

VYUŽITÍ NOVÝCH POZNATKŮ PŘI PŘEDÚPRAVĚ POVRCHŮ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPRSKY ■ USE OF NEW KNOWLEDGE DURING PRE- TREATMENT OF SURFACE OF CONCRETE STRUCTURES BY HIGH-SPEED WATER JETS

Libor Sitek, Lenka Bodnárová,
Josef Foldyna, Jiří Klich

Článek se zabývá aplikací nových poznatků a trendů při generování vysokorychlostních vodních paprsků a jejich uplatnění při sanacích betonových konstrukcí nejen v laboratorních podmínkách ale i během praktického využití in-situ. Příspěvek zkoumá několik typů vodních paprsků s důrazem na snížení ekonomické náročnosti procesu sanace a úpravy sanovaného povrchu pro následnou aplikaci správných materiálů. ■ The article deals with application of new knowledge and trends when generating of high-speed water jets and their utilisation during concrete structures repair not only in laboratory conditions but also during practical use in-situ. This contribution examines several types of water jets with emphasis on reduction of economical intensity of the process of repair and treatment of rehabilitated surface for subsequent application of repair materials.

Betonové konstrukce jsou v průběhu svého užívání vystaveny působení okolních agresivních vlivů. Působení agresivního prostředí, užívání konstrukce v průběhu času a zatížení konstrukce provozem mohou vést k jejímu poškození. To může nastat také nevhodným užíváním konstrukce, nadměrným zatížením či působením požáru. Dopravní stavby (silnice, tunely, mosty) patří k vysoce namáhaným betonovým konstrukcím (cyklickým zatěžováním, klimatickými podmínkami, užíváním chemických rozmrazovacích látek, působením požárů apod.).

Již porušené konstrukce je většinou nutné v co nejkratší době uvést zpět do provozuschopného stavu, což vyžaduje specifický sanační zásah. Při sanacích betonových konstrukcí je nutné na základě odborného posouzení a návrhu odstranit porušenou vrstvu betonu a provést náhradu porušených částí konstrukce. Odstranění poškozených vrstev tudíž představuje důležitou etapu při sanaci a údržbě betonových staveb.

Vedle dnes již tradičních metod, jako jsou odřezávání, rozrušování pneumatickým kladivem, suché a mokré otryskávání, čištění plamenem a frézování,

se k takovému účelu stále častěji používají technologie na bázi vysokorychlostních vodních paprsků. U nás je použití vodních paprsků pro tyto účely doporučeno, v některých zemích (např. v Německu) je vzhledem k unikátním vlastnostem paprsků dokonce vyžadováno.

Je všeobecně známo, že vysokorychlostní vodní paprsky mají schopnost selektivně odstranit pouze poškozenou vrstvu a zachovat tak co nejvyšší únosnost původní konstrukce. Účinnost takového zásahu může být ještě zvýšena zavedením vysokofrekvenčních akustických pulzací do paprsku prostřednictvím akustického generátoru tlakových pulzací.

Generování dostatečně velkých a rychlých (20 kHz) tlakových pulzací ve vysokotlakém systému ještě před výstupem vody z trysky umožňuje vytváření tzv. pulzujícího vodního paprsku, který sice vystupuje z trysky jako paprsek kontinuální, v určité vzdálenosti od trysky se však vlivem rozpadu kontinuálního proudu na shluky vody mění v pulzující.

Výhoda takového paprsku v porovnání s běžným kontinuálním spočívá v tom, že dopad každého shluku vody pulzujícího paprsku vyvolá v místě dopadu impaktní tlak, který několikanásobně převyšuje stagnační tlak, kterým působí na dopadovou plochu klasický kontinuální paprsek za jinak naprosto shodných pracovních podmínek. Tento jev způsobuje vážné poškození jak povrchu, tak i vnitřní struktury desintegrováního materiálu.

Vlivem pulzů v paprsku dochází k únavovému a smykovému namáhání v materiálu rychlým cyklickým zatěžováním dopadové plochy, případně působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To dále zvyšuje účinnost pulzujícího kapalínového paprsku v porovnání s kontinuálním. Použití pulzujícího paprsku kromě toho umožňuje podstatné snížení pracovního tlaku vody (na cca 30 až 70 MPa) při zachování rozrušovacích účinků srovnatelných se standardními vysokotlakými zařízeními užívanými k ošetřování a udrž-

bě betonových povrchů (s tlaky 150 až 200 MPa).

Pracoviště Oddělení desintergrace materiálů Ústavu geoniky v Ostravě studuje fenomén pulzujícího vodního paprsku a jeho desintegrační účinky na materiálech již téměř dvacet let. V oblasti stavebních hmot, zejména betonů, zde byly prováděny laboratorní experimenty, které zkoumaly účinnost desintergrace pulzujícího paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem při odstraňování povrchových vrstev pevných betonů [1], [2], betonů s odlišnými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi či betonů narušených technologickou nekázní [3] i betonů, které byly vystaveny působení agresivních prostředí a/nebo mrazu [4].

