

Technologia strumienia wodnego dużej prędkości w naprawie konstrukcji betonowych – nowe kierunki i możliwości

High-speed water jet technology for renovation of concrete structures – new trends and possibilities

1. Technologia strumienia wodnego wysokiej prędkości w inżynierii lądowej

Usunięcie uszkodzonych warstw betonu jest bardzo ważnym etapem procesu naprawy konstrukcji betonowych. Zabieg ten powinien być przeprowadzony bardzo ostrożnie, aby nie spowodować dalszego osłabienia konstrukcji już uszkodzonej. Jedną z metod tego typu obróbki jest zastosowanie ciągłego strumienia wodnego generowanego przez pojedynczą dyszę lub ciągłego strumienia wodnego z dodatkiem materiału ściernego. W technologii ciągłego strumienia woda wypływa z dyszy z prędkością nawet do $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (zależnie od ciśnienia wody). Technologia strumienia wodnego (wykorzystywana do cięcia, czyszczenia i innych zastosowań) dzięki złożonym procesom fizycznym powoduje rozpad materiału poprzez zamianę energii kinetycznej strumienia wody na energię ciśnienia przyłożonego w punkcie styku z powierzchnią obrabianego materiału.

Zdolność ciągłego strumienia wodnego do obróbki można znacząco poprawić za pomocą dodatku cząstek ściernych. Cząstki ściernie są przyspieszane przez wodę do prędkości końcowej, jaką uzyskują w punkcie styku z powierzchnią obrabianego materiału. Rozpad materiału w wyniku działania takiego ściernego strumienia wysokiej prędkości jest podobny do bardzo szybkiej erozji spowodowanej ścieraniem wywołanym przez cząstki zderzające się z materiałem. Woda przyspiesza cząstki materiału ściernego, wypłukuje zużyty materiał ścierny oraz rozkruszony beton. W rezultacie strumień wody zawsze ma kontakt z czystą powierzchnią betonu. Na rysunku 1 przedstawiono różne rodzaje strumieni wodnych bez i z zastosowaniem cząstek ściernych.

Złożony strumień wodny (generowany przez kilka dyszy) stanowi modyfikację strumienia pojedynczego. Jego zaletą jest zdolność do objęcia swoim działaniem większej powierzchni obrabianego elementu. Technologię strumienia złożonego z powodzeniem stosowano przez wiele lat do usuwania uszkodzonego betonu odnawianych konstrukcji. Technologia z zastosowaniem wielu dysz umożliwiła obróbkę większej powierzchni betonu przy pojedyn-

1. High-speed water jet technology in civil engineering

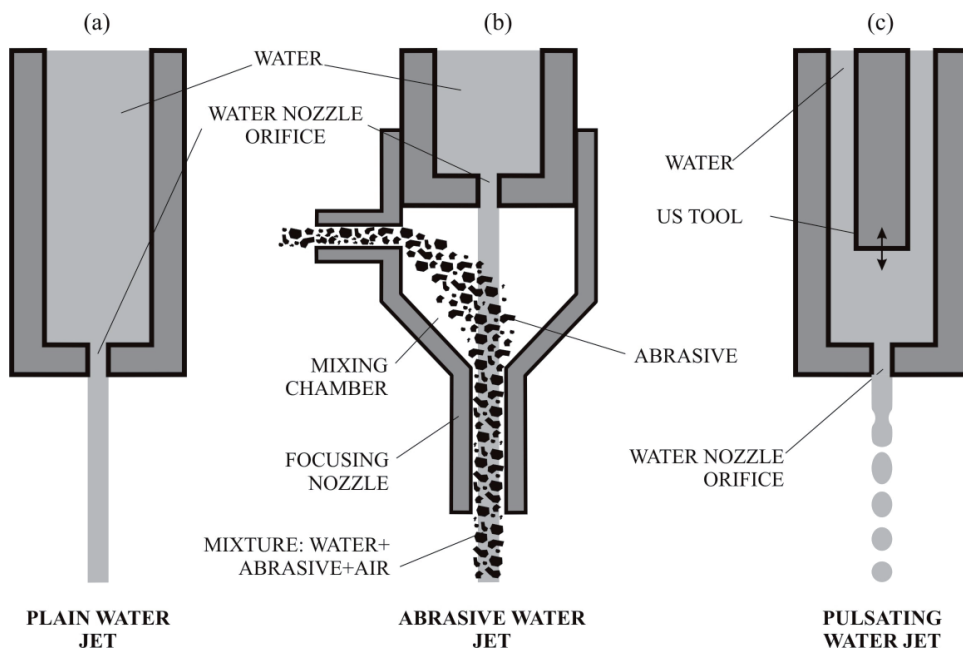
Removal of damaged concrete layers is a very important step in the process of renovation of concrete structures. The removing has to be very done carefully to avoid further weakening of the structure, which has already been damaged. One of cut possibilities is the application of continuous water jet generated by single nozzle or use of continuous abrasive water jet. Continuous water jet is a stream of liquid flowing at the speed as high as $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (depending on water pressure). Water jet technology (cutting, cleaning and other applications) disintegrates material by means of complicated physical processes by changing kinetic energy of water jet to pressure energy at the point of contact with the surface of worked material.

Cutting ability of continuous water jet can be considerably increased by addition of abrasive particles. Abrasive particles are accelerated by water up to their final speed they have at the point of contact with surface of cut material. Disintegration of material caused by action of such high-speed abrasive jet is similar to high-speed erosion by abrasion caused by particles colliding with material. Water is accelerating grains particles and washing out used abrasive and cut material so that water jet is always in contact with clean surface of concrete. On Figure 1 the different types of water jet without and with abrasive particles are shown.

Multiple water jet is a modification of single jet. Its advantage is to cover larger area in one pass. Damaged concrete of renovated structures has been successfully removed with multiple jets for many years. With multiple nozzles technology the larger area of concrete was treated in one pass and uniform distribution of energy of water jet on cut surface was obtained.

2. Pulsating water jet

In the case of the necessity to apply the jet energy to larger area, either multiple nozzle set or flat fan-shaped jet can be used. The



Rys. 1. Podstawowe rodzaje strumieni wodnych

Fig. 1. Basic types of water jet

czym ruchu oraz zapewniała równomierny rozkład energii strumienia wodnego na obrabianej powierzchni.

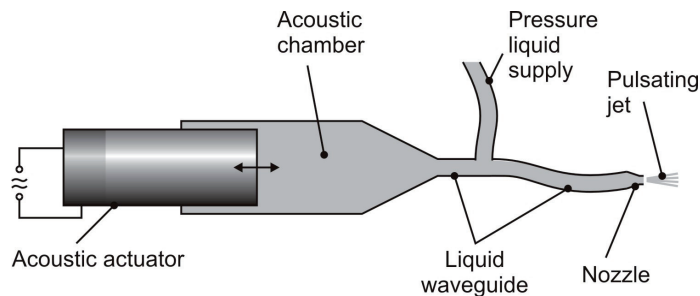
2. Pulsacyjny strumień wodny

W przypadku, gdy istnieje konieczność działania energią strumienia na większej powierzchni, można zastosować zarówno wspomniany zestaw wielu dysz, jak i płaski strumień w kształcie wachlarza (10). Ten ostatni rodzaj strumienia wodnego, z uwagi na jego niewystarczającą energię, nie jest obecnie stosowany w naprawach. Strumień taki generowany jest przez pojedynczą dyszę. Ponieważ jego energia obejmuje stosunkowo dużą powierzchnię, parametry obecnie stosowanych strumieni (ciśnienie wody, prędkość wypływu) nie są w stanie zagwarantować odpowiedniego rozpadu betonu usuwanej warstwy. Płaski strumień wodny z powodzeniem jest wykorzystywany do specjalnych zastosowań (czyszczenie, w tym powierzchni zbrojenia). W celu usunięcia warstwy stosunkowo mocnego betonu, płaski strumień wodny oraz rozkład jego energii należy odpowiednio zmodyfikować. Udało się to z powodzeniem osiągnąć w Instytucie Geoniki Akademii Nauk w Ostrawie w Czechach. Połączenie standardowego urządzenia wysokociśnieniowego do wytwarzania ciągłego strumienia wodnego z generatorem akustycznym dającym strumień pulsacyjny wysokich częstotliwości (rys. 2), może zapewnić rozpad nawet mocnego betonu (9). Efektywność płaskiego strumienia wodnego można również zwiększyć zmieniając jego charakter na pulsacyjny (10).

Pulsacyjny strumień wodny przedstawiono na rysunku 3. Dzięki różnym prędkościom wypływających cząstek, co spowodowane jest przez impulsy ciśnieniowe wytwarzane w układzie wysokociśnieniowym, struktura strumienia charakteryzuje się wyraźnym grupowaniem cząstek wody. Poszczególne porcje cieczy powo-

second type of water jet is currently not used for renovation purposes because energy of the jet is not sufficient. This type of jet is generated by single nozzle. Since the energy of the jet is spread over relatively larger area the parameters of currently used jet (water pressure, flow rate) cannot ensure sufficient disintegration of concrete. Flat water jet is successfully used for special applications (cleaning, removing of iron scale). Flat water jet and its energy distribution have to be modified for the purpose of removing of relatively strong concrete. This problem is successfully solved by the Institute of Geonics, Academy of Sciences in Ostrava, Czech Republic. Combination of standard continuous water jet with acoustic generator (Fig. 2) giving high frequency pulsating jet (9) can assure the disintegration of hard concrete with the use of standard high

pressure devices. Efficiency of flat water jet can be increased by pulsating as well (10).



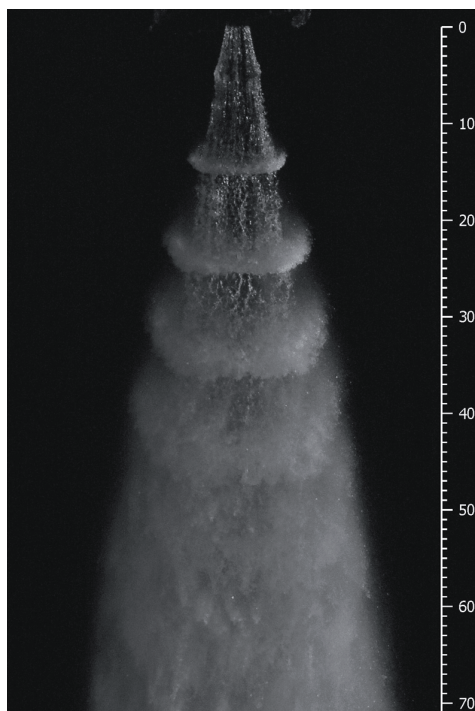
Rys. 2. Schemat wysokociśnieniowego układu połączonego z generatorem akustycznym impulsów ciśnieniowych

Fig. 2. Scheme of high-pressure system integrated with acoustic generator of pressure pulses

Figure 3 shows pulsating water jet. The structure of the jet shows distinct areas of bunching of liquid due to different speed of flowing particles caused by pressure pulses in high-pressure system. Individual bunches of liquid cause short time pressure increase up to the so-called impact pressure at the point of impact onto the surface of worked material. The impact pressure is several times higher than stagnation pressure caused by continuous jet. Cyclical high frequency (20KHz) loading of surface of worked material by pressure changes causes its disintegration at water pressure values several times lower (30MPa) than currