr. 6-38 Model topologie pro neokoujené vzorky



Obr. 6-39 Model topologie pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3

- **Model materiálu**

Pro každou část modelu geometrie byl uvažován odpovídající model materiálu. Pro horní a spodní část upínače byl uvažován lineární elastický model materiálu, jehož materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 6-8. Model materiálu keramické kuličky byl taktéž uvažován jako lineárně elastický (viz Tab. 6-8). Ani jedna z těchto komponent nebyla předmětem zájmu, a proto byly jejich materiálové modely omezeny na nezbytně nutné charakteristiky, tak aby dostatečně popisovaly svoji tuhost a tím i základní vliv při SPT měření.

Tab. 6-8 Mechanické vlastnosti uvažované ve výpočtovém modelu

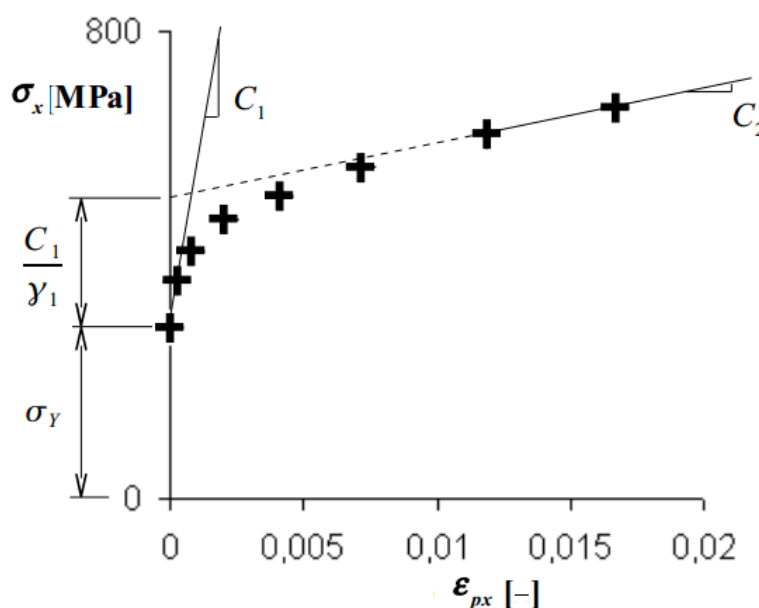
Komponenta	Tepelná roztažnost	Hustota	Modul pružnosti	Poissonův poměr
[-]	[1/°C]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
Keramická kulička	12e-6	7850	2.0e13	0.3
Upínač	12e-6	7850	2.0e11	0.3

Model materiálu pro vzorek byl vybrán podle požadovaného mechanického chování a možností parametrizace jeho jednotlivých členů ve výpočtovém programu Ansys. Pro tento účel byl zvolen Chabocheův kinematický model. Chabocheův kinematický model se používá zejména při popisu cyklické deformační křivky nebo hysterezní smyčky s cílem popsat a zachytit některé jevy jako např. „ratchetting“ nebo „shakedown“. Tyto jevy se vyskytují při cyklickém zatěžování a tento materiálový model je vhodný při analýze nízkocyklové únavy [32]. Jeho základní formulace je prezentována rovnicí (29) [35]. Pro Chabocheův materiálový model je možné zadat až pět kinematických modelů zpevnění a izotropních modelů zpevnění při simulaci složitěho cyklicky deformačního chování materiálu. Tento materiálový model obsahuje několik parametrů popisujících materiálové chování. Vlivem kombinací a zahrnutím, či vypuštěním jednotlivých parametrů je možné zachytit uvedené jevy. Při vhodné úpravě je však možné tento materiálový model používat i při popisu jednoosého monotónního namáhání [32]. V tomto případě byla uvažována rovnice pouze se dvěma kinematickými modely a s parametrem γ_2 rovným nule. Z obecné rovnice materiálového modelu je pak možné odvodit zjednodušenou formu pro popis monotónního zatěžování, jakým bylo i zatěžování při SPT zkoušce, rovnicí (30) [32]. Jednotlivé členy uvedené rovnice určují sklon a průběh napětově deformační křivky. K tvorbě Chabocheova modelu je potřeba mít experimentální data, ze kterých se určí potřebné koeficienty Chabocheova modelu. Odhady parametrů je možné provádět pomocí matematických přístupů

jako je např. nelineární regrese s prvotním odhadem potřebných koeficientů dle R. Halamy [32] uvedených na Obr. 6-40. Při výpočtovém modelování a hledání optimálních parametrů pro vzorky změřené při SPT zkouškách nebyly známy hodnoty napětí v závislosti na přetvoření, jako tomu obvykle bývá, ale byly změřeny průběhy síly v závislosti na deformaci. Proto byly potřebné parametry Chabocheova modelu parametrizovány a hledány optimalizační metodou na základě několika hodnot síly a odpovídající hodnotě deformace vybraných z celého změřeného průběhu.

$$\dot{\alpha} = \sum_i^n \dot{\alpha}_i = \frac{2}{3} \sum_i^n C_i \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma_i \alpha_i \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{C_i} \frac{dC_i}{d\theta} \dot{\theta} \alpha_i \quad (29)$$

$$\sigma_x = \sigma_Y + \frac{C_1}{\gamma_1} (1 - e^{-\gamma_1 \varepsilon_{px}}) + C_2 \varepsilon_{px} \quad (30)$$



Obr. 6-40 Zobrazení počáteční volby parametrů Chabocheova modelu (R. Halama a kol.[32])

• Model okrajových podmínek a zatížení

Model okrajových podmínek byl připraven tak, aby co nejlépe zachytil a reprezentoval skutečné podmínky při reálném experimentu. Protože nebyly všechny okrajové podmínky ovlivňující vzorek při experimentálním měření (např. přítlačná síla upínače na vzorek atd.) známy, byly nahrazeny podmínkami, které toto ovlivnění adekvátně nahradily a zároveň jednoznačně definovaly stupně volnosti celé soustavy, čímž stabilizovaly celý výpočet. Model okrajových podmínek byl stejný pro všechny výpočtové simulace. Na odpovídající

plochy upínače byly aplikovány okrajové podmínky, které odebíraly všechny stupně volnosti. Tím byla poloha upínače jednoznačně definována. Mezi plochami vzorku a upínače byl definován kontakt s hodnotou tření 0,5. Poloha vzorku byla vymezena jeho uložením mezi vrchní a spodní část upínače a na vnějším obvodu byl odebrán stupeň volnosti, který odpovídal radiálnímu posuvu. Tímto způsobem bylo zajištěno, že nedojde při protlačování vzorku k jeho posunutí vůči upínači. Plocha indentoru (keramická kulička) byla svázaná s bodem pomocí MPC kontaktu. Tento bod sloužil pro zadávání zatížení, které odpovídalo vybraným hodnotám posuvu ze změřené křivky síla vs. deformace, a zároveň byla v tomto bodu monitorována silová odezva na zatěžování daného vzorku. Tato silová odezva poté vstupovala do optimalizačního procesu. Mezi vzorkem a indentorem byl definován kontakt se třením. Hodnota koeficientu tření mezi těmito plochami byla zařazena mezi optimalizované parametry. Model zatížení tedy vycházel ze změřených křivek při SPT zkouškách pro jednotlivé vzorky měřených při definovaných teplotách.

Výsledky optimalizační analýzy:

Cílem optimalizační analýzy bylo převést změřené závislosti síla vs. deformace z SPT zkoušek na křivky napětí vs. přetvoření. Tímto převodem by byly získány mechanické vlastnosti měřených vzorků, potažmo okují. K tomu aby bylo možné získat požadované křivky bylo potřeba nalézt jednotlivé materiálové charakteristiky a konstanty. Pro získání mechanické odezvy materiálu byl zvolen Chabocheův model materiálu, tento model byl popsán pomocí čtyř koeficientů, které byly předmětem optimalizačního procesu. Další optimalizované parametry, mezi kterými byla základní mechanická charakteristika, kterou je modul pružnosti a posledním optimalizovaným parametrem byl koeficient tření mezi keramickou kuličkou a vzorkem. Optimalizační proces byl prováděn na neokujených vzorcích a na vzorcích typu B číslo 1 a typu A číslo 3. Výsledky optimalizace materiálových parametrů pro jednotlivé vzorky při odpovídajících teplotách jsou prezentovány v Tab. 6-9 až Tab. 6-12. 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. Odhad byl proveden z důvodu doplnění chybějících parametrů, které byly použity při optimalizační úloze okujených vzorků typu B číslo 1. 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. Optimalizace materiálových parametrů nebyla prováděna v celém

rozsahu změřených křivek síla vs. deformace, ale pouze do hodnot maximální síly F_m a odpovídající deformace u_m . Optimalizovat celou křivku by znamenalo použití jiných, vhodnějších modelů materiálů. Optimalizace celého průběhu neměla opodstatnění, protože všechny podstatné mechanické vlastnosti, kterými jsou modul pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti je možné získat z části křivky do maximální hodnoty síly. Srovnání optimalizovaných a změřených průběhů odezvy síly vs. deformace jsou uvedeny na Obr. 6-55 až Obr. 6-53. Pro představu o velikosti celkového přetvoření při maximální deformaci odpovídajícího vzorku, jsou zobrazeny na Obr. 6-49 až Obr. 6-52.

Tab. 6-9 Optimalizované parametry pro neokujené vzorky typu A

Teplota [°C]	Tření [-]	E [MPa]	Mez kluzu [MPa]	C_1 [MPa]	γ_1 [-]	C_2 [MPa]
600	0.26	6800	85.0	800.0	200.0	105.0
700	0.26	6700	62.0	1200.0	250.8	2.5
800	0.28	2120	19.0	870.0	190.2	2.2
884	0.31	1300	18.0	600.0	550.8	200.0

Tab. 6-10 Optimalizované parametry pro neokujené vzorky typu B

Teplota [°C]	Tření [-]	E [MPa]	Mez kluzu [MPa]	C_1 [MPa]	γ_1 [-]	C_2 [MPa]
600	0.28	15500	75.0	3670.0	148.0	116.0
700	0.32	13500	25.7	1640.0	155.7	76.5
800*	0.33	12850	24.4	1255.0	1477.8	38.3
880	0.34	12200	23.1	870.0	2800.0	0.1

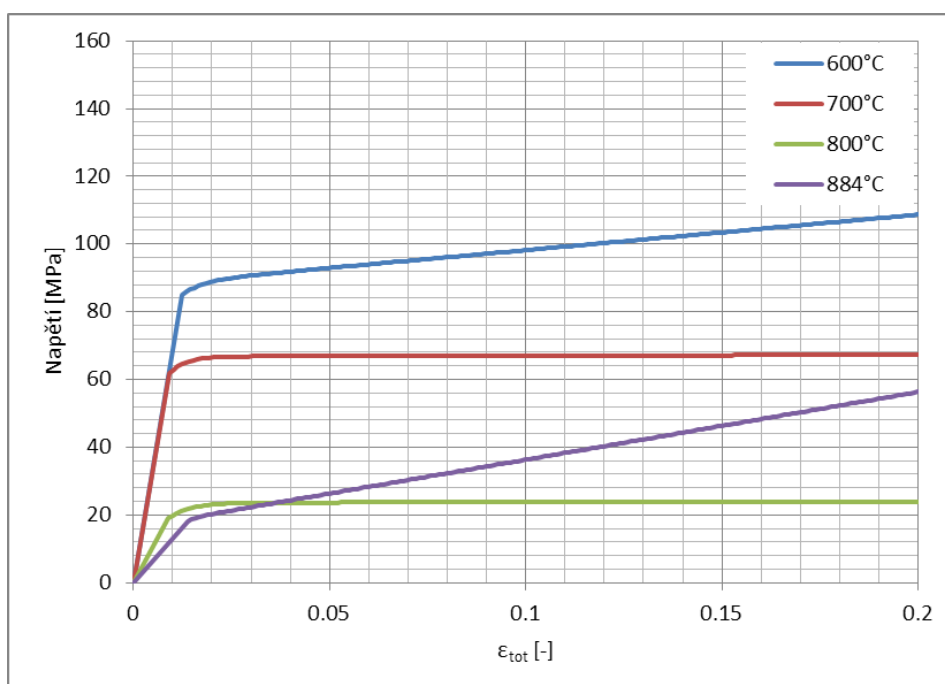
*hodnoty získané lineární interpolací

Tab. 6-11 Optimalizované parametry pro vzorky typu A číslo 3

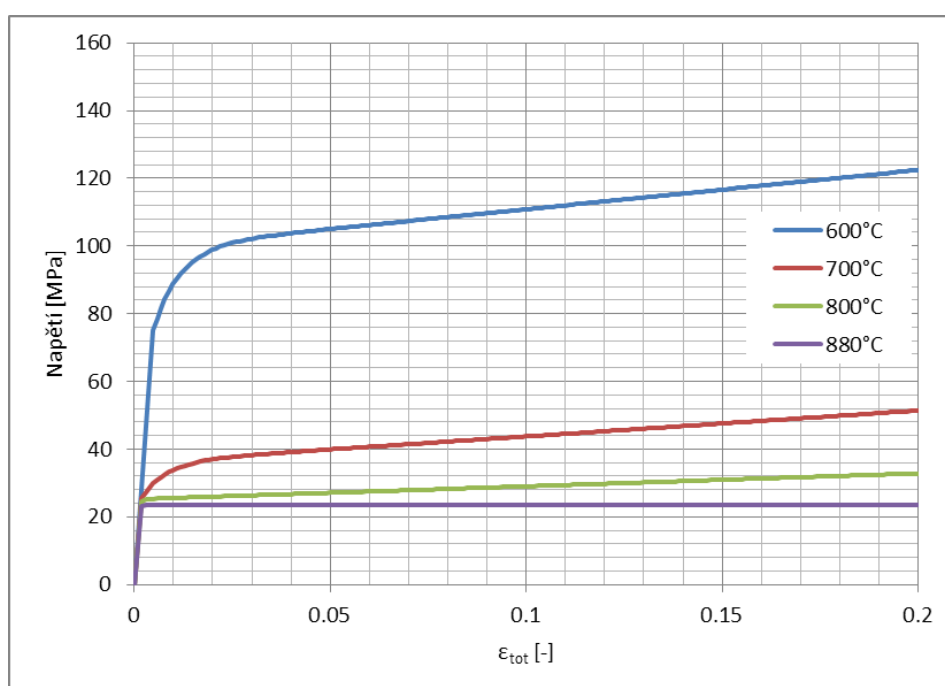
Teplota [°C]	Tření [-]	E [MPa]	Mez kluzu [MPa]	C_1 [MPa]	γ_1 [-]	C_2 [MPa]
600	0.26	12000	21.0	620.0	1200.0	0.07
700	0.26	11000	20.0	600.0	2011.2	3.50
800	0.28	1130	15.0	112.0	1255.7	1.07
874	0.31	450	5.1	96.9	2870.7	0.05

Tab. 6-12 Optimalizované parametry pro vzorky typu B číslo 1

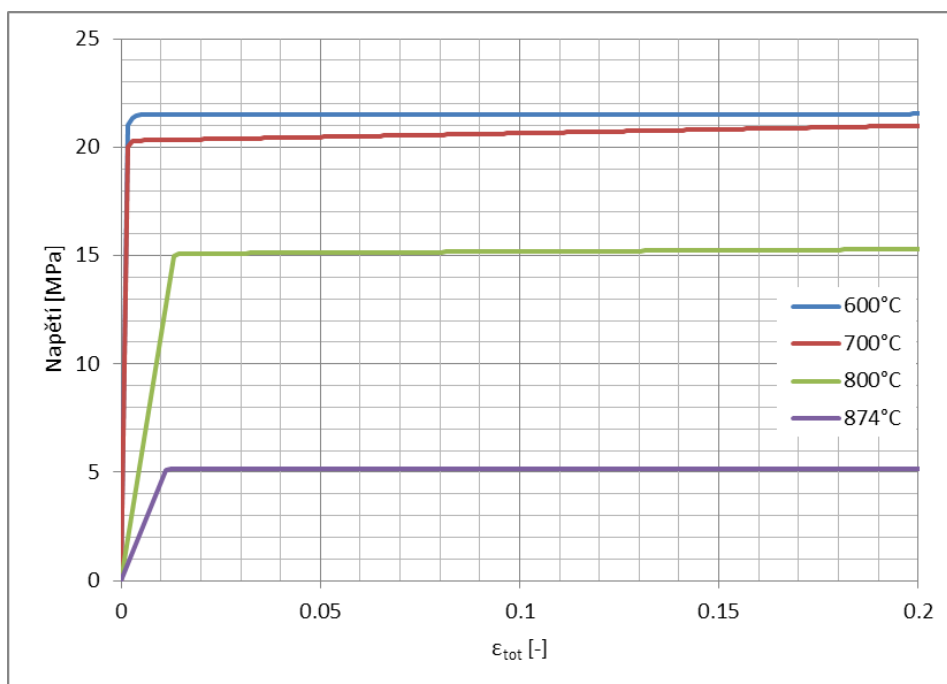
Teplota [°C]	Tření [-]	E [MPa]	Mez kluzu [MPa]	C_1 [MPa]	γ_1 [-]	C_2 [MPa]
600	0.26	1480	25.1	302.0	602.1	15.0
700	0.26	1110	7.6	277.0	1579.7	4.6
800	0.28	656	3.2	261.0	1869.4	9.5
870	0.31	655	2.6	875.0	466.5	4.0



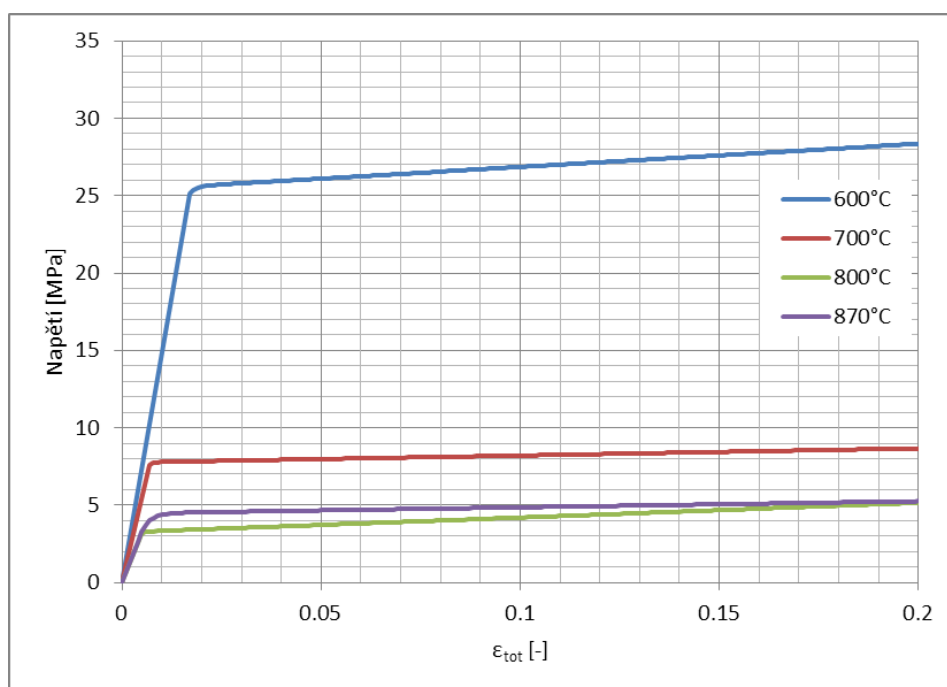
Obr. 6-41 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro neokujené vzorky typ A



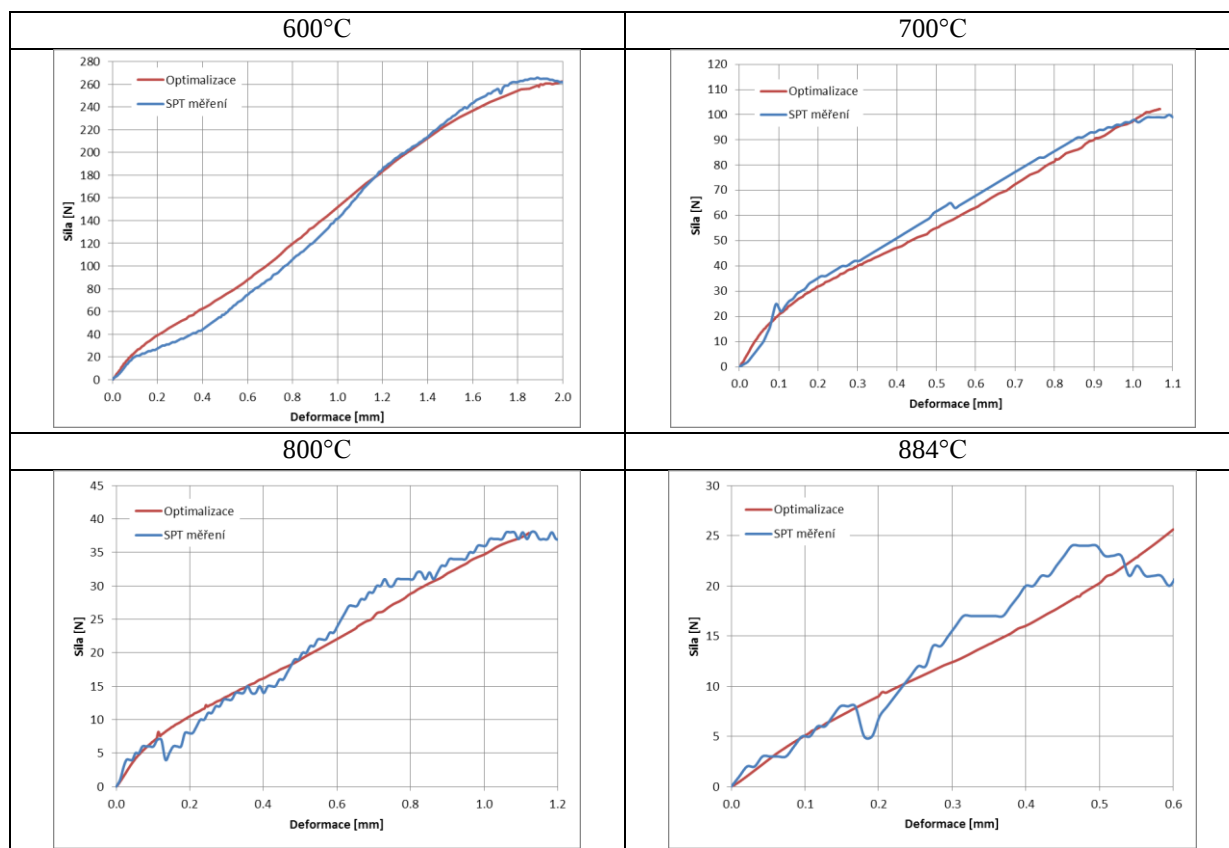
Obr. 6-42 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro neokujené vzorky typ B



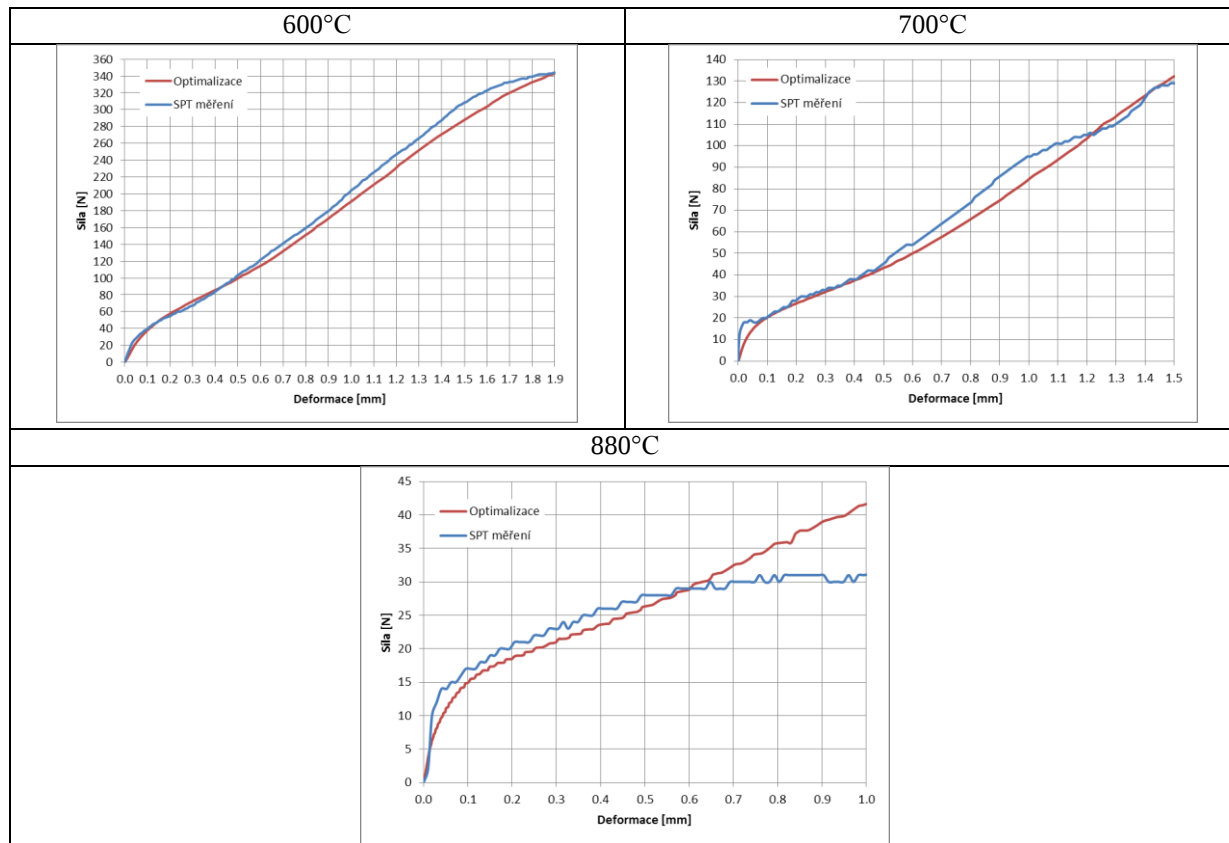
Obr. 6-43 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro vzorky typ A číslo 3



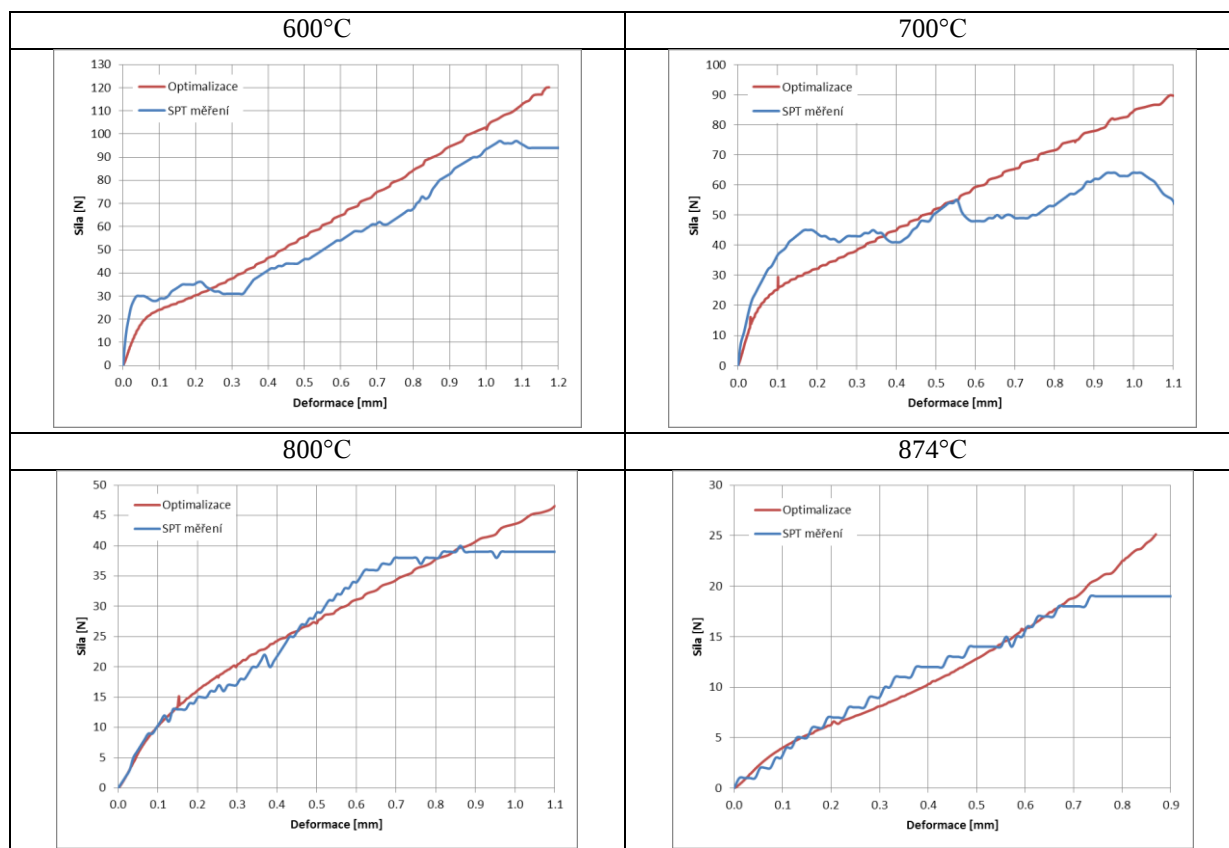
Obr. 6-44 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro vzorky typ B číslo 1



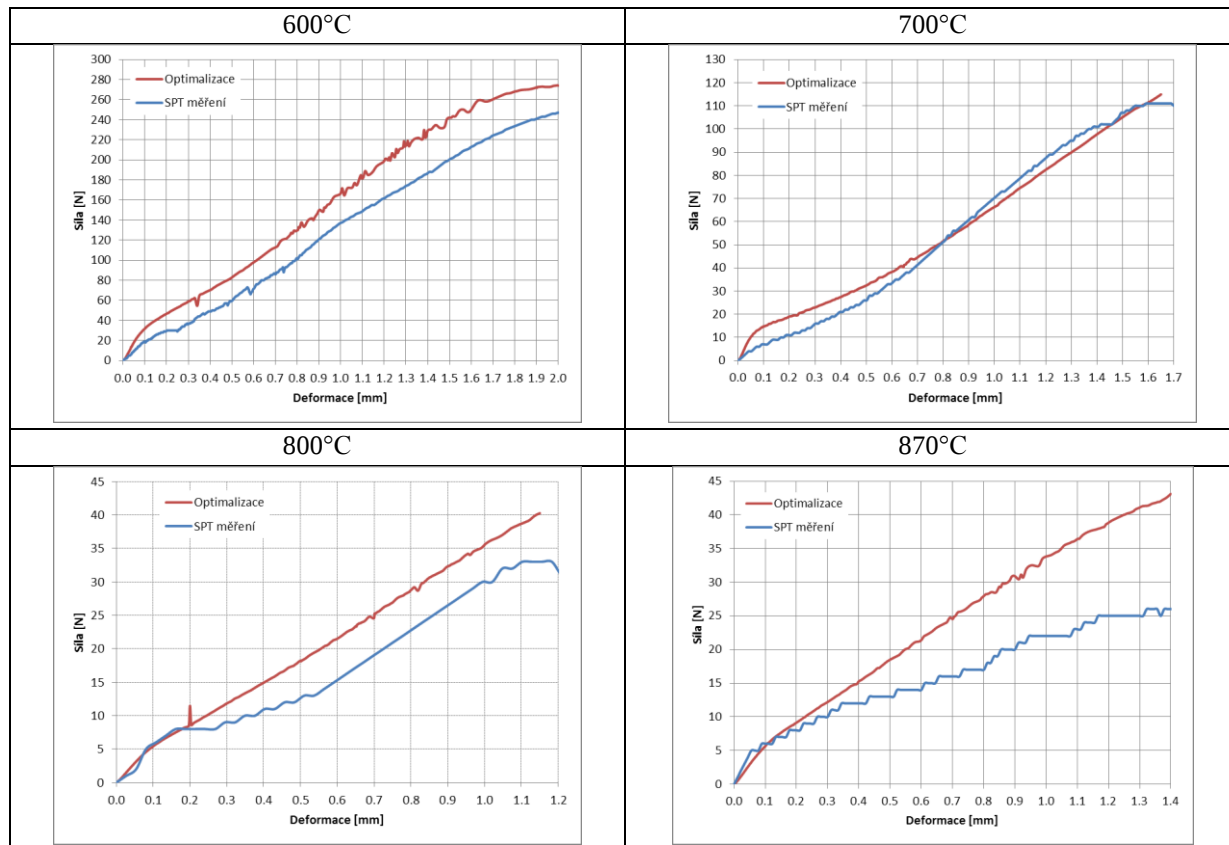
Obr. 6-45 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro neokujené vzorky typu A



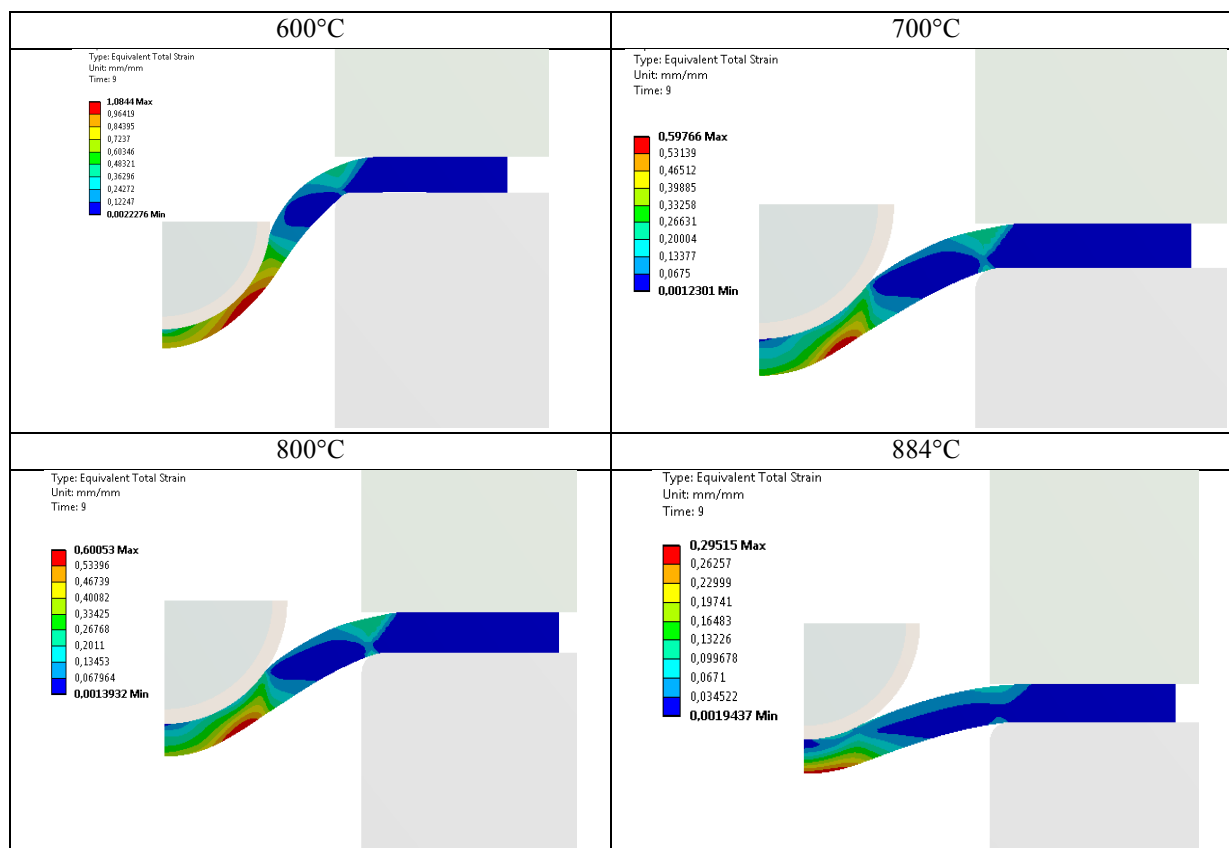
Obr. 6-46 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro neokujené vzorky typu B



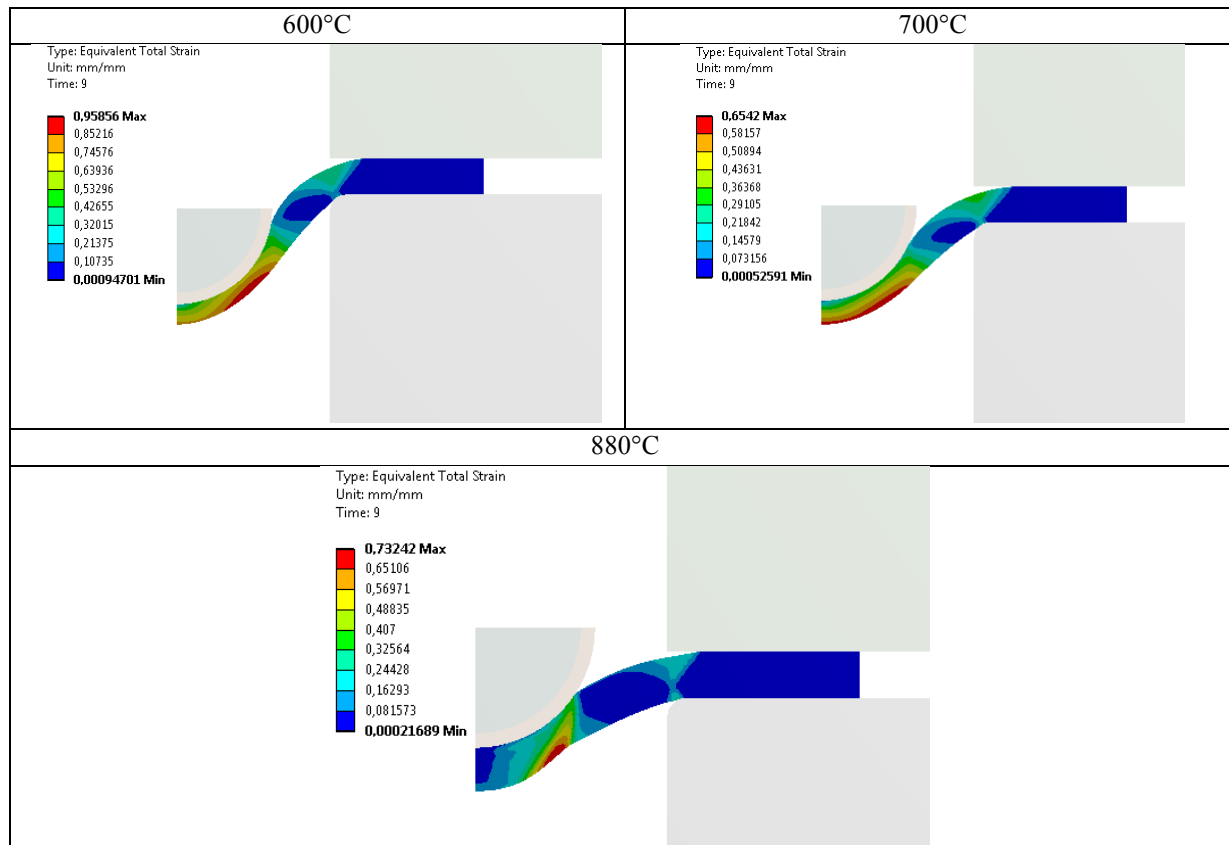
Obr. 6-47 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro vzorky typu A číslo 3



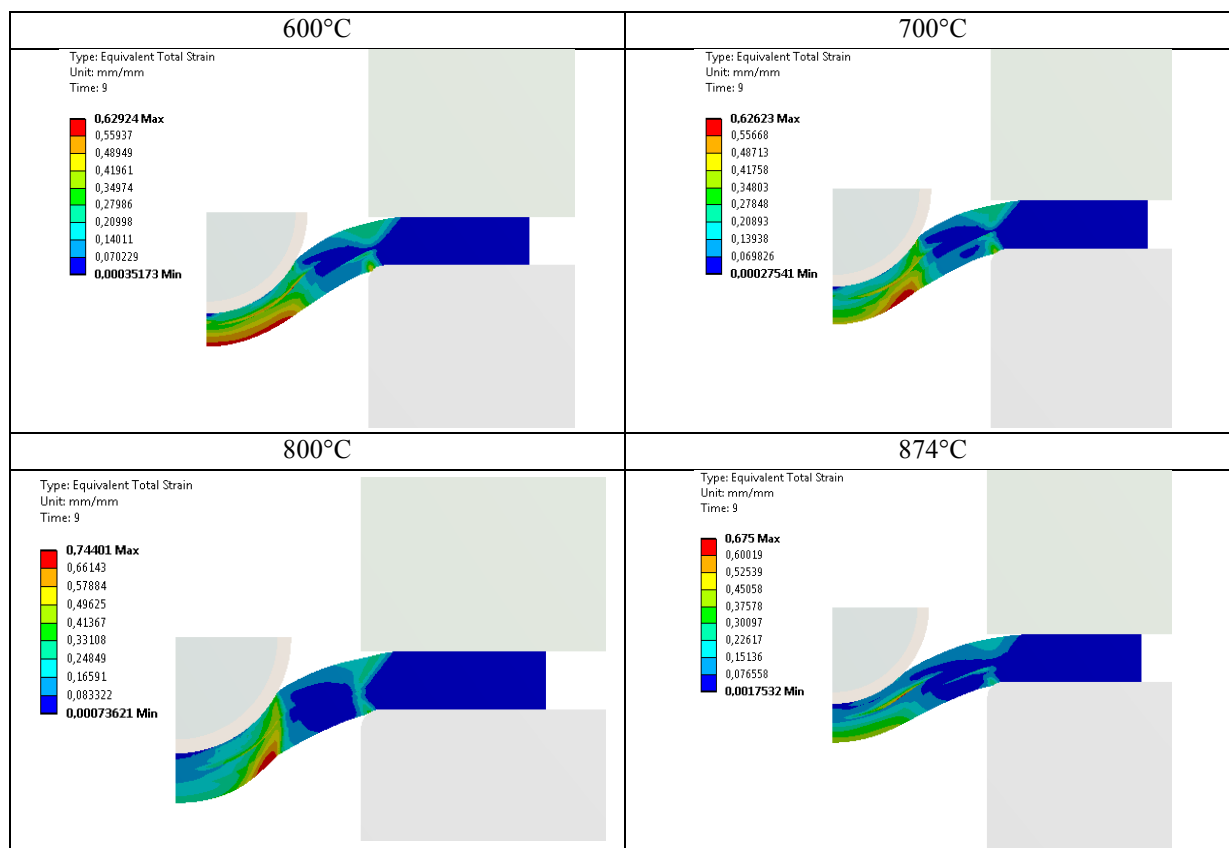
Obr. 6-48 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro vzorky typu B číslo 1



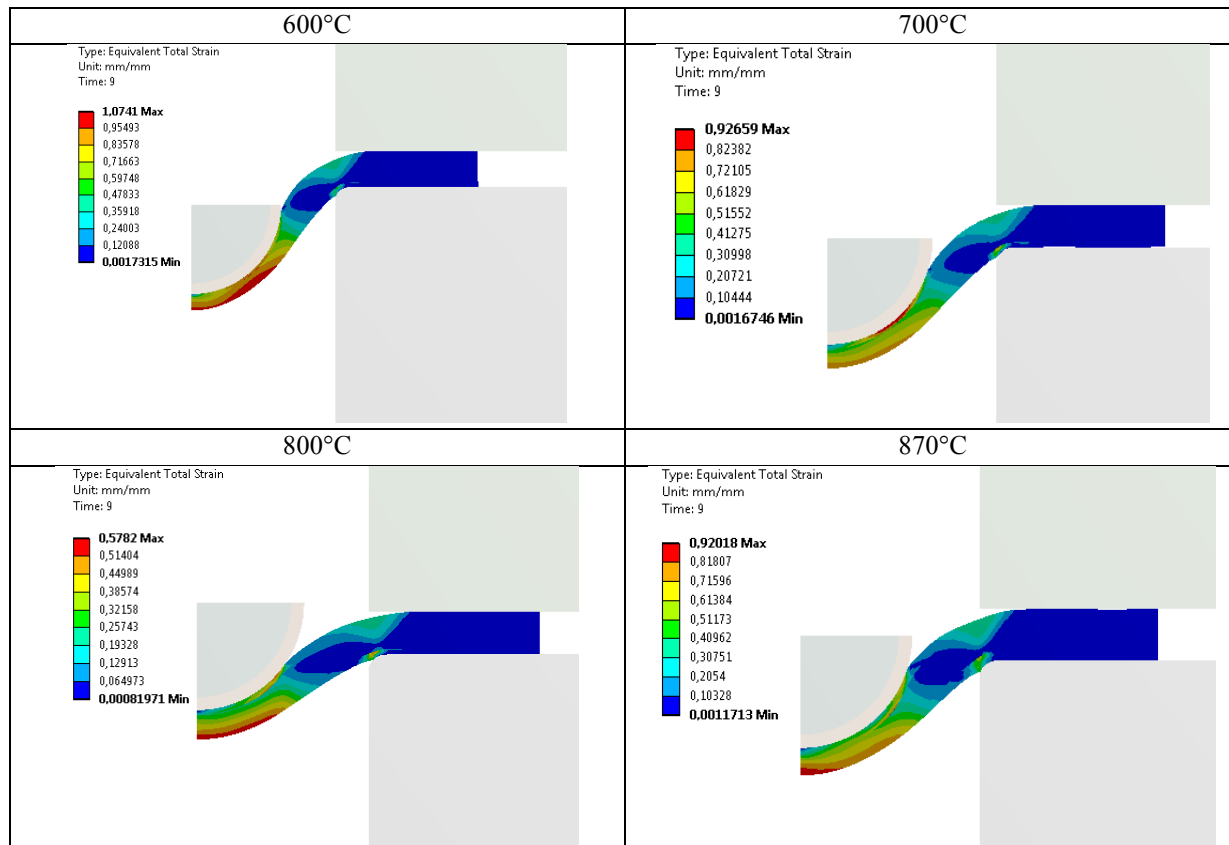
Obr. 6-49 Zobrazení celkového přetvoření pro neokujené vzorky typu A



Obr. 6-50 Zobrazení celkového přetvoření pro neokujené vzorky typu B

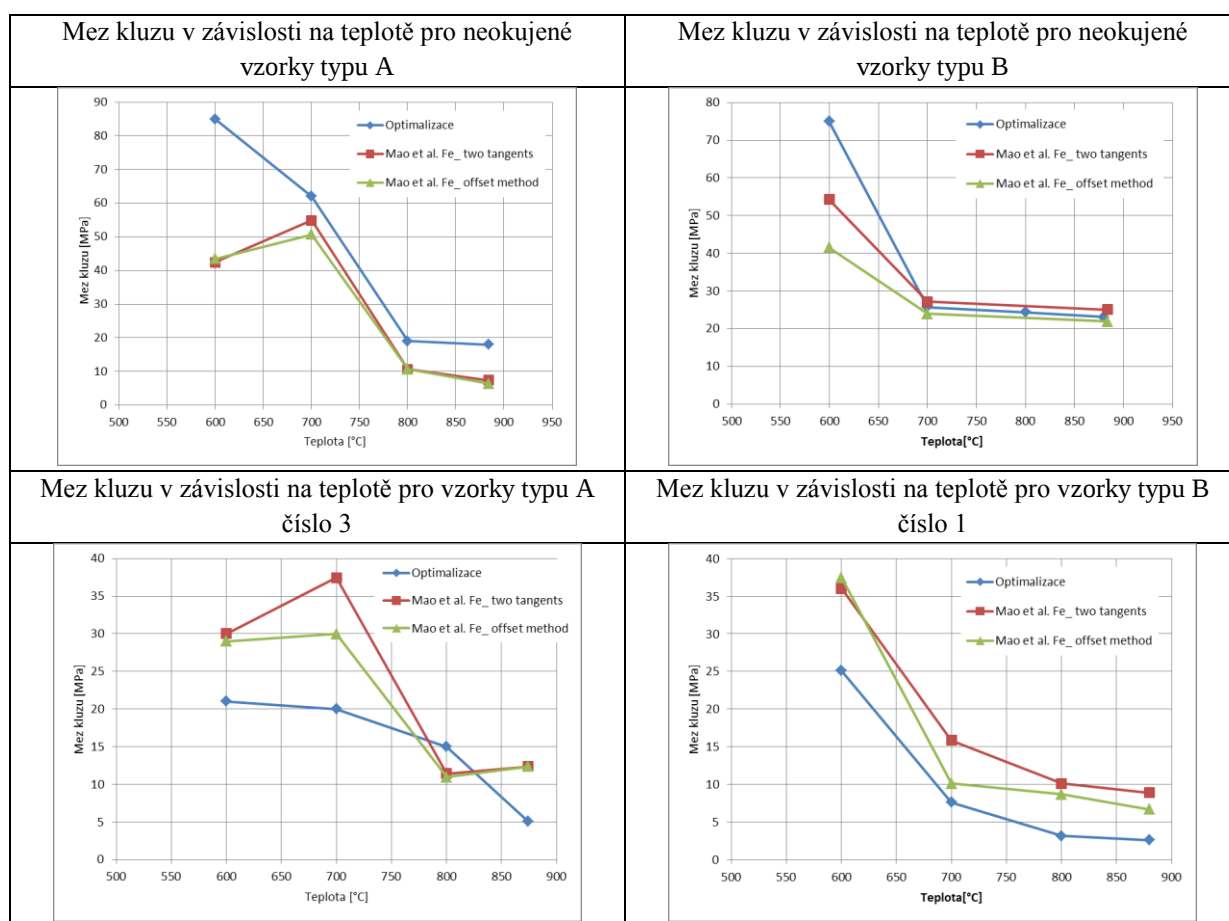


Obr. 6-51 Zobrazení celkového přetvoření pro vzorky typu A číslo 3



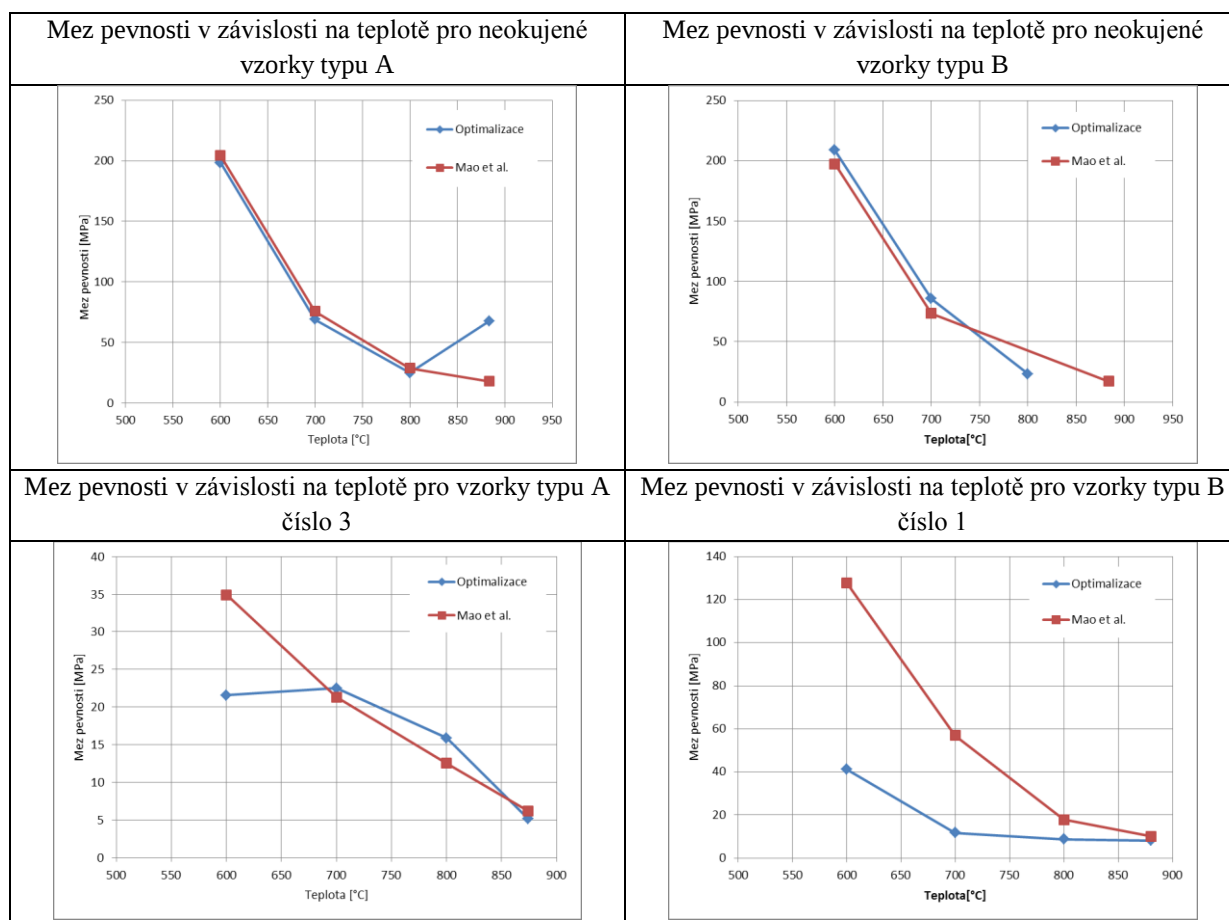
Obr. 6-52 Zobrazení celkového přetvoření pro vzorky typu B číslo 1

Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti získané optimalizací materiálových parametrů, byly srovnány s hodnotami meze kluzu a meze pevnosti dle empirických vztahů (rovnice (25) resp. (26)) prezentovaných Mao et al. Toto srovnání mělo za cíl odhalit rozdíly mezi změřenými potažmo optimalizovanými hodnotami meze kluzu a meze pevnosti a empirickými vztahy získanými pro jiné materiály při odlišných podmínkách, a tím prokázat relevantnost empirických vztahů a jejich všeobecnou platnost. Vyhodnocení meze kluzu bylo prováděno dle rovnice (25), která je definována na základě odečtené síly na mezi kluzu a počáteční tloušťce vzorku. Protože hodnota síly na mezi kluzu (F_e) byla vyhodnocena dvěma grafickými metodami, byly pro vyhodnocení použity obě hodnoty. Tloušťky jednotlivých vzorků byly uvažovány bez tolerančního pásma. Byly tedy použity jejich diskrétní hodnoty získané měřením. Srovnání optimalizovaných hodnot meze kluzu s hodnotami vyhodnocenými dle empirických vztahů je uvedeno na Obr. 6-53.

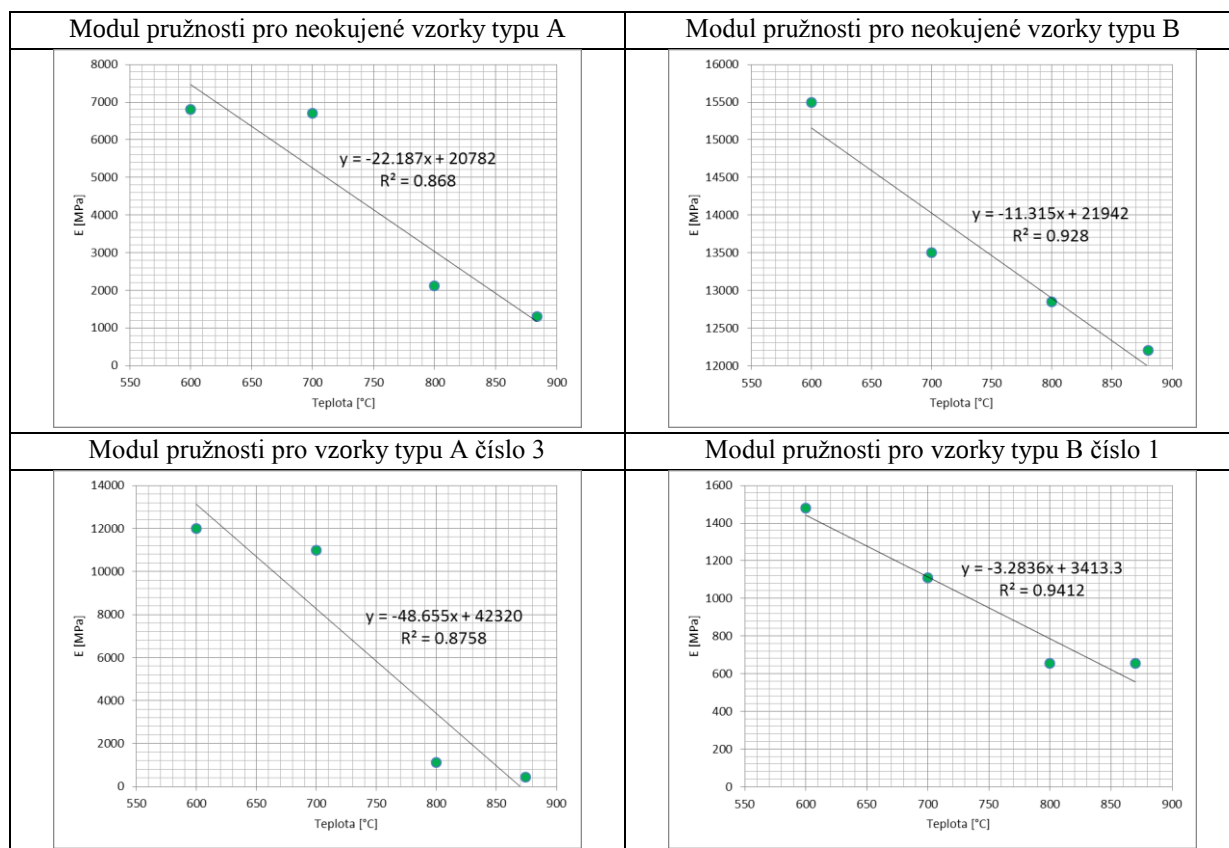


Obr. 6-53 Srovnání hodnoty meze kluzu z optimalizace s hodnotami meze kluzu dle empirického vztahu prezentovaných Mao at al. (rovnice 25)

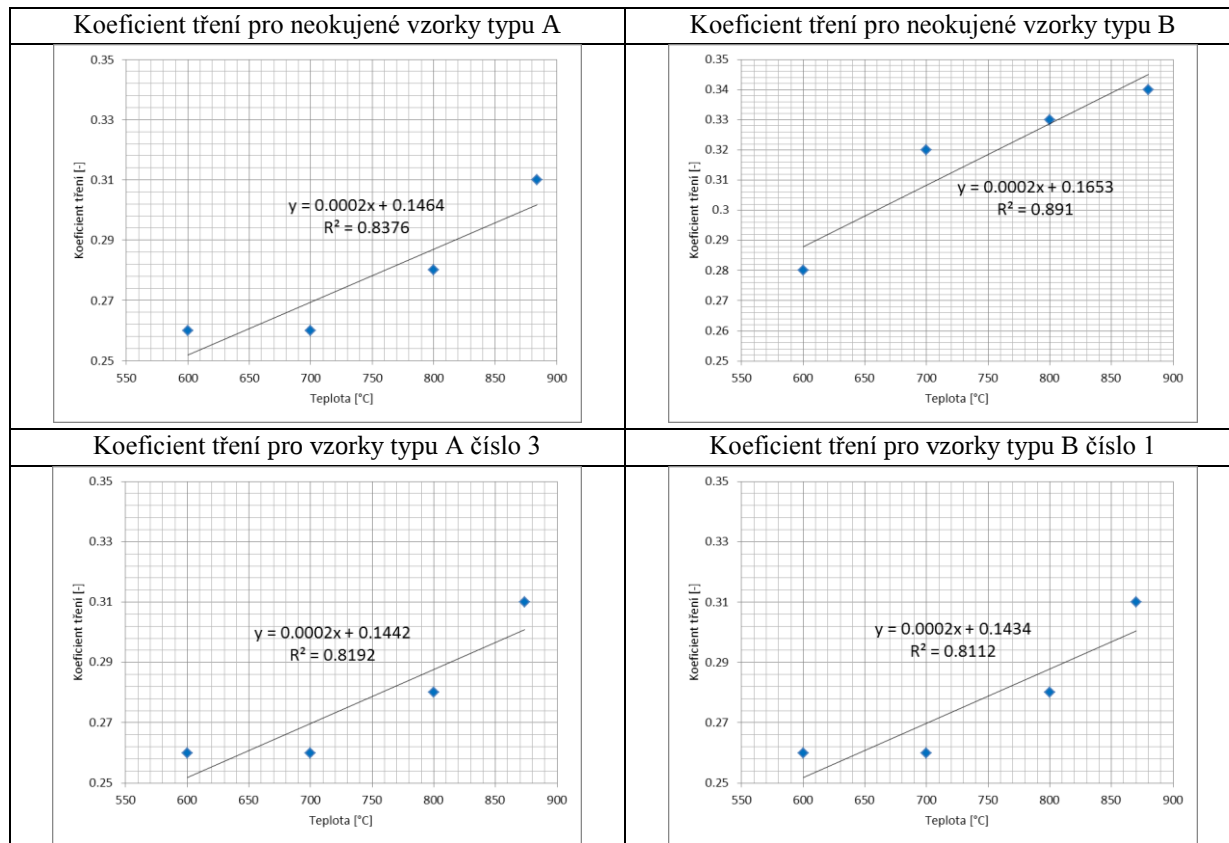
Obdobným způsobem byly srovnány i hodnoty meze pevnosti, které byly vyhodnoceny. Jako mez pevnosti byla zvolena hodnota redukovaného napětí podle podmínky HMH při dosažení maximální deformace, na základě optimalizovaných materiálových vlastností. Pro srovnání byla vyhodnocena hodnota meze pevnosti z empirické rovnice (26). Srovnání těchto dvou přístupů je uvedeno na Obr. 6-54. Hodnoty meze pevnosti pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3 jsou ovlivněny strukturou vzorků, která je složena jak se základního materiálu, tak z vrstvy okují. Jako další byly z optimalizačního procesu vyhodnoceny optimalizované parametry, kterými byly modul pružnosti a koeficient tření. Modul pružnosti jakožto základní materiálová charakteristika, byl vyhodnocen v závislosti na teplotě. Dosažené výsledky byly proloženy lineární závislostí. Tyto výsledky jsou prezentovány na Obr. 6-55. Stejným způsobem byl vyhodnocen i parametr koeficient tření. Dosažené výsledky pro tento parametr byly opět proloženy lineární závislostí (viz Obr. 6-56). Pro vytvoření lineární závislosti s odpovídající rovnicí bylo provedeno toto vyhodnocení i pro mez kluzu (viz Obr. 6-57).



