

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 260

ISSN 1213-418X

Miroslav Raudenský

HYDRAULICKÉ ODSTRANĚNÍ OKUJÍ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Doc. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

HYDRAULICKÉ ODSTRANĚNÍ OKUJÍ

HYDRAULIC DESCALING

Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení
v oboru
Aplikovaná mechanika



BRNO 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

Ostřík okují, válcování, přenos tepla, dynamický ráz, numerické modelování, teorie parní exploze.

KEY WORDS

Hydraulic descaling, rolling, heat transfer, water hammer effect, numerical modeling, theory of vapour explosion.

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	6
2.1	Intenzita přenosu tepla	6
2.2	Impaktní tlaky	8
2.3	Studium kvality procesu	9
3	NUMERICKÉ MODEL Y	12
3.1	Výpočty MKP	13
3.2	Parní exploze	14
4	DYNAMICKÝ VODNÍ RÁZ	15
4.1	Numerické simulace dopadu kapky	16
5	TEORIE PARNÍ EXPLOZE	16
6	LITERATURA	19
	Abstrakt	21

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Miroslav Raudenský je docentem v Laboratoři přenosu tepla a proudění na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se 27. ledna 1957 v Brně. Po studiu na Střední průmyslová škole v Jedovnicích (1971–1975) pokračoval ve studiu na Fakultě strojní VUT v Brně, specializace Automatizované systémy řízení (1975–1981). V letech 1981 až 1982 pracoval ve Výzkumném ústavu energetických strojů, Brno, zařazení na místě asistenta. Od roku 1982 pokračoval ve studiu vědecké aspirantury na katedře termomechaniky a jaderné energetiky Fakulty strojní zakončeném 12. 12. 1985 obhajobou disertační práce „Řešení přímých a inverzních úloh vedení tepla pomocí kubických splajnů“. Od roku byl 1983 zaměstnán jako odborný pracovník na VUT v Brně. Od roku 1985 pak jako odborný asistent na VUT v Brně. V roce 1992 absolvoval atestaci IIa a v roce 1995 mu byl po habilitačním řízení udělen titul docent v oboru mechanika

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ

Teoretické práce v oblasti inverzních tepelných úloh pro výpočet okrajových podmínek z měření teplot v tělese. Rozvoj klasických minimalizačních přístupů k inverzním úlohám vedení tepla a vývoj nových metod s využitím umělé inteligence (genetické algoritmy a neuronové sítě).

Práce v oblasti studia mechanických vlastností ocelí v polotekutém stavu. Zejména laboratorní experimenty pro stanovení přetvárných odporů ocelí při různém podílu tuhé a kapalné fáze.

Vývoj a optimalizace chladicích systémů používaných především při válcování za tepla. V této oblasti vývoj a experimentální studium chlazení hutních válců a chlazení válcovaného materiálu.

Experimentální studium chlazení při kontinuálním lití ocelí a hliníku. Optimalizace systémů sekundárního chlazení využívajících jedno- a dvoufázové trysky.

Rozvoj teorie ostříku okují na základě numerických modelů a laboratorních experimentů prováděných v Laboratoři přenosu tepla a proudění Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

37 publikací v časopisech

75 příspěvků na konferencích

100 výzkumných zpráv

3 patenty

1 ÚVOD

Rozvoj technologie ostřiku okují v posledních dvou desetiletích je zajímavým příkladem využití vědeckých poznatků v tradičních technologiích používaných bez přehánění po staletí. Proces válcování oceli za tepla byl vždy spojen s problémem oxidace povrchu válcovaného materiálu. Všeobecně je vznik okují považován za významný problém, který způsobuje ztráty materiálu a hlavně snižuje kvalitu povrchu vznikem trhlin, důlků, vzhledovými vadami a dekarbonizací a rovněž má vliv na opotřebení pracovních válců.

Problematika je tedy stará jako válcování samo, přesto se dá tvrdit, že dosud neexistuje ucelená teorie, která by popisovala tepelné a mechanické děje, které vyústí v dobrý nebo špatný výsledek po ostřiku okují. Tento příspěvek má za cíl ukázat, jakými metodami a s jakými výsledky je tato teorie vyvíjena na VUT v Brně.

Ještě před třiceti lety bylo možno v některých válcovnách vidět hromady březového proutí, které se ručně házelo na válcovaný plech a při průchodu válcovací stolicí explozivně odstraňovalo okuje. Význam odkujování začal rychle narůstat teprve v osmdesátých letech dvacátého století s nárůstem požadavků na kvalitu. Vznikl převis nabídky a prodej válcovaného materiálu byl najednou ovlivněn i takovými faktory, jako je nejen kvalita, ale i vzhled povrchu. První konference zaměřená na odstraňování okují se konala v londýnském Institute of Metals v roce 1995 [1]. První příspěvek [2] na této první konferenci shrnoval v té době známé představy o mechanismu odstraňování okují. Tyto koncepty jsou schematicky znázorněny na obr. 1 a je možné je stručně charakterizovat takto:

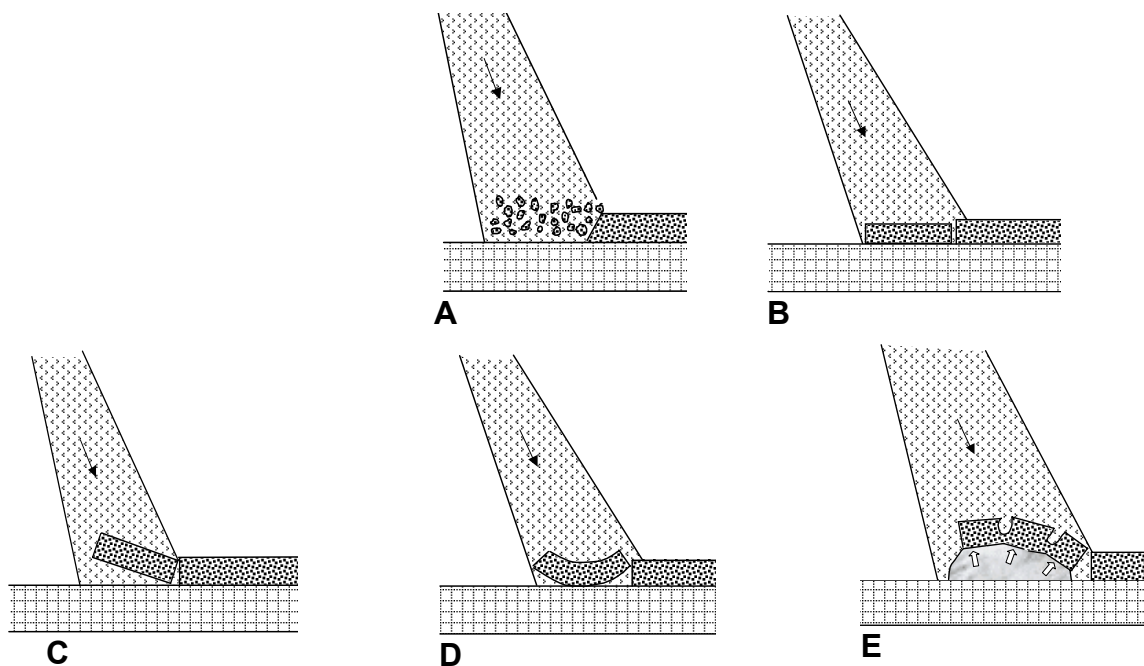
A/ Mechanická síla vysokotlakého paprsku drolí vrstvu okují.

B/ Rozdílná tepelná roztažnost okují a podkladového materiálu působí odtrhávání lamel okují.

C/ Mechanická síla působící z boku na vrstvu okují vyvolá vysoké smykové napětí mezi materiálem a okují, které oddělí okuje.

D/ Teplotní gradient v okuji způsobí její prohýbání a odlupování od podkladu.

E/ Voda, která pod tlakem vniká do puklin v okujích, se rychle vypařuje a vzniklá pára odlupuje okuje od podkladu.



Obr. 1: Koncepty přijímané v 80. letech minulého století pro vysvětlení principu odstranění okují

Publikované koncepty je možné rozdělit na „teplotní“ a „mechanické“. Jednoduchý pokus s ostřikem okují na studeném materiálu prokazuje, že čistě mechanické působení nezanechává na ostříkovaném vzorku výraznější stopy. Čistě tepelné koncepty mají vážné nedostatky, protože při intenzivním chlazení nízkotlakým paprskem nedochází k žádoucímu efektu. Koncept se vznikem páry je zajímavý a byl publikován již v roce 1959 [3]. Autor zde uvádí, že při ostřiku silných vrstev okují (několik milimetrů) po pecním ohřevu jsou v okujích porozity, do kterých se dostává voda, a vznikající pára odlupuje vrstvy okují.

Výzkum hydraulického odstraňování okují začal v Laboratoři přenosu tepla a proudění na VUT v Brně v roce 1998, kdy byla laboratoř vybavena výkonným agregátem poskytujícím tlak až 54 MPa. První práce byly věnovány studiu intenzity přenosu tepla při vysokotlakých ostřicích [4, 5, 6]. V roce 2003 byl pak poprvé publikován základ teorie parní exploze [7], která je na VUT v Brně dále rozvíjena.

2 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Provozní zkušenost, výsledky jednoduchých zkoušek i diskuse odborné veřejnosti vedou k závěru, že účinného odkujení je možno dosáhnout pouze společným tepelně-mechanickým působením vysokotlakého paprsku. Stejně faktory pak musí zahrnovat i teorie popisující proces odkujení. Přesto se vedou spory o tom, zda je dominantní teplotní efekt nebo mechanické působení paprsku. Je zajímavé, že nejuznávanější odborník na americkém kontinentu – David Blazievic – prosazuje koncepci mechanického působení [8]. Jeho teoretické rozbory v publikaci Newton and Descaling vedly k některým experimentům na VUT v Brně, ale ty však nepotvrdily jeho závěry (kap. 2.3).

