České vysoké učení v Praze, Fakulta strojní

**Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering** 

Doc. Ing. Libor Hlaváč, Ph.D.

## MAKROSKOPICKÝ FYZIKÁLNÍ POPIS INTERAKCE KAPALINOVÉHO PAPRSKU VYSOKÉ ENERGIE S MATERIÁLEM

## MACROSCOPIC PHYSICAL DESCRIPTION OF HIGH-ENERGY LIQUID JET INTERACTION WITH MATERIAL

#### **Summary**

High-energy, alternatively high-velocity, liquid jets and abrasive liquid jets, constrictively water and abrasive water jets, have become very important tools for material cutting and disintegration within last thirty years. It is expected that this trend will continue as the liquid jets, similarly to other flexible tools (plasma, laser, electron jet), bring an enormous advantage – they cannot be damaged in standard applications and the moving machine remains also intact when parameters are insufficient for effective material removing. Liquid jet has a very important advantage opposite to the rest three mentioned tools. Its cut is cold, because only a microscopic volume is influenced thermally in the interaction of jet with material, directly corresponding to the contact of an abrasive particle with cut or machined material. Another advantages of liquid jets are huge thickness of a cut-through material with a high quality surface and easy regulation as well as control that enables applications in automated systems and on robots.

To control the interaction process between liquid jet and material effectively, not only for cutting purposes but also for lathing, drilling, sharpening, polishing and even shaping, it is necessary to have at one's disposal a set of relationships describing changes of quantities important for determination of process effectiveness. The lecture is aimed at determination of the physical relationships describing two aspects of liquid jet existence separated in time and space, the second of them being strongly influenced and determined by the first one.

The first aspect to be mentioned is generation of liquid jet and its propagation in space. The attention is focused at formulation of simple macroscopic model yielding rapid results highly correlating with experimental results. Such a model is necessary for calculations of parameter changes during on-line control of quality and quantity of interaction process between liquid jet and machined material, especially during shaping. Model is based at the idea that liquid jet is composed of a compact converging core and a diverging less compact cover. The results of the model are in a good correspondence both with performed experiments and with a flow structure calculated from a set of differential equations that describe the phenomena in a more detailed and complex form.

The second analyzed aspect is interaction of liquid jet with material. The attention is aimed both at interaction of pure liquid flow with abrasive particles during mixing process and at interaction of generated abrasive liquid jet with machined material. The process is described by macroscopic parameters through simplified equations enabling acceleration of calculations and shortening of feedback delay during on-line control of quality and quantity of the machining process.

### Souhrn

Vysoce energetické resp. vysokorychlostní kapalinové paprsky či abrazivní kapalinové paprsky, zúženě pak vodní či abrazivní vodní paprsky, se staly v uplynulých třiceti letech velmi důležitým nástrojem pro dělení materiálu nebo jeho dezintegraci. Tento trend bude i nadále pokračovat, protože kapalinové paprsky mají podobně, jako ostatní flexibilní nástroje (plasma, laser, elektronový paprsek) velkou výhodu v tom, že při standardních aplikacích je není možno zničit a není ohroženo ani pohyb vyvozující strojní zařízení. Velkou výhodou kapalinového paprsku proti třem dalším zmiňovaným nástrojům je skutečnost, že řez je prakticky chladný, protože při interakci paprsku s materiálem dochází k lokálnímu zvýšení teploty pouze v mikroskopickém objemu, který odpovídá kontaktu abrazivního zrna s děleným – obráběným – materiálem. Výhodou kapalinových paprsků je dále poměrně vysoká mocnost materiálu, kterou je možno kvalitně prořezat a snadná možnost regulace i řízení, což umožňuje aplikaci v automatizovaných provozech a na robotech.

Aby bylo možno účinně řídit proces interakce kapalinového paprsku s materiálem, a to nejen pro účely řezání, ale i soustružení, vrtání, broušení, leštění či dokonce frézování, je třeba mít k dispozici vztahy popisující vývoj veličin důležitých pro stanovení účinnosti procesu. Přednáška se zaměřuje na určení fyzikálních vztahů popisujících dva časově a prostorově oddělené aspekty existence kapalinového paprsku, z nichž druhý je tím prvním do značné míry determinován.

Prvním v přednášce uvedeným aspektem je vznik kapalinového paprsku a jeho šíření prostorem. Pozornost je zaměřena na vytvoření jednoduchého makroskopického modelu, který poskytuje okamžité výsledky dobře korelující s experimentem. Tento model je nutný pro velmi rychlé výpočty změn parametrů při dialogového způsobu řízení kvantity a kvality interakčního procesu mezi kapalinovým paprskem a obráběným materiálem, a to zejména při frézování. Model vychází z představy, že paprsek tvoří kompaktní konvergující jádro a divergentní obal. Výsledky modelu odpovídají provedeným experimentům i struktuře proudu vypočtené pomocí soustav diferenciálních rovnic, kterými byl děj popsán podstatně podrobněji.

Druhý rozebíraný aspekt je interakce kapalinového paprsku s materiálem. Pozornost je věnována jak interakci proudu čisté kapaliny s abrazivními zrny při směšovacím procesu, tak interakci již vygenerovaného abrazivního kapalinového paprsku s obráběným materiálem. Proces je popsán pomocí makroskopických parametrů zjednodušenými rovnicemi tak, aby bylo možno výpočty co nejvíce zrychlit a zkrátit tak zpětnovazební zpoždění při dialogovém způsobu řízení kvantity a kvality obráběcího procesu. **Klíčová slova:** kapalinový paprsek, vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, řezání kapalinovým paprskem, kapalinový paprsek vysoké energie, fyzikální a technické parametry, fyzikální modelování, abrazivní materiál, porušení materiálu, obrábění kapalinovým paprskem, rychlostní profil, struktura paprsku, struktura materiálu, interakční procesy

**Keywords:** liquid jet, water jet, abrasive water jet, liquid jet cutting, highenergy liquid jet, physical and technical parameters, physical modeling, abrasive material, material disintegration, liquid jet machining, velocity profile, jet structure, material structure, interaction processes

# Obsah

1. Úvod	6
2. Fyzikální veličiny a technické parametry kapalinových paprsků	7
3. Vznik kapalinového paprsku a jeho šíření	. 10
4. Struktura kapalinových paprsků a její vliv na interakční procesy	. 14
5. Struktura materiálů a její vliv na interakční procesy	. 16
6. Makroskopický popis interakčního procesu	. 19
7. Závěr	. 25
Literatura	. 26
Seznam použitých symbolů	. 28

## 1. Úvod

Systematický výzkum využití energie kapalinového proudu k porušování materiálu a cílené uplatňování výsledků tohoto výzkumu v praxi bylo zahájeno zhruba v padesátých letech dvacátého století, i když využití energie proudící kapaliny v těžebním průmyslu se objevovalo již dříve. Nejprve byly studovány paprsky vody bez cílené změny jejích vlastností. Ovšem již v šedesátých letech 20. století byly studovány různé příměsi měnící některé vlastnosti kapaliny a tím i kvalitu toku. Byly také zahájeny pokusy o "rozpulzování" paprsku. Cílem je dosáhnout stavu, kdy na materiál dopadají samostatné, v určitém časovém odstupu po sobě jdoucí, kapky vysoké rychlosti. Tyto způsoby zvyšování účinku paprsku na materiál jsou rozvíjeny dodnes. V sedmdesátých letech byla rozpracována myšlenka dodávat do proudu kapaliny pevné abrazivní částice. Tím byl vytvořen základ pro získání velmi efektivního, flexibilního, kapalinového obráběcího nástroje. Nevýhodou je závislost účinku tohoto paprsku na velkém množství parametrů, jejichž nepatrná změna může vyvolat výrazné odchylky výsledného paprskem vytvořeného tvaru od požadovaného, přičemž hodnoty některých parametrů jsou v procesu obrábění v současné době z principu neovlivnitelné, nestanovitelné či nepředvídatelné. Proto je oblast fyzikálního výzkumu týkajícího se uplatnění kapalinových paprsků v praxi stále živá.

Abrazivnímu vodnímu paprsku (obecněji abrazivnímu kapalinovému paprsku) a jeho interakci s obráběným materiálem byla věnována řada výzkumných prací. Interakce byla studována zejména Hashishem, který modifikoval teorie impaktu částic popsané Bitterem a Finniem a přizpůsobil je popisu účinků abrazivního vodního paprsku [1] až [5]. Této problematice se věnovali také Zeng a Kim, kteří vytvořili regresí na základě četných experimentů soustavu rovnic pro výpočet účinnosti abrazivního paprsku a jeho ekonomických parametrů [6] až [8]. Mimo to mnoho autorů z celého světa dílčími poznatky přispělo k popisu chování abrazivního paprsku a k analýze jeho účinků na materiálu a bylo vytvořeno několik dalších modelů. Tyto modely však stále nejsou dostatečně přesné pro výpočty při řízení procesu řezání či obrábění materiálů kapalinovým paprskem. Stanovením vhodnějších fyzikálních vztahů popisujících strukturu abrazivního kapalinového paprsku a jeho interakci s materiálem je možno získat přesnější model určující kvantitativní i kvalitativní účinky paprsků. Tomuto problému se věnuje i Hlaváč, který odvodil teoretické vztahy popisující makroskopické účinky kapalinového paprsku bez přísad na materiál [9] až [11], zabývá se procesem směšování abraziva s kapalinovým paprskem ve směšovací komoře a usměrňovací trubici [12] až [14] a účinky abrazivního paprsku na materiál [14] až [16]. Zaměřuje se také na vytvoření komplexnějšího matematicko-fyzikálního popisu interakce abrazivního vodního paprsku s materiálem, aby bylo možno výrazně zpřesnit a zefektivnit obrábění tímto nástrojem. Hlavní pozornost je soustředěna na odklon trajektorie paprsku v řezné stopě, a to nejen při řezání, ale i jiných způsobech obrábění.