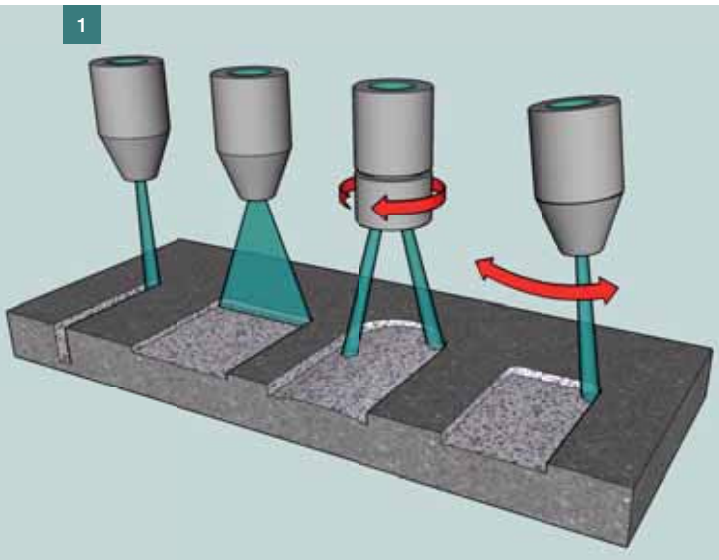
Příspěvek shrnuje výsledky, kterých bylo v dané oblasti dosaženo, a zkušenosti, které byly získány při rozpojování betonů za použití nových metod generování paprsků nejen v laboratorních podmínkách, ale i během praktického využití in-situ [5].

LABORATORNÍ ZKOUŠKY PŮSOBNÍ VODNÍCH PAPRSKŮ NA BETONY

V této části jsou stručně uvedeny výsledky dosažené při laboratorních testech odstraňování povrchových vrstev betonových vzorků pomocí několika typů vysokorychlostních vodních paprsků v sanační praxi běžně užívaných či paprsků progresivních s předpokládaným využitím v blízké budoucnosti (obr. 1). Všechny zmíněné typy paprsků mohou být generovány jako kontinuální nebo pulzující (při využití akustického generátoru pulzací). Účinky pulzujících paprsků byly vždy porovnány s klasickými kontinuálními paprsky za stejných nebo podobných pracovních podmínek.

Pevné betony

Jedním z prvních experimentů bylo porovnání účinnosti klasického kontinuálního vodního paprsku s kruhovým průřezem a pulzujícího paprsku s kruhovým průřezem. Pro tyto zkoušky byly vybrány dvě třídy pevných neporuše-



Obr. 1 Typy paprsků vhodné k odstraňování povrchových vrstev betonu (klasický s kruhovým průřezem, plochý, rotační a oscilující)

Fig. 1 Types of streams suitable for concrete surface layers removal (classical, with circular section, flat, rotational, oscillating)

ných betonů, které se lišily typem kameniva. Betonové vzorky byly rozřezány diamantovým kotoučem a na řezné straně pak byly pomocí kontinuálního a pulzujícího paprsku vytvořeny drážky rychlostmi 2 a 5 ms⁻¹. Tlak vody pro generování paprsků byl ve všech případech 40 MPa, průměr vodní trysky pak 1,98 mm.

Z podstaty testovaného pulzujícího paprsku vyplývá, že jeho nejvyšší účinnosti je na rozdíl od kontinuálního paprsku dosahováno až v určité vzdálenosti od trysky, kdy se v proudu nacházejí dobře vyvinuté shluky vody. Proto se vzdálenost trysky od povrchu rozpojovaného betonu u jednotlivých paprsků lišila (kontinuální 20 mm, pulzující 140 mm). Tato vzdálenost byla zjištěna experimentálně pomocí měření dopadové síly paprsku a také erozními zkouškami na měkkých kovových materiálech (nejčastěji na hliníku). Byla zjišťována hloubka průniku paprsků do betonu v několika místech drážky a celkový vzhled drážky.

V obou třídách betonu vytvářejí oba paprsky drážky nepravidelného tvaru a hloubky, přesto jsou drážky vytvořené pulzujícím paprskem o poznání pravidelnější, převážně pak při vyšších rychlostech. Drážky jsou vytvářeny zejména vytrháváním cementových úlomků kolem větších zrn kameniva. Ve všech případech bylo dosaženo zhruba 1,5krát větší hloubky průniku paprsku do betonu při použití pulzujícího paprsku v porovnání s paprskem kontinuálním.

Ukázalo se, že potenciál pulzujícího paprsku při jeho působení na beton by mohl být v odstraňování nánosů a vrstev z betonového povrchu, v čištění či úpravě povrchu, zejména při sana-

cích narušených konstrukcí v selektivním odstraňování poškozených vrstev. Při těchto procesech je však nezbytné, aby paprsek rozšířil své působení na větší plochu povrchu. Dále tedy byly zkoumány některé způsoby rozptýlu energie paprsku, jako jsou rotační paprsek, plochý paprsek, případně oscilující paprsek (obr. 1).

Další experimenty byly zaměřeny na porušování pevného betonu třídy B55 – C45/55 – XF4 plochým pulzujícím paprskem. Výsledky byly porovnány s účinky paprsku plochého kontinuálního a rotačního kontinuálního i pulzujícího na stejném typu betonu.

Plochý (vějířovitý) paprsek je v současnosti mimo okruh zájmu sanačních firem. Jelikož se jeho energie rozloží do poměrně velké šířky, není při běžné užívaných parametrech paprsků schopen beton dostatečně poškodit. Byl vyvinut pro určité speciální aplikace (čištění, odstraňování okují z povrchů apod.). Jiná situace však nastane, pokud jsou do plochého paprsku zavedeny vysokofrekvenční pulzace. Pulzující plochý paprsek je schopen při použití běžných vysokotlakých zařízení užívaných k sanacím porušit i pevný beton.