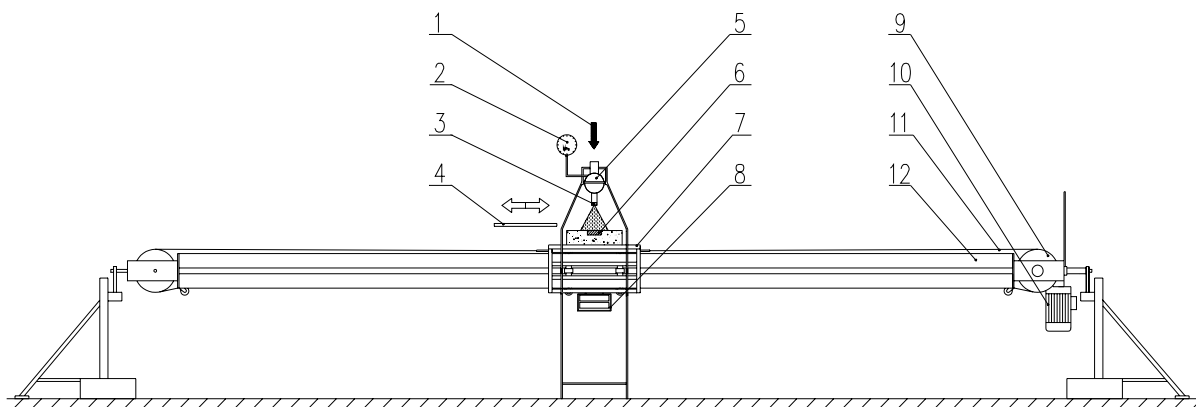
2.1 INTENZITA PŘENOSU TEPLA

Teploty materiálu se při ostřiku okují pohybují kolem 1 000 °C. Pro ostřik jsou používány trysky s plochým vodním paprskem a šířkou dopadové stopy kolem 5 mm. Materiál přitom pod ostřikem prochází rychlostí kolem 1 m/s. Systémy ostřiku okují ve válcovných pracujících s tlaky 100 až 30 MPa (jsou ale zkoušeny systémy s tlakem 240 MPa) a při těchto tlacích jsou výstupní rychlosti vodního proudu až 300 m/s. Povrchová vrstva materiálu je vystavena teplotnímu šoku. Rychlost teplotních změn je možné měřit a vyhodnotit velikosti a průběhy součinitele přestupu tepla na ostříkovaném povrchu. Pro měření intenzity přenosu tepla je využíván laboratorní stand s lineárním pohybem vzorku (obr. 2).

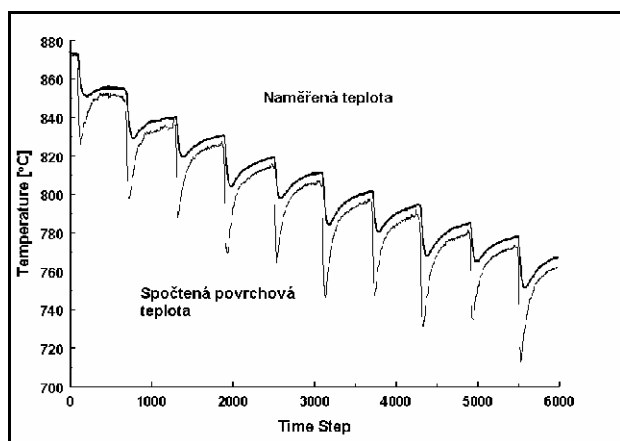
Průběh experimentu je následující:

Deska je v elektrické peci zahřata na počáteční teplotu 1 000 °C. Jakmile deska dosáhne požadované teploty, je zapnuto plunžrové čerpadlo a v trysce je nastaven požadovaný tlak. Měřicí deska je pomocí řídicího mechanismu uvedena do pohybu pod zkoumanou vodní tryskou. Pohyb desky je řízen tak, aby po náběhu rychlosti projížděla deska pod ostřikem předepsanou konstantní rychlostí. Během průjezdu se pomocí zabudovaných senzorů měří teplota uvnitř desky. Současně s teplotou je také zaznamenávána poloha desky, jež následně slouží ke kontrole rychlosti desky pod tryskou. Podrobnosti k provedení a vyhodnocení experimentů je možné najít v [9]. Experiment je prováděn tak, že zkušební deska projíždí pod ostřikem několikrát.

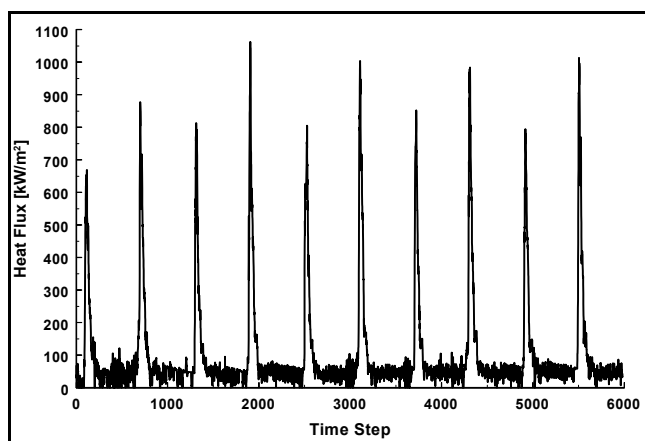
Po experimentu jsou data vyhodnocena a z naměřených průběhů teplot se pomocí inverzní úlohy [10] počítá povrchová teplota desky, tepelný tok a součinitel přestupu tepla. Na obr. 3 je vidět průběh naměřené teploty v hloubce 0,75 mm pod povrchem a vypočtené povrchové teploty během několika průjezdů pod tryskou. Tato data byla změřena při tlaku 20 MPa, vzdálenosti trysky 150 mm od povrchu desky a rychlosti desky 1,5 m/s. Průměrné velikosti poklesu povrchové teploty dosahují 54 °C, zajímavějším údajem je však rychlost poklesu teploty, která dosahuje 8 000 °C/s. Na obr. 4 je průběh tepelného toku. Vypočtené špičky tepelného toku dosahují v místě dopadu paprsku až 1 MW/m².



Obr. 2: Schéma zkušebního zařízení, 1 přívod vysokotlaké vody, 2 manometr, 3 tryska, 4 krycí lišta, 5 rozvodná komora, 6 zkušební deska, 7 vozík nesoucí desku, 8 dataloger, 9 jednotka pohonu, 10 motor, 11 tažné ocelové lano, 12 nosník pojezdu

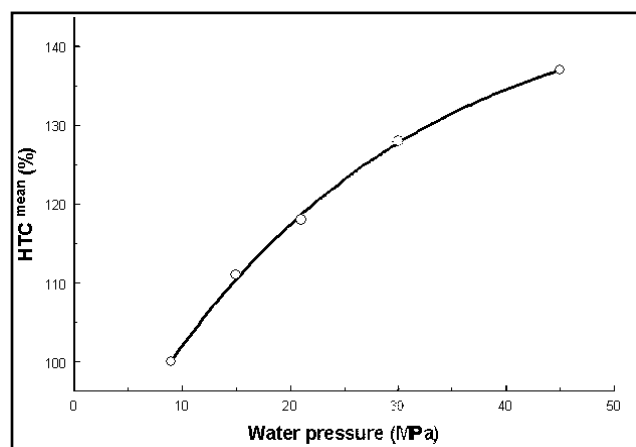


Obr. 3: Záznam změřené teploty při deseti průjezdech pod tryskou a průběh vypočítané povrchové teploty



Obr. 4: Vypočítaný průběh tepelného toku pro poklesy teplot z obr. 3

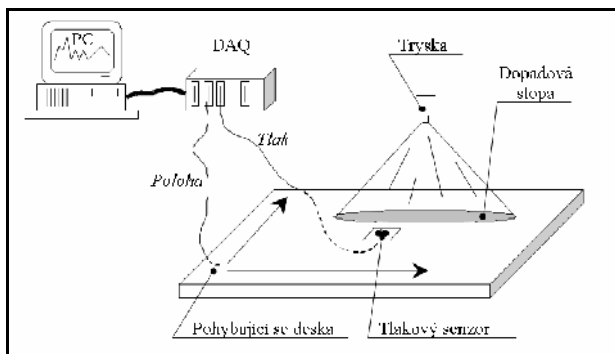
S uvedenými hodnotami rychlosti teplotních změn a intenzity přenosu se v technice setkáváme jen výjimečně. Pro studium kvality odkujení je nutná znalost závislosti těchto parametrů na tlaku ostříku. Výsledky měření skupiny tlaků (od 90 do 45 MPa) jsou na obr. 5. Zde jsou zobrazeny relativní hodnoty součinitele přestupu tepla (HTC) v závislosti na tlaku. Za vztažnou hodnotu byl zvolen tlak 9 MPa, který je považován za nejnižší používaný v hutním ostříku okují. Z obrázku je vidět, že nárůst tlaku na 45 MPa vede ke vzrůstu součinitele přestupu tepla pouze o 35 %. Tento relativně malý vzrůst nemůže vysvětlit zásadní rozdíly v kvalitě povrchu při ostříku v tomto rozsahu tlaků.



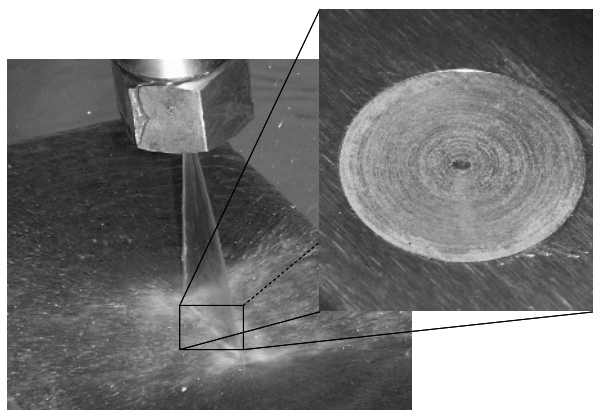
Obr. 5 Relativní nárůst intenzity přenosu tepla v místě dopadu vodního paprsku s tlakem na trysce

2.2 IMPAKTNÍ TLAKY

Ve všech úvahách o ostříku okují hraje důležitou roli mechanická složka působení vodního paprsku. Při návrzích a srovnání systémů ostříku je většinou používáno kritérium dynamického tlaku v impaktní ploše. Pro měření rozložení impaktního tlaku jednotlivých trysek pro dané konfigurace tlaku a vzdálenosti je používáno zařízení schematicky zobrazené na obr. 6. Základem je tenzometrický snímač, na který je přenášena síla z ocelového válečku průměru 1,5 mm, která je zabudovaná v ocelové desce, na jehož čelo dopadá vodní proud (obr. 7). Deska se snímačem skenuje dopadovou stopu a při krátkých zastávkách jsou odečítány hodnoty sil.