#### 2. Fyzikální veličiny a technické parametry kapalinových paprsků

Předpokladem úspěšné aplikace kapalinového paprsku v praxi je vhodná volba kombinace veličin a parametrů, které určují jeho efektivitu. Fyzikální veličiny jsou spojovány především s teoretickým popisem, protože v praxi jsou výrazně limitovány technickými možnostmi použitých zařízení a komponent. Mnohdy pak získávají charakter technických parametrů. Rozlišení je možno také definovat tak, že veličiny popisující účinek kapalinového paprsku lze považovat za fyzikální tehdy, je-li jejich změna v oblasti technicky realizovatelných hodnot spojitá. Nabývá-li v oblasti technické realizace veličina pouze diskrétních hodnot, je považována za technický parametr. Další možná interpretace je taková, že všechny fyzikální veličiny se při technické realizaci stávají technickými parametry procesu. Protože z hlediska možných parametrů či veličin jsou kapalinové paprsky bez i suspenzní abrazivní kapalinové paprsky podmnožinou příměsí tzv. "vstřikovaných" abrazivních kapalinových paprsků (injection abrasive liquid jets), je výčet uveden právě pro tyto abrazivní kapalinové paprsky.

Průměr kapalinové trysky je fyzikální veličina, která je v praxi z technických důvodů proměnná pouze v diskrétních hodnotách (nejsou vyráběny libovolné průměry trysek, ale pouze určité řady). Z technického hlediska je navíc změna této veličiny za provozu prakticky neuskutečnitelná. V případě abrazivního paprsku je situace ještě složitější, neboť mezi průměrem kapalinové trysky, průměrem usměrňovací trubice pro abrazivo a střední velikostí částic abraziva je nutno dodržet určité relace. Proto má průměr kapalinové trysky charakter technického parametru, i když ve výpočtových modelech pro stanovení porušení materiálu kapalinovým paprskem je spojitou veličinou.

Vzdálenost výstupního ústí kapalinové trysky (resp. abrazivní trubice) od povrchu materiálu je fyzikální veličina, pro kterou závislost účinku kapalinového paprsku dosahuje výrazného maxima. Pro nepulzující kapalinový paprsek leží toto maximum v blízkosti výstupního ústí kapalinové trysky (či usměrňovací trubice abrazivního paprsku). Je-li pohybové zařízení uzpůsobeno tak, aby bylo možno tuto veličinu definovaným způsobem měnit, stává se vhodnou pro řízení procesu obrábění; výrazně kvantitativně i kvalitativně ovlivňuje působení kapalinového paprsku na obrobek. Většinou je však vzdálenost výstupního ústí od povrchu materiálu během procesu obrábění neměnná, což z ní dělá technický parametr.

Úhel dopadu paprsku vzhledem k normále k povrchu materiálu je fyzikální veličina, která ovlivňuje sklon drážky vzhledem k rovině kolmé k povrchu materiálu a obsahující tečnu k trajektorii stopy paprsku. Ovlivňuje také hloubku dna drážky pod povrchem materiálu (pokud se nejedná o prořezávání materiálu) a jejími změnami je možno provádět korekce kolmosti stěn drážky při řezech, zejména v zakřivených částech dráhy, kde působí na částice paprsku v drážce odstředivá síla (především u abrazivního paprsku). Řízení úhlu na obráběcích

strojích s kapalinovými paprsky je náročný technický problém i při zavedení kvalitních vztahů popisujících závislost sklonu stěn drážky na nastavených technických parametrech kapalinového paprsku, obráběcích trajektoriích apod. Problém je náročný z důvodu postupné ztráty koherence paprsku při průchodu obrobkem (těžko definovatelná korekce na rozšíření či zúžení aktivní stopy paprsku) i z důvodu obtížně předvídatelného vlivu nehomogenit obráběného materiálu na odchýlení flexibilního nástroje z původního směru.

Tlak kapaliny před tryskou je fyzikální veličina, která významně ovlivňuje výkonové i kvalitativní projevy kapalinového paprsku. Jsou-li ostatní technické parametry ve svých změnách výrazně limitovány nebo udržovány konstantní, tato veličina je z technického hlediska v podstatě postačující k řízení procesu z hlediska kvantitativního i kvalitativního. Je vhodná k regulaci, neboť existují dostatečně přesné snímače i akční členy ovládající stavové veličiny čerpadel. Je možno buď udržovat definovanou hodnotu tlaku kapaliny nebo používat jeho plynulou změnu podle technologických potřeb.

Rychlost pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu je rovněž fyzikální veličina s výrazným vlivem na kvalitu i kvantitu porušení materiálu. Podobně jako tlak je tato fyzikální veličina použitelná jako technický parametr umožňující regulaci hloubky porušení materiálu. Je možné zajistit snímání okamžité hodnoty i konstruovat pohony zajišťující definovaný pohyb materiálu resp. pohyb trysky, v níž vzniká paprsek, s téměř plynule měnitelnou rychlostí. Regulace či řízení může probíhat v obou základních módech jako u tlaku: lze udržovat konstantní hodnotu nebo veličinu plynule měnit definovaným způsobem na základě potřeb technologického procesu.

Dosud uvedených pět fyzikálních veličin, resp. technických parametrů, se týká všech kapalinových paprsků, tedy i bez přísad. Kapalinové paprsky bez přísad však nemají v současné praxi takové přímé využití, při kterém by bylo možné plně využít možností přímého řízení technologických parametrů. Jsou používány pro dělení velmi měkkých materiálů v textilním, papírenském nebo potravinářském průmyslu, plastů, gumy, kůže a voštinových, pěnových a jiných měkkých poddajných materiálů, u kterých je tloušťka zanedbatelná a kvalita povrchu řezné drážky se při zvyšování tlaku kapaliny nad určitou minimální hodnotu prakticky nemění pro široký obor řezných rychlostí. U abrazivního vodního paprsku umožňuje automatizace obráběcího procesu využití skrytého potenciálu tohoto nástroje (obecnější název abrazivní kapalinový paprsek se užívá méně, protože zpravidla je při aplikacích v praxi jako nosné médium pro abrazivo používána voda, neboť je to ekologicky i ekonomicky nejpřijatelnější kapalina). Využití teoretického modelu založeného na fyzikálních veličinách při řízení a automatizaci obrábění materiálů abrazivním vodním paprskem vysoké energie zahrnuje jak predikci či regulaci odpovídajících technických parametrů, tak výpočet jejich změny na základě snímaných veličin v dialogovém režimu řízení. Při automatizaci pracoviště s abrazivním vodním paprskem je nutno vzít v úvahu, mimo výše uvedené, i další specifické technické parametry (fyzikální veličiny), které ovlivňují kvalitu a kvantitu porušení materiálu.

Množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku je fyzikální veličina, kterou lze ovlivňovat hloubku porušení materiálu i kvalitu vzniklého povrchu. Většinou je však v praxi používáno pouze jedno nastavení, což redukuje tuto veličinu na technický parametr. Existují ovšem zařízení, která relativně plynule a definovaně dávkují abrazivní materiál do paprsku, a umožňují i změnu tohoto parametru za provozu. Proto je potenciálně možné začlenit regulaci (případně i řízení) dávkování množství abraziva do automatizačního procesu. Do modelu je tento parametr zaveden jako fyzikální veličina, ovšem v návaznosti na ostatní veličiny, neboť proces porušení materiálu je jednoznačně determinován teprve konkrétní kombinací hodnot všech veličin uvedených v tomto výčtu.

Střední velikost zrna abrazivního materiálu (zrnitost abraziva) má velký vliv na kvalitu vzniklého povrchu a ovlivňuje hloubku porušení materiálu. Jedná se v podstatě o technický parametr, protože i tato veličina je v praxi determinována parametry materiálu, který je dostupný. Z principu není možno tento parametr spojitě měnit, i když do výpočtových modelů je možno jej zahrnout jako spojitě proměnnou fyzikální veličinu. Střední zrnitost dodávaných materiálů je určena technologickými postupy dodavatelů a nabývá diskrétních hodnot určitých řad. Veličina (parametr) ovšem úzce souvisí s nutným průměrem kapalinové trysky a nutným průměrem usměrňovací trubice, neboť při dané zrnitosti abraziva a optimální kombinaci průměrů kapalinové trysky a usměrňovací trubice existuje optimální hmotnostní přítok abraziva do systému tak, aby byla energie kapaliny maximálně efektivně využita.