Na zkušebních betonových trácích byly vytvářeny drážky jednotlivými typy paprsků. Pro generování plochých paprsků byla použita plochá tryska Lechler typ 602 571 s úhlem rozstříku 15° a ekvivalentním průměrem 2,05 mm. Pro generování rotačních paprsků byla využita rotační hlavice Barracuda osazená dvojicí trysek o průměru 1,19 mm. Tlak vody byl při všech zkouškách 30 MPa. Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysky byla u plochého paprsku pulzujícího i kontinuálního udržována na 40 mm. Při použí-

tí rotačního kontinuálního paprsku byla vzdálenost od trysky 20 mm, u pulzujícího pak 40 mm z důvodu vyšší účinnosti ve větší vzdálenosti od trysky. Ultrazvukový výkon při řezání pulzujícími paprsky byl 630 W, akustický buďič vytvářel akustické vlny o frekvenci 20 kHz. Rychlost řezání byla ve všech případech 0,2 m.min⁻¹. U každé drážky byl změřen rozpojený objem, u vybraných drážek byla provedena makroskopická analýza nově vzniklého povrchu po řezání paprskem.

Z celkového souboru drážek zkoumaných vzorků se prokázalo, že pulzující paprsek za stejných podmínek vždy rozpojí větší objem betonu, než paprsek kontinuální. Z výsledků dále vyplynulo, že plochý pulzující paprsek rozpojí cca 7,2krát větší objem betonu než plochý kontinuální paprsek za stejných podmínek. Při použití rotačního pulzujícího paprsku je tento poměr zhruba 2,9 vzhledem k rotačnímu kontinuálnímu paprsku.

Zajímavé je porovnání účinnosti plochého pulzujícího paprsku s paprskem rotačním kontinuálním, který se běžně při sanacích používá. Ukázalo se, že plochý pulzující paprsek je schopen rozpojit zhruba dvojnásobný objem při jinak stejné energetické náročnosti. Jelikož akustická energie nutná k vytvoření pulzů v pulzujícím paprsku představuje zanedbatelnou část z celkové energie potřebné na generování paprsku (asi 1 až 2 %), pulzující plochý paprsek se může v budoucnu stát vážným konkurentem rotačních hlavíc.

Z makroskopické analýzy nově vzniklého povrchu po řezání jednotlivými typy paprsku vyplynulo, že zatímco kontinuální paprsky odstraní za daných zkušebních podmínek pouze povrchovou část cementového kamene, případně (u rotačního kontinuálního paprsku) jen částečně odkryjí kamenivo uvnitř betonu, pulzující paprsky odstraní cementový kámen až na kamenivo, které pak reliéfně vystupuje z nově vytvořeného povrchu.

Betony s vrstvami odlišných fyzikálně-mechanických vlastností či narušené technologickou nekázní

Experimentální výzkum byl prováděn na speciálních betonových vzorcích záměrně vyrobených ze dvou vrstev betonu s odlišnými parametry. Vrstvy betonu měly rozdílné výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti (zejména pevnosti), byla měněna skladba kameniva,

druh cementu a vodní součinitel. Pro vizuální kontrolu byly vrstvy betonu výrazně barevně odlišeny použitím barevného pigmentu.

Cílem zkoumání bylo ověření, zda je technologie pulzujícího rotačního vysokorychlostního vodního paprsku skutečně selektivní a zda při rozpojování dojde k snížení výkonu (snížení množství odebíraného materiálu) v okamžiku, kdy vodní paprsek pronikne k betonu vyšší kvality. Toto částečně simulovalo reálné použití technologie vodního paprsku při sanacích betonových konstrukcí, kdy odstraňujeme povrchovou vrstvu betonu určitým způsobem narušenou, s horšími fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, a vrstvu betonu vyšší kvality se snažíme v co nejvyšší míře zachovat a dále nenarušovat.

Pro experiment byl zvolen běžně užívaný rotační pulzující paprsek a opět porovnán s běžně užívaným paprskem rotačním kontinuálním. Na betonových vzorcích byly vytvářeny drážky oběma typy paprsku. Rotační hlavice Barracuda byla osazena dvojicí trysek o průměru 1,47 mm, tlak vody byl udržován na hodnotě 30 MPa. Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysek byla u kontinuálního paprsku 20 mm, u pulzujícího 40 mm kvůli vyšší účinnosti. Ultrazvukový výkon při řezání pulzujícím paprskem byl 630 W a frekvence generování akustických vln 20 kHz. Proměnným parametrem, kterým se regulovala hloubka drážky, byla rychlost řezání (0,1 až 0,5 m.min⁻¹). Ta byla postupně snižována, dokud nebylo dosaženo tvrdší probarvené spodní vrstvy betonu. Za stejných podmínek byly vyřezány drážky také kontinuálním paprskem. U každé drážky byl zjišťován rozpojený objem.

Opět se prokázala vyšší účinnost pulzujícího paprsku v porovnání s kontinuálním. Pulzující paprsek rozpojí cca 2,3 až 6,3krát větší objem betonu za stejných podmínek. Vyšších poměrů je dosaženo zejména při vyšších rychlostech řezání, tedy při krátkém časovém působení paprsku na plochu. Zatímco energie kontinuálního paprsku v takovém případě k rozpojení povrchové vrstvy betonu nestačí, pulzující paprsek je schopen již velice slušně beton rozpojovat. Při nižších rychlostech řezání se rozdíl mezi oběma typy paprsků snižují.