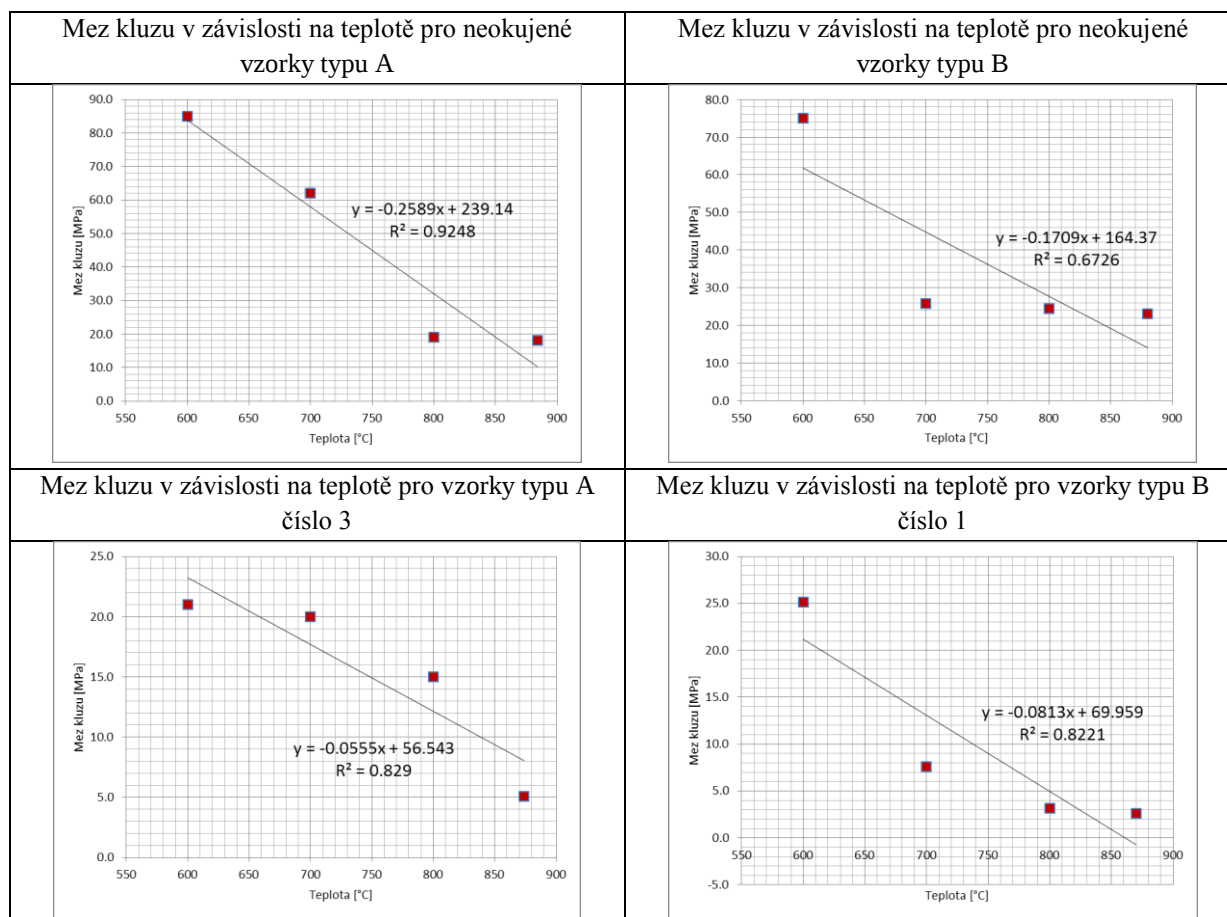
Obr. 6-54 Srovnání hodnoty meze pevnosti z optimalizace s hodnotami meze pevnosti dle empirického vztahu prezentovaných Mao et al. (rovnice 26)



Obr. 6-55 Vyhodnocení závislosti modulu pružnosti na teplotě pro optimalizované vzorky



Obr. 6-56 Vyhodnocení koeficientu tření v závislosti na teplotě pro optimalizované vzorky



Obr. 6-57 Vyhodnocení závislosti meze kluzu na teplotě pro optimalizované vzorky

6.3 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 dosažení těchto jednotlivých cílů bylo provedeno několik postupných kroků, které vedly ke stanoveným cílům. Pro analýzu mechanických vlastností okují byla použita kombinace experimentálních měření s výpočtovou a optimalizační analýzou. Vzorky, které byly použity pro růst okují, byly vybrány v duchu celé této práce. První typ vzorků odpovídal běžné konstrukční oceli, druhý typ vzorků korespondoval s ocelí obsahující vyšší procento křemíku. Tyto typy oceli byly použity i při analýzách popsanych v předchozích kapitolách.

Jak již bylo uvedeno, celá analýza mechanických vlastností byla prováděna v několika postupných krocích. První krok analýzy byl věnován měření rychlosti růstu okují v podmínkách připravených v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Měření rychlosti růstu okují bylo prováděno experimentálně. Samotné experimenty byly prováděny na vzorcích z běžné konstrukční oceli a měli za cíl zjistit vliv tloušťky vzorku na tvorbu a růst okují, rychlost růstu okují v daném prostředí. Tyto výsledky byly použity při tvorbě dalších experimentů se zokujenými vzorky. Zvolený typ ocelových vzorků byl při teplotě 1000°C podroben oxidaci v elektrické peci při okolní atmosféře po dobu šedesát minut. Výsledkem tohoto experimentálního měření byla rychlost růstu okují při daných podmínkách, která byla stanovena na hodnotu 0,008 mm/min. Dalším důležitým výsledkem tohoto měření bylo zjištění, že střední hodnota tloušťky okují pro všechny měřené tloušťky vzorků byla přibližně 0,48 mm, a že u vzorků větší tloušťky docházelo k výraznější redukci základního materiálu. Tento projev může být způsoben tím, že u tlustších vzorků jsou zajištěny lepší oxidační podmínky větší plochou vzorku a rovněž větším množstvím materiálu (zejména železa). Platnost těchto závěrů je omezena použitelností, která se vztahuje na stejné podmínky, jaké byly vytvořeny při těchto experimentálních měřeních a na stejné typy materiálů, ze kterých byly připraveny vzorky.

Pro analýzu mechanických vlastností okují byla zvolena metoda s názvem „Small Punch Test“. Tato metoda je považována za nedestruktivní, a je rozšířená zejména v energetickém průmyslu na zjišťování mechanických vlastností ocelí, které byly vystaveny působení externích vlivů (např. záření). Tato zkouška je také považována za analogickou s tahovou zkouškou. Výsledkem při použití této metody je závislost síly na deformaci. Měření se provádí tak, že se do upínače vloží vzorek, který se ohřeje na požadovanou teplotu a při konstantní hodnotě posuvu se vzorek protlačuje keramickou, popřípadě ocelovou kuličkou až do protřetí. Při tomto procesu se zaznamenává síla v závislosti na deformaci. Pro experimentální měření byly zvoleny dva typy oceli (konstrukční ocel, ocel s vyšším obsahem křemíku). Rozměry vzorků byly průměr osm milimetrů a tloušťka vzorku odpovídala jeho topologii. Celkem bylo provedeno 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. Počet vrstev jednotlivých vzorků je možné odhadnout z počtu zaznamenaných extrémů v odpovídající křivce. Čtvrtá sada měření byla prováděna na vzorcích typu B, které byly vystaveny stejným oxidačním podmínkám jako vzorky z předešlé sady. Tyto vzorky nabyly zokujené 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, tedy základní materiál s vrstvou okují. Výsledkem všech těchto sad měření byly křivky síly v závislosti na deformaci při teplotách 600°C až zhruba 880°C. 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 měřeními opakovaně byl přibližně 3%. Tato hodnota potvrzuje dobrou přesnost a relevantnost měření.

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. Pro účel měření jednotlivých tlouštěk byli vybráni zástupci jednotlivých typů vzorku, kteří byli rozřezáni a zaliti do plastových válečků. Následně byla plocha řezu vyleštěna a nauhličena. Po tomto přípravném procesu byly vzorky zkoumány pod elektronovým mikroskopem a zároveň byly měřeny tloušťky jednotlivých vrstev. Výsledkem měření tlouštěk byl poté přehled o jednotlivých vrstvách odpovídajících typu vzorku. Bylo zjištěno, že zokujené vzorky typu A dosahovaly tlouštěk 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 tlouštěk 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. Pro tuto analýzu byli vybráni kandidáti z obou typů okujených vzorků. Ze zvolených vzorků byly odebrány části okují, které byly rozemlety na jemný prášek, ze kterého bylo pomocí rentgenové difrakce možné zjistit potřebné informace. Z práškové rentgenové difrakce byly pro odpovídající vzorky

získány tzv. difraktogramy, které určují fázové složení zkoumaných chemických sloučenin a dopočítat některé jejich fyzikální vlastnosti (jako např. hustotu). Z fázové analýzy byly dále zjištěny krystalové mřížky jednotlivých chemických sloučenin. 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, který říká, že pořadí vrstvení je následující (viz Obr. 3-1): 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 okujů 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 okujů bylo zpracování a vyhodnocení změřených křivek síly v závislosti na deformaci. Tyto změřené křivky je možné rozdělit na několik oblastí, stejně jako výsledky z konvenční tahové zkoušky. Tyto oblasti reprezentují aktuální chování vzorku v daném okamžiku. Popisují jeho elastické, elasto-plastické, plastické a lomové chování vzorku. Všechny tyto části je možné analyzovat a získat tak potřebné informace a charakteristiky pro vyhodnocení mechanických vlastností odpovídajícího materiálu. Pro prvotní zpracování výsledků z SPT měření byly v prvním případě použity grafické metody. Pomocí grafických metod byly zjištěny charakteristické hodnoty, jakými jsou síla na mezi kluzu (F_e), síla na mezi pevnosti (F_m) a odpovídající hodnoty deformace. Pro zjištění hodnoty F_e byly použity dvě metody: „two tangents method“ a „offset method“. Hodnoty F_m a odpovídající velikosti deformací byly zjištěny jednoduchým odečtením. Všechny tyto základní charakteristiky byly následně použity při vyhodnocování lomových či materiálových vlastností odpovídajícího vzorku. Někteří autoři zabývající se

SPT měřením prezentovali několik empirických vztahů na přepočtené charakteristické hodnoty F_e a F_m na mez kluzu resp. mez pevnosti. Tyto materiálové parametry jsou základními charakteristikami daného materiálu. Všechny prezentované empirické vztahy byly získány pro konkrétní typ oceli měřený při daných podmínkách. Proto byla potřeba pro získání mechanických charakteristik provést vlastní analýzu a získat tak vlastní empirické vztahy, které bylo možné v závěru srovnat s těmi pocházejícími z literatury. 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 – napětěvou křivku. Dále byla na základě optimalizace zjištěna hodnota meze kluzu (jeden z parametrů Chabocheova modelu) a hodnota modulu pružnosti. Při optimalizaci materiálových parametrů byla hlídána odezva síly na deformaci do maximální změřené síly, tomu odpovídala i rekonstruovaná deformačně – napětěvá 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. Optimalizované materiálové charakteristiky, jako mez kluzu a mez pevnosti, byly pro ověření vyhodnoceny na základě

empirických vztahů prezentovaných Mao et al. Toto srovnání mělo pouze informativní charakter, protože empirické vztahy byly získány při jiných podmínkách a jiných materiálech.

Poslední krok analýzy materiálových vlastností okují byl věnován vyhodnocení lomových charakteristik daných vzorků. Pro tento účel bylo použito několik hodnot odečtených přímo ze změřené křivky síla vs. deformace v kombinaci s empirickými vztahy získanými z literatury. Pro vyhodnocení určitých lomových charakteristik byla použita i integrace změřených křivek do maximální hodnoty změřené síly (F_m). Takto získaná plocha pod křivkou určuje potřebnou energii pro porušení vzorku (E_{SPT}). Tento parametr byl vyhodnocen pro všechny změřené vzorky v závislosti na teplotě a také bylo provedeno srovnání energie z SPT měření s energií získanou z optimalizovaných křivek. Dalším lomovým parametrem, který byl vyhodnocen, bylo kritické přetvoření na základě empirického vztahu prezentovaného Mao et al. Pro vyhodnocení kritického přetvoření byla připravena závislost na lomové energii, která byla proložena lineární funkcí s přesností kolem 90%. Jako poslední lomová charakteristika byla vyhodnocena hodnota lomové houževnatosti J_{IC} , která definuje odpor materiálu vůči iniciaci a růstu trhliny. K vyhodnocení této lomové charakteristiky byly opět použity empirické vztahy z literatury. Vyhodnocení má však pouze informativní charakter, protože prezentované vztahy byly zjištěny na jiných typech vzorků a za jiných podmínek. Pro ověření platnosti těchto vztahů na vzorky použité v tomto případě by bylo minimálně potřeba provést výpočetní analýzu ve stejném duchu jako pro zjišťování mechanických vlastností popsanou v předešlém odstavci, nebo další experimentální měření zaměřené na zkoumání lomových charakteristik. Jak je z prezentovaných výsledků lomové houževnatosti vidět (viz Obr. 6-34 a Obr. 6-35), při použití některých empirických vztahů dochází k záporným hodnotám lomové houževnatosti, což není reálné. Tyto výsledky jen potvrzují, že není možné používat empirické vztahy bez vlastního ověření.

7 DISKUZE

Problematika odstraňování okují z povrchu při tepelném zpracování oceli je složitý a náročný proces, který vyžaduje velké množství informací a rozborů. Protože je tato problematika velice široká, bylo vyvinuto mnoho metod a přístupů k jejímu řešení. Aby bylo možné zlepšit konečnou kvalitu povrchu po procesu odstraňování okují je potřeba věnovat pozornost jednotlivým metodám, analyzovat je a na základě získaných informací zvýšit jejich efektivitu. Zvýšení efektivity znamená optimalizaci samotného procesu odstraňování okují za účelem dosažení lepší kvality povrchu výrobku při nižší energetické a finanční náročnosti. Aby bylo možné dosáhnout těchto cílů, je nezbytně nutné pochopit jak samotnou problematiku odstraňování okují, tak problematiku jejich vzniku a jejich vlastností.