Průměr usměrňovací (abrazivní) trubice patří k technickým parametrům. Za provozu jej není možno měnit ani na zařízeních, která změnu umožňují. Do výpočtového modelu ovšem může být zahrnut jako spojitě proměnná fyzikální veličina. Má vliv na šířku řezu paprsku a spolu s průměrem kapalinové trysky, střední velikostí zrna abrazivního materiálu a hmotnostním průtokem má zásadní význam pro účinnost paprsku a kvalitu vytvořeného povrchu.

Délka usměrňovací (abrazivní) trubice je další z technických parametrů, který ovlivňuje kvalitu vytvořeného povrchu. Ve výpočtovém modelu může být použit jako spojitá fyzikální veličina, ale v praxi není použitelný pro účely regulace či řízení, neboť jeho změna vyžaduje fyzickou výměnu trubice (jako u průměru), a to je poměrně náročný proces i u těch zařízení, která to umožňují.

Kvalita abrazivního materiálu má také charakter spíše technického parametru než fyzikální veličiny, i když je možno ji jako takovou zahrnout do výpočtových modelů. Výrazně ovlivňuje výkon abrazivního paprsku a kvalitu vytvořeného povrchu, ale jedná se o parametr velmi těžko stanovitelný i ovladatelný, neboť se vymyká možnosti přímého řízení. Většinou je totiž používán přírodní materiál (granát, olivín), u něhož jsou sice vlastnosti zjistitelné, ovšem dané lokalitou naleziště. Z ekonomických důvodů zpravidla není možné, aby byly abrazivní materiály zkvalitňovány náročnými technologickými postupy, proto se používají v přírodní formě; jsou pouze jednoduchými postupy pročištěny, vytříděny a rozsítovány. Nejsou-li odstraněna vnitřní napětí a defekty, významné příčiny porušení abrazivního materiálu v procesu vzniku i působení abrazivního paprsku, dochází k významnému poškozování abrazivních částic. Míra tohoto porušování je ovšem v přímé relaci s účinností paprsku a kvalitou vzniklého povrchu. Tento parametr však vůbec není vhodný pro začlenění mezi regulované nebo řízené parametry kapalinového paprsku.

Na základě výčtu fyzikálních veličin, resp. technických parametrů, a jejich vlivu na kvalitu technologického procesu či jejich regulovatelnosti je možno vybrat soubor veličin (parametrů) mimořádně vhodných pro řízení technologie kapalinového paprsku. V pořadí jak byly uvedeny při předchozím rozboru se jedná o tyto parametry: vzdálenost výstupního ústí trysky (resp. usměrňovací trubice) od povrchu materiálu, úhel dopadu paprsku, tlak kapaliny před tryskou, rychlost pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu a množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku.

### 3. Vznik kapalinového paprsku a jeho šíření

Výtok kapaliny z trysky není při popisu působení kapalinových paprsků na materiál klíčový, ale kvalita přeměny statické energie kapaliny na kinetickou má základní vliv na chování paprsku. Výtok z trysky byl modelován zejména pomocí klasických rovnic hydrodynamiky, ale výroba těchto prvků je do značné míry ovlivněna materiálovými, technologickými a technickými podmínkami, které limitují možnosti uskutečnění dosavadních teoretických závěrů. Při velmi malých průřezech trysek proto zpravidla skutečný paprsek neodpovídá klasickým teoretickým modelům. Proto bylo nutno vytvořit model opřený o experimentální výsledky a průřez teoretických poznatků modifikovaných do jedné funkční závislosti. Model pro stanovení rychlostního profilu paprsku je pojat semiempiricky [17], protože hlavním cílem je časově nenáročné určení hodnot potřebných parametrů toku kapaliny bez nutnosti numerického řešení složitých rovnic.

Osovou rychlost vytékající kapaliny je možno při dostatečném zjednodušení určit z transformace statické formy energie kapaliny charakterizované tlakem do pohybové energie proudu. V tomto pojetí je možno k výpočtu použít upravenou Bernoulliho rovnici. Nejčastěji používanou kapalinou v praxi je voda, pro kterou lze na základě experimentálních hodnot uvedených v literatuře [18] stanovit

regresní vztah závislosti stlačitelnosti na tlaku. Ztráty třením jsou zahrnuty do výtokového součinitele, který je chápán klasicky jako součin kontrakčního a rychlostního součinitele. Kontrakční součinitel je pro určitý tvar považován za konstantní, protože je přímo určen geometrickým uspořádáním. Rychlostní součinitel závisí na více faktorech. Do modelu byla použita závislost podle [19], kterou pro turbulentní proudění v hladkém potrubí odvodil Blasius. Výtokový součinitel trysky je pak možno stanovit ze vztahu:

$$\mu = \alpha_c \left( 1 - \frac{0.184}{Re_{ef}^{0.2}} l_{ud} \right) \tag{1}$$

Při popisu mechanismu vývoje paprsku mimo trysku je však nutno zohlednit také expanzi stlačené kapaliny na výstupu z trysky. Tím je určena minimální rozpadová délka paprsku, která je odvozena z doby expanze kapaliny na výstupu z trysky. Model rychlostního profilu kapalinového paprsku po opuštění trysky navazuje na rovnici popisující rychlostní profil uvnitř trysky. Rychlostní profil kapalinového paprsku vně trysky je určen divergencí paprsku a konvergencí jeho kompaktního jádra. Poloměr jádra paprsku při výtoku pro pokles rychlosti proudu o 95%, což odpovídá asi 99% energie uvnitř jádra, je na základě rovnice popisující rychlostní profil uvnitř trysky [10] určen vztahem:

$$r_{j} = \frac{1}{2} d_{o} \left( 1 - 0.05 \right)^{\log^{-1}(Re+1)}$$
(2)

Poloměr jádra ve vzdálenosti *L* od trysky je vypočten ze vztahu:

$$r_{jL} = r_j - L tg\delta \tag{3}$$

Tangenta úhlu divergence paprsku po výstupu z trysky je dána poloměrem jádra paprsku na výstupu z trysky a délkou válcového ústí trysky:

$$tg\delta = \frac{\left(d_o - 2r_j\right)}{2l_u} \tag{4}$$

Průměr paprsku po výstupu z trysky a jeho rychlostní profil závisí na tom, zda v dané vzdálenosti již jádro vymizelo či nikoli. Pro závislost osové rychlosti proudu na vzdálenosti od výstupu z trysky byl zvolen předpoklad exponenciálního útlumu a byl určen vztah pro součinitel útlumu. Soustava rovnic určujících průměr paprsku, osovou rychlost a útlum ve vzdálenosti L od výstupu z trysky je dána těmito vztahy:

$$d_{L} = 2r_{j}e^{\frac{1}{2}\xi L} + \frac{L}{2l_{u}}\left(d_{o} - 2r_{j}\right)$$
(5)

$$v_L = \sqrt{2\mu p_o \rho_o^{-l} \left( l - \gamma p_o \right)} e^{-\xi L}$$
(6)

$$\xi = \frac{C_x \,\rho_{env}}{\mu \rho_o d_o} \tag{7}$$

· ¬2

Soustavu doplňují podmínky modelující příčný rychlostní profil v závislosti na existenci a rozměrech jádra paprsku. Pro rotačně symetrický proud umožňují určit rychlostní profil ve vzdálenosti *L* od trysky tyto podmínky:

$$\forall (r_{jL} - |y|) > 0 \implies v_L(y) = v_L$$
(8)

$$\forall (r_{jL} - |y|) \leq 0 \implies v_L(y) = v_L e^{-\left\lfloor \frac{2(|y| - r_{jL})}{d_L} \right\rfloor}$$
(9)



**Obr. 1.** Schéma struktury kapalinového paprsku a rychlostního profilu proudu kapaliny podle zahraničních autorů (a). Graf rychlostních profilů  $v_L(y)$  vypočtených v několika vybraných vzdálenostech *L* od ústí trysky podle teorie prezentované v kap. 3 (b).

Uvedená teorie byla porovnána s vývojem rychlostního profilu určeným podle výsledků experimentů zahraničních odborníků. Graficky lze pro účely porovnání znázornit strukturu rychlostního profilu rotačně symetrického paprsku schématickým řezem, který byl nakreslen na základě zahraničních výsledků. V obr. 1 je uveden pod písmenem a). Písmenem b) je v obr. 1 označen graf, ve kterém křivky znázorňují rychlostní profily rotačně symetrického proudu vypočítané v několika vzdálenostech od trysky podle rovnic (1) až (9).



**Obr. 2.** Závislost rychlostního profilu  $v_L(y)$  vodního paprsku ve dvou vzdálenostech od ústí trysky na radiální souřadnici *y* od osy paprsku.