Podobných výsledků je možno dosáhnout také při konstantní rychlosti rozpojování a proměnném tlaku vody. Pulzující paprsek dříve (tedy při nižším

tlaku vody) překoná prahovou hranici, kdy již bude schopen beton rozpojovat. Účinky kontinuálního paprsku se projeví teprve při vyšších tlacích.

Rovněž se prokázala schopnost obou paprsků selektivně odstraňovat narušenou vrstvu betonu. Po poměrně snadném odstranění porušené vrstvy bylo nutno vynaložit zvýšenou energii na desintegraci pevné, neporušené spodní vrstvy. Při hodnocení odolnosti speciálně vyrobených betonových vrstev proti působení vodních paprsků se ukázalo, že nejlépe odolává paprsku vrstva nenarušeného betonu (třída C20/25, bez technologické nekázně). O něco hůře dopadla vrstva betonu nedostatečně zhutněná a vrstva s vysokým podílem písku. Nejméně vydržely málo pevný beton (třída C12/15) a beton s vysokou dávkou záměsové vody.

Betony vystavené působení agresivních prostředí a/nebo mrazu

Tento výzkum byl zaměřen na desintegraci betonů vystavených působení mrazu, chloridů a síranů pomocí plochého pulzujícího i kontinuálního vysokorychlostního vodního paprsku.

Betonové krychle o průměrné pevnosti 40 MPa byly rozděleny do několika skupin a každá skupina byla podrobena některé z korozivních zkoušek:

- zkouška mrazuvzdornosti (schopnost vzorků ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování, betonové krychle byly vystaveny 100 cyklům zmrazování dle ČSN 731322),
- zkouška odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (vzorky vodou nasáklého betonu se uloží do misky s 3% roztokem NaCl tak, aby byly ponořeny na výšku 5±1 mm, ve zkušebním prostoru se podrobí střídavému zmrazování a rozmrazování; betonové krychle byly vystaveny sto cyklům zmrazování dle ČSN 731326),
- působení chloridů (betonové vzorky byly na šest měsíců zcela ponořeny do roztoku NaCl),
- působení síranů (betonové vzorky byly na šest měsíců zcela ponořeny do roztoku Na₂SO₄).

Část vzorků byla uložena jako referenční.

Na betonových krychlích všech skupin pak byly vytvářeny drážky pomocí vodních paprsků, u každé drážky byl zjištěn rozpojený objem, u vybraných

drážek byla provedena makroskopická analýza nově vzniklého povrchu po řezání paprskem.

K vytváření drážek byla použita plochá tryska Lechler typ 602 571 s ekvivalentním průměrem 2,05 mm a s úhlem rozstříku 15°. U pulzujícího paprsku vytvářel předřazený akustický budič akustické vlny o frekvenci 20 kHz. Tlak vody byl při všech zkouškách udržován na hodnotě 30 MPa. Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysky byla 40 mm, ultrazvukový výkon při řezání pulzujícím paprskem byl nastaven na 630 W. Rychlosti řezání vzorků paprskem byly 0,1; 0,2; 0,4 a 1 m.min⁻¹, pokud to stav konkrétního vzorku umožňoval.

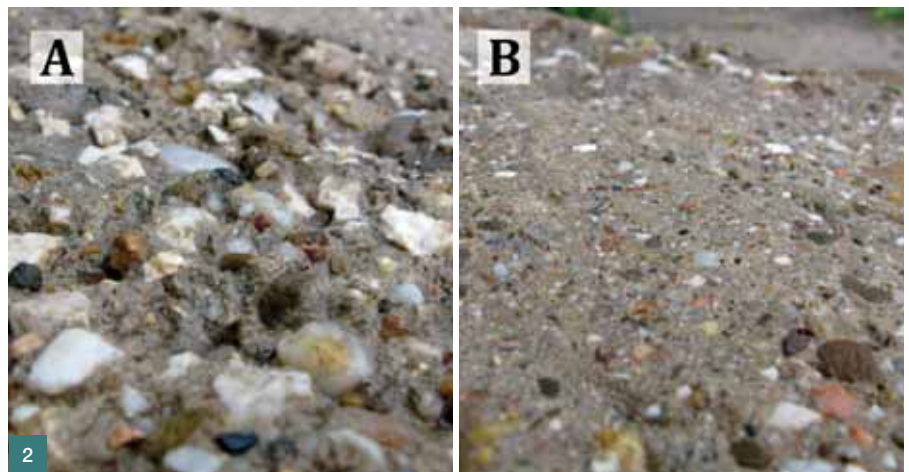
Na základě studia všech drážek vytvořených v betonových vzorcích se opět ukázalo, že pulzující paprsek je účinnější než paprsek kontinuální. Poměr mezi objemem odstraněným z vzorku pulzujícím a kontinuálním paprskem se však liší podle druhu a stupně degradace vzorku, případně podle rychlosti rozpojování.

Nejmenší poměr byl zjištěn u vzorků po zkoušce odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (cca 1,1) při rychlosti řezání 0,4 m.min⁻¹; při rychlosti 1 m.min⁻¹ se poměr zvyšuje na 2,8. Naopak nejvyšší poměr byl zaznamenán u vzorků referenčních neporušených korozí při rychlosti 1 m.min⁻¹ (cca 6,7). Poměr mezi 2,9 a 3,9 byl zaznamenán u vzorků uložených v roztoku NaCl a poměr od 2,8 do 4,5 u vzorků uložených v roztoku Na₂SO₄. U vzorků vystavených působení mrazu byl poměr zhruba 1,9.