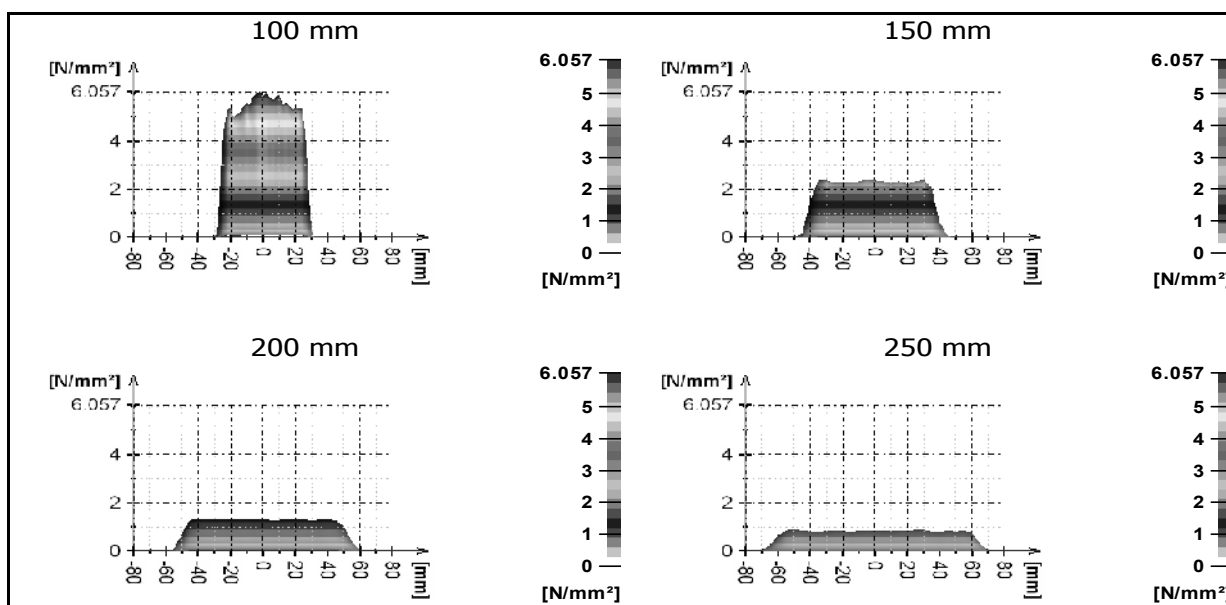


Obr. 6: Schéma zařízení pro měření rozložení impaktního tlaku



Obr. 7: Plochý vodní paprsek při skenování a detail snímače

Výsledkem měření je popis rozložení tlaku. Grafy zobrazující rozložení impaktního tlaku pro rostoucí vzdálenost trysky od povrchu jsou na obr. 8. Tyto výsledky byly získány pro tryšku s úhlem rozstříku 24° a průtokem 123 l/min při tlaku 20 MPa. Tloušťka paprsku v místě impaktu je 4 až 6 mm. Při měření rozložení impaktního tlaku dochází ke zkreslení vlivem konečného rozměru senzoru. Průměr senzoru je již srovnatelný s šířkou měřené stopy (1,5 mm a 5 mm). Dopadová stopa se jeví širší a maximum tlaku nižší než je ve skutečnosti. Pro tento účel byl vyvinut inverzní program, který transformuje data na nekonečně malou velikost senzoru [11]. Vliv vzdálenosti trysky na impaktní tlak je zásadní při dalších úvahách o teorii odkujení.

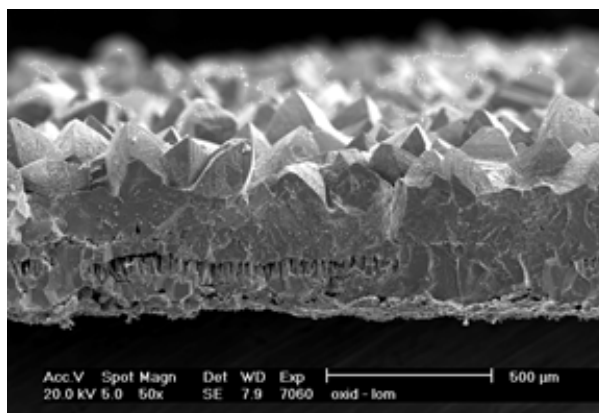


Obr. 8: Průběh impaktního tlaku pro různé vzdálenosti trysky od povrchu

2.3 STUDIUM KVALITY PROCESU

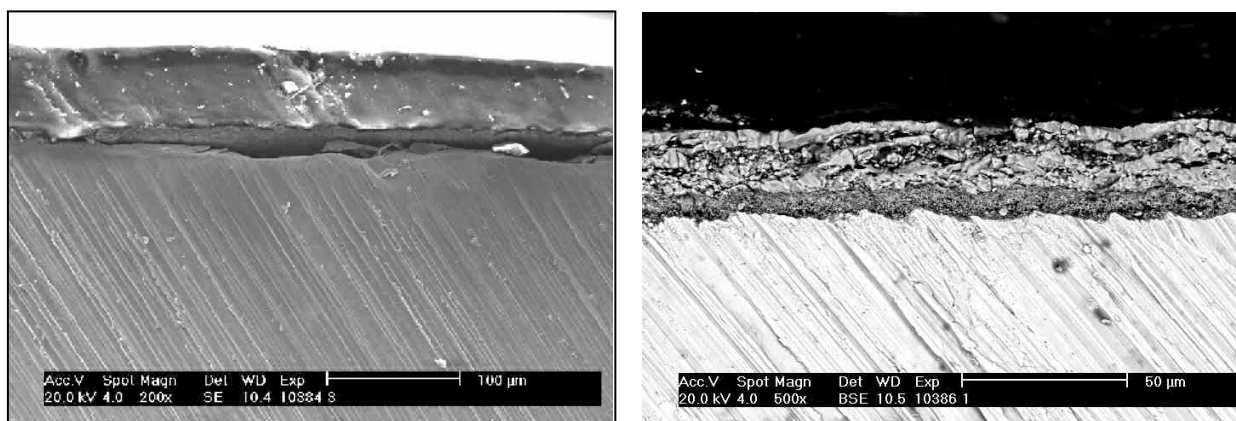
Pro vývoj teorie a při zkouškách trysek a parametrů ostříku bylo nutné připravit metodiku experimentu pro stanovení kvality odkujení. Základem je stejné zařízení jako pro experimentální měření součinitele přestupu tepla. Rozdíl je ale v tom, že na vozíku je umístěna ocelová deska bez senzorů, na které je připravena vrstva okují.

V technologii válcování jsou rozlišovány dva hlavní typy okují. Pecní neboli primární okuje vznikají v peci a mají tloušťku řádově v milimetrech. Jejich struktura (kompaktnost) závisí především na tom, zda je v peci atmosféra s malým nebo velkým přebytkem kyslíku. Na obr. 9 je snímek lomu primárních okují, které byly vytvořeny ve vzduchové atmosféře v laboratoři VUT v Brně. Tyto okuje jsou velmi kompaktní a jejich tloušťka po tříhodinovém ohřevu zkušební desky dosáhla 0,35 až 0,5 mm.



Obr. 9: Struktura primárních okují

Sekundární okuje vznikají po prohybu rozvalku mezi přípravným a hotovným pořadím. Vznikají tedy na vzduchu a při povrchové teplotě kolem 1 000 °C. Doba oxidace je obvykle kolem jedné minuty. Sekundární okuje dosahují tloušťky kolem 50 μm. Charakter sekundárních okují výrazně závisí na chemickém složení oceli. Na obr. 10 jsou snímky z elektronového mikroskopu ukazující krajní hranice struktury. Vlevo je vidět řez zcela kompaktní vrstvou okují. Vrstva okují je zde již částečně oddělena od ocelového podkladu. Vpravo je velmi porézní struktura. Je dobře viditelné, že se tato vrstva skládá ze dvou podvrstev o rozdílné struktuře. Měření také ukazují, že k odkujení většinou dochází „kvantově“ – tedy po skocích, kdy jsou odstraňovány celé vrstvy. Obr. 10 dokumentuje obtížnost vytvoření jednotné teorie odkujení platící pro všechny typy okují.