Tato práce je zaměřená na nejpoužívanější metodu odstraňování okují, kterou je vysokotlaké hydraulické odstraňování okují. Podle samotného názvu, kterým je kvalifikace mechanismů hydraulického odstranění okují, je patrné zaměření této práce. Hlavní cíl byl stanoven dle důležitosti a nutnosti přinést relevantní výsledky a komplexní pohled na proces odstraňování okují zkoumanou metodou a také přinést informace o chování a vlastnostech zvolených typů okují. Pro splnění všech těchto cílů byly použity experimentální metody měření v kombinaci s výpočtovými analýzami prováděnými na základě konečnoprvkové metody. Všechna tato experimentální měření a výpočetní analýzy byly připraveny pro hlubší popis zkoumaných jevů a jejich lepší pochopení. Tato práce byla rozdělena na dvě hlavní části, a to v duchu komplexního přístupu k řešení této problematiky, který byl nastíněn v úvodu. První část práce byla v několika krocích věnována rozboru a studiu vysokotlakého vodního paprsku a faktorům, kterými je možné ho ovlivňovat. V prvním kroku bylo provedeno experimentální měření základních charakteristik, definujících vodní paprsek. Těmito charakteristikami jsou součinitel přestupu tepla a impaktní tlak. Součinitel přestupu tepla reprezentuje teplotní složku vodního paprsku a impaktní tlak definuje mechanický vliv vodního paprsku. Obě tyto charakteristiky byly zkoumány na standardním (nepulzujícím) a pulzujícím vodním paprsku při hodnotách tlaku vody uvnitř hydraulické soustavy 15 MPa, 30 MPa a 45 MPa. Výsledky experimentálního měření při těchto okrajových podmínkách přinesly několik zajímavých závěrů. Vliv typu vodního paprsku v kombinaci s velikostí tlaku vody uvnitř hydraulické soustavy neměl zásadní vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla. Tento závěr není překvapující, protože zvýšení tlaku by neměl mít vliv na teplotní složku vodního paprsku, součinitel přestupu tepla by se změnil, pokud by byla změna tlaku vody

spojená i se změnou průtoku, což v tomto případě nebylo uvažováno. Hodnoty součinitele přestupu tepla se však významně nelišily ani mezi standardním typem vodního paprsku a pulzujícím vodním paprskem. Předpoklad při tomto měření byl takový, že součinitel přestupu tepla pro pulzující vodní paprsek by měl být o něco vyšší než u standardního vodního paprsku a to z toho důvodu, že pulzující vodní paprsek se skládá z většího počtu samostatných kapek vody, tím pádem tento vodní paprsek má větší plochu a měl by proto mít i větší teplotní vliv. Tento předpoklad se povedlo prokázat jen nepatrně a to tím, že maximální hodnota součinitele přestupu tepla pro pulzující vodní paprsek byla nad hodnotou $55\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ pro tlak 40 MPa i pro tlak 30 MPa na rozdíl od standardního vodního paprsku. V případě výsledků z měření impaktního tlaku byla získána předpokládaná lineární závislost mezi hodnotou impaktního tlaku a velikostí tlaku vody uvnitř hydraulické soustavy pro oba typy vodního paprsku. Pro standardní typ vodního paprsku dosahovaly změřené hodnoty impaktního tlaku zhruba o $0,5\text{ MPa}$ vyšších hodnot, dále byla stopa vodního paprsku podstatně stabilnější než pro pulzující vodní paprsek. Proměnná šířka pulzujícího vodního paprsku potvrdila předpoklad nesourodého a rozptýleného vodního paprsku složeného ze samostatných vodních kapek. Nižší hodnoty impaktního tlaku pro pulzující vodní paprsek mohly být způsobeny použitím vodního stabilizátoru ve vodní komoře umístěného před vstupem do trysky. Základní funkcí stabilizátoru je zrovnoměnit a stabilizovat proud vody před vstupem do trysky, což mohlo vést v případě pulzujícího vodního paprsku k nežádoucímu ovlivnění a tím i snížení konečné hodnoty impaktního tlaku. Při dalším studiu pulzujícího vodního paprsku by bylo dobré ověřit vliv stabilizátoru na hodnotu impaktního tlaku. Dalším krokem v této části práce byla aplikace hodnot součinitele přestupu tepla a impaktního tlaku jako okrajových podmínek do výpočtové analýzy. Výpočtová analýza byla rozdělena na zkoumání teplotního vlivu vodního paprsku prostřednictvím součinitele přestupu tepla a mechanického vlivu způsobeného impaktním tlakem. Obě tyto složky vodního paprsku byly zkoumány z makro a mikro hlediska. Mikro hledisko nahrazovalo pulzující vodní paprsek jednou kapkou vody, makro hledisko zkoumalo vliv vodního paprsku jako celku. Výsledky výpočtové analýzy překvapivě potvrdily trendy vlivů jednotlivých parametrů vodního paprsku získané z experimentálního měření, i když nebyly použity stejné hodnoty okrajových podmínek. Výsledky pro makro hledisko odhalily větší vliv impaktního tlaku na napjatost ve vrstvě okují. U mikro hlediska tomu bylo naopak. Oba tyto výsledky korespondovaly se změřenými výsledky, kdy pro standardní vodní paprsek dosahovaly vyšších hodnot impaktního tlaku a jevil se tedy výraznější než změřené hodnoty součinitele

přestupu tepla. Ty byly pro pulzující vodní paprsek naopak stabilnější. Tyto výsledky je však potřeba ověřit při dalším zkoumání za použití stejných okrajových podmínek a při uvažování konkrétních mechanických vlastností, které mají zásadní vliv na výslednou napjatost ve vrstvě okují. Dále byla provedena výpočtová simulace hydraulického odstraňování okují, která simulovala skutečné odkujovací experimenty na dvou typech vzorků. První vzorek byl připraven z konstrukční oceli, na které vznikají okuje, které se relativně dobře odstraňují. Druhý vzorek reprezentoval obtížně odstranitelné okuje, které vznikají na ocelích s vyšším obsahem křemíku. Pro výpočtovou analýzu byly použity experimentálně změřené hodnoty impaktního tlaku a součinitele přestupu tepla. Na těchto dvou typech vzorků byl zkoumán teplotní a mechanický vliv vodního paprsku. Z výsledků bylo zjištěno, že napjatost způsobená teplotním gradientem (teplotní složka vodního paprsku) ve vrstvě okují byla vyšší u vzorků z křemíkové oceli než u vzorků z konstrukční oceli. To bylo způsobeno uvažovanými fyzikálními vlastnostmi, kdy tepelná vodivost okují pro konstrukční ocel dosahovala přibližně trojnásobně vyšších hodnot. Pro vzorky z konstrukční oceli byly uvažovány vlastnosti okují z literatury, které odpovídaly wüstitu. U vzorků z křemíkové oceli byly uvažovány vlastnosti okují pro silikon. Získané hodnoty napjatosti vlivem teplotního gradientu byly tedy silně ovlivněny zvolenými fyzikálními vlastnostmi. Uvažování jiných hodnot tepelné vodivosti, které budou ve skutečnosti ovlivněny podstatně rozmanitějším složením okují, může tento výsledek zvrátit. Dále bylo zjištěno, že napjatost vlivem teplotního zatížení vyvolalo vyšší hodnoty napětí podél okují, což má zásadní vliv na porušování okují.

Posledním krokem v této části práce byla analýza vybraných komponent hydraulické soustavy na konečné charakteristiky vodního paprsku. Tato část byla opět realizována experimentálním měřením a podpořena výpočtovým modelováním. Mezi vybranými komponentami byl kolektor v třech různých konfiguracích a dva typy stabilizátorů. V prvním případě byla pro kolektor uvažována přímá část potrubí, ve druhém případě bylo uvažováno potrubí se zahnutím 90° a v posledním případě byl použit válcový kolektor s průměrem 125 mm a délkou 300 mm. Jako stabilizátory byly zvoleny dva typy, které se od sebe lišily designem. Starší typ (typ A) měl ploché zakončení a uvnitř byl rozdělen několika žebry, které byly v ose stabilizátoru spojeny kuželem. Konstrukce druhého typu stabilizátoru (typ B) měla sférické zakončení a uvnitř měla několik žebér bez kužele. Experimentální měření jednotlivých konfigurací připravených z různých typů kolektorů v kombinaci se stabilizátory bylo realizováno při tlaku vody v hydraulické soustavě 25 MPa a 10 MPa. Výsledkem

experimentálního měření bylo prostorové rozložení impaktního tlaku jednotlivých konfigurací. Z vyhodnocených výsledků bylo zjištěno, že volba typu kolektoru může způsobit rozdíl v impaktním tlaku až několik procent. V tomto případě činil rozdíl mezi přímým a válcovým kolektorem 6,2 % ve prospěch přímého kolektoru. Tento výsledek byl změřen při tlaku vody 25 MPa. Při tlaku 10 MPa byl tento rozdíl menší a průměrně dosahoval rozdílu 2,1%. Z experimentálního měření bylo dále zjištěno, že konfigurace se stabilizátorem typu A dosahovaly rovnoměrnějšího rozložení impaktního tlaku a zároveň tento typ stabilizátoru nebyl tolik citlivý na typ kolektoru. Změřené výsledky byly pro ověření a hlubší analýzu použity ve výpočtové simulaci metodou CFD. Pro výpočtové analýzy byly připraveny odpovídající proudové domény, které reprezentovaly jednotlivé konfigurace kolektorů se stabilizátory. CFD analýzy byly rozděleny na zkoumání proudění uvnitř odpovídající proudové domény a na vliv polohy stabilizátoru při uvažování válcového kolektoru. Výsledky získané metodou CFD, přinesly prostorový pohled na proudění uvnitř kolektoru a stabilizátoru. Výpočtová analýza rovněž potvrdila výsledky experimentálního měření, a to že kolektor v kombinaci se stabilizátorem významně ovlivňuje charakteristiky vodního paprsku. Dále bylo potvrzeno zjištění, že stabilizátor A dosahoval rovnoměrnějšího rozložení vodního paprsku (kruhové rozložení rychlosti proudu) na rozdíl od stabilizátoru B (eliptické rozložení rychlosti). Z výsledků získaných CFD analýzou byl vyhodnocen bezrozměrný parametr, tzv. ztrátový koeficient, který charakterizoval odpor dané konfigurace. Nejvyšších hodnot ztrátového koeficientu a tedy největší odpor způsoboval válcový kolektor s oběma typy stabilizátorů. Nejnižších hodnot dosahovalo přímé potrubí. Výsledky ztrátového koeficientu tedy přímo potvrdily výsledky experimentálního měření, když stejné konfigurace dosahovaly nižších resp. vyšších hodnot impaktního tlaku. Hodnoty ztrátového koeficientu pro kombinaci všech typů kolektorů a stabilizátoru typu A dosahovaly vyrovnaných hodnot, což potvrzuje lepší stabilitu stabilizátoru typu A. Výpočtová analýza vlivu polohy stabilizátoru byla prováděna pro konfiguraci válcového kolektoru se stabilizátorem typu B. Poloha stabilizátoru byla uvažována ve třech pozicích. První pozice byla referenční, to znamená taková jako při experimentálním měření, druhá a třetí pozice spočívala v posunutí stabilizátoru ve směru proudu. CFD simulace byla prováděna pro tlak vody 25 MPa a 20 MPa. Vyhodnocení výsledků probíhalo ve stejném duchu, jako tomu bylo v předchozím případě. Bylo tedy vyhodnocováno rozložení rychlosti na výstupu a také byl vyhodnocen ztrátový součinitel jednotlivých poloh stabilizátoru. Jako nejvhodnější poloha stabilizátoru uvnitř kolektoru byla na základě výsledku prokázána referenční poloha. Ta

dosahovala nejrovnoměrnějšího rozložení rychlosti proudu a zároveň nejnižšího ztrátového koeficientu. Naproti tomu byla poloha stabilizátoru v nejnižší uvažované pozici. Získané výsledky jednoznačně potvrzují předpoklad o významnosti volby kolektoru, typu stabilizátoru a jeho poloze. Změřené a vypočtené výsledky však nemusí platit při jiné volbě odkujovací trysky nebo jiném režimu v kombinaci s tlakem vody. Proto je dobré při volbě stabilizátoru a vodní komoře provést citlivostní analýzu na parametry hydraulické soustavy a vybrat tak jejich vhodnou kombinaci.

Jak již bylo uvedeno, tuto práci je možné rozdělit na dvě části podle zkoumaných charakteristik. První část byla věnována charakteristikám vodního paprsku. Druhá část byla věnována neméně důležitým charakteristikám, jakými jsou materiálové charakteristiky resp. materiálové a fyzikální vlastnosti okují. Zkoumání bylo prováděno jak experimentálními metodami, tak výpočtovou a optimalizační procedurou. Opět byla tato část práce analyzována v několika postupných krocích. Prvním krokem bylo experimentální zkoumání rychlosti růstu okují v laboratorních podmínkách. Toto měření bylo prováděno na několika vzorcích z běžné konstrukční oceli o rozdílných tloušťkách. Výsledkem těchto měření byla zjištěna rychlost růstu okují při daných podmínkách, která činila 0,008 mm/min. Tento výsledek je však silně vázán podmínkami vytvořenými v Laboratoři přenosu tepla a proudění, kde bylo měření prováděno. Je však zároveň užitečným poznatkem při tvorbě okují v těchto podmínkách na podobném typu oceli. Pro samotnou analýzu mechanických vlastností okují byla zvolena metoda „Small Punch Test“, která funguje na protlačování malých vzorků, povětšinou kruhového tvaru, při konstantní hodnotě síly nebo konstantní hodnotě posunutí. Pro experimentální měření okují byla zvolena možnost konstantního posunutí, která představuje alternativu tahové zkoušky. Vzorky pro experimentální měření byly vyrobeny ze dvou typů oceli (konstrukční ocel, ocel s vyšším obsahem křemíku) a to ze stejných důvodů jako tomu bylo při simulaci odkujovacího procesu. A to proto, aby bylo možné získat další informace o rozdílném chování okují těchto dvou typů oceli. Okuje na těchto dvou typech vzorků byly připraveny v elektrické peci při teplotě 1000°C a okolní atmosféře. Struktura vzorků se lišila typem oceli a délkou oxidace. Pro zjištění chemického složení vytvořených okují byla připravena kvalitativní fázová analýza. Ta byla provedena tzv. rentgenovou práškovou difrakcí, na základě které byl vytvořen obraz o složení jednotlivých chemických sloučenin odpovídajících typů vzorků. Na základě této analýzy tedy byly jednoznačně určeny chemické sloučeniny tvořící okuje a jejich fyzikální vlastnosti. Bylo tedy zjištěno, že okuje připravené na vzorcích z konstrukční oceli byly složeny zejména z magnetitu a hematitu. Okuje

připravené na vzorcích z křemíkové oceli obsahovaly všechny tři základní chemické sloučeniny, wüstit, hematit a magnetit. Pro jednotlivé chemické sloučeniny byly vyhodnoceny jejich hustoty a krystalové mřížky. Na základě získaných informací o krystalových mřížkách z kvalitativní analýzy bylo možné vyslovit předpoklad vysvětlující chování okují odpovídajících typů vzorků. Okuje připravené z konstrukční oceli obsahovaly nejvyšší podíl hematitu, který má hexagonální mřížku a tedy rozdílnou od základního materiálu, který má kubickou mřížku. Tento rozdíl v mřížce může mít podíl na nižší vazbě mezi vrstvou okují a základním materiálem a tím může dojít k jednoduššímu porušování okují u tohoto typu oceli. U okují připravených na křemíkové oceli byly všechny chemické sloučeniny. Z Lechatelierova principu je známo, že wüstit a magnetit jsou nejbližší základnímu materiálu a zároveň bylo z fázové analýzy zjištěno, že mají kubickou mřížku stejně jako základní materiál, proto mohou vytvářet silnější vazby mezi vrstvou okují a základním materiálem. To může přispívat k těžšímu odstraňování okují z povrchu oceli. Je zajímavé, že z fázové analýzy nebyly zjištěny žádné oxidy křemíku ve vrstvě okují. Tato skutečnost mohla být způsobena oxidačními podmínkami a chemickým složením oceli. Analýza získaných typů okují byla tedy provedena na základě SPT měření při teplotách od 600°C do 880°C na vzorcích, které obsahovaly základní materiál s vrstvou okují. Typickým výsledkem SPT měření je závislost síly na deformaci. Aby bylo možné z této závislosti zjistit základní mechanické vlastnosti, jako jsou modul pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti, byla připravena optimalizace materiálových parametrů zvoleného materiálového modelu (Chabocheův materiálový model) na základě křivek síla vs. deformace. Mezi optimalizované materiálové parametry patřily čtyři koeficienty Chabocheova modelu, modul pružnosti a koeficient tření mezi keramickou kuličkou a vzorkem. Po provedení optimalizace byly vyhodnoceny potřebné materiálové vlastnosti okují při teplotách 600°C až 880°C (viz Tab. 6-9 až Tab. 6-12). Zpracování změřených křivek spočívalo v dalším vyhodnocení, které bylo provedeno na základě empirických vztahů získaných z literatury. Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti získané z optimalizační analýzy byly srovnány se stejnými hodnotami získanými pomocí empirických vztahů, aby tak mohla být ověřena jejich použitelnost. Toto srovnání ukázalo, že veličiny získané optimalizací a z empirických vztahů spolu dobře korelují pro vzorky bez okují, u vzorků s okujemi byly rozdíly v optimalizovaných a empirických hodnotách významně rozdílné. Tento výsledek potvrdil původ empirických vztahů, které byly připraveny pouze pro ocelové vzorky. To znamená, že je nezbytně nutné při použití empirických vztahů pokaždé ověřit jejich platnost a respektovat podmínky, za

kterých byly zjištěny. Pomocí dalších empirických vztahů byly vyhodnoceny veličiny charakterizující lomové vlastnosti měřených vzorků. Mezi těmito veličinami byly zejména hodnoty kritického přetvoření (dochází k porušení vzorku) a lomová houževnatost J_{Ic} . Obě tyto charakteristiky byly vyhodnoceny a prezentovány i v závislosti na hodnotě energie získané z integrace změřené křivky do maximální hodnoty síly, která reprezentuje energii potřebnou na porušení vzorku a přímo tak souvisí s provedeným SPT měřením. Veličiny vyhodnocené na základě empirických vztahů mají v tomto případě pouze informativní charakter, protože pro jejich relevantnost při aplikaci na měřené vzorky nebyla provedena žádná korelační ani ověřovací analýza.

8 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. Doufám, že se tato práce stane podnětem pro další zkoumání a prohlubování poznatků o problematice odstraňování okují a bude také i určitým návodem jak efektivně a zároveň optimálně řídit tento proces.

LITERATURA

- [1] D. T. BLAZEVIC, Hot strip mill operations, Volume V, Scale, Sun Lakes, Arizona, USA, December, 2005
- [2] 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
- [3] H. ECHSLER, S. ITO, M. SCHÜTZE, Mechanical properties of oxide scales on mild steel at 800 to 1000°C, Oxidation of metal, Vol. 60, Nos. ¾, October 2003
- [4] M. SCHÜTZE, Mechanical properties of oxide scales, Oxidation of metal, Vol. 44, Nos. ½, 1995
- [5] B. PICQUÉ, P-O. BOUCHARD, P. MONTMITONET, M. PICKARD, Mechanical behaviour of iron scale: Experimental and numerical study, Wear, 260, 231-242, 2006
- [6] Y. I. OKA, Y. MUKAI, T. TSUMURA, Mechanical properties and adhesion of oxide films examined by a solid particle impact method at high temperature corrosive environments, Wear, 258, 92-99, 2005
- [7] T. AKIYAMA, H. OHTA, R. TAKAKASHI, Y. WASEDA, J. YAGI, Measurement and modeling of thermal conductivity for dense iron oxide porous iron ore agglomerates in stepwise reduction, ISIJ International, Vol. 32, No. 7, pp. 829-837, 1992
- [8] J. W. FRICK, More efficient hydraulic descaling header designs, MPT International 2/2004, [cit. 01.03.2012] http://www.lechler.de/pdf/descaling_header_designs.pdf
- [9] L. BENDING, M. RAUDANSKÝ, J. HORSKÝ, Descaling with high pressure nozzles, ILLAS-Europe, Zurich, 2-6 September 2001
- [10] M. SCHÜTZE, M. MALESSA, D. RENUSCH, P. F. TORTORELLI, I. G. WRIGHT, R. B. DOOLEY, Mechanical properties and adherence of oxide scales, Materials science forum, Vols. 522-523, pp 393-400, 2006
- [11] M. POHANKA, Technical experiment based inverse tasks in mechanics, závěrečná doktorská práce, LPTP FSI VUT v Brně, 2006
- [12] CHIZOV, V. ANTON, K. TAKAYAMA, The impact of compressible liquid droplet on hot rigid surface. International journal of heat and mass transfer, 47, 1391-1401, 2004
- [13] ANSYS Academic Research, Release12.0, Help System, ANSYS, Inc. <http://www.ansys.com/>
- [14] ČSN EN 1993-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – část 1
- [15] LIENHARD IV, J.H., V LIENHARD V, J.H. A heat transfer text book. Third edition. Cambridge, Massachusetts, U.S.A., Appendix A, 2002
- [16] ČSN 41 1366, Ocel obvyklých jakostí pro vyšší teploty a žárovevná
- [17] EN 10028-6, 1.8888 Svařitelná jemnozrnná zušlechtěná ocel

- [18] TAKEDA. M, ONISHI. T, NAKAKUBO. S, FUJIMOTO. S, Physical properties of iron-oxide scales on Si-containing steels at high temperatures. Material Transactions, Vol. 50. No. 9, pp. 2242 to 2246, 2009
- [19] ANSYS Academic Research, Release13.0, CFX Help, ANSYS, Inc. <http://www.ansys.com/>
- [20] ČSN 41 1308, Ocel obvyklých jakostí k tažení a tváření za studena
- [21] 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
- [22] L. IVÁN, P. DYMÁČEK, Optimalizace materiálových parametrů při simulaci protlačovací zkoušky na miniaturních discích, ANSYS konference, Frymburk 6.-8. Října 2010
- [23] PENG DU, A study of Influence Factors of Small Punch Test to Estimate the Yield Strength by Energy Method, Determination of mechanical properties of materials by small punch and other miniature testing techniques, Mezinárodní konference SSTT, Ostrava, 2010, [cit. 04. 04. 2012]
http://mmresearch.eu/Obr/37_Study%20on%20Influence.....pdf
- [24] J. KAMEDA, X. MAO, Small-punch and TEM-disc testing techniques and their application to characterization of radiation damage, Journal of materials science, 27, 983-989, 1992
- [25] J. H. BULLOCH, A study concerning material fracture toughness and some small punch test data for low alloy steels, Engineering failure analysis, 11, 635-653, 2004
- [26] L. STRÁNSKÝ, S. POSPÍŠILOVÁ, Krystalografie,[cit. 10. 04. 2012]
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/bum/03Krystalografie%20studijni%20opora.pdf>
- [27] F. DOBEŠ, K. MILIČKA, Application of small punch test for estimation of fracture properties of Fe-Al alloys, Institute of physics of materials, Academy of science, Brno, 2010, [cit. 10. 04. 2012]
http://www.mmvyzkum.cz/Obr/17_Application%20of%20Small....pdf
- [28] M. VLK, Z. FLORIAN, Mezní stavy a spolehlivost, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Brno, 2007
- [29] KAISHU GUAN, LI HUA, QIONGQI WANG, XIAOUHI ZOU, MING SONG, Assesment of toughness in long term service CrMo low alloy steel by fracture toughness and small punch test, Nuclear engeneering and design, 241, 1407-1413, 2011
- [30] YOUNG WHA MA, KEE BONG YOON, Assesment of tensile strenght using small punch test for transversely isotropic aluminium 2024 alloy produced by equal channel angular pressing, Materials science and engeneering, A 527, 3630-3638, 2010
- [31] D. FINARELLI, M. ROEDIG, F. CARSUGHI, Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation enviroment with 530 MeV protons, Journal of nuclear materials, 328, 146-150, 2004

- [32] R. HALAMA, H. ROBOVSKÁ, a kol., Stanovení konstant Chabocheova nelineárního kinematického modelu zpevnění, 9th International scientific conference, Applied mechanics, Malenovice, Czech Republic, 2007
- [33] R. HALAMA, Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů, Habilitační práce, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009
- [34] P. Dymáček, K. Milička, F. Dobeš, Analysis of potential factors influencing the relation between small punch and conventional creep test, 1st International conference SST, Aug. 31 – Sept. 2 2010
- [35] ANSYS Academic Research, Release14.0, Help System, ANSYS, Inc. <http://www.ansys.com/>

PUBLIKACE AUTORA

- [1] HRABOVSKÝ, J.; HORSKÝ, J. Influence of the water chamber and position of the stabilizer on the impact pressure at high pressure descaling, Conf. Porc. Metal 2012, pp.1-6, ISBN 978-80-87294-29-1, (2012), 2012 Tanger Ltd. Ostrava, článek ve sborníku, akce: METAL 2012: 21st International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, 23.05.2012-25.05.2012
- [2] KVAPIL, J.; HRABOVSKÝ, J.; POHANKA, M. Water chamber geometry and stabilizer construction effect on water pressure distribution of high pressure descaling nozzles, Experimental Fluid Mechanics 2011, pp.394-404, ISBN 978-80-7372-784-0, (2011)
- [3] HRABOVSKÝ, J.; HORSKÝ, J. Numerical Simulation of the High Pressure Hydraulic Descaling, Thompson and Reuters, pp.95-100, ISBN 978-80-87294-17-8, (2011), Tanger s.r.o.
- [4] VAVREČKA, L.; HRABOVSKÝ, J.; HORSKÝ, J. Experimentální výzkum a numerická simulace procesu hydraulického odstraňování okují, Hutnické listy, Vol.LXIV, (2011), No.2, pp.4-11, ISSN 0018-8069, Hutnické listy
- [5] HRABOVSKÝ, J.; HORSKÝ, J. Numerical Simulation of the High Pressure Hydraulic Descaling, Sborník konference, pp.95-100, ISBN 978-80-87294-15-4, (2010), Tanger s.r.o. článek ve sborníku, Rožnov pod Radhoštěm, 18.05.2010-20.05.2010
- [6] HORSKÝ, J.; HRABOVSKÝ, J.; KVAPIL, J. Měření teplot ve svítilnách SK120, Škoda Ml. Boleslav, zpráva
- [7] HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P.; KVAPIL, J.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; LUKS, T.; SLABÁKOVÁ, J. Laboratory Measurements of HTC on Nozzle Array, Usiminas- Brasil, zpráva
- [8] HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; BOHÁČEK, J., Heat Transfer Tests, zpráva
- [9] HORSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; KOTRBÁČEK, P.; BOHÁČEK, J.; BELLEROVÁ, H.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M., Run-Out Table Cooling - 1.Upper Configuration, 2.Bottom Conf., voestalpine Grobblech, zpráva
- [10] HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; BOHÁČEK, J. Spray Nozzle Testing for HTC Calculation, ArcelorMittal Chicago, USA, zpráva
- [11] RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; BELLEROVÁ, H.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M., Fundamental Study of Nozzle Characteristics for Accelerated Cooling, POSCO- Korea, zpráva
- [12] HORSKÝ, J.; POHANKA, M.; HRABOVSKÝ, J.; HNÍZDIL, M.; LUKS, T., Optimisation of Work Roll Cooling, voestalpine Stahl, Siemens VAI, zpráva

- [13] HORSKÝ, J.; HRABOVSKÝ, J.; RAUDENSKÝ, M.; KOTRBÁČEK, P.; POHANKA, M.; STRÁNSKÝ, M., Návrh kolektorů pro chlazení válců a návrh sekundárního ostříku okují pro dva kalibry profily Trilex 8,5"N na těžké profilové trati, 1.etapa, zpráva
- [14] HORSKÝ, J.; KOTRBÁČEK, P.; BOHÁČEK, J.; BELLEROVÁ, H.; HRABOVSKÝ, J., Spolupráce v rámci řešení úkolu H-03-103/881 "Odlévání kruhových sochorů kul. 130mm a následné ověření výroby trubek, zpráva

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Název
A	[m ²]	plocha
A(T)	[-]	konstanta (rovnice 13)
A ₀	[m ²]	celý povrch
A _{sep}	[m ²]	oddělený povrch (póry, dutiny, atd.)
c(t,T)	[m]	velikost vady
C ₁	[Pa]	konstanta (rovnice 29, 30)
C ₂	[Pa]	konstanta (rovnice 30)
c _p	[J/kgK]	měrná tepelná kapacita
E	[Pa]	modul pružnosti
E _f	[J]	lomová energie
E _f	[Pa]	modul pružnosti v tahu pro okuje
E _{SPT}	[J]	lomová energie z SPT zkoušky
F	[N]	síla
F _e	[N]	síla na mezi kluzu
F _m	[N]	síla na mezi pevnosti
G	[Pa]	modul pružnosti ve smyku
G _f	[Pa]	modul pružnosti ve smyku pro okuje
H	[m]	vzdálenost
J _{lc}	[J/m ²]	lomová houževnatost
K	[-]	faktor růstu okují
K _{lc}	[MPa m ^{1/2}]	lomová houževnatost
k _p	[-]	konstanta oxidace železa
m	[kg]	hmotnost
p	[Pa]	tlak
q	[W/m ²]	hustota tepelného toku
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas
t ₀	[m]	počáteční tloušťka
t _{0x}	[m]	počáteční tloušťka
u _f	[m]	deformace při protržení vzorku
u _m	[m]	deformace na mezi pevnosti
u _{tot}	[m]	celková deformace
V	[m ³]	objem
W	[%]	hmotnostní podíl
Zkratka	Jednotka	Název
α	[K ⁻¹]	teplotní roztažnost (rovnice 17)
α	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla (rovnice 18)
α	[-]	konstanta (rovnice 27, 28)
α	[-]	kinematický tenzor (beck stress tensor)



β	[-]	konstanta (rovnice 28)
γ	[-]	smykové přetvoření
γ_1	[-]	konstanta (rovnice 29, 30)
γ_f	[-]	smykové přetvoření okují
γ_i	[J/m ²]	lomová energie materiálu
δ	[m]	kritická délka trhliny
δ_{0x}	[m]	tloušťka okují
ε	[-]	přetvoření
ε_c (m)	[-]	kritické přetvoření
ε_f	[-]	přetvoření okují
ε_{qf}	[-]	lomové přetvoření
ε^{pl}	[-]	tenzor plastického přetvoření
θ	[°C]	teplota
η (m)	[-]	konstanta materiálových vlastností
λ	[W/mK]	tepelná vodivost
μ	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg/m ³]	hustota
σ_a	[Pa]	povrchové napětí
σ_f	[Pa]	normálové napětí
σ_u	[Pa]	mez pevnosti
σ_x	[Pa]	napětí
σ_y	[Pa]	mez kluzu
τ_f	[Pa]	smykové napětí
v	[ms]	rychlost
ω (t,m)	[-]	parametr poškození