Teoretické výsledky byly konfrontovány i s experimenty, na kterých se autor podílel. Hlavní výsledky jsou shrnuty do obr. 2. Byl použit snímač síly opatřený odolnou dopadovou ploškou, nad kterou byla umístěna krycí kovová fólie. Po vytvoření otvoru ve fólii dopadá procházející část paprsku na dopadovou plochu snímače a příslušnou sílu je možno zaznamenat a analyzovat. Experimentální zařízení a použitá metoda měření umožňují získat informace o silách působených paprskem při dopadu na snímač v závislosti na průměru otvoru, který paprsek v tenké odolné kovové fólii prorazil. Záznamy sil a velikosti otvorů vytvořených paprskem ve fólii separující činnou a nečinnou část paprsku (činná část způsobí otvor při síle detekované snímačem), byly analyzovány, zpracovány a porovnány s teoretickým modelem [17]. Prodlužování doby působení paprsku způsobuje zvětšení části paprsku, která projde fólií. Ze změřené síly a plochy otvoru v separační folii je možno určit střední tlak proudu kapaliny na soustředných kružnicích, které mají poloměr rovný průměru poloměrů po sobě následujících otvorů. Z rozdílu sil a příslušných ploch je určen tlak, z něhož je dle Bernoulliho rovnice vypočtena rychlost v příslušném mezikruží. Takto získané experimentální hodnoty velikosti rychlosti v závislosti na vzdálenosti od osy paprsku jsou porovnány s křivkami rychlostních profilů vypočítaných pomocí modelu uvedeného v této kapitole.

### 4. Struktura kapalinových paprsků a její vliv na interakční procesy

Na základě struktury můžeme rozlišit několik základních druhů kapalinových paprsků. Struktura paprsku má významný vliv na způsob porušení materiálu i jeho rozsah. Prvním typem paprsku je tzv. kontinuální paprsek bez přísad. Rozumí se tím paprsek kapaliny, který není cíleně modulován, nucen k rozpadu nebo dotován abrazivy či chemickými aditivy zlepšujícími jeho vlastnosti. Tento paprsek je účinný na tenké materiály, zejména organického původu, a pro větší mocnosti materiálu pouze na velmi měkké materiály (guma, molitan, polystyren). Paprsky tohoto typu je možno také využívat pro čištění ploch od rzi, starých nátěrů, nánosů nečistot, pro destrukci zvětralých částí betonu a horninových materiálů a při speciálních aplikacích na nástrojích pro vytváření hlubokých řezů v horninách, betonech a jiných křehkých zrnitých materiálech a pro vrtání do těchto materiálů.

Dalším typem jsou kontinuální kapalinové paprsky s chemickými aditivy zlepšujícími koherenci paprsku i jeho průraznost. Avšak i tyto paprsky je možno s výhodou použít pouze na obdobné materiály, jako kontinuální paprsky čisté kapaliny. Ve volném prostředí, kde je zvýšení kvality paprsku nejvíce potřebné, je navíc zpravidla nežádoucí používat chemické látky zušlechťující kapalinový paprsek z ekologických důvodů.

Třetím typem paprsku je tzv. abrazivní vodní (kapalinový) paprsek. Tento paprsek může vznikat dvěma způsoby. První z nich je nasávání směsi vzduchu a abrazivního materiálu pomocí podtlaku vytvořeného vodním (kapalinovým) paprskem ve směšovací komoře, v níž pak dochází k mísení abraziva a vzduchu s vodním (kapalinovým) proudem. Druhý způsob vytváření abrazivního vodního (kapalinového) paprsku je založen na vytlačování připravené směsi vody (kapaliny) s abrazivem ze speciální tlakové nádoby přes odolnou trysku. Tyto abrazivní vodní (kapalinové) paprsky mohou porušovat (tedy řezat, vrtat či jinak obrábět) veškeré dosud známé materiály.

Čtvrtým významným typem jsou paprsky založené na neaditivované kapalině (většinou vodě), ale s výraznějším účinkem při porušování materiálu. Jsou to pulzní, modulované nebo kavitační paprsky. Používají se hlavně pro účely odstraňování povrchových vrstev materiálu při čištění a objemové destrukci zpravidla zvětralých křehkých materiálů. Jejich výhodou je skutečnost, že mají své vysoké účinky již při poměrně nízkých tlacích kapaliny. Charakter jejich působení však není vhodný pro přesné obrábění.



**Obr. 3.** Znázornění procesu směšování abraziva s kapalinovým paprskem ukazuje řez tryskou, přívodní trubicí vzduchu a abraziva, směšovací komorou a usměrňovací trubicí se znázorněním procesu sání a urychlování abraziva.



Pro obrábění materiálů je nejužívanější abrazivní vodní paprsek, proto bude dále věnována pozornost zejména jeho vzniku a působení na materiál. V praxi nejčastěji užívaný abrazivní vodní paprsek je generován interakcí vodního paprsku s částicemi abrazivního materiálu ve směšovací komoře a usměrňovací trubici, schéma procesu je na obr. 3. Tuto interakci je možno vyšetřovat na základě několika fyzikálních pojetí [12] až [14] a [20] až [22], jejichž základem je aproximace paprsku několika způsoby, a to pomocí sledu kulových nebo válcových kapek, spojitého proudu nebo funkční závislost popisující průběh zatěžujícího tlakového působení, jehož profil odpovídá rychlostnímu poli na průřezu paprsku, schématické znázornění je na obr. 4.

Spojitý proud je použitelný zejména v případě, že částice materiálu jsou dostatečně malé ve srovnání s příčným rozměrem paprsku [12, 14]. Vyjádření

paprsku sledem kapek je výhodnější při analýze změn hybnosti částic. Tento přístup je vhodný zejména při modelování interakce paprsku s částicemi srovnatelného průměru jako je průměr paprsku [12, 14]. Vyjádření paprsku pomocí rychlostního profilu je vhodné zejména pro vyšetřování napěťových polí způsobených v nehybné (nebo téměř nehybné) částici materiálu úderem paprsku na určitou část jejího povrchu [13, 20].

Výpočet ve všech uvedených případech probíhá postupně po krocích daných buď zvoleným časovým intervalem (v případě spojitého proudu) nebo dobou od počátku střetu do odeznění interakce kapky s částicí materiálu (v případě kapkových reprezentací paprsku). U kapkových reprezentací je možné pro účely urychlování částice volit časový interval jako dobu odeznění napěťové vlny v kapce kapaliny a dobu rozšíření napěťové vlny v materiálu z interakční plochy na protilehlou plochu částice a zpět do jejího středu jako čas interakce pro účely výpočtu napěťových stavů uvnitř částice. Vstupními okrajovými podmínkami dalšího kroku jsou vždy konečné parametry kroku předchozího, zejména rozdíl rychlosti paprsek - částice.

### 5. Struktura materiálů a její vliv na interakční procesy

Zcela specifickou skupinu materiálů tvoří kovy. Působení kapalinového paprsku bez přísad na kovy je až na výjimky velmi málo efektivní. Kovy jsou typický pružně-plastický materiál s dostatečnou pevností a při působení kapalinového paprsku se tato skutečnost plně projevuje. Většinou je lehce narušena pouze slabá povrchová vrstva. Zejména u kovů vyšší pevnosti (dural, ocel, titan) jsou stopy paprsku mnohdy téměř neznatelné. Pokud dochází k porušení kovů kapalinovým paprskem bez přísad, nese toto porušení znaky typické pro deformační úběr materiálu způsobený střetem materiálu s rychle se pohybujícími kapkami kapaliny. Eroze materiálu je způsobena vznikem tlakového impulzu vyvolaného v kovovém materiálu při dopadu rychle se pohybujícího čela paprsku nebo kapky stlačitelné kapaliny. U kovových materiálů můžeme proto častěji pozorovat porušení při větší vzdálenosti povrchu materiálu od trysky, protože paprsek se již rozpadá (nebo rozpadl) na kapky, a ty pak působí erozi. Popsané účinky paprsku se mohou mísit i s lokálními kavitačními účinky vznikajícími na povrchu kovu v důsledku uvolnění plynů z kapaliny nebo jejímu zplynění při lokálním poklesu parciálních tlaků. Specifické chování kovů při interakci s kapalinovým paprskem bez přísad je v přímé souvislosti s jejich vnitřní stavbou. Je způsobeno tím, že krystalová mříž kovů je vzhledem ke specifické vazbě atomů schopna přenést daleko více energie, aniž se poruší, než jiné krystalové mříže. Materiál zpravidla není výrazně hloubkově narušován.

Sklo a jiné amorfní materiály nemají krystalovou mřížku ani předem známé významné plochy nespojitosti, oslabení či narušení, jak tomu zpravidla bývá

u krystalických materiálů. Jsou pevné, ale málo pružné, často díky procesu tuhnutí, který neprobíhá v celém objemu při stejné teplotě, obsahují oblasti s vnitřním pnutím. Energie, kterou jsou schopny absorbovat, aniž by se porušily, je velmi malá. Protože však nemají žádné významné směry či roviny nespojitosti či energetického oslabení vazeb, jak bylo uvedeno, je jejich porušení dáno lokálními nehomogenitami nebo energetickými poruchami. Plochy nejmenší soudržnosti jsou v každém místě jiné, a proto se zdánlivě "náhodně" sklo i jiné amorfní materiály při působení kapalinového paprsku tříští, odštěpují, praskají a lámou. Tato náhodnost je však svázána právě s lokálními podmínkami určenými vnitřní strukturou. Destrukce amorfních látek při mletí je velmi pravděpodobná, ale střední velikost produktu je nutně zatížena značnou nejistotou.

Poslední skupinou se zvláštním chováním jsou krystaly a látky s výraznou makroskopicky významnou krystalickou strukturou. Při interakci kapalinových paprsků s těmito látkami a krystaly často dochází k výraznému šíření poruch podél krystalografických ploch. Při vhodném situování směru toku paprsku a orientace krystalu nebo krystalické látky je možno dosáhnout významného zvýšení lokálního porušení. Při konkrétních aplikacích lze tuto skutečnost využít nebo potlačit. Při využití popsaných jevů je potřeba snížit plošnou hustotu energie (resp. příkon) ve stopě paprsku. Ke splnění tohoto cíle se zpravidla užívá snižování tlaku kapaliny před tryskou. Bylo pozorováno, že tlak nutný ke vzniku porušení krystalů odpovídá přibližně dvojnásobku až trojnásobku napětí pro smykové porušení, v případě výrazné laminace materiálu může klesnout na dvojnásobek tahového napětí na styčných plochách mezi různými vrstvami materiálu.

Jevy probíhající při interakci kapalinového paprsku s materiálem je možno dedukovat ze schématu možných relací mezi střední velikostí částic materiálu a středním průměrem toku kapaliny (paprsku) znázorněných na obr. 5. Relace mezi středním příčným rozměrem paprsku a středním průměrem částic materiálu je určujícím faktorem chování materiálu.

Na základě zkušenosti je možno rozlišit tři základní relace uvedené na obr. 5 a příslušné typy odezvy částic materiálu na působení kapalinového paprsku (a to i v případě, že jsou volné, ale téměř se nepohybují). První vzájemná relace je taková, že charakteristický rozměr paprsku je daleko menší než střední rozměr částice vázané v materiálu. Má-li paprsek dostatek energie, dochází jeho působením k hloubkovému narušování materiálu včetně stavebních částic bez jejich objemové destrukce. Druhý případ nastává, je-li rozměr paprsku srovnatelný s rozměrem stavebních částic materiálu. Při interakci s paprskem dostatečné energie dochází k objemovému porušování těchto částic. Třetí případ je charakteristický tím, že rozměr paprsku je daleko větší než velikost částic materiálu. Částice jsou kapalinou dostatečné energie pouze uvolňovány ze struktury látky a urychlovány, přičemž k jejich porušování nedochází.



**Obr. 5.** Relace velikosti (průřezu) kapalinového paprsku a částice materiálu (zde pro případ, kdy je vázaná v látce): a) průřez paprsku je velmi malý ve srovnání s průřezem částice - vzniká stopa (drážka) v částici; b) průřez paprsku je srovnatelný s průřezem částice - vzniká objemové porušení částice; c) průřez paprsku výrazně převyšuje průřez částice - materiál se na plochách nižší soudržnosti mezi částicemi rozvolňuje a vznikají uvolněné částice.

Působení kapalinového paprsku bylo popsáno teoretickým modelem [9] až [11]. Tento model umožňuje kvalitativní i kvantitativní stanovení míry porušení materiálu při interakci s kapalinovým paprskem (obr. 6).

Nejdůležitějšími parametry, které je možno určit, jsou hloubka vniku do materiálu h a součinitel účinnosti paprsku v interakci  $\alpha$ , pro které byly odvozeny tyto vztahy:

$$h = \frac{\pi d_{o} \sqrt{2\rho_{o} \mu^{3} p_{o}^{3} \gamma_{R}^{3} e^{-5\xi L}} (1 - \alpha^{2}) \cos \theta}{4 \chi \rho_{M} v_{Pm}^{\frac{\rho_{o}}{\rho_{M}}} \left( \alpha^{2} e^{-5\xi L} \mu p_{o} \gamma_{R} + \frac{\rho_{o}}{\rho_{M}} \sigma \right)}$$
(10)  
$$\alpha = 1 - \frac{C_{f}^{2} \sqrt{2\mu^{3} p_{o}^{3} \gamma_{R}^{3}} \rho_{M}^{*} k^{*}}{8 \sqrt{\rho_{o}} \eta \sigma_{s} a e^{3\xi L}}$$
(11)

Jak vyplývá z těchto vztahů, oba parametry jsou závislé na materiálových vlastnostech, zejména pevnostech, a to především pevnosti v tlaku (resp. v tahu) a ve smyku. Proto je nyní stanovení těchto parametrů u materiálů či částic věnována mimořádná pozornost. Jsou hledány cesty, jak určit tyto parametry

s dostatečnou přesností i v případě, že je není možno stanovit experimentálně, ale bylo by možno stanovit jiné důležité či charakteristické veličiny, např. měrnou povrchovou energii.



**Obr. 6.** Příklad závislosti hloubky desintegrace *h* horninového materiálu (velmi pevného abrazivního pískovce) způsobené čistým vodním paprskem dopadajícím kolmo na povrch materiálu v závislosti na tlaku kapaliny před vodní tryskou  $p_o$ . Průměr trysky  $d_o = 0,25$  mm, vzdálenost povrchu vzorku od výstupu z trysky L = 10 mm, rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu  $v_P = 25$  mm.s<sup>-1</sup>. Výpočet křivky proveden podle vztahů (10) a (11).

#### 6. Makroskopický popis interakčního procesu

Hlavními modely působení kapalinového paprsku na materiál používanými v současné době v praxi jsou ty, které představily výzkumné týmy úzce svázané s nejvýznamnějšími americkými producenty technologických celků užívajících kapalinové paprsky jako řezné nástroje. Jsou to firmy Flow International a KMT (dříve Ingersoll Rand). Firma Flow International se opírá o teoretické práce Hashishe, který řešil problém působení kapalinového paprsku jako dopad abraziva na různě šikmé plochy [1] až [5]. Firma KMT se opírá o experimentální práce provedené Zengem a Kimem, kteří svůj model staví na regresní analýze rozsáhlé databáze experimentálních dat [6] až [8].

Při řešení problematiky interakce kapalinového paprsku s materiálem se naše pracoviště opírá o třetí model, který byl prezentován na mezinárodním fóru Hlaváčem. Tento model bude podrobněji rozebrán. Byl vytvořen proto, aby bylo možno odstranit nebo potlačit nedostatky modelu Hashishe, který je částečně v rozporu s jevy probíhajícími v řezném kanálu, i modelu dvojice Zeng a Kim, který dosahuje vysoké přesnosti a spolehlivosti na základě plošného zobecnění zákonitostí zjištěných z databáze vlastních experimentálních výsledků.

Makroskopický model působení kapalinového paprsku na materiál odvozený a prezentovaný Hlaváčem je založen na těchto skutečnostech a předpokladech. Proces interakce je studován jako transformace kinetické energie do práce síly, která působí porušení materiálu a transformace hybnosti do impulzu této síly. Podpůrným zákonem je zákon zachování hmotnosti. Model byl připraven nejprve pro obecný kapalinový materiál [11] a potom rozšířen a modifikován pro abrazivní kapalinový paprsek [15]. V případě, že je to z makroskopického hlediska účelné, je abrazivní paprsek považován za kapalné médium se střední měrnou hmotností určenou váženou průměrnou hodnotou z měrné hmotnosti použité kapaliny a abrazivního materiálu. Je-li to z mikroskopického hlediska nezbytné, je chápán jako soubor singulárních objektů v toku kapaliny (např. při stanovení technologických limitů).

Konfrontace modelu s experimentálními výsledky ukázala, že je použitelný pro účely řízení a automatizace procesu řezání a obrábění materiálů vodními i abrazivními vodními paprsky. Základní model je zde stručně shrnut.

Pro kapalinový paprsek bez přísad byly odvozeny obecné vztahy, které umožňují výpočet hloubky záběru do materiálu, jsou-li známy technologické možnosti a materiálové vlastnosti řezaného materiálu. Maximální hloubku drážky vytvořené kapalinovým paprskem bez přísad je možno vypočítat ze vztahu (10). Součinitel  $\alpha$ , který koresponduje s účinností paprsku, je určen na základě zákona zachování hybnosti soustavy element kapaliny - element materiálu a rovnice pro něj má obecně tvar, který lze shrnout do vztahu (11).

Na tyto vztahy dále navazuje odvození specifických vztahů pro abrazivní kapalinový paprsek. Protože vznik a vývoj abrazivního kapalinového paprsku má určitá specifika, která významnou měrou ovlivňují jeho účinek i celkové projevy na řezaném materiálu, je třeba proces rozebrat a objasnit některé jeho klíčové momenty. Popis je soustředěn na abrazivní paprsek, který je generován pomocí ejektorového sání vzduchu s abrazivem, proto některé fáze vzniku a rysy suspenzního abrazivního paprsku mohou být mírně odlišné.