Obr. 10: Struktura sekundárních okují (kompaktní vlevo, porézní vpravo)

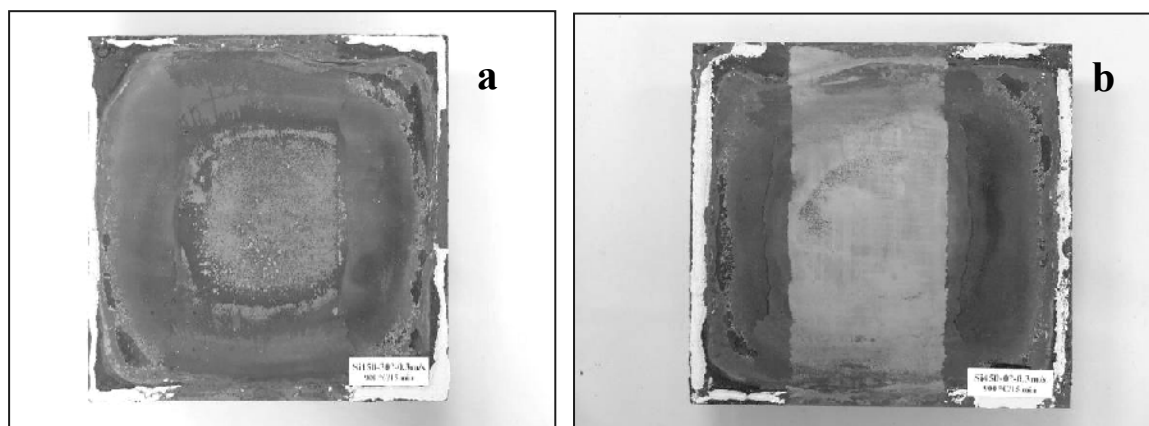
Pro testy kvality ostříku byly vyvinuty dvě metodiky postupu přípravy sekundárních okují v laboratorních podmínkách. V obou případech se vychází z čistého, obroušeného povrchu. Při prvním postupu je povrch přikryt při ohřevu nerezovou deskou a okraje jsou zatmeleny keramickým tmelem. Tím je povrch chráněn proti oxidaci. Po ohřevu je krycí deska odstraněna a povrch je vystaven oxidaci. Po uplynutí oxidačního času prochází deska pod ostříkem (obr. 11). Druhý postup využívá desku ohřivanou v peci bez ochrany povrchu. Při ohřevu vzniknou na povrchu pecní okuje. Deska je ostříknuta tak, že paprsek pokrývá přibližně jednu třetinu šířky desky. Po prvním ostříku plyne čas sekundárního zokujení. Deska je otočena o 90°

a přesunuta zpět do výchozí polohy pro ostřík. Druhý běh pod deskou pak odstraní sekundární okuje.

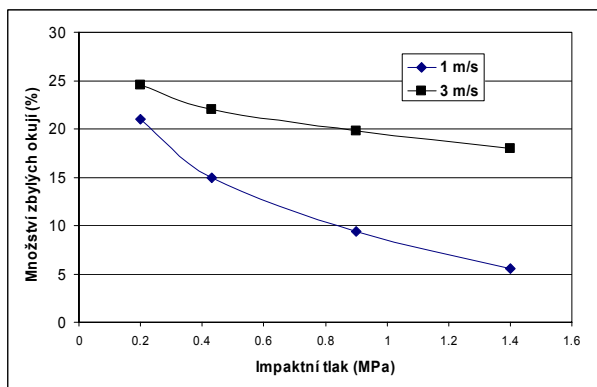


*Obr. 11: Průběh experimentu,
deska o teplotě 950 °C s připravenými sekundárními okujemi projíždí rychlostí 1 m/s pod tryskou*

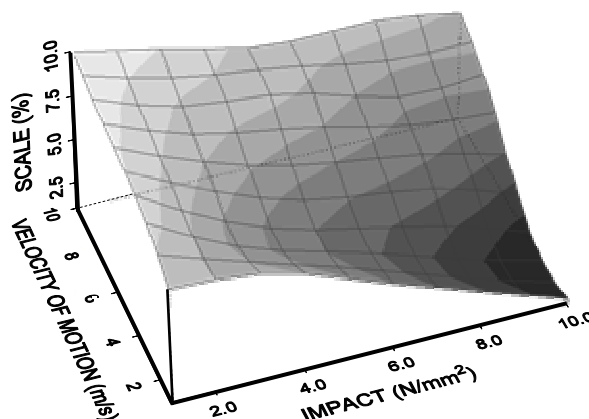
Po ostříku jsou desky ochlazovány v kontejneru naplněném inertním plynem tak, aby bylo zabráněno další oxidaci. Na ostříknutém povrchu je jasně patrná stopa trysky (obr. 12a, b). Při hodnocení kvality ostříku bylo nutné upustit od subjektivního posuzování, protože některé typy okují vykazují po ostříku stříbřitý vzhled a i při značné tloušťce budí dojem kovově čistého povrchu. Tloušťky zbylých vrstev se měří buď elektronovým mikroskopem na řezu vzorkem, nebo elektromagnetickou sondou kalibrovanou na vlastnosti okují. Na povrchu některých zkušebních desek je možné naměřit rozdílné tloušťky okují (obr. 12a). Pro hodnocení povrchu je pak vypočten procentuální podíl zbytkových okují (za referenční hodnotu je vzat povrch mimo stopu ostříku).



Obr. 12: Výsledné povrchy po odkujení křemikové oceli (3.1 % Si) při rychlosti 0.3 m/s rozdílnými parametry ostříku, vlevo tlak v trysce 15 MPa a zůstává 20 % zbytkových okují, vpravo tlak 45 MPa a zůstává 5.6 % zbytkových okují



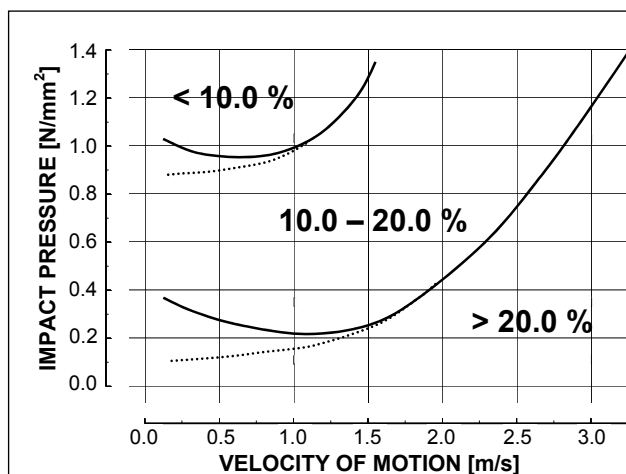
Obr. 13: Výsledky studia kvality ostříku křemikové oceli (3.1 % Si) pro dvě rychlosti jezdů



Obr. 14: Kvalita povrchu po ostříku uhlíkové oceli (0.34 % C) v závislosti na impaktním tlaku a rychlosti pohybu materiálu

Obtížnost odstranění okují výrazně závisí na chemickém složení ocelí. Prvek, který nejvíce zhoršuje odkujitelnost, je křemík, který může vytvářet nízkotavitelné eutektikum ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$). Na obr. 13 a 14 jsou výsledky ze studia materiálů dodaných z teplé širokopásové válcovny v US Steel Košice. Velmi náročným výrobním sortimentem jsou dynamo a trafo-plechy. Tyto materiály mají zvýšený obsah křemíku pro dosažení požadovaných elektromagnetických vlastností. Výsledky měření na obr. 13 ukazují, že na křemikové oceli pokryté vrstvou sekundárních okují o tloušťce 30 až 55 μm zůstává i po ostříku při tlacích 45 MPa (impaktní tlak 1.4 Mpa) 17 % okují, pokud je rychlost vzorku 3 m/s. Zvýšení kvality je možné dosáhnout pouze snížením rychlosti, což limituje výrobnost tratě.

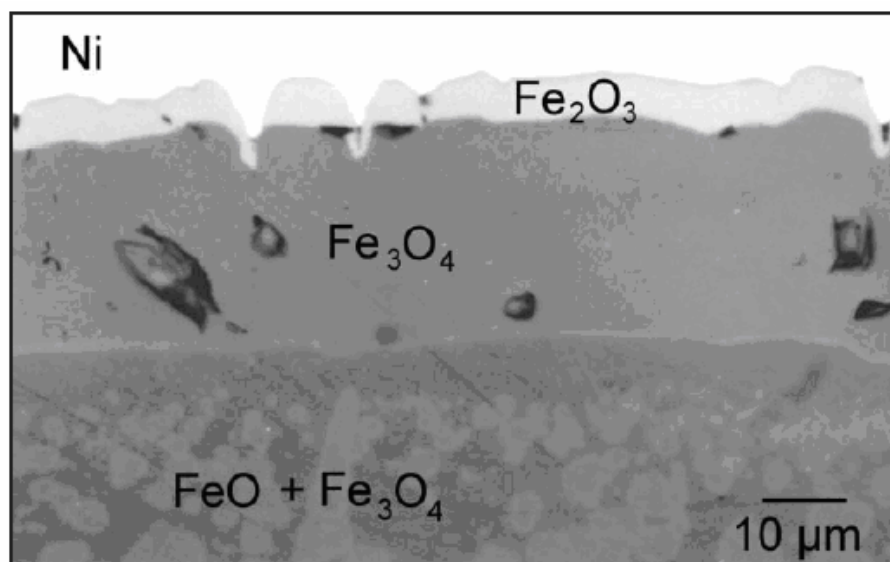
Pro uhlíkové oceli postačují nižší impaktní tlaky a tím i nižší tlaky na tryskách. Dalo by se shrnout, že se vzrůstajícím impaktním tlakem se zvyšuje kvalita výsledného povrchu. Na obr. 14 je vidět rovněž významný vliv rychlosti. S rostoucí rychlostí je odkoujení méně efektivní. Tento závěr však neplatí absolutně. Zkoušky s velmi malými rychlostmi (0,3 m/s) ukázaly překvapivé zhoršení kvality povrchu. Výsledky jsou ukázány na obr. 15. V obrázku jsou vidět tři oblasti různé kvality povrchu vyjádřené procentem zbytkových okují. Podle původních předpokladů měly křivky pro nízké rychlosti pokračovat tak, jak je naznačeno tečkovanými čarami. Ve skutečnosti ukázala měření při nízkých rychlostech nárůst procenta zbytkových okují. Tato skutečnost výrazně ovlivnila vývoj teorie ostříku okují. Zhoršení kvality je možné vysvětlit tím, že odražená voda z trysek podchlazuje povrch, který se blíží k impaktní oblasti a tím je zmenšen teplotní šok a dochází k menšímu porušování vrstvy okují teplotní napjatostí.