Po zkoušce odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám byl povrch betonu již natolik rozpadlý, že hrubé kamenivo bylo v horní části obnaženo a cementový kámen včetně drobného kameniva byl ze vzorku částečně vydrolen. Zbývající narušená struktura cementového kamene a drobného kameniva byla pulzujícím či kontinuálním paprskem lehce odstraněna až na hrubé kamenivo, které již nebylo při daných parametrech zkoušky z drážky odstraněno.

Naopak u vzorků nenarušených korozí je obecně dosahováno nejlepších poměrů mezi pulzujícím a kontinuálním paprskem, neboť neporušenou a dostatečně pevnou strukturu betonu není kontinuální plochý paprsek při daných parametrech schopen výrazněji narušit. Pulzující paprsek naopak díky vy-

Obr. 2 Betonové povrchy ošetřené pulzujícím oscilujícím paprskem (A) a kontinuálním oscilujícím paprskem (B) | Fig. 2 Concrete surfaces treated by pulsing stream (A) and continual oscillating stream



sokofrekvenčnímu cyklickému zatěžování povrchu vzorku bez větších potíží odstraňuje cementový kámen, případně drobné kamenivo. Tato vlastnost se pak nejvýrazněji projeví při vyšších rychlostech řezání. U pevných betonů je zjištěný poměr (cca 7,2) ještě výhodnější ve prospěch pulzujícího paprsku.

Určité nesnáze nastaly při řezání vzorků vystavených sto cyklům zmrazování: při nižších rychlostech se zcela rozpadaly z důvodu narušení struktury vzorku trhlinami bez ohledu na typ použitého paprsku. I když po zkoušce zmrazování nevykazovaly betony vizuálně žádné porušení, ukázalo se, že odolnost vůči průniku paprsku je zcela zanedbatelná. Lze tedy usuzovat na vnitřní porušení betonu, které vzniklo při zmrazování. Na základě této skutečnosti doporučujeme u vzorků betonu provádět další typy zkoušek, které by měly narušenou strukturu odhalit (pevnost povrchových vrstev betonu, zkoumání skutečné pórové struktury, nasákavost povrchových vrstev apod.).

Makroskopická analýza potvrdila dřívější zjištění, že zatímco kontinuální paprsky odstraní za daných zkušebních podmínek pouze povrchovou část cementového kamene, případně u koro-dovaných vzorků částečně odkryjí kamenivo uvnitř betonu, pulzující paprsky odstraní cementový kámen až na kamenivo, které pak obnažené vystupuje z nově vytvořeného povrchu. Skutečná plocha povrchu vytvořeného pulzujícím paprskem je tak větší než u povrchu vytvořeného kontinuálním paprskem.

PŮSOBENÍ VODNÍCH PAPERKŮ NA BETON IN-SITU

Vzhledem k slibným výsledkům z laboratorních testů jsme přistoupili také k praktickým zkouškám odstraňování povrchových vrstev betonů v reál-

ném prostředí. Ve spolupráci s firmou Net, s. r. o., Staré Město pod Sněžníkem, která se zaměřuje na sanace betonových konstrukcí technologií vodního paprsku, byly realizovány zkoušky na silničním betonovém panelu pomocí běžného mobilního strojního zařízení používaného zmíněnou firmou při odstraňování poškozených vrstev při sanačních pracích.

Polní zkoušky odstraňování povrchových vrstev standardního betonového panelu (pevnost v tlaku zhruba 40 MPa) uloženého v normálním venkovním prostředí (vliv mrazu a atmosférických par, bez chemických látek) po dobu osmnácti let proběhly in-situ (tedy na místě, v původním prostředí) pomocí kontinuálního a pulzujícího oscilujícího vodního paprsku.

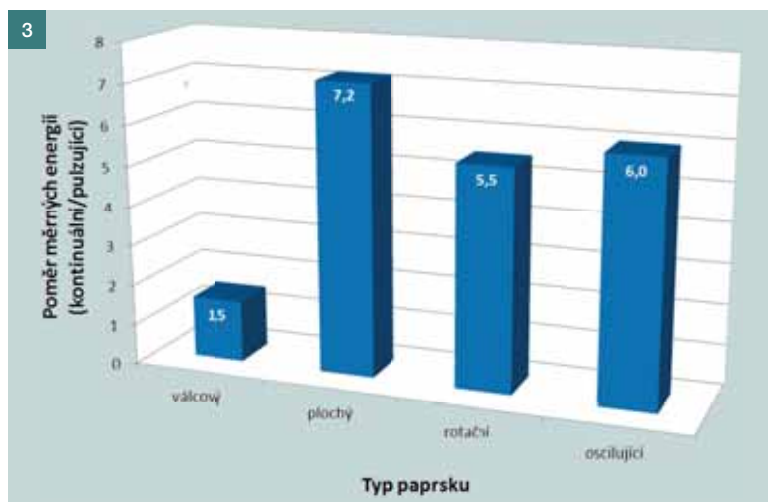
Experimentální zařízení sestávalo ze zdroje vysokotlaké vody, systému ke generování vysokofrekvenčních tlakových pulzací ve vysokotlakém systému a pásového manipulátoru, který umožňoval oscilační (kmitavý) pohyb trysky a zároveň posuvný pohyb kmitající trysky nad testovaným panelem. Vysokotlaká voda byla do trysky dodávána vždy jedním ze dvou plunžrových čerpadel podle typu použité trysky. Tlakové pulzace byly vytvářeny akustickým generátorem pulzů s frekvencí 20 kHz a maximálním akustickým výkonem 630 W. Ke generování vodních paprsků byly použity standardní průmyslové trysky různých průměrů s různou vnitřní geometrií. Použitý pásový manipulátor Aqua Cutter HVD-6000 pro plošné odstraňování povrchových vrstev vodním paprskem umožňoval programovatelný pohyb trysky nad povrchem.

Povrchové vrstvy byly postupně odstraňovány z vrchní strany panelu kontinuálním oscilujícím a pulzujícím oscilujícím paprskem. Manipulátor po-

sunul řeznou hlavici k dalšímu kroku (o cca 50mm) po čtyřnásobném průchodu oscilujícího paprsku po stejné ploše. Takto byly postupně ošetřeny plochy o rozměrech přibližně 470 x 130 až 250 mm. Poté byly změřeny hloubky penetrace vzhledem k původnímu povrchu na pěti nezávislých místech. Následně byl ze známých rozměrů ošetřené plochy a průměrné hloubky vypočítán rozpojený objem betonu. Ten dále sloužil jako měřítko účinnosti paprsku.

Zkoušky proběhly při různých tlacích vody (30 až 200 MPa). Vzdálenost trysky od rozpojovaného povrchu byla zvolena 45, 50 resp. 60 mm podle optimální vzdálenosti konkrétního pulzujícího paprsku určené erozními zkouškami na hliníku. U zkoušek uskutečněných s pulzujícím paprskem byla buďící amplituda akustického generátoru nastavena na 7 μ m. Plošná rychlost desintegrace byla vzhledem k naprogramovanému oscilujícímu pohybu trysky přibližně 12 cm^2s^{-1} . Tato rychlost byla stejná pro všechny zkoušky. Experimenty se uskutečnily s následujícími průměry trysek: 0,81; 0,97; 1,07; 1,2; 1,4; 1,5; 1,7; 1,8 a 2,26 mm. Vzhledem k různým průměrům trysek, různým použitým tlakům a tudíž obtížnému porovnání účinnosti jednotlivých paprsků byl u každého paprsku vypočítán hydraulický výkon. Ten sloužil k porovnání ploch ošetřených různými způsoby (trysky s různou vnitřní geometrií od různých výrobců, paprsky generované při různých tlacích apod.), tedy pulzujícím paprskem generovaným při nižší tlaku vody a tradičně vysokotlakým kontinuálním vodním paprskem.

V případě, že byly oba povrchy ošetřeny jak kontinuálním, tak pulzujícím paprskem za stejných pracovních podmínek a povrchy se nacházely zhru-



Obr. 3 Poměr měrných energií potřebných k odstranění jednotkového množství betonu [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$] pro příslušný kontinuální a pulzující paprsek ■ Fig. 3 Specific energy ratio needed to remove a unit of concrete [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$] for the specific continual and oscillating stream

ba na stejném místě panelu, porovnání účinnosti obou paprsků nečiní žádné potíže (obr. 2). Rozdíl je patrný na první pohled: zatímco kontinuální paprsek není schopen vrchní vrstvu betonu dostatečně rozpojit a je patrné pouze částečné vymytí poškozeného cementového kamene z povrchu panelu, pulzující paprsek snadno odstraňuje vrstvu betonu do požadované hloubky a vytváří vhodný podklad pro případnou aplikaci sanačních malt či ochranných vrstev. Objem betonu odstraněného pulzujícím paprskem je nejméně 3,8krát větší, než objem odstraněný paprskem kontinuálním za stejných pracovních podmínek.

Ovšem v běžné sanační praxi se při odstraňování betonových vrstev pomocí klasických kontinuálních vodních paprsků používají mnohem vyšší tlaky vody (až 200 MPa). Při takovýchto tlacích je beton snadno porušován i kontinuálními paprsky. Proto jsme se rozhodli porovnat kontinuální paprsky generované při vysokých tlacích s pulzujícími paprsky generovanými několikanásobně nižším tlakem.

Bylo porovnáno několik dvojic ošetřených ploch se zhruba stejným rozpojeným objemem materiálu, z nichž jedna plocha byla ošetřena kontinuálním a druhá pulzujícím paprskem. Z výsledků testů bylo zjištěno, že kontinuální paprsek by měl mít alespoň dvojnásobný hydraulický výkon, aby odstranil stejný objem betonu jako pulzující paprsek. Navíc musí být takový kontinuální paprsek generován při zhruba trojnásobném tlaku vody. Zatímco pulzující oscilující paprsek vytváří relativně pravidelný drsný povrch, kontinuální paprsek generovaný vysokým tlakem produkuje povrch tvořený převážně vytrháním cementových úlomků a drobného kameniva.

POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PAPERKŮ

Pro porovnání účinnosti jednotlivých typů trysek v konkrétních podmínkách při odstraňování povrchových vrstev betonu byly stanoveny měrné energie potřebné pro odstranění jednotkového objemu betonu [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$] pro kontinuální i pulzující paprsek. Poměr měrných energií kontinuálního a pulzujícího paprsku udává, kolikrát je technologie pulzujícího paprsku účinnější oproti klasickému paprsku kontinuálnímu (obr. 3).

Do grafu byly vybrány řezy, které byly provedeny všemi tryskami za zhruba stejných pracovních podmínek. Účinnost je však výrazně ovlivněna vlastnostmi odstraňované betonové vrstvy, typem a parametry paprsku. Ukázalo se, že nejvýhodnější je použití pulzujících paprsků pro plošné odstraňování vrstev (plochý, oscilující a rotační paprsek). Nejméně výhodné je použití pulzujícího paprsku pro vytváření zářezů, i v tomto případě je ovšem pulzující technologie zhruba o polovinu účinnější oproti kontinuální.

PŘÍDRŽNOST SANAČNÍCH MALT NA POVRCHU OŠETŘENÉM VODNÍMI PAPERKY

Předchozí výzkum prokázal, že povrchy ošetřené pulzujícím paprskem mají větší skutečnou plochu než povrchy ošetřené paprskem kontinuálním. Tuto skutečnost bude možné využít v aplikacích, kde se u takto připraveného podkladu požaduje dobrá přilnavost nově nanášených vrstev v tahu i ve smyku. Schopnost nových vrstev přilnout k podkladu po požadované dobu životnosti konstrukce je jeden ze základních požadavků na ochranné vrstvy či sanační systémy pro beton. Adekvátní makroskopická drsnost podkladu poskytuje dobré mechanické ukotvení, velkou povrchovou

plachu pro stmelení a svrchní vrstva je mechanicky spojena s podkladem.

Několik studií (např. [6], [7], [8] a [9]) potvrzuje fakt, že adhezni pevnost vrstev aplikovaných na povrchu ošetřeném technologií vodního paprsku bezpečně splňuje požadavky kladené v příslušných normách na betonové povrchy před sanací a zároveň překračuje hodnoty adhezni pevnosti získané při aplikaci dalších metod ošetření betonových povrchů, jako jsou pneumatická kladiwa, suché a mokré otruskávání, čištění plamenem apod. Jelikož při aplikaci pulzujícího vodního paprsku vykazují povrchy větší drsnost a členitost než u kontinuálního paprsku [10], lze u povrchů upravených pulzujícím paprskem očekávat ještě lepší přídržnost správkové malty k podkladu, než je tomu u povrchů vytvořených kontinuálním paprskem. To potvrzují i výsledky studie Mazáčové a kol. [11]: při standardních laboratorních odtrhových zkouškách prováděných pomocí zařízení Coming OP 3 bylo zjištěno, že průměrná přídržnost v případě odtrhů na kontaktu malty s betonem byla o cca 38 % vyšší u povrchů ošetřených rotačním pulzujícím paprskem, než u povrchů ošetřených rotačním kontinuálním paprskem. Povrch upravený pulzujícím paprskem vykazoval vyšší stupeň narušení cementového tmele s částečným reliéfním odkrytím kameniva. Cementový tmel byl zřetelně odstraněn v okolí zrn kameniva, což umožnilo lepší přilnavost malty k podkladu.

BETONOVÉ KONSTRUKCE VYSTAVENÉ PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮ

Aktuálně řešeným problémem je sanace betonových konstrukcí porušených vysokými teplotami a ohněm. Základní otázky ohledně teplotního vlivu na be-

Literatura:

- [1] *Sitek L., Foldyna J., Ščučka J., Švehla B., Bodnárová L., Hela R.*: Concrete and rock cutting using modulated waterjets, Proc. of the 7th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jetting Technology, Jeju 2003, Chung-In Lee, Seokwon Jeon, Jae-Joon Song (eds.), Korean Society of Water Jet Technology, 2003, p. 235–244, ISBN 89-95026-6-2 93550
- [2] *Sitek L., Martinec P., Foldyna J., Ščučka J., Bodnárová L., Hela R., Mádr V.*: Ploché vodní paprsky při porušování betonu, In Sb. Mezinár. symp. Sanace 2008, Brno: SSBK, 2008, s. 416–426 ISSN 1211-3700
- [3] *Sitek L., Bodnárová L., Foldyna J., Hela R., Ščučka J., Jekl P., Nováková D.*: Pulzující rotační vodní paprsek při odstraňování povrchových vrstev, In Sb. Mezinár. symp. Sanace 2007, Brno: SSBK, 2007, s. 341–348, ISSN 1211-3700
- [4] *Sitek L., Bodnárová L., Foldyna J., Nováková D., Ščučka J., Martinec P., Hela R., Mádr V., Hlaváč L.*: Odstraňování povrchových vrstev koro-dovaných betonů vysokorychlostními vodními paprsky, In Sb. XIX. mezin. symp. Sanace 2009, Brno: SSBK, 2009, s. 296–307, ISSN 1211-3700
- [5] *Sitek L., Foldyna J., Wolf I., Klich J., Mazáčková R.*: Příprava betonového povrchu před sanací pomocí kontinuálních a pulzujících oscilujících vodních paprsků, Sb. XX. mezin. symp. Sanace 2010, Brno, 2010, SSBK 2010, pp. 317–326, ISSN 1211-3700
- [6] *Galecki G., Maerz N., Nanni A., Summers D. A.*: The need for quantifying waterjetted surface texture for RFP adhesion, In Longman (ed.) Proc. of the 18th Intern. Conf. on Water Jetting, Gdańsk: BHR Group, 2006, s. 347–356, ISBN 1 85598 080-0
- [7] *Sakada S., Adachi I., Yahiro T., Mitunobu Y.*: Effects of surface treatment on bond strength between new and old concrete using the waterjet method, In Vijay M.M. et al. (eds) Proc. 5th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jet Technology, New Delhi: Allied Publ. Ltd., 1998, s. 561–566
- [8] *Momber A.*: Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete, Elsevier Ltd., Oxford 2005
- [9] *Bodnárová L., Wolf I., Hela R., Válek J.*: Užití vysokorychlostního vodního paprsku pro ošetření povrchu betonu – hodnocení vlastností betonů otryskaných vysokorychlostním vodním paprskem. In: Sitek, Zelaňák (eds.) Sb. mezinár. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2011, Ostrava: ÚGN, 2011, s. 25–37, ISBN 978-80-86407-23-4
- [10] *Sitek L., Foldyna J., Ščučka J., Młynarczuk M., Sobczyk J.*: Quality of bottom surface of kerfs produced by modulated jets. In Lake (ed.) Proc. of the 16th Intern. Conf. on Water Jetting, Aix-en-Provence: BHR Group, 2002, s. 359–368, ISBN 1 85598 042 8
- [11] *Mazáčková R., Ščučka J., Sitek L., Foldyna J., Hurta J.*: Přidržitost sanační malty k povrchu betonu upravenému vodním paprskem, In: Sitek (ed.) Sb. mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009, Ostrava: ÚGN, 2009, s. 136–145, ISBN 978-80-86407-81-4

ton zahrnují nejen komplexní identifikaci změn, k nimž dochází v cementové matici, ale i transportních jevů. Analýza je komplikovaná také s ohledem na skutečnost, že cementový beton je kompozit mimo jiné složený ze dvou podstatně odlišných složek: cementového tmele a kameniva. Různé druhy kameniva se navíc liší svým mineralogickým složením. Pokud se minerály zahřívají, jsou charakterizovány metamorfními změnami, které jsou typické a rozdílné pro každý minerál. Konečným efektem mnoha probíhajících změn, ke kterým dochází v zahřívání betonu, jsou odlišné výsledné fyzikální, tepelné a mechanické vlastnosti. Teplota požáru ovlivňuje nejen pevnost, ale i ostatní charakteristiky betonu, jako například modul pružnosti.

Rozsah degradace železobetonové konstrukce vlivem působení vysokých teplot je závislý zejména na parametrech působícího teplotního zatížení a parametrech materiálu, který je tepelně expozici vystaven. V současné době spolupracují pracoviště Ústavu geoniky a Fakulty stavební VUT v Brně na řešení projektu Grantové agentury České republiky P104/12/1988 „Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot.“ Znalosti získané studiem procesu porušování betonu při vysokých teplotách a zkušenosti při odstraňování degradovaného betonu pomocí technologie vysokorychlostních vodních paprsků napomohou nejen k prohloubení poznatků v oblasti chování cementových kompozitů při tepelném namáhání, ale i při následné aplikaci technologie vodních paprsků během odstraňování betonů již porušených vysokými teplotami.

ZÁVĚR

Výzkum odstraňování povrchových vrstev betonů pomocí různých typů vysokorychlostních vodních paprsků založený na zkouškách v laboratořích i polních aplikacích prokázal ve všech případech vyšší účinnost pulzujících paprsků v porovnání s odpovídajícími kontinuálními paprsky. Nejvyšší účinnosti pulzující technologie je dosaženo při použití trysek, které umožňují rozptýlení energie paprsku na větší plochu tryskaného povrchu (plochý, oscilující či rotační paprsek). Pulzující paprsky lépe odstraňují prostor mezi hrubým kamenivem, čímž vzrůstá plocha ošetřeného povrchu. Takový povrch pak lépe mechanicky ukotví nejrůznější

ší ochranné povlaky a aplikované sanační hmoty.

Technologie vodních paprsků je v současnosti nejčastěji používanou metodou pro odstraňování degradovaných vrstev betonů silničních a dopravních staveb. Výzkumné aktivity jsou zaměřeny jednak na inovace v oblasti vodních paprsků a dále na studium procesu interakce vodních paprsků s betony, které byly vystavené cyklickému působení mrazu, působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek a vystavené působení vysokých teplot. Problém odolnosti cementových betonů vůči vysokým teplotám se stal aktuální zejména po stále častějších autonehodách (především nákladních automobilů) v silničních tunelech s následkem požáru. Poznatky získané zkoumáním zmíněných oblastí umožní efektivní využití technologie vodních paprsků při sanacích takto zatížených staveb.

Článek byl vypracován v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 podporovaného OP Výzkum a vývoj pro Inovace, financovaného ze strukturálních fondů EU a ze státního rozpočtu ČR. Práce byla podpořena GA ČR, projektem č. P104/12/1988 a MPO ČR, projektem č. FR-TI3/733. Autoři děkují za podporu.

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

tel.: 596 979 323

e-mail: libor.sitek@ugn.cas.cz



Ing. Josef Foldyna, CSc.

tel.: 596 979 328

e-mail: josef.foldyna@ugn.cas.cz



Ing. Jiří Klich

tel.: 596 979 312

e-mail: jiri.klich@ugn.cas.cz



všichni: Ústav geoniky, AV ČR, v. v. i.

Studentská 1768,

708 00 Ostrava–Poruba

www.ugn.cas.cz

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Fakulta stavební VUT v Brně

Ústav technologie stavebních

hmot a dílců

Veveří 95, 662 37 Brno

tel.: 541 147 511

e-mail: bodnarova.l@fce.vutbr.cz

www.fce.vutbr.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem.