

MOŽNOSTI VYUŽITÍ MODULOVANÉHO VODNÍHO PAPERSKU PŘI SANACI BETONU

POSSIBILITIES OF USING OF MODULATED WATER JET IN CONCRETE REPAIR

LIBOR SITEK, JOSEF FOLDYNA

Problematika přípravy povrchu betonu před sanací. Přehled tradičních metod je doplněn pojednáním o přípravě pomocí vysokorychlostních vodních paprsků, zvláště pak paprsků modulovaných ultrazvukem. Jsou ukázány výhody použití takových paprsků při sanačních pracích z hlediska ekonomického i ekologického. A problem of preparation of concrete surface before repair is a subject of the paper. The review of traditional methods is accompanied with section dealing with preparation by high speed water jets, and, in particular, by ultrasonic modulated jets. Advantages of using such the jets for repair works are presented from both economical and ecological points of view.

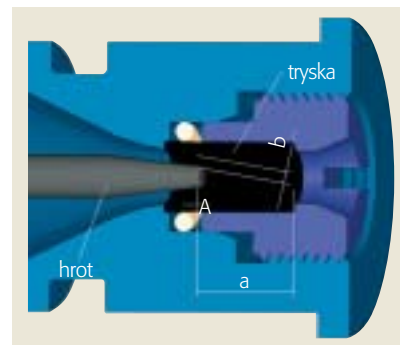
PŘEHLED STÁVAJÍCÍCH TECHNOLOGIÍ ODSTRAŇOVÁNÍ POVRCHOVÝCH VRSTEV BETONU

V současné době se k přípravě povrchů betonu pro sanace používá celá řada technologií od mechanických až po využití vysokorychlostních vodních paprsků.

- **Odsekávání** – provádí se klasickým vibračním nářadím, je nutno mít na zřeteli, že přes vysokou produktivitu této operace může dojít k poškození konstrukce zbytečným oslabením, vznikem prasklin nebo mikrotrhlin.
- **Frézování** – provádí se odbušováním povrchu betonu, vytváří se však hladký

povrch. Zároveň se odstraňuje pasivně celá vrstva průřezu a nedochází k selektivnímu odstraňování degradovaného betonu.

- **Otryskávání abrazivem** – technologie otryskávání betonu pískem, ocelovými broky či jinými abrazivními částicemi patří k nejstarším technologiím (byla patentována v roce 1870 B.C. Tilghamem). U této technologie jsou abrazivní částice vrhány proti čistěnému povrchu buď stlačeným vzduchem nebo mechanicky. Nevýhodou je vznik polétaivých částic, které mohou být nežádoucí s ohledem na životní a pracovní prostředí, a také nutnost odstranit z ošetřené plochy ulpělé abrazivní částice a zbytky odstraňovaného betonu.
- **Otryskávání horkou vodou a parou** – hodí se zejména k očištění povrchu betonu, samo o sobě není schopno odstraňovat degradované vrstvy. Pára a horká voda mají značnou schopnost zefektivnit čištění betonu, a to zejména u povrchů, které jsou kontaminovány uhlovodíky nebo u kterých je zapotřebí emulgovat tuky. Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost tepelně izolovat systém pro generování horké vody nebo páry a značné energetické ztráty.
- **Otryskávání vysokorychlostními vodními paprsky (VVP)** – slouží pro selektivní odstraňování degradovaných vrstev betonu, které je zajištěno vhodným nastavením pracovních parametrů paprsku. Při této operaci nedochází k dyna-



Obr. 2 Schéma uspořádání ultrazvukové trysky [4]

Fig. 2 Geometric configuration of the ultrasonic nozzle [4]

mickému zatížení konstrukce, nevznikají mikrotrhliny. Po aplikaci paprsku navíc není nutno očišťovat povrch konstrukce. V poslední době se zdá, že vodní paprsky ve stále větší míře nahrazují otryskávání abrazivy a mechanické způsoby přípravy povrchů před sanací.

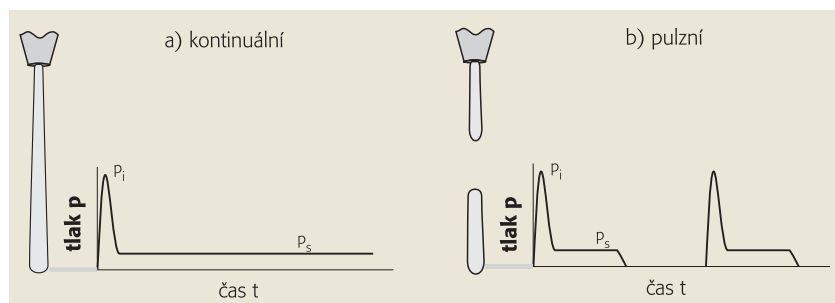
Technologie VVP zaznamenala v průběhu posledních dvou desetiletí značný rozmach. Vývoj rotačních těsnění umožnil využívání rotujících paprsků jak v aplikacích objemového rozpojování a řezání hlubokých zářezů (například při těžbě okrasného kamene), tak i při sanacích. Počátkem osmdesátých let se oblast použitelnosti VVP rozšířila zavedením abrazivních vodních paprsků (abrazivní částice se přidávají do VVP), a abrazivních suspenzních paprsků (abrazivní paprsek je vytvářen přímo průtokem abrazivní suspenze tryskou). Technologie umožňuje vysoký stupeň automatizace a možnost nasazení dálkově řízených jednotek.

V současné době je na trhu k dispozici řada systémů pro odstraňování degradovaných vrstev betonu s využitím vysokorychlostních vodních a abrazivních paprsků. Maximální pracovní tlaky se v některých aplikacích pohybují až do 380 MPa, v jiných aplikacích se používají průtoky vody desítky a někdy i stovky l/min, výkony čerpadel mohou dosáhnout až 400 kW.

I přes technologický pokrok dosažený v posledních letech v oblasti aplikací vys-

Obr. 1 Porovnání tlakových projevů kontinuálního a pulzního paprsku při jejich dopadu na povrch betonu (p_i – impaktní tlak, p_s – stagnační tlak)

Fig. 1 Comparison of pressure effects of continuous and pulsed jets acting upon concrete surface (p_i – impact pressure, p_s – stagnation pressure)



korychlostních a abrazivních paprsků při sanacích, je zapotřebí snažit se o další zdokonalení této technologie, aby se ještě lépe přizpůsobila stále náročnějším ekologickým požadavkům, dále se zvýšila její výkonnost a její použití bylo ekonomicky výhodnější.

V poslední době se pozornost výzkumných týmů začíná soustřeďovat na možnost využití perspektivních a energeticky méně náročných vysokorychlostních modulovaných pulzních paprsků.

ZESÍLENÍ ÚČINKŮ VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ MODULACÍ

Teoretický rozbor nárazu vodního paprsku na povrch rozpojovaného materiálu vede k závěru, že impaktní tlak p_i generovaný dopadem sloupce kapaliny dosahuje hodnotu mnohonásobně vyšší než je hodnota stagnačního tlaku p_s generovaného kontinuálním paprskem se stejnými parametry (obr. 1). Zesílení tlaku je možno vyjádřit vztahem (1)

$$\frac{p_i}{p_s} = 2 \frac{c_0}{v_0} \quad (1)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku v kapalině (pro vodu $c_0 = 1480$ m/s) a v_0 je rychlost dopadajícího paprsku.

Jelikož rychlosti dopadu kontinuálních paprsků dnes běžně užívaných při sanacích nepřekračují hodnotu 700 m/s, impaktní tlak pulzního paprsku bude nejméně 4krát vyšší než tlak stagnační za jinak stejných podmínek.

Z předchozí úvahy je tedy zřejmé, že pokud se kontinuální paprsek rozčlení na vzájemně oddělené sloupce vody, výsledný pulzní paprsek bude mít při stejných hydraulických parametrech značně vyšší výkonnost v porovnání s kontinuálním paprskem. Také další účinky vyvolané dopadem pulzního paprsku – zvýšená penetrace paprsku a únavové namáhání rozpojovaného materiálu – budou dále zvyšovat výkonnost pulzních paprsků [3].

Nejperspektivnějším způsobem generování pulzních paprsků z hlediska praktického využití je ultrazvuková modulace kontinuálního paprsku. Modulovaný paprsek se formuje do pulzů až po výstupu z trysky působením relativně malé modulace (pouze několik %) a systém pro generování modulovaného paprsku tedy netrpí účinky hydraulického rázu a extrémními změnami reaktivní síly, jako některé dřívější pulzní systémy. Navíc modu-

lace paprsku umožňuje generovat pulzní paprsek s frekvencí řádově desítky tisíc pulzů za sekundu, což významně přispívá k únavovému porušování rozpojovaného materiálu.

Příklad provedení ultrazvukové trysky je na obr. 2. Ultrazvuková modulace paprsku je vytvářena vibrujícím hrotem ultrazvukového transformátoru rychlosti umístěného uvnitř trysky. Hrot vibruje axiálně s frekvencí f a amplitudou A tak, že vzdálenost a i mezera b se periodicky mění z minimálních na maximální hodnoty. Víbrace jsou generovány ultrazvukovým zařízením připojeným k trysce.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM ÚČINKŮ MODULOVANÝCH PAPRSKŮ NA BETON

V roce 1994 se Ústav geoniky AV ČR v Ostravě zařadil mezi několik málo světových pracovišť zabývajících se výzkumem v oblasti pulzních vodních paprsků. V současnosti zde probíhá rozsáhlý experimentální program zaměřený na zkoumání základních fyzikálních procesů při generování pulzních paprsků a hodnocení jejich účinků na materiály v nejrůznějších aplikacích včetně sanací betonu.

Porovnání účinků rozpojování modulovaným a kontinuálním paprskem bylo provedeno na vzorcích dvou druhů betonu lišících se druhem kameniva, viz tab. 1.

Byla použita tryska o výstupním průměru 1,98 mm, tlak vody na vstupu do trysky byl udržován na hodnotě 40 MPa, ultrazvukový výkon byl ve všech případech 600 W. Z vyhodnocení zkoušek zaměřených na výzkum parametrů modulovaného paprsku vyplynulo, že optimální vzdálenost vzorku od trysky bude při daných

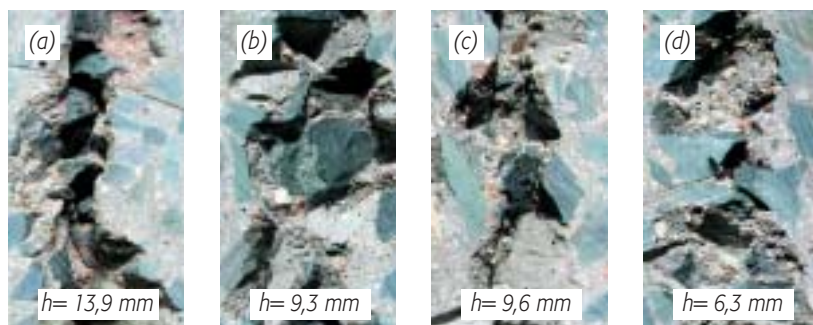
parametrech paprsku 140 mm. Při zkouškách na **betonu 1** byly testovány dvě řezné rychlosti: 2 a 5 m/min, u **betonu 2** byla řezná rychlost 2 m/min. Při stejných parametrech byly na vzorcích obou druhů betonu provedeny také zkoušky s běžnou tryskou pro generování kontinuálního paprsku a porovnány s výsledky rozpojování modulovaným paprskem. Jako kvantitativní parametr k porovnání výkonnosti obou způsobů rozpojování byla stanovena hloubka řezu (úběru) materiálu.

Výsledky, včetně dosažené hloubky řezu, ukazují obrázky 3 a 4. Modulovaný i kontinuální paprsek vytvářejí v obou typech betonu drážky nepravidelné šířky a hloubky, jež jsou vytvářeny především vytrháváním kousků cementu kolem větších zrn kameniva. Drážky vytvořené působením modulovaného paprsku však mají členitější dno, zvláště při větších rychlostech rozpojování (obr. 3c a 3d). Podobných výsledků bylo dosaženo také při rozpojování hornin (pískovec, žula), ovšem s větším rozdílem mezi nepravidelným dnem u modulovaného paprsku a plošším u kontinuálního. Průměrná hloubka řezu v betonu při použití modulovaného paprsku je ve všech případech asi o 50 % větší v porovnání s kontinuálním paprskem stejných parametrů. Ukazuje se, že výkonnost modulovaného paprsku při rozpojování může být ještě zvýšena, zejména pak optimálním nastavením parametrů paprsku, jako je např. tlak vody či řezná rychlost.

Experimenty jednoznačně potvrdily teoretický předpoklad, že modulovaný paprsek se až do určité vzdálenosti od trysky chová jako paprsek kontinuální. Jakmile však dosáhne tzv. rozpadovou délku

Tab. 1 Charakteristiky zkoušených vzorků betonu
Fig. 1 Characteristics of tested samples of concrete

beton 1	cement	CEM I 42,5 R, Mokrá (412 kg)
	písek	0 až 4 mm, Žabčice (780 kg)
	kamenivo	8 až 16 mm, amfibolit Želešice (1020 kg)
	voda	210 kg
	hustota	2526 kg/m ³
	pevnost v tlaku:	37,3 MPa
beton 2	cement	CEM I 42,5 R, Mokrá (412 kg)
	písek	0 až 4 mm, Žabčice (780 kg)
	kamenivo	8 až 16 mm, kopaný písek Žabčice (1020 kg)
	voda	210 kg
	hustota	2367 kg/m ³
	pevnost v tlaku	28,0 MPa



Obr. 3 Beton 1 rozpojený modulovaným (a, c) a kontinuálním (b, d) paprskem. Podmínky zkoušky: tlak vody 40 MPa, průměr trysky 1,98 mm, řezná rychlost 2 m/min (a, b) a 5 m/min (c, d), vzdálenost od trysky 140 mm

Fig. 3 Concrete No. 1 exposed to modulated jet (a, c) and continuous jet (b, d). Testing conditions: water pressure 40 MPa, nozzle diameter 1.98 mm, traverse velocity 2 m/min (a, b) and 5 m/min (c, d), standoff distance 140 mm

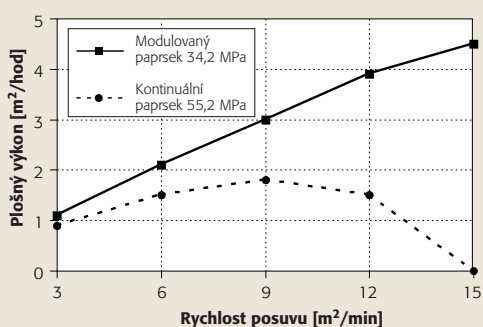
paprsku, kdy se kontinuální paprsek rozdělí na jednotlivé shluky kapaliny, jeho výkonnost se dramaticky zvýší právě v důsledku uplatnění vlivu impaktního tlaku generovaného dopadem jednotlivých shluků vody.

ZJIŠŤOVÁNÍ KVALITY UPRAVENÉHO POVRCHU

Metodika pro hodnocení kvalitativního aspektu, tedy vlastností povrchu upraveného technologií vysokorychlostního vodního paprsku, doposud není dostatečně propracována. Jedná se o definování přesného postupu, který by umožňoval pomocí jednoduchých a v terénu rychle proveditelných zkoušek konstatovat, zda je kvalita

Obr. 5 Porovnání výkonnosti modulovaného a kontinuálního paprsku při odstraňování nátěru AMERCOAT 68HS (1-GP-183 & 1-GP-192) – průměr trysky 1,7 mm, ultrazvuková modulace 15 kHz a 1 kW

Fig. 5 Comparison of continuous and pulsed jets for the removal of coating AMERCOAT 68HS (1-GP-183 & 1-GP-192) – nozzle diameter 1.7 mm, ultrasonic modulation 15 kHz and 1 kW



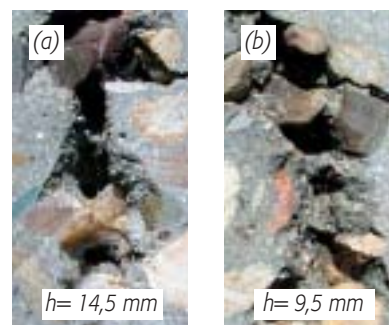
ošetřeného povrchu dostatečná, tedy zda byl degradovaný beton odstraněn v dostatečné hloubce a zda je povrch betonu připraven pro aplikaci sanačních hmot [1].

V literatuře [2] jsou popsány experimenty, které zjišťovaly vliv způsobu úpravy povrchu na výslednou kvalitu sanace. Byla hodnocena soudržnost nově nanášených správkových materiálů s podkladním betonem upraveným pískováním, osekáváním pneumatickým kladivem a otrýskáním vysokorychlostním paprskem. Nejlépe byl hodnocen vysokorychlostní vodní paprsek. V důsledku nedostupnosti však nebyl sledován vliv paprsku modulovaného.

Dalším kritériem hodnocení kvality povrchu betonu před nanášením sanačních hmot je geometrie upraveného povrchu. Pro zajištění dobré soudržnosti nově aplikovaných správkových materiálů se starým podkladním materiálem je vhodné, aby nově vytvořený povrch byl dostatečně členitý a odstranění degradovaného betonu bylo selektivní. Povrchy byly upraveny pískováním, osekáváním pneumatickým kladivem, vysokorychlostním vodním paprskem a modulovaným vysokorychlostním vodním paprskem. Nejlepších výsledků, nejčlenitějšího povrchu bylo dosaženo při použití modulovaného paprsku. Je to způsobeno zejména pulzním zatěžováním povrchu betonu, kdy dochází k snadnějšímu porušení v mikroobjemech degradované vrstvy vlivem několikanásobně nižší pevnosti v tahu u křehkých materiálů (beton, horniny apod.).

ZAHRAŇIČNÍ ZKUŠENOSTI S MODULOVANÝMI PAPSJKY

Modulovaný pulzní vysokorychlostní paprsek není doposud při sanačních zásazích



Obr. 4 Beton 2 rozpojený modulovaným (a) a kontinuálním (b) paprskem. Podmínky zkoušky: tlak vody 40 MPa, průměr trysky 1,98 mm, řezná rychlost 2 m/min, vzdálenost od trysky 140 mm

Fig. 4 Concrete No. 2 exposed to modulated jet (a) and continuous jet (b). Testing conditions: water pressure 40 MPa, nozzle diameter 1.98 mm, traverse velocity 2 m/min, standoff distance 140 mm

využíván. Současné zkušenosti zahraničních pracovišť zabývajících se výzkumem těchto paprsků a jejich uvedením do praxe jsou zatím z oblasti čištění a odstraňování nátěrů, kde již bylo dosaženo nepopíratelně lepších výsledků v porovnání s ostatními (klasickými) způsoby čištění i vysokorychlostním vodním paprskem. Bylo vyrobeno první komerční zařízení pro čištění modulovaným paprskem a je s úspěchem využíváno v praxi.

Porovnání výkonnosti modulovaného a kontinuálního paprsku v aplikaci odstraňování ochranného nátěru jako jedné z činností při sanacích je graficky znázorněno na obr. 5. Jak je z obrázku zřejmé, kontinuální paprsek dosahuje maximální výkonnosti při rychlosti posuvu 9 m/min a při dalším zvyšování rychlosti posuvu výkonnost ztrácí. Naproti tomu modulovaný paprsek získává maximální výkonnost při rychlosti posuvu 15 m/min, což je maximální možná rychlost použitého systému. Za pozornost stojí také skutečnost, že ačkoli byl kontinuální paprsek generován tlakem o více než 20 MPa vyšším než paprsek modulovaný, maximální výkonnost modulovaného paprsku byla zhruba 2,5krát vyšší.

Skutečnost, že modulovaný paprsek dosahuje maximální výkonnosti až v určité vzdálenosti od trysky, je z praktického hlediska velmi významná. V případě použití modulovaného pulzního paprsku totiž odpadá nutnost minimalizovat vzdálenost mezi tryskou a čištěným povrchem, což

usnadňuje práci především na nerovných či obtížněji přístupných plochách.

Další novinkou v oblasti modulovaných pulzních paprsků je vývoj rotačního modulovaného paprsku a jeho úspěšné uvedení do praxe. I když je v současnosti využíván zejména při čištění, autoři si troufají tvrdit, že i při sanacích zaujme své významné místo.

Výše uvedené výsledky dosažené s modulovanými pulzními paprsky naznačují, že při vhodné volbě provozních parametrů těchto paprsků je u přípravy povrchů betonů pro sanace možno očekávat při jinak stejných podmínkách několikanásobně vyšší výkonnost v porovnání s kontinuálními paprsky.

PRAKTICKÝ DOPAD VYUŽITÍ MODULOVANÝCH PAPERKŮ PŘI PŘÍPRAVĚ POVRCHŮ BETONU PRO SANACI

Hledisko výkonnostní

Při přípravě povrchů pro sanace se v současné době používají vysokotlaká zařízení schopná generovat kontinuální paprsky tlakem minimálně 100 MPa a v mnoha případech je pro účinné odstranění degradovaného betonu zapotřebí tlaků přes 250 MPa. Průtočná množství se přitom pohybují řádově v desítkách litrů vody za minutu. Jedná se tedy o zařízení velmi složitá a velmi namáhaná, s vysokou spotřebou pohonných hmot a vysokými provozními náklady.

Hledisko ekologické

Celosvětové trendy ochrany životního prostředí vedou k prosazování tzv. čistých technologií, které mají minimální dopad na okolní prostředí. V případě použití modulovaných pulzních vodních paprsků je možno očekávat podstatné snížení množství vody použité při sanacích v porovnání s aplikacemi kontinuálních vodních paprsků, a to díky jejich výrazně vyšší výkonnosti.

Hledisko ekonomické

Při ekonomickém hodnocení nasazení vysokorychlostních vodních paprsků je nutno vycházet z cen počítaných za nasazení technologie na měrnou jednotku výkonu (např. za 1 hod, za 1 m² apod.). Tyto ceny se zase odvíjí od vstupních cen, zohledňujících následující nákladové položky:

- pořizovací cena zařízení;
- provozní náklady (pohonné hmoty,

náhradní díly, údržba, opravy, technologické náklady – voda, abrazivo atd.);

- ekologické náklady;
- personální náklady;
- režijní náklady firmy.

Proti těmto nákladům stojí výnosy, které jsou na úrovni tržní ceny za měrnou jednotku výkonu. Dominuje snaha minimalizovat nákladové položky a položky výnosové naopak maximalizovat. Minimalizace nákladových položek je nejlépe možná v případě položek spojených s cenou zařízení, náhradních dílů, údržby zařízení a s ochranou životního prostředí. Z praxe je možno odhadnout, že při použití technologie vysokorychlostního vodního paprsku tvoří uvedené vlivy zhruba 30 % celkové ceny.

Z rozboru cen vysokotlakých zařízení na trhu je zřejmé, že nižší pracovní tlak a nižší průtok vody se výrazně odráží ve výsledné ceně vysokotlakého zařízení. Pokud vycházíme z výkonnostního porovnání uvedeného v předchozích kapitolách, je možno předpokládat, že použitím vysokorychlostního pulzního vodního paprsku by bylo možno nahradit například agregát pracující s kontinuálními paprsky generovanými tlakem 200 MPa a s průtokem 22 l/min agregátem s pracovním tlakem 35 MPa a průtokem 27 l/min. Pro dosažení stejného pracovního výkonu by bylo možno použít zařízení zhruba 6krát levnější, s nižšími nároky na údržbu a náhradní díly. V konečném důsledku by použití vysokorychlostních pulzních paprsků mohlo vést ke snížení celkových nákladů na měrnou jednotku výkonu minimálně o 30 až 40 %, což by výrazně přispělo k dalšímu rozšíření využívání této technologie při sanacích betonu.

ZÁVĚR

Technologie vysokorychlostních vodních paprsků v oblasti sanací betonu má velký potenciál pro nahrazení jiných technologií. Výraznějším rozšíření této technologie brání vysoká pořizovací cena a vysoké provozní náklady vysokotlakých zařízení. Sanace se v důsledku toho prodražují a vysokotlaká zařízení si mohou pořídit a provozovat jen finančně silné firmy.

Vývoj v oblasti modulovaných pulzních paprsků může znamenat cestu k takové intenzifikaci účinků vysokorychlostních paprsků, že místo vysokotlakých systémů bude možno používat zařízení s výrazně nižšími pracovními tlaky, aniž se tak bude dít na úkor jejich výkonnosti. Vzhledem ke

značně nižším nákladům na pořízení provozu takových zařízení se využití vodních paprsků stane ekonomicky výhodným a vyhledávaným řešením pro malé firmy zabývající se sanacemi.

Na základě výsledků testů rozpojování betonu autoři odhadují, že použití modulovaných paprsků by mohlo v případě sanačních zásahů na betonových konstrukcích vést ke snížení požadovaných pracovních tlaků na hodnoty pod 50 MPa, přičemž výkonnost bude minimálně stejná, ne-li vyšší než u stávajících systémů s tlaky až 250 MPa. Díky použití pulzních vysokorychlostních vodních paprsků by bylo možno uvažovat buď o omezení pracovních tlaků a tudíž o efektivním používání finančně dostupnějších vysokotlakých zařízení, nebo o výrazném omezení množství použité vody, což může pomoci při dodržování stále tvrdších ekologických limitů.

Výzkumná práce v oblasti vysokorychlostních pulzních paprsků byla uskutečněna v rámci projektů GA AVČR (reg. č. A2086001) a GA ČR (reg. č. 105/00/0235).

Literatura

- [1] Bodnárová L.: Některé vybrané aspekty kvality povrchu betonu ošetřeného technologií vysokorychlostního vodního paprsku, Sb. IX. mezin. symp. Sanace betonových konstrukcí, SSBK, Brno 1999, str. 276 – 280
- [2] Hilmersson S.: Hydrodemolition of concrete structures: basics and field experience. Water Jet Applications in CE, A. A. Balkema, Rotterdam 1998, Brookfield, pp. 163 – 176
- [3] Vijay M. M., Foldyna J.: Ultrasonically Modulated Pulsed Jets: Basic Study, Proc. of the 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, BHR Group, Cranfield, Bedford, UK 1994, pp. 15 – 35
- [4] Vijay M. M., Foldyna J.: Ultrasonically modulated pulsed water jets: Effect of frequency on performance, Proc. of the Int. Conf. Geomechanics 96, A. A. Balkema, Rotterdam 1997, Brookfield, pp. 303 – 308

*Ing. Libor Sitek, Ph.D., Ing. Josef Foldyna, CSc.
Ústav geoniky AV ČR
Studentská 1768, 708 00 Ostrava–Poruba
tel.: 069 6979 111, fax: 069 6919 452,
e-mail: sitek@ugn.cas.cz, foldyna@ugn.cas.cz
www.ugn.cas.cz*