Obr. 15: Vliv rychlosti vzorku na procento zbytkových okují, studium negativního dopadu velmi nízkých rychlostí

3 NUMERICKÉ MODELÝ

Numerické modelování nepředstavuje výraznější problém v oblasti tvorby modelů a výpočtů teplotních a napěťových polí. Zásadním problémem je však stanovení nebo získání materiálových vlastností oxidů. Existují tři typy oxidů železa a v oxidické vrstvě při vysokých teplotách je možné najít všechny tři. Na obr. 16 je řez vrstvou oxidů při teplotě 1 000 °C na měkké oceli chemického složení C 0,04 %, Si 0,15 %, Mn 0,5 %, P 0,01 %, Ni 0,02 %, Cr 0,03 %. Další komplikací je přechod jedné formy oxidů v druhou při změnách teploty. Po vychlazení vzorku na pokojovou teplotu je podíl FeO téměř zanedbatelný.



Obr. 16: Třívrstvá okuje vzniklá při 1 000 °C po 0,5 hod. na vzduchu, převzato z [12]

Literární údaje o vlastnostech okují jsou velmi chudé a navíc i velmi rozporuplné a nespolehlivé. Vysvětlením může být i obr. 10, kde je vidět, že struktura okují se mění v širokém spektru. V tabulce 1 jsou základní údaje převzaté z literatury [13]. Stejní autoři publikovali v [14] vlastnosti okují, které používají při jejich numerických výpočtech a kde nerozlišují, o který typ oxidu se jedná. Tyto vlastnosti používají pro teploty obvyklé při válcování za tepla.

Velmi zajímavý soubor informací byl publikován v roce 2000 v časopise Ironmaking and Steelmaking a je uveden v tabulce 3. Pro rozvoj teorie odkujení jsou velmi významné údaje o pevnosti oxidů a jejich tvrdosti.

Tab. 1 Vlastnosti okují podle [13]

Parametr	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄
	Oxid železnatý	Oxid železitý	Magnetit
Hustota [kg.m ⁻³]	5900	5200	5100
Tepelná roztažnost [K ⁻¹]	–	8×10 ⁻⁶	9.6×10 ⁻⁶
Teplota tavení [°C]	1370	1560	1550
Youngův modul [GPa]	151.504(1-(T-300)/5476)	209.916(1-(T-300)/9200)	
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	55.7	88.2	
Poissonova konstanta	0.36	0.19	

Tab. 2 Vlastnosti okují podle [14]

Parametr	Hodnota
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	5700
Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	$674.959 + 0.297\cdot T - 4.367\text{E-}5\cdot T^2$
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	$1 + 7.833\text{E-}4\cdot T$
Youngův modul E [Pa]	$240\text{E}9(1 - 4.7\text{E-}4(T - 25))$
Poissonova konstanta	0.3
Tepelná roztažnost [K^{-1}]	8×10^{-6}

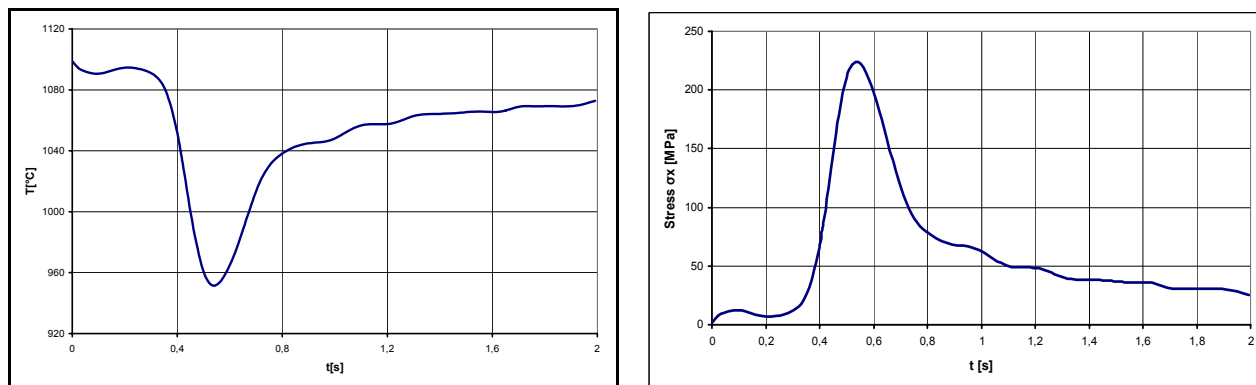
Oblast platnosti: c_p pro $T \in (600 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C})$, λ pro $T \in (600 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C})$

Tab. 3 Vlastnosti okují podle *Ironmaking and Steelmaking, vol. 2, 2000*

Parametr		FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	5670	5180	5240
Pevnost	MPa	0.4	4	10
Tvrdost	HV	270 až 350	420 až 500	–
Tepelná vodivost	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2.7 až 3.2	0.5 až 3.5	0.5 až 3.5
Tepelotní vodivost	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$0.7 \cdot 10^{-6}$	$0.2 \text{ až } 3 \times 10^{-6}$	$0.2 \text{ až } 3 \times 10^{-6}$
Měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	58	200	150
Tepelná roztažnost	K^{-1}	$10 \text{ až } 15 \times 10^{-6}$		

3.1 VÝPOČTY MKP

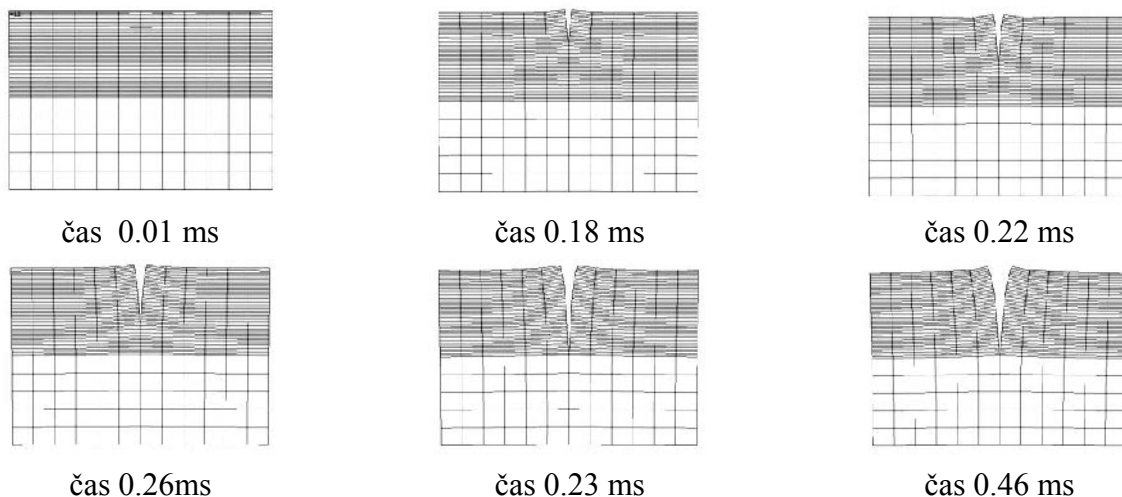
S využitím materiálových vlastností uvedených v předchozí kapitole byl sestaven numerický model popisující vrstvu okují na ocelovém povrchu zatížených jednak mechanickým působením vodního paprsku a jednak teplotním zatížením. Na obr. 17 jsou výsledky pro homogenní vrstvu okují tloušťky 50 μm a rychlosti pohybu 1 m/s. Počáteční teplota je konstantní 1 100 $^\circ\text{C}$.



Obr. 17: Průběh teploty na hranici mezi vrstvou oxidů a kovem (vlevo)
Průběh tahového napětí na povrchu vrstvy okují (vpravo)

Výsledky v obr. 17 je nutné interpretovat tak, že s ohledem na pevnost okují (tabulka 3) nemůže dojít k nárůstu napětí na takto vysoké hodnoty. Již počáteční fáze ochlazování povede ke vzniku trhlin, které se postupně rozevírají tak, jak dochází ke kontrakci podchlazeného povrchu.

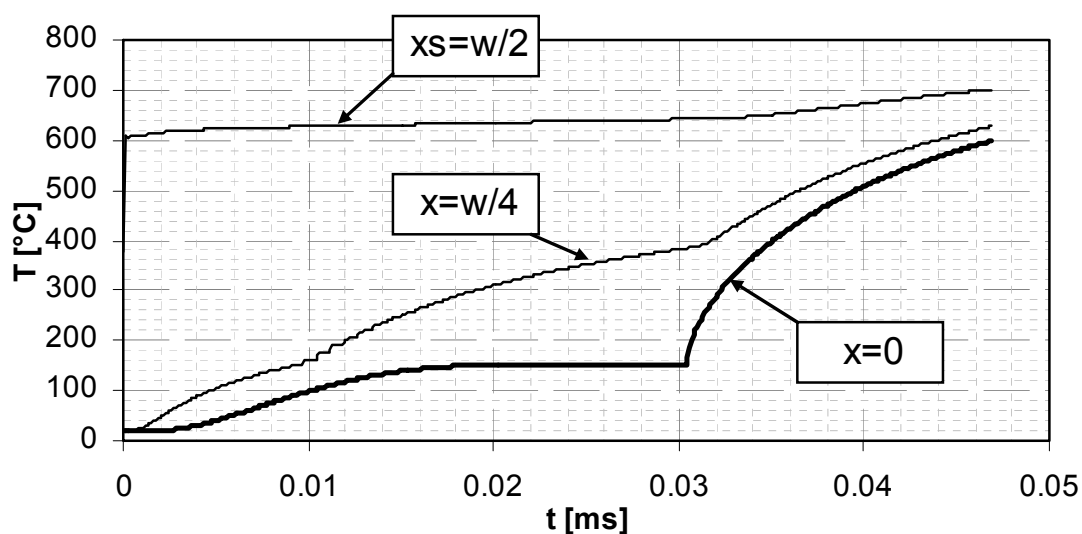
Přesnější řešení šíření trhlin ve vrstvě okují je obtížné s ohledem na možné nehomogenity materiálu (obr. 10) a s ohledem na nejasné chování oxidů za teplot kolem 1 000 $^\circ\text{C}$. Při zkouškách za pokojové teploty se zdají být lomy křehké, tomu napovídá i vysoká hodnota tvrdosti (tabulka 3). Přes tato omezení byl proveden orientační výpočet šíření trhliny. Tento výpočet využíval MKP a šíření trhliny bylo simulováno rozpojováním prvků při dosažení kritické hodnoty maximálního hlavního napětí. Výsledky pro vrstvu tloušťky 100 μm a kritické napětí 10 Mpa jsou zobrazeny na obr. 18. Trhlina dosáhla povrchu oceli po 460 μs od začátku chlazení. Zahájení chlazení bylo simulováno skokovou změnou okrajové podmínky na povrchu okují.



Obr. 18: Průběh šíření trhliny ve vrstvě okují silné 100 μm (okuje mají ve výpočtovém modelu jemnější síť než ocel)

3.2 PARNÍ EXPLOZE

Předpokládejme nyní, že se ve vrstvě okují objeví teplotně indukovaná trhlina, která má při tloušťce okují 100 μm šířku 5 μm . Na povrchu vrstvy je voda o impaktním tlaku jednotek MPa. V trhlíně je podtlak a tak je voda nasáta do trhliny. Pro jednoduchost předpokládejme, že v čase 0 je trhlina šířky 5 μm naplněna vodou o teplotě 20 $^{\circ}\text{C}$. Teplota oceli i okují je 1 000 $^{\circ}\text{C}$. Přibližným numerickým výpočtem je možné sledovat ohřívání a odpařování vody (obr. 19). Křivka $x_s = w/2$ je pro kapalinu na stěně trhliny, křivka $x = w/4$ je v $1/4$ tloušťky trhliny a křivka $x = 0$ je pro kapalinu v ose trhliny. V ose trhliny probíhá ohřev a odpařování kapaliny nejpomaleji. Přesto již po 15 μs je teplota vody na teplotě varu, po 30 μs je všechna kapalina odpařena a po 50 μs dosahuje teplota páry 600 $^{\circ}\text{C}$. Vypaření vody vede k velkému nárůstu objemu a tlaku. S ohledem na únik páry trhlinou se jedná o dynamický děj. Velikost a trvání tlakového pulzu nejsou známy. Modelování tohoto děje je dalším cílem při zpřesňování teorie ostříku okují.

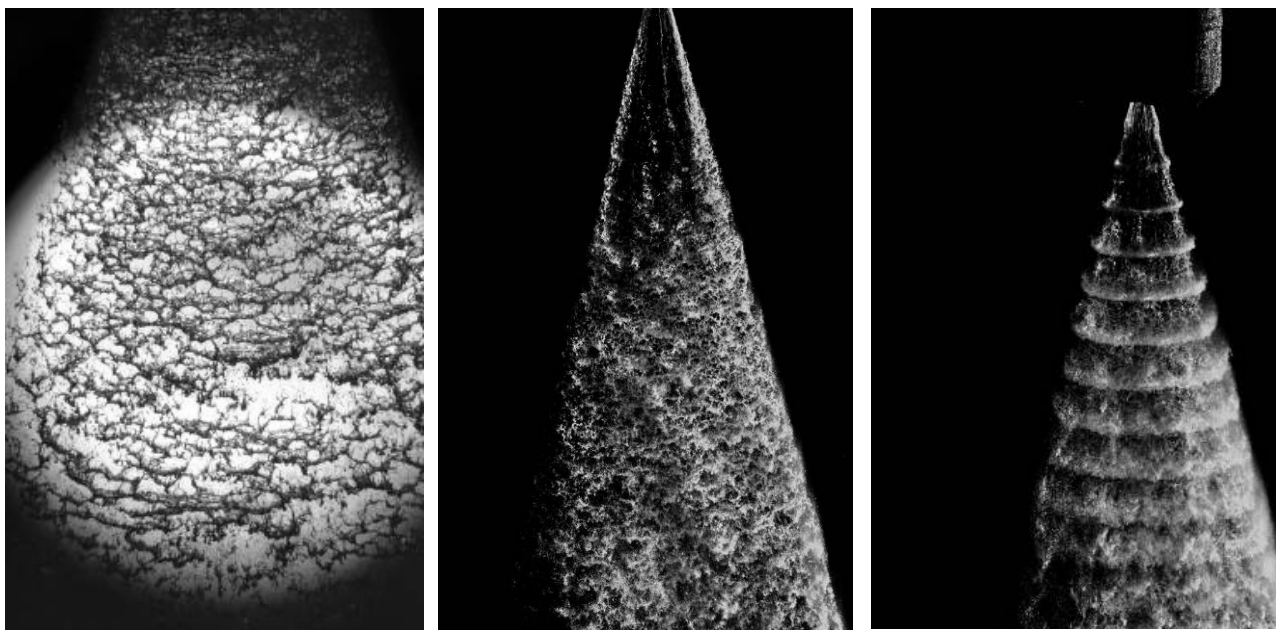


Obr. 19: Ohřívání a odpařování v trhlíně šířky 5 μm , x_s – na povrchu trhliny, $x=0$ v ose trhliny

4 DYNAMICKÝ VODNÍ RÁZ (WATER HAMMER EFFECT)

Existence dynamického rázu při dopadu vodních kapek je dáována do souvislosti s teorií ostříku teprve v posledních třech letech. Struktura vysokotlakého vodního paprsku není kontinuální. Na ostříkávaný povrch dopadají samostatné kapky nebo spíše shluky kapaliny (obr. 20). Na fotografii vpravo je vidět zvláštní struktura vodního paprsku získaná zavedením tlakových pulzů o frekvenci 20 kHz. Tento paprsek vykazuje značný abrazivní efekt. Využití pulzujícího paprsku při ostříku okují je na VUT v Brně studováno ve spolupráci s AV ČR.

Při statických měřeních (kapitola 2.2) jsou pro obvyklé parametry ostříku v hutních podnicích dosahovány hodnoty impaktního tlaku kolem 3 MPa. Pokud uvažujeme samostatnou kapku letící rychlostí 300 m/s, můžeme při dopadu na tuhý povrch zaznamenat tlakovou špičku až o dva řády vyšší, než je změřený statický impaktní tlak. Tento efekt trvá velmi krátce a je způsoben šířením tlakových vln v kapce. V teorii odstranění okují je tedy nutno brát do úvahy dynamický ráz (v anglickém textu používáme výraz water hammer effect).



Obr. 20: Snímky struktury vysokotlakého vodního paprsku při použití plochých trysek vyvinutých pro odstranění okují, fotografie vlevo je pořizena při zadním osvitu nanosekundovou výbojkou (foto Lechler), snímky vpravo při osvitu pulzním laserem v laboratoři VUT v Brně

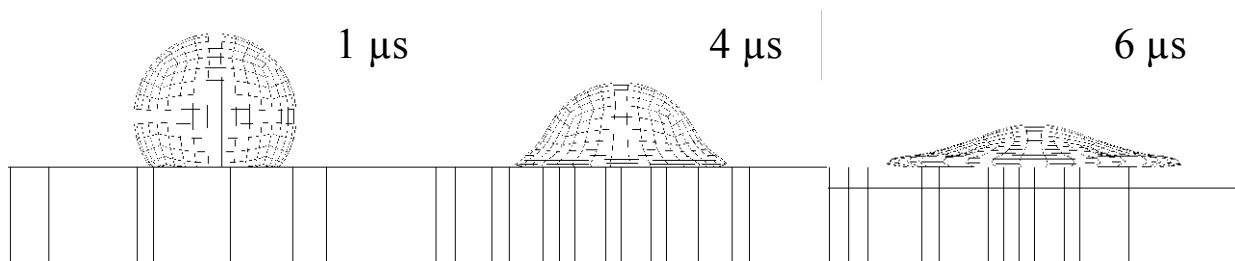
Úvahy o dynamickém působení vodních kapek nejsou v technice nové. Zajímavé je sledovat rozptyl vypočítaných špiček impaktních tlaků podle různých publikovaných teorií. Heyman [15] publikuje v roce 1968 vztahy, podle kterých by při rychlosti kapky 300 m/s bylo dosaženo tlaků 1280 MPa, tentýž autor pak v roce 1969 uvádí další vztahy [16], které pro rychlost 300 m/s predikují 216 MPa. Huang publikuje v roce 1973 teorii, podle které by bylo dosaženo pro stejnou rychlost (300 m/s) tlaků 420 MPa [17]. Podle publikace [18] z roku 2004 by při rychlosti kapky 300 m/s bylo dosaženo tlaku 583 MPa.

Obtížnost přímého měření velmi krátkých tlakových pulzů je příčinou naprostého nedostatku publikovaných experimentálních údajů. Bruton v roce 1961 v [19] ukazuje výsledky měření, při kterých získal průměrné hodnoty tlaku 924 MPa pro $v_0 = 731.7$ m/s; $r = 2.15$ mm. K tomuto experimentálnímu výsledku se nejvíce blíží teorie publikovaná v [17].

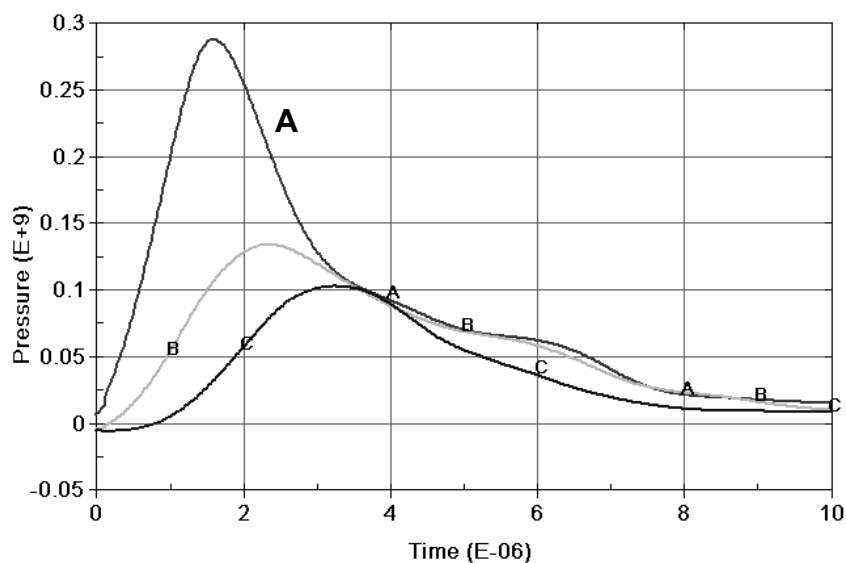
Smith publikuje v roce 1976 v [20] výsledky pro vodní kapku o čelním průměru 6.6 mm a impaktní rychlosti 640 m/s, kdy byl pozorován maximální impaktní tlak v ose kapky 863 MPa.

4.1 NUMERICKÉ SIMULACE DOPADU KAPKY

Pro srovnání s teoretickými závěry uvedenými výše byly na VUT v Brně provedeny numerické výpočty dopadu kapky na tuhou plochu. Byla využita metoda konečných prvků s řešičem LS-Dyna. Kapka byla modelována jako dokonalá koule letící rychlostí 300 m/s. K deformaci kapky dochází až dopadem na rovinu kolmou na dráhu letu. Ukázky deformace kapky o průměru 3 mm jsou na obr. 21. Výsledné tlaky v impaktní ploše jsou vykresleny v obr. 22. Hodnota maximálního vypočteného tlaku je 282 MPa a je dosažena v ose kapky a v čase 1.56 μ s. Trvání tlakového pulzu je velmi krátké a hodnota tlaku nad 100 MPa je dosažena v ose kapky po dobu 3.2 μ s.



Obr. 21: Deformace kulové vodní kapky průměru 3 mm při dopadu rychlostí 300 m/s na tuhou desku, jsou vykresleny tvary pro 1 μ s, 4 μ s, and 6 μ s



Obr. 22: Časové průběhy tlaků v impaktní ploše při dopadu kapky průměru 3 mm rychlostí 300 m/s; křivka A platí pro osu kapky, křivka C je pro okraj kapky na ploše, křivka B je pro poloviční vzdálenost mezi A a C

5 TEORIE PARNÍ EXPLOZE

Předchozí kapitoly shromažďovaly argumenty pro navrhovanou teorii parní exploze. Nyní je možné sumarizovat, jak tento děj probíhá podle dosaženého stupně poznání. Děj je možné rozdělit do čtyř kroků tak, jak je schematicky ukázáno na obr. 24.

1. krok – teplotní porušování (obr. 24 A)

Vodní paprsek dopadající na horký povrch způsobí vznik teplotních napětí, která působí vznik teplotních prasklin ve vrstvě okují. Vypočtená teplotní napětí přesahují minimálně o jeden řád mez pevnosti oxidů libovolného druhu. Hloubka teplotních prasklin závisí především na kompaktnosti vrstvy okují. Teplotní porušování je výrazně omezeno u ocelí s vysokým obsahem křemíku, protože křemík vytváří směsi oxidů, které jsou při vysokých teplotách viskózní.

Pro dosažení maximálního teplotního efektu je nutné zabránit předchlazování povrchu okují odstříknutou vodou proudící po povrchu. Tam, kde je to možné, je výhodné směřovat sklon vodních paprsků ve směru pohybu materiálu.

Výsledky experimentů s podchlazeným povrchem oceli ukázaly výrazné snížení účinnosti ostříku. Stejně tak je možné hodnotit jako neúčinné použití dvou řad odkujovacích trysek blízko za sebou.

2. krok – rozevření trhlin a nasání vody (obr. 24 B)

Vzniklá trhlina ve vrstvě okují postupuje velmi rychle a je zastavena buď nehomogenitou v okuji, nebo povrchem oceli. Z výpočtů je možné odhadnout časy šíření a otvírání trhliny na maximálně 0.5 ms. Při častých výskytech vrstevnatých okují je při zkouškách kvality vidět, že se okuje odstraňují po vrstvách. Je tedy možné předpokládat, že hloubka odstranění okují souvisí s hloubkou průniku teplotní trhliny.

Trhlina vzniká ve stavu, kdy je povrch pokryt vodou. Voda na povrchu je nasávána do otvírajících se trhlin. Hnací silou je podtlak ve vznikající trhlíně a přetlak ve vrstvě vody. Při uvažování dynamických pulzů – water hammer effect – je možné počítat na okraji trhliny s krátkými tlakovými pulzy o tlaku stovek MPa.

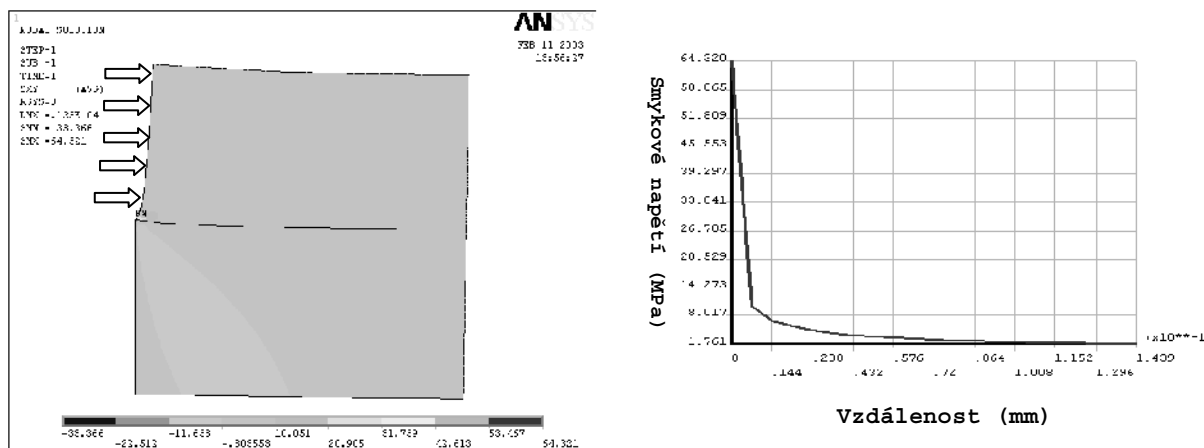
3. krok – parní exploze (obr. 24 C)

Voda nasátá do trhlin se velmi rychle ohřívá a odpařuje. Vznikající pára uniká ústím trhliny. Voda je však odpařena velmi rychle (desítky mikrosekund, kap. 3.2). Rychlost tvorby páry a nárůstu tlaku je taková, že i při úniku páry dochází ke krátkodobému zvýšení vnitřního tlaku v trhlíně. Velikost a časový průběh nárůstu tlaku jsou předmětem výzkumu. Minimální velikost tlakového pulzu v trhlíně je odhadována na 10 MPa.

Pokud ale opět uvažujeme i v této fázi o dynamickém efektu dopadu vodních kapek, je možné počítat s krátkými tlakovými pulzy v ústí trhliny, které brzdí nebo zastavují unikající proud páry a tak prodlužují tlakové působení parní exploze nebo dokonce zvyšují tlak v trhlíně.

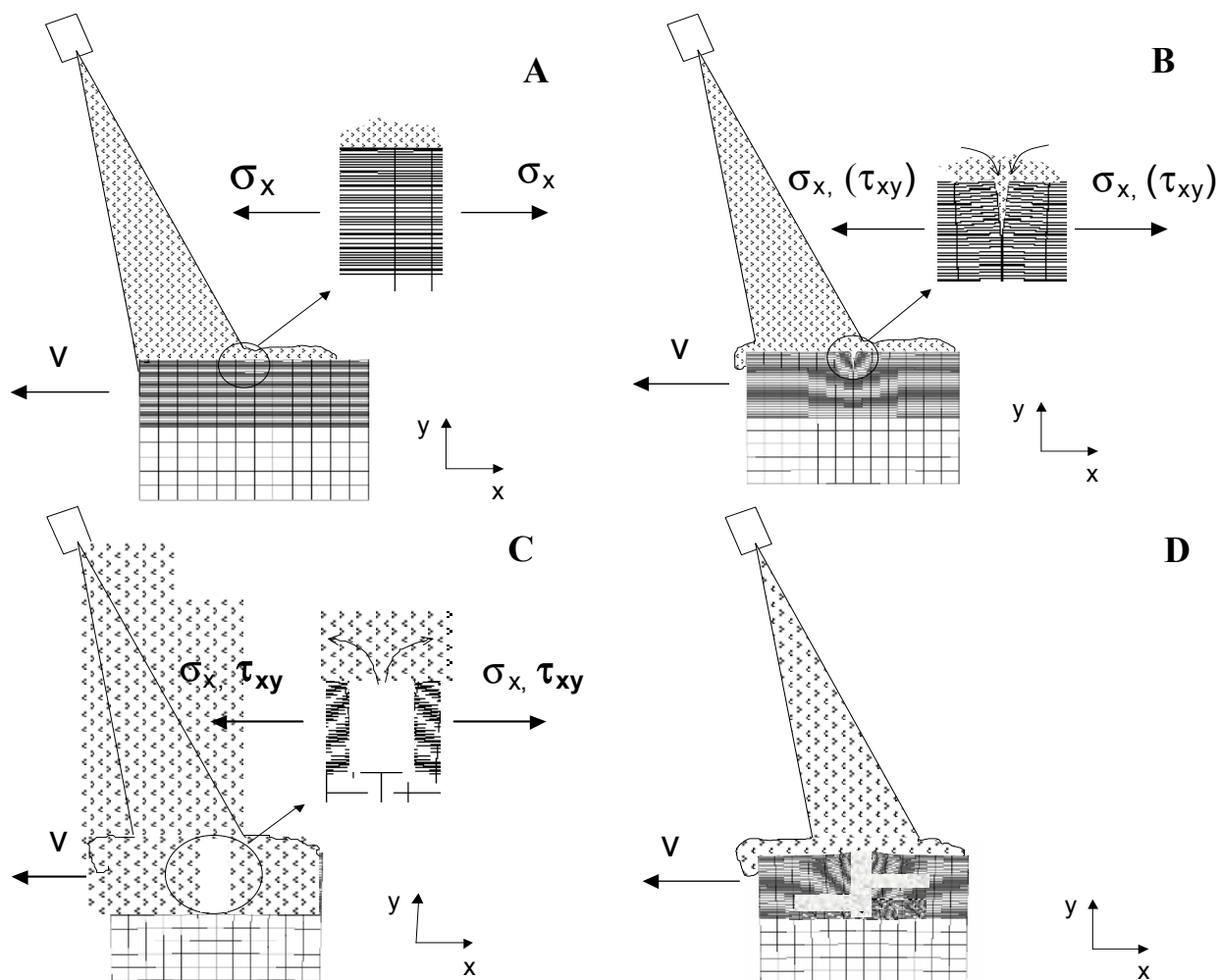
4. krok – disintegrace vrstvy okují (obr. 24 D)

Pro disintegraci vrstev okují je při navrhované teorii parní exploze rozhodující vnitřní tlak v trhlíně. Pokud použijeme tlak 10 MPa odhadnutý u předchozí části jako okrajovou podmínku pevnostního výpočtu, pak dostáváme výsledky znázorněné v obr. 23. Ve schématu nalevo je vidět výpočtový model. Na základní ocelové desce je vrstva okují. V této vrstvě je trhlina kolmá na povrch oceli a čelo trhliny dosahuje ocelový povrch. Na boku trhliny působí tlak 10 MPa ve schématu je zobrazený šipkami. V pravé části obr. 23 je vidět průběh smykového napětí na hranici ocel okuje. Bod 0 je v místě kořene trhliny.



Obr. 23: Schéma výpočtu smykových napětí na hranici okuje-ocel a vypočtený průběh napětí při zatížení tlakem 10 MPa

Uvedený výsledek vysvětluje to, proč při experimentech a ve válcovnách pozorujeme, že okuje jsou odstraňovány ve vrstvách. Vrstvy okují nejsou erodovány postupně od volného povrchu, na který působí vodní paprsek. Šíření trhliny se zastaví – buď na ocelovém povrchu, nebo při obvyklé vrstevnaté struktuře okují – na vrstvě s jinými mechanickými vlastnostmi. V hloubce čela trhliny pak vzniká v rovině rovnoběžné s povrchem vysoké smykové napětí, které oddělí vrstvu okují.



Obr. 24: Schematické znázornění čtyř stádií ostříku okují v teorii parní exploze

Teorie dynamického vodního rázu je v oblasti rozvoje teorie ostřiku okují zcela novým prvkem. Předchozí práce počítaly s impaktním tlakem změřeným statickými metodami, který dosahoval řádově jednotek MPa. Nyní je možné (nutné) počítat s tlakovými pulzy dosahujícími stovek MPa. První práce, které zvažují water hammer effect byly publikovány v roce 2007 [21, 22]. Problém ostřiku okují se tak dostává z oblasti statické do oblasti vysoce dynamické. Doby trvání tlakových pulzů v jednotkách mikrosekund jsou ještě o řád kratší, než je vypočítaný čas parní exploze z trhlín v okujích.

Jako velmi významný faktor se nově ukazuje struktura vodního proudu (obr. 20). Podle teoretických předpokladů je velikost tlakového pulzu závislá pouze na rychlosti dopadající kapky. Doba pulzu pak závisí na velikosti kapky. Tyto závěry platí pouze pro dopad kapky na tuhou plochu. Je možné předpokládat, že příliš malé kapky nebudou mít dostatečně vysokou kinetickou energii, aby mohly dynamicky ovlivnit okují do větší hloubky v místě impaktu. Povrch a struktura okují může být značně porézní a je nutné zvažovat situaci, že se nejedná o tuhý povrch. Dalším, dosud neřešeným problémem, je dopad kapek na povrch pokrytý vrstvou vody. Všechny tyto problémy jsou dosud nevyřešenými otázkami v teorii hydraulického odstranění okují.

6 LITERATURA

- [1] Konference Hydraulic Descaling in Rolling Mills, Institute of Metals, Londýn 1995.
- [2] Marson, H. F.: Influence of Scale Structure on the Effectiveness of Descaling. Proc. Conference Hydraulic Descaling in Rolling Mills, London, UK, October 1995, pp. 1–10.
- [3] Trenkler, H.: Scripta for Iron Metalurgy III. Montanuniversitaet, Loeben, Austria, 1959.
- [4] Raudensky, M.; Horsky, J.; Telecky, L.: Thermal and Mechanical Effect of High Pressure Spraying of Hot Surface-Descaling. 3rd International Metallurgical Conference – Proceedings Continuous Casting of Billets, Třinec, Czech Republic, 1999, p. 217–221.
- [5] Raudensky, M.; Horsky, J.: Experimental Study of Thermal Processes in Hydraulic Descaling. 3rd International Conference on Hydraulic Descaling, 14–15 September 2000, The Society of Chemical Industry, London, UK.
- [6] Bendig, L.; Raudensky, M.; Horsky, J.: Descaling with High Pressure Nozzles. ILASS – Europe 2001, Zurich, 2–6 September 2001.
- [7] Raudensky, M.; Horsky, J.; Pohanka, M.; Tosovsky, J.; Kotrbacek, P.: Experimental Study of Parameters Influencing Efficiency of Hydraulic Descaling. 4th International Conference on Hydraulic Descaling, April 7–8, 2003, 1Carlton House Terrace, London, UK, pp. 29–38, Reg. Charity No.: 1059475.
- [8] Blazevic, D. T.: Newton and Descaling. Proc. 3rd Int. Conf. Hydraulic Descaling, London, UK, September 2000, pp. 3–13.
- [9] Kotrbacek, P.; Horsky, J.; Raudensky, M.; Pohanka, M.: Influence of Parameters of Hydraulic Descaling on Temperature Losses and Surface Quality of Rolled Material. 10th International Conference Metal Forming 2004, September 19–22, 2004, Krakow, Poland, ISBN 3-937057-08-0, ISSN 1619-9529.
- [10] Raudenský, M.: Heat Transfer Coefficient Estimation by Inverse Conduction Algorithm. Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol. 3, No. 3, 1993, pp. 257–266.
- [11] Pohanka, M.: Two-dimensional correction of data measured using a large pressure sensor. In Computational methods and experimental measurements XI. Halkidiki: WIT Press, 2003, pp. 587–596. ISBN 1-85312-969-0.
- [12] Echsler, H.; Ito, S.; Schutce, M.: Mechanical Properties of Oxide Scales on Mild Steel at 800 to 1 000 °C. *Oxidation of Metals*, October 2003, vol. 60, no. 3/4, pp. 241–269.

- [13] Krzizanowski, M.; Beynon, J. H.: Measurement of oxide properties for numerical evaluation of their failure under hot rolling conditions. *Material Processing Technology*, September 2002, pp. 398–404.
- [14] Krzizanowski, M.; Beynon, J. H.: Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing-oxide scale behavior and composition effects. *Modeling Simul. Mater. Sci. Eng.* 8 (2000) 927–945.
- [15] Heyman, F. J.: *Journal of Basic Engineering* 90, 400 (1968).
- [16] Heyman, F. J.: “High-speed Impact between a Liquid Drop and a Solid Surface”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 13, December 1969.
- [17] Huang, Y. C.; Hammit, F. G. and Mitchell, T. M.: “Note on shock-wave velocity in high-speed liquid-solid impact”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 4, April 1973.
- [18] Foldyna, J. et al.: “Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects”. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11 (2004), 131–137.
- [19] Bruton, J. H.: “Deformation of Solids by Impact of Liquids at High Speeds”. *Symposium on Erosion and Cavitation*, 1961.
- [20] Smith, D. G. and Kinslow, R.: “Pressure Due to High-velocity Impact of a Water Jet”. *Experimental Mechanics*, vol. 1, 1976.
- [21] Raudensky, M., Horak, A., Horsky, J., Pohanka, M.; Kotrbacek, P.: Hydraulic Descaling Improvement. Findings of Jet Structure on Water Hammer Effect. *La Revue de Métallurgie*, February 2007, ISSN 0035-1563 (print edition), ISSN 1156-3141.
- [22] Horsky, J.; Raudensky, M.; Vavrecka, L.: Experimental Study of Hydraulic Descaling. In 5th International Conference HEFAT 2007, Sun City, South Africa, July 1–4, 2007, ISBN: 978-86854-6435.

Abstract

The technology of hydraulic descaling has passed through major changes in the last three decades. The process of descaling occurs through the application of energy or force by a descaling system. There are several mechanisms suggested for the active mechanism of descaling. Two major approaches can be found in the literature: Mechanical concept and Thermal concept.

The mechanical theory is that the force of the water applied to steel is sufficient to pulverize the scale into small particles and thus remove it from the steel substrate.

A similar water-impact concept is where the scale is removed by a mechanical force applied to its through-thickness face [8]. This theory leads to the conclusion that an oblique jet impact provides better performance than a perpendicular impact.

Tests of surface quality after descaling were conducted at the Brno laboratory. Impact angles of 0° , 8° , 15° and 30° were applied. These tests show that better results are not achieved by using larger angle inclination.

The thermal theory is predominantly based on the thermal expansion mismatch between scale and steel, which causes large mechanical shear forces at the scale-steel interface during chilling. Thermal induced force can reach two order of magnitudes of higher values than the measured mechanical force applied by water [5].

Another approach is that of vapour explosion [7]. Water can infiltrate cracks in the scale and evaporates almost instantly due to a high material temperature. This rapid evaporation creates an instant increase in vapour pressure, producing a high shear stress between scale and substrate or among the scale layers.

The latest research in descaling brought new findings about the dynamic features of the process. The continuous water jet formed by a descaling nozzle has complicated and variable qualities not visible to the naked eye. A water jet is formed by clusters of droplets moving at high velocity. The theory of the “water hammer” must be used when the descaling process is studied [21]. Results show that in the impact area, one can observe pressure peaks of several hundred Mpa's, lasting microseconds per peak. This finding can modify most existing concepts of descaling and the impact on current theory is discussed here. The structure of the descaling jet can have equally as much importance in the process as the impact pressure.

A new theory explaining hydraulic descaling is being developed at Brno University of Technology. The Theory of Vapour Explosion is built with the help of numerical modeling in conjunction with the latest results of experimental work in the Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory at BUT.