První ovlivnění kvality a charakteristik paprsku vnáší do procesu generace abrazivního kapalinového paprsku kapalinová tryska, která slouží k transformaci statické tlakové energie kapaliny vytvořené v čerpadle na kinetickou energii proudící kapaliny. Paprsek kapaliny je ovlivněn především těmito parametry trysky: průměr otvoru, délka válcové části otvoru, kvalita stěn otvoru. Spolu s tlakem a hustotou kapaliny určují uvedené parametry střední výstupní rychlost paprsku, jeho rychlostní profil, konvergenci jeho "jádra" a divergenci paprsku jako celku.

Kapalinový, zpravidla vodní, paprsek vstupuje do tzv. směšovací komory, ve které při svém průchodu vyvolává podtlak. Ve stěně komory je minimálně jeden otvor s přívodní trubicí a tou je nasáván podtlakem do komory vzduch, do kterého je ve vhodné vzdálenosti před komorou (určené zpravidla technologickými podmínkami) přisypáván abrazivní materiál. Ten je strháván proudícím vzduchem do této tzv. směšovací komory. V ní se střetává směs abraziva a vzduchu s kapalinovým paprskem vysoké rychlosti, který po krátkém průchodu komorou vstupuje do usměrňovací trubice, kam s sebou strhává abrazivní materiál a vzduch. V usměrňovací trubici se dokončuje proces mísení kapaliny, abraziva a vzduchu do kvazihomogenní směsi. Proces odehrávající se v kapalinové trysce, sací trubici, směšovací komoře a usměrňovací trubici je schématicky znázorněn na obr. 3. Při střetu abrazivního materiálu s kapalinovým paprskem vysoké rychlosti dochází zpravidla i k porušování částic abraziva a vzniká tak frakce s nižší střední velikostí částic, než byla na vstupu do komory. Tato skutečnost významným způsobem ovlivňuje podmínky pro optimální průtok směsi usměrňovací trubicí, tření směsi o stěny trubice, divergenci vzniklého abrazivního paprsku a vznik i konvergenci jádra tohoto paprsku.

Po výstupu paprsku do okolního prostředí (zpravidla vzduchu) a při jeho pohybu tímto prostředím dochází k dalšímu podstatnému brždění. To způsobuje divergenci paprsku, přičemž konvergentní střední část paprsku ("jádro") postupně mizí. Rychlostní profil odpovídající tomuto chování je takový, že "jádro" paprsku má nejvyšší rychlost, a to přibližně konstantní v celém příčném řezu. Okrajová část paprsku mimo "jádro" má rychlostní profil odpovídající křivce gaussovského poklesu z maximální hodnoty určené rychlostí jádra na nulovou hodnotu v dostatečné vzdálenosti od osy paprsku (obr. 1).

Z výše uvedeného rozboru vyplývá, že při výpočtu účinku abrazivního kapalinového paprsku je samozřejmě nutné určit nejprve rozpad abrazivního materiálu ve směšovací komoře a teprve potom počítat urychlování částic v usměrňovací trubici. Na tyto výpočty pak teprve mohou navázat rovnice, z nichž je možno určit hloubku řezu abrazivním paprskem. Prezentovaný způsob výpočtu je založen na předpokladu, že z parametrů abrazivního paprsku (velikosti částic, průtoku kapaliny a abrazivního materiálu, výsledné rychlosti abrazivního paprsku apod.) je možno určit ekvivalentní parametry kapalinového paprsku bez přísad. Při tomto odvození jsou pro modelování účinku abrazivního paprsku použity vztahy (10) a (11), v nichž jsou podle uvedeného předpokladu modifikovány parametry.

Rychlost abrazivní částice je vzhledem k rychlosti kapaliny zpravidla velmi malá (do 10 m.s<sup>-1</sup>). Navíc složka rychlosti abrazivní částice rovnoběžná s rychlostí paprsku se často blíží nule (záleží na konstrukci vstupního otvoru pro abrazivo). První náraz paprsku na téměř nehybnou částici abraziva proto zpravidla způsobí její rozbití (obr. 7). Střední velikost částic abraziva vznikajících při této interakci je pak možno určit z této rovnice:



$$a_{n} = \frac{24 \rho_{o} E_{P} c_{o}^{2} a_{o}^{3}}{24 \rho_{o} E_{P} c_{o}^{2} a_{o}^{2} + C_{f} \pi a_{o} d_{o}^{2} \mu^{2} p_{o}^{2} \gamma_{R}^{2}}$$
(12)

**Obr. 7.** Závislost velikosti zrna po směšovacím procesu  $a_n$  pro několik tlaků vody před vodní tryskou na původní velikosti zrna abraziva (vzorku granátu almandin)  $a_q$ .

Rychlost abrazivního paprsku na výstupu z usměrňovací trubice může být určena dvěma způsoby. Iterační metoda je založena na popisu střetu kapalinového paprsku, abrazivní částice a stěn trubice. Tato metoda je ovšem poněkud složitá pro aplikaci v komerčním predikčním modelu, který musí poskytovat dostatečně přesné výsledky co nejrychleji. Proto je pro výpočet rychlosti abrazivního kapalinového paprsku z průtoků kapaliny a abraziva použita obecná podmínka, která vyplývá ze zákona zachování hybnosti při smísení abraziva s kapalinou (přisávaný vzduch je v této interakci z důvodu nepatrné hmotnosti vzhledem k ostatním složkám zanedbán):

$$v_a = \delta_e \ v_o \ \frac{m_w}{m_w + m_a} \tag{13}$$

Pro zpřesnění výpočtu je nutno součinitel  $\delta_e$  charakterizující přenos hybnosti nahradit součinem několika součinitelů, které umožňují lépe charakterizovat děje probíhající ve směšovací komoře a usměrňovací trubici [23, 24].

Změna modelu odvozeného pro paprsek bez přísad, tedy rovnic (10) a (11), na model pro abrazivní paprsek vyžaduje zavedení těchto parametrů:

$$\rho_{j} = \frac{4 \rho_{a} \left( m_{w} + m_{a} \right)}{\pi \rho_{a} v_{o} d_{o}^{2} + 4 m_{a}}$$
(14)

$$p_j = \frac{1}{2} \rho_j v_a^2 \tag{15}$$

Tyto rovnice popisují změnu hustoty kapaliny a impaktního tlaku kapaliny způsobené přítomností abrazivního materiálu. Zvyšování hmotnostního průtoku abraziva způsobuje zvyšování výkonu paprsku pouze do doby, než je systém abrazivem zahlcen. Potom se postupně výkon paprsku snižuje a tuto skutečnost je nutno popsat parametrem  $C_5$  odvozeným z fyzikální představy dějů ve směšovací komoře a usměrňovací trubici:

$$\frac{4 m_a}{\pi \rho_a v_a d_a^2} < 1 \implies C_5 = \frac{4 m_a}{\pi \rho_a v_a d_a^2} \quad ; \quad \frac{4 m_a}{\pi \rho_a v_a d_a^2} \ge 1 \implies C_5 = \frac{m_{al}}{m_a} \quad (16)$$

V souladu s teorií kapalinového paprsku prezentovanou v [11] byla odvozena rovnice umožňující určit materiálovou konstantu z parametrů experimentálního řezu [23, 24]. Konstanta je nutná pro výpočet limitní postupové rychlosti paprsku při dané tloušťce materiálu nebo limitní tloušťky prořezávaného (resp. odstraněného obráběného) materiálu.

Aby bylo možno vzájemně využívat materiálové konstanty určené pro různé druhy abraziv, byl zaveden transformační součinitel [23, 24] umožňující na základě vybraných charakteristik abraziva určit pravděpodobné limitní parametry (postupovou rychlost a maximální hloubku) pomocí materiálové konstanty získané s jiným abrazivním materiálem. Tento součinitel je pak využitelný při výpočtu součinitele  $\alpha$ , která má charakter účinnosti kapalinového paprsku a slouží bezprostředně k výpočtu limitních parametrů řezání.

Maximální prořezávaná tloušťka materiálu je při dané postupové rychlosti určena rovnicí (17). Maximální postupová rychlost abrazivního paprsku při dané tloušťce řezaného materiálu je počítána z rovnice (18):

$$H = \frac{C_5 S_p \pi d_o \sqrt{2\rho_j p_j^3} e^{-5\xi_j L} (1 - \alpha^2)}{4 (1 + \alpha^{-0.5}) (v_p + a_n)^{1.5} (p_j \rho_M \alpha^2 e^{-2\xi_j L} + \sigma \rho_j)}$$
(17)

$$V_{p} = \left[\frac{C_{5} S_{p} \pi d_{o} \sqrt{2\rho_{j} p_{j}^{3} e^{-5\xi_{j}L}} (1-\alpha^{2})}{4 (1+\alpha^{-0.5}) H \left(p_{j} \rho_{M} \alpha^{2} e^{-2\xi_{j}L} + \sigma \rho_{j}\right)}\right]^{\frac{2}{3}} - a_{n}$$
(18)

Limitní parametry mají význam především jako okrajová podmínka a výchozí hodnota pro další výpočty. Porovnání teorie a experimentu pro extrémní materiál a podmínky je uvedeno na obr. 8.



**Obr. 8.** Závislost maximální tloušťky prořezávaného železobetonu *H* na postupové rychlosti stopy abrazivního vodního paprsku  $v_P$  při kolmém dopadu:  $d_o = 0,76$  mm,  $p_o = 230$  MPa,  $Q_a = 1,5$  kg.min<sup>-1</sup>,  $d_a = 2,54$  mm,  $l_a = 152$  mm, L = 2 mm.

Většinou není účelné řezat maximální možnou rychlostí nebo maximální možnou tloušťku. Proto byl zaveden součinitel, kterým je třeba násobit limitní hloubku nebo postupovou rychlost, aby byla získána odpovídající kvalita stěn řezu. Ve [23, 24] je zavedeno pět úrovní kvality stěn řezu ve směru od povrchu materiálu. Příslušné hodnoty součinitele pak jsou 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 a 0,9.

#### 7. Závěr

Kapalinové paprsky ve všech známých a používaných podobách jsou nástroji, které působí v přírodě od počátku existence Země. Díky technickému pokroku je dnes možno generovat těmto přírodním vzorům podobné nástroje velmi malých rozměrů, a to s velmi dobře definovanými zvolenými parametry. To činí nástroje vhodnými pro všechny způsoby obrábění materiálů. Parametry nástrojů je dále možno během procesu obrábění ovlivňovat či dokonce řídit a tak dosáhnout dobře definovaného působení těchto nástrojů na materiál. Ovládnutí parametrů rozhodujícím způsobem ovlivňujících kvalitu a kvantitu působení kapalinových paprsků na materiál bylo bezprostředně umožněno aplikací fyzikálních poznatků a souvislostí na popis interakce kapalinový paprsek - látka v pevné fázi. Popis makroskopickými veličinami je pro tyto účely velmi důležitý. Na rozdíl od mikroskopických veličin jsou dobře měřitelné a nastavitelné, pokud je možno je v průběhu procesu měnit.

Prezentovaný fyzikální popis umožňuje nejen prognózu řezných parametrů, nýbrž i přímé řízení procesu včetně ovlivňování kvality vzniklé plochy. Uvedený popis může být po příslušné modifikaci, která spočívá v doplnění geometrického popisu pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu, využit pro kterýkoli obráběcí proces s nástrojem kapalinový paprsek k predikci efektivnosti nebo řízení. Tím je položen základ obrábění speciálních materiálů jako jsou vysokopevnostní oceli, tvrdokovy, kompozity, a to v krátkém čase, velmi dobré kvalitě a za přijatelnou cenu. Některé způsoby obrábění ještě vyžadují dokončení technického řešení (např. odsávání směsi použitého kapalinového paprsku a rozrušeného materiálu), ale to jsou zpravidla záležitosti konstrukčního řešení a investiční náročnosti.

Podle dosavadních zkušeností je model možno s výhodou aplikovat také na stanovení účinnosti kapalinových paprsků na horkých materiálech a materiálech pod vodní hladinou. Očekává se, že vztahy budou s minimální modifikací platné i pro interakci kapalinového paprsku ve vakuu. Dále je možno pomocí modelu odvodit z experimentálních výsledků některé fyzikální a technické parametry materiálu. Kapalinový paprsek je tak možno použít i jako analytický nástroj.

#### Literatura

- Hashish, M.: A Modeling Study of Metal Cutting With Abrasive Waterjets. Trans. of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, No.1, 1984, p. 88-100
- [2] Hashish, M.: An improved model of erosion by solid particle impact. Proc. 7th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, England, 1987, paper 66
- [3] Hashish, M.: A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining. Trans. of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, No.4, 1989, p. 154-162
- [4] Hashish, M.: Pressure Effects in Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining. Trans. of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, No.7, 1989, p. 221-228
- [5] Hashish, M.: Prediction Models for AWJ Machining Operations. Proc. 7th American Water Jet Conference, M.Hashish (ed.), WJTA, Seattle, Washington, 1993, p. 175-189
- [6] Zeng, J., Kim, T.J.: A study of brittle erosion mechanism applied to abrasive waterjet processes. Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA, England, 1990, paper B1
- [7] Zeng, J., Kim, T.J.: Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials. Proc. 11th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992, p. 483-501
- [8] Zeng, J., Kim, T.J.: Parameter Prediction and Cost Analysis in Abrasive Waterjet Cutting Operations. Proc. 7th American Water Jet Conference, M.Hashish (ed.), WJTA, Seattle, Washington, 1993, p. 175-189
- [9] Hlaváč, L.: Physical description of high energy liquid jet interaction with material. Geomechanics'91, Rakowski (ed.), Balkema, Rotterdam, 1992, p. 341-346
- [10] Hlaváč, L., Vašek, J.: Physical Model of a High Energy Liquid Jet for Cutting Rock. International Journal of Water Jet Technology, Vol. 2, No. 1, June, 1994, p. 39-50
- [11] Hlaváč, L.M.: Physical Analysis Of The Energy Balance Of The High Energy Liquid Jet Collision With Brittle Non-Homogeneous Material. Proc. 8th American Water Jet Conference, T.J.Labus (ed.), WJTA, Houston, Texas, 1995, p. 681-697
- [12] Hlaváč, L.: Physical model of jet Abrasive interaction. Geomechanics'93, Rakowski (ed.), Balkema, Rotterdam, 1994, p. 301-304
- [13] Hlaváč, L., Sochor, T., Sitek, L., Martinec, P., Vala, M.: Physical Study of a High Energy Liquid Jet as a Milling Tool. Proc. 4th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jet Technology, WJTSJ, Shimizu, Japan, 1995, p. 449-456

- [14] Hlaváč, L.M.: Interaction of grains with water jet the base of the physical derivation of complex equation for jet cutting of rock materials. Proc. 12th Int. Conf. on Jetting Technology, C.Gee (ed.), Mech. Eng. Pub. Ltd., Bury StEdmunds & London, 1996, p. 471-485
- [15] Hlaváč, L.M.: JETCUT software for prediction of high-energy waterjet efficiency. Proc. 14th Int. Conf. on Jetting Technology, H. Louis (ed.), Prof. Eng. Pub. Ltd., Bury StEdmunds & London, 1998, p. 25-37
- [16] Hlaváč, L.: Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi. Doktorská disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2000
- [17] Hlaváč, L.M., Hlaváčová, I.M., Mádr, V.: Quick method for determination of the velocity profile of the axial symmetrical supersonic liquid jet. Proc. 10th American Waterjet Conference, M.Hashish (ed.), WJTA, Houston, Texas, 1999: p.189-199
- [18] Brož, J., Roskovec, V., Valouch, M.: Fyzikální a matematické tabulky. SNTL, Praha, 1980
- [19] Noskievič, J. a kol.: Mechanika tekutin. SNTL, Praha, 1987
- [20] Hlaváč, L.M., Sochor, T.: A Contribution to the Physics of a High Velocity Abrasive Particle Interaction with Brittle Non-homogeneous Materials. Proc. 12th Int. Conf. Jet Cutting Technology, N.G.Allen (ed.), Mech. Eng. Pub. Ltd., London, 1994: p. 117-126
- [21] Hlaváč, L.M., Pinka, J., Vašek, J.: High energy liquid jet use for producing of coal powder. Transactions of the Faculty of Mining and Geology, vol. 35/36, University of Belgrade, 1997: p. 9-15
- [22] Hlaváč, L.M., Sosnovec, L., Martinec, P.: Abrasives for High Energy Water Jet: Investigation of Properties. Proc. 10th American Waterjet Conference, M.Hashish (ed.), WJTA, Houston, Texas, 1999, p. 409-418
- [23] Hlaváč, L.: Teoretický model abrazivního kapalinového paprsku. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technická univerzita Ostrava, řada hornicko-geologická, č. 1, ročník XLVII, 2001, p. 51-62
- [24] Hlaváč, L., Mádr, V.: Užití teoretického modelu abrazivního vodního paprsku k řízení obrábění obecné plochy na horninových materiálech. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technická univerzita Ostrava, řada hornickogeologická, č. 2, ročník XLVII, 2001, p. 1-13

### Seznam použitých symbolů

- *a* střední velikost základní stavební jednotky materiálu částice ...[m]
- *a<sub>o</sub>* původní střední velikost částic materiálu ...[m]
- *a<sub>n</sub>* střední velikost částic vznikajících při směšovacím procesu ...[m]
- $c_o$  rychlost zvuku v kapalině ... [m.s<sup>-1</sup>]
- $C_5$  součinitel upravující výkon paprsku vzhledem k měnícímu se obsahu abraziva pod a nad tzv. saturační hladinou...[-]
- *C<sub>f</sub>* součinitel odporu elementu (částice) materiálu vůči paprsku ...[-]
- $C_x$  součinitel odporu paprsku při průniku plynným (kapalným) kontinuem ...[-
- $E_p$  měrná povrchová energie (vytváření poruch v materiálu) ...[J.m<sup>-2</sup>]
- *d*<sub>o</sub> průměr vodní trysky ...[m]
- *d<sub>a</sub>* průměr usměrňovací trubice ...[m]
- $d_L$  průměr paprsku ve vzdálenosti L od ústí trysky ...[m]
- *h* hloubka porušení materiálu (resp. okamžitá hloubka řezu) ...[m]
- *H* tloušťka materiálu ...[m]
- $k^*$  "dynamická" propustnost materiálu ... [m<sup>2</sup>]
- $l_u$  délka válcového ústí trysky ...[m]
- $l_{ud}$  délka válcové části ústí trysky v násobcích průměru trysky ...[-]
- *L* vzdálenost povrchu materiálu nebo vyšetřované roviny kolmé k ose paprsku od výstupního ústí kapalinové trysky (usměrňovací trubice) ...[m]
- $m_a$  hmotnostní průtok abraziva ... [kg.s<sup>-1</sup>]
- $m_{a1}$  limitní hmotnostní průtok abraziva ... [kg.s<sup>-1</sup>]
- $m_w$  hmotnostní průtok kapaliny ... [kg.s<sup>-1</sup>]
- *p<sub>o</sub>* tlak kapaliny před tryskou (v čerpadle) ...[Pa]
- $p_i$  tlak určený z hustoty a rychlosti abrazivního paprsku ...[Pa]
- *r<sub>i</sub>* poloměr jádra paprsku ...[m]
- $r_{iL}$  poloměr jádra paprsku ve vzdálenosti od ústí trysky ...[m]
- *Re* Reynoldsovo číslo ...[-]

- $Re_{ef}$  efektivní hodnota Reynoldsova čísla ...[-]
- $v_o$  rychlost kapalinového paprsku bez přísad na výstupu z trysky ... [m.s<sup>-1</sup>]
- $v_a$  rychlost abrazivního paprsku na výstupu z usměrňovací trubice ...[m.s<sup>-1</sup>]
- $v_L$  rychlost ve vzdálenosti *L* od výstupního ústí trysky ...[m.s<sup>-1</sup>]
- $v_p$  rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu ...[m.s<sup>-1</sup>]
- $v_{Pm}$  modifikovaná rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu ...[m.s<sup>-1</sup>]
- $V_P$  rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu určená pro tloušťku H materiálu ...[m.s<sup>-1</sup>]
- y radiální souřadnice měřená od osy paprsku ...[m]
- $\alpha$  součinitel ztráty rychlosti paprsku v interakčním procesu s materiálem ...[-]

$$\alpha_c$$
 kontrakční součinitel trysky ...[-]

 $\gamma$  stlačitelnost kapaliny při tlaku  $p_o$  ...[Pa<sup>-1</sup>]

$$\gamma_R$$
 zkrácený vztah  $(1 - \gamma p_o)$  ...[-]

- $\delta$  úhel rozbíhavosti kapalinového paprsku po výstupu z trysky ...[rad]
- $\delta_e$  součinitel účinnosti transformace hybrosti ve směšovacím procesu ...[-]

$$\eta$$
 dynamická viskozita kapaliny ...[N.s.m<sup>-2</sup>]

- θ úhel mezi osou paprsku a kolmicí v bodě, kde osa paprsku protne povrch materiálu, v rovině proložené těmito přímkami ...[rad]
- $\mu$  ztrátový součinitel trysky ...[-]
- $\xi$  součinitel útlumu kapalinového paprsku v prostředí mezi ústím trysky a povrchem materiálu ...  $[m^{-1}]$
- $\xi_j$  součinitel útlumu abrazivního paprsku v prostředí mezi ústím usměrňovací trubice a povrchem materiálu ... $[m^{-1}]$
- $\rho_o$  hustota kapaliny za normálních podmínek ...[kg.m<sup>-3</sup>]
- $\rho_{env}$  hustota prostředí mezi výstupem z trysky a povrchem materiálu ...[kg.m<sup>-3</sup>]
- $\rho_i$  hustota abrazivního paprsku (přepočet na homogenní prostředí) ...[kg.m<sup>-3</sup>]
- $\rho_{M}$  měrná hmotnost obráběného materiálu objemová (včetně pórů) ...[kg.m<sup>-3</sup>]
- $\rho_M^*$  měrná hmotnost porušovaného materiálu ...[kg.m<sup>-3</sup>]
- $\sigma$  pevnost materiálu, na který paprsek působí, v tlaku, tahu či smyku ...[Pa]

- $\sigma_s$  pevnost materiálového elementu ve smyku ...[Pa]
- $\chi$  součinitel rozšíření paprsku vlivem interakce s materiálem ...[-]

#### Doc. Ing. Libor Hlaváč, Ph.D.

Doc. Hlaváč se narodil v roce 1958 v Karviné. Základní a střední školu absolvoval v Ostravě -Porubě. V letech 1977 až 1982 studoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, kde v roce 1982 absolvoval a získal titul inženýr (ve zkratce ing.) v oboru fyzikální inženýrství.

V srpnu 1982 nastoupil do Výzkumného a vývojového ústavu Pozemního stavitelství v Ostravě, pracoval jako fyzik a podílel se na řešení rezortního projektu úspěšně obhájeného v roce 1985. V roce 1986 odešel do Hornického ústavu ČSAV se sídlem v Ostravě a zaměřil se na dezintegraci horninových materiálů. Teoreticky i experimentálně řešil fyzikální problémy interakce kapalinového paprsku s materiály, a to v rámci úkolu státního úkolu II-6-1/03.04, projektu GA AVČR 31655, projektů GAČR 106/93/2338 (řešitel), 101/94/1429 a 205/96/0931, projektu Česko-amerického vědeckotechnického programu 95005 a klíčového směru AVČR K 1042603.

Po konkurzním řízení v roce 1997 nastoupil jako odborný asistent na Institut fyziky Hornickogeologické fakulty VŠB-TU Ostrava. Podílí se na výuce základního kurzu fyziky v teoretických a praktických cvičeních a od roku 1998 vede přednášky a cvičení předmětu Aplikovaná fyzika pro některé obory HGF, resp. FBI (Fakulta bezpečnostního inženýrství). V letech 2000 až 2002 vedl přednášky i praktická cvičení z fyziky kombinovaného studia na Fakultě strojní. V období 1998 až 2004 byl vedoucím studentských fyzikálních laboratoří na Fakultě strojní a Fakultě stavební. V roce 2001 obhájil doktorskou práci v oboru Automatizace technologických procesů na HGF VŠB-TUO. V roce 2003 se na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci habilitoval v oboru Aplikovaná fyzika. Od akademického roku 2003-2004 vyučuje předměty Fyzikální elektronika, Fyzika plazmatu, Elektronické prvky a Senzory fyzikálních veličin pro obor Aplikovaná fyzika materiálů na Hornicko-geologické fakultě. V nově akreditovaném doktorském studiu Aplikovaná fyzika je členem oborové rady, má schváleno několik odborných témat a předměty pro doktorské studium: Mechanika kontinua, Toky kapalin vysokých energií a Interakční procesy kapalinového paprsku. Jako člen oborové rady doktorského studia oboru Hornictví a školitel oboru Automatizace technologických procesů nabízí témata prací a předměty doktorského studia i v těchto oborech.

Souběžně s výukou se podílel na řešení projektu GAČR 106/98/1354, který podával na Ústavu geoniky (po přechodu z ÚGN AVČR na VŠB-TUO byl projekt převeden na spoluřešitele, prof. Mádra). V letech 2000 až 2002 byl spoluřešitelem projektu MPO FB-C3/05, v letech 2003 a 2004 se podílel na řešení vědeckovýzkumného záměru CEZ: J17/98:273500007. Od roku 2004 je vedoucím Laboratoře kapalinového paprsku, kterou buduje pro jeden z vědeckovýzkumných programů Institutu fyziky (HGF VŠB-TU Ostrava). V roce 2005 získal jako spoluřešitel projekt od MPO (1H-PK2/22) a Magistrátu SMO (1/2005).

Doc. Hlaváč je členem JČMF, WJTA a České strojnické společnosti. Od období 1999 až 2004 vykonával funkci vědeckého tajemníka Institutu fyziky. Výsledky svých vědeckých prací publikoval v mezinárodních i tuzemských vědeckých a odborných časopisech a přednášel je na konferencích. Do mezinárodní monografie napsal se spoluautorem 12 stran, v mezinárodních recenzovaných časopisech publikoval se spoluautory 8 článků a ve sbornících mezinárodních konferencích mu bylo uveřejněno 44 příspěvků. Celkem má přes 140 publikací. Tyto práce vzbudily ohlas, o čemž svědčí celkem 47 citací; během posledních deseti let 10 citací v zahraničí a 19 citací v ČR. Plně se věnuje výchově doktorandů jako školitel (4 doktorandi) či jako konzultant - specialista (nyní 2 doktorandi). Touto formou se také podílel na výchově dvou doktorandů, kteří své práce již obhájili.

Je ženatý, manželka Ing. Irena Hlaváčová, Ph.D. pracuje na Institutu fyziky VŠB-TU Ostrava. Má sedm dětí, dcera Marie vystudovala PF UK v Praze, dcera Kateřina studuje LF UK v Hradci Králové, syn Libor studuje VA v Brně, syn Dominik a dcery Irena a Jana studují BiGy v Ostravě, syn Christian Michael navštěvuje mateřskou školu v Ostravě - Výškovicích.