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Chemické složení vrstvy okují.....	13
Obr. 3-2 Procentuální růst vrstev okují v závislosti na teplotě (dle Davida T. Blaževiče [1])	15
Obr. 3-3 Změny růstu okují (dle Davida T. Blaževiče [1])	15
Obr. 3-4 Proces porušování vrstvy okují v průběhu impaktní zkoušky (dle Y. I. Oka [6])	18
Obr. 3-5 Teplotní vodivost odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7])	20
Obr. 3-6 Tepelná vodivost odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7])	20
Obr. 3-7 Charakteristiky odkujovacích trysek a vodního paprsku (dle J. W. Fricka [8])	21
Obr. 3-8 Vliv výšky ostříku na impaktní tlak (dle J. W. Fricka [8])	23
Obr. 3-9 Vliv vodního tlaku a průtoku na impaktní tlak (dle J. W. Fricka [8])	23
Obr. 3-10 Diagram EPRI (dle M. Schütze a kol. [10]).....	24
Obr. 3-11 Mechanizmy porušování vrstvy okují a odpovídající vztahy pro η , ω (dle M. Schütze a kol. [10]).....	25
Obr. 4-1 Standardní vodní paprsek.....	28
Obr. 4-2 Pulzující vodní paprsek.....	28
Obr. 4-3 Experimentální zařízení pro měření HTC v Laboratoři přenosu tepla a proudění....	30
Obr. 4-4 Měření HTC při standardním typu vodního paprsku	31
Obr. 4-5 Měření HTC při pulzujícím typu vodního paprsku.....	31
Obr. 4-6 Hodnoty HTC pro standardní vodní paprsek	33
Obr. 4-7 Změřené hodnoty HTC pulzujícího paprsku.....	33
Obr. 4-8 Experimentální měření impaktního tlaku pro danou trysku.....	35
Obr. 4-9 Experimentální měření impaktního tlaku pro pulzující vodní paprsek.....	35
Obr. 4-10 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 15 MPa	37
Obr. 4-11 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 30 MPa	37
Obr. 4-12 Změřené hodnoty impaktního tlaku při tlaku 45 MPa	37
Obr. 4-13 Změřené hodnoty impaktního tlaku	38
Obr. 4-14 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 15 MPa.....	38
Obr. 4-15 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 30 MPa.....	38
Obr. 4-16 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci a tlaku 45 MPa.....	39
Obr. 4-17 Změřené hodnoty impaktního tlaku při pulzaci	39
Obr. 4-18 Model geometrie pro makro hledisko	42
Obr. 4-19 Model topologie pro makro hledisko (detail)	42
Obr. 4-20 Model geometrie pro mikro hledisko.....	43
Obr. 4-21 Model topologie pro mikro hledisko.....	43
Obr. 4-22 Průběh funkce HTC vodního paprsku.....	45
Obr. 4-23 Průběh funkce impaktního tlaku vodního paprsku	45
Obr. 4-24 Průběh funkce HTC vodní kapky.....	45
Obr. 4-25 Průběh funkce impaktního tlaku vodní kapky	45
Obr. 4-26 Průběh teploty ve vzorku pro makro hledisko	46
Obr. 4-27 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko.....	46
Obr. 4-28 Napětí ve směru Y (ve směru působení impaktního tlaku) ve vzorku pro makro hledisko.....	47
Obr. 4-29 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko.....	47
Obr. 4-30 Průběh teploty ve vzorku pro mikro hledisko	48
Obr. 4-31 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko.....	48
Obr. 4-32 Napětí ve směru Y (ve směru působení impaktního tlaku) ve vzorku pro makro hledisko.....	49
Obr. 4-33 Smykové napětí ve vzorku pro makro hledisko.....	49

Obr. 4-34 Vyhodnocení složek napětí v základním materiálu pro všechny analýzy	50
Obr. 4-35 Vyhodnocení složek napětí v okujích pro všechny analýzy	50
Obr. 4-36 Model geometrie	52
Obr. 4-37 Model topologie (detail)	52
Obr. 4-38 Změřený průběh HTC (teplotní zatížení).....	55
Obr. 4-39 Změřený průběh impaktního tlaku (mechanické zatížení).....	55
Obr. 4-40 Průběh teplot ve vzorcích.....	55
Obr. 4-41 Výsledky teplotně – napjatostní analýzy	56
Obr. 4-42 Výsledky strukturní analýzy	56
Obr. 5-1 Konstrukce stabilizátoru typu A	64
Obr. 5-2 Konstrukce stabilizátoru typu B.....	64
Obr. 5-3 Přímý kolektor 0°	65
Obr. 5-4 Zahnutý kolektor 90°	65
Obr. 5-5 Válcový kolektor.....	65
Obr. 5-6 Konfigurace s přímým kolektorem (0°)	67
Obr. 5-7 Konfigurace se zahnutým kolektorem (90°)	67
Obr. 5-8 Konfigurace s válcovým kolektorem	68
Obr. 5-9 Měření času a sloupce vody na vodní nádrži	68
Obr. 5-10 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 1	69
Obr. 5-11 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 2	70
Obr. 5-12 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 3	70
Obr. 5-13 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 4	70
Obr. 5-14 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 5	71
Obr. 5-15 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 6	71
Obr. 5-16 Zobrazení rozložení impaktního tlaku pro měření číslo 7	71
Obr. 5-17 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 1	72
Obr. 5-18 Zprůměrované hodnoty impaktního tlaku pro typ trysky 2	72
Obr. 5-19 Proudová doména s přímým kolektorem a stabilizátorem A.....	76
Obr. 5-20 Proudová doména s přímým kolektorem a stabilizátorem B	76
Obr. 5-21 Proudová doména se zahnutým kolektorem a stabilizátorem A	76
Obr. 5-22 Proudová doména se zahnutým kolektorem a stabilizátorem B	76
Obr. 5-23 Proudová doména s válcovým kolektorem a stabilizátorem A.....	77
Obr. 5-24 Proudová doména s válcovým kolektorem a stabilizátorem B (poloha stabilizátoru č. 1)	77
Obr. 5-25 Poloha stabilizátoru č. 2 při analýze vlivu polohy stabilizátoru	77
Obr. 5-26 Poloha stabilizátoru č. 2 při analýze vlivu polohy stabilizátoru	77
Obr. 5-27 Model topologie pro přímý i zahnutý kolektor a stabilizátor A.....	78
Obr. 5-28 Model topologie pro přímý i zahnutý kolektor a stabilizátor B.....	78
Obr. 5-29 Model topologie pro válcový kolektor a stabilizátor A	78
Obr. 5-30 Model topologie pro válcový kolektor a stabilizátor B	79
Obr. 5-31 Model okrajových podmínek	80
Obr. 5-32 Výsledky rozložení rychlosti pro stabilizátor A	83
Obr. 5-33 Výsledky rozložení rychlosti pro stabilizátor B.....	84
Obr. 5-34 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro stabilizátor A.....	85
Obr. 5-35 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro stabilizátor B	85
Obr. 5-36 Výsledky rozložení rychlosti pro tlak vody 25 MPa	86
Obr. 5-37 Výsledky rozložení rychlosti pro tlak vody 20 MPa	87
Obr. 5-38 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro tlak vody 25 MPa	88
Obr. 5-39 Srovnání rozložení rychlosti na výstupu pro tlak vody 20 MPa	88
Obr. 6-1 Tloušťka základního materiálu před oxidací	96

Obr. 6-2 Tloušťka základního materiálu po oxidaci.....	97
Obr. 6-3 Hmotnost jednotlivých vzorků před a po oxidaci	97
Obr. 6-4 Tloušťky okují jednotlivých vzorků	98
Obr. 6-5 Experimentální zařízení pro realizaci SPT měření	100
Obr. 6-6 Záznam ohřevu vzorků před SPT	100
Obr. 6-7 Schématické zobrazení uložení vzorku a jeho rozměrů.....	101
Obr. 6-8 Schématické znázornění procesu okujení	102
Obr. 6-9 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku B č.1	104
Obr. 6-10 Opakované měření vzorků typu B č. 1	104
Obr. 6-11 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku A č. 2.....	105
Obr. 6-12 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro typ vzorku A č. 3.....	105
Obr. 6-13 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro základní materiál vzorků typu B	106
Obr. 6-14 Změřené křivky síly v závislosti na deformaci pro základní materiál vzorků typu A	106
Obr. 6-15 Tvar jednotlivých vzorků po SPT měření	109
Obr. 6-16 Vzorky typ B číslo 1 měřeny při teplotě 700°C.....	110
Obr. 6-17 Vzorky typ B číslo 1 měřeny při teplotě 870°C.....	111
Obr. 6-18 Vzorky typ A číslo 3 měřeny při teplotě 600°C	112
Obr. 6-19 Vzorky typ A číslo 3 měřeny při teplotě 800°C	113
Obr. 6-20 Změřené tloušťky základního materiálu	114
Obr. 6-21 Změřené tloušťky vrstev okují	114
Obr. 6-22 Difraktogram pro typ vzorku B číslo 1	116
Obr. 6-23 Difraktogram pro typ vzorku A číslo 2	117
Obr. 6-24 Difraktogram pro typ vzorku A číslo 3	117
Obr. 6-25 Průběh síly v závislosti na deformaci z SPT měření.....	121
Obr. 6-26 Vyhodnocení charakteristických hodnot síly na mezi kluzu a síly na mezi pevnosti	121
Obr. 6-27 Vyhodnocení charakteristických hodnot deformací na mezi kluzu a deformací na mezi pevnosti.....	122
Obr. 6-28 Možnosti vyhodnocení lomové energie z SPT měření	124
Obr. 6-29 Srovnání energií z SPT měření a numerické simulace pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3	124
Obr. 6-30 Srovnání energií z SPT měření pro vzorky typu A číslo 2	125
Obr. 6-31 Srovnání energií z SPT měření a numerické simulace pro neokujené vzorky typu B a typu A	125
Obr. 6-32 Vyhodnocení kritické hodnoty přetvoření v závislosti na lomové energii pro vzorky typu B číslo 1 a typu A číslo 3	126
Obr. 6-33 Vyhodnocení kritické hodnoty přetvoření v závislosti na lomové energii pro neokujené vzorky typu B a typu A	127
Obr. 6-34 Vyhodnocení lomové houževnatosti pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3.....	128
Obr. 6-35 Vyhodnocení lomové houževnatosti pro neokujené vzorky typu B typu A	129
Obr. 6-36 Model geometrie pro neokujené vzorky	133
Obr. 6-37 Model geometrie pro vzorky s vrstvou okují	133
Obr. 6-38 Model topologie pro neokujené vzorky	134
Obr. 6-39 Model topologie pro vzorky typu B číslo 1 a vzorky typu A číslo 3.....	134
Obr. 6-40 Zobrazení počáteční volby parametrů Chabocheova modelu (R. Halama a kol.[32])	136

Obr. 6-41 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro neokujené vzorky typ A	139
Obr. 6-42 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro neokujené vzorky typ B	139
Obr. 6-43 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro vzorky typ A číslo 3	140
Obr. 6-44 Křivky napětí vs. přetvoření z optimalizovaných parametrů pro vzorky typ B číslo 1	140
Obr. 6-45 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro neokujené vzorky typu A	141
Obr. 6-46 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro neokujené vzorky typu B	141
Obr. 6-47 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro vzorky typu A číslo 3	142
Obr. 6-48 Optimalizované a změřené křivky síla vs. deformace pro vzorky typu B číslo 1	142
Obr. 6-49 Zobrazení celkového přetvoření pro neokujené vzorky typu A	143
Obr. 6-50 Zobrazení celkového přetvoření pro neokujené vzorky typu B	143
Obr. 6-51 Zobrazení celkového přetvoření pro vzorky typu A číslo 3	144
Obr. 6-52 Zobrazení celkového přetvoření pro vzorky typu B číslo 1	144
Obr. 6-53 Srovnání hodnoty meze kluzu z optimalizace s hodnotami meze kluzu dle empirického vztahu prezentovaných Mao at al. (rovnice 25)	145
Obr. 6-54 Srovnání hodnoty meze pevnosti z optimalizace s hodnotami meze pevností dle empirického vztahu prezentovaných Mao at al. (rovnice 26)	146
Obr. 6-55 Vyhodnocení závislosti modulu pružnosti na teplotě pro optimalizované vzorky	147
Obr. 6-56 Vyhodnocení koeficientu tření v závislosti na teplotě pro optimalizované vzorky	147
Obr. 6-57 Vyhodnocení závislosti meze kluzu na teplotě pro optimalizované vzorky	148

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Fyzikální a mechanické vlastnosti dle M. Krzyzanowského, J. H. Beynona [2].....	17
Tab. 3-2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vrstvy okují (dle Y. I. Oka [6]).....	19
Tab. 3-3 Hodnoty hustot odpovídajících chemických struktur (dle T. Akiyama a kol. [7]) ...	20
Tab. 4-1 Tabulka experimentů HTC se změřenými veličinami	32
Tab. 4-2 Tabulka experimentů impaktního tlaku se změřenými veličinami	36
Tab. 4-3 Fyzikální a mechanické vlastnosti konstrukční oceli [14][15]	43
Tab. 4-4 Fyzikální a mechanické vlastnosti wüstitu [2][4]	44
Tab. 4-5 Fyzikální a mechanické vlastnosti pro oba typy oceli [16][17].....	53
Tab. 4-6 Fyzikální a mechanické vlastnosti okují [2][4][18]	54
Tab. 5-1 Seznam všech měřených konfigurací a jejich parametry.....	66
Tab. 5-2 CFD analýzy vlivu kolektoru a stabilizátoru	74
Tab. 5-3 CFD analýza polohy stabilizátoru ve válcové vodní komoře	75
Tab. 5-4 Fyzikální vlastnosti vody definované pro proudovou doménu [19]	79
Tab. 5-5 Zkoumané veličiny při CFD analýze vlivu kolektoru a stabilizátoru	81
Tab. 5-6 Zkoumané veličiny při CFD analýze vlivu polohy stabilizátoru	82
Tab. 6-1 Počáteční parametry jednotlivých vzorků.....	94
Tab. 6-2 Změřené parametry jednotlivých vzorků po oxidaci	96
Tab. 6-3 Chemické složení vzorků pro přípravu okují.....	99
Tab. 6-4 Čas a teplota při oxidaci jednotlivých vzorků.....	102
Tab. 6-5 Fázové složení okují pro odpovídající typy vzorků	116
Tab. 6-6 Vypočtené hodnoty hustoty pro jednotlivé typy struktur.....	118
Tab. 6-7 Změřené parametry krystalové mřížky zkoumaných struktur	119
Tab. 6-8 Mechanické vlastnosti uvažované ve výpočtovém modelu	135
Tab. 6-9 Optimalizované parametry pro neokujené vzorky typu A	138
Tab. 6-10 Optimalizované parametry pro neokujené vzorky typu B	138
Tab. 6-11 Optimalizované parametry pro vzorky typu A číslo 3	138
Tab. 6-12 Optimalizované parametry pro vzorky typu B číslo 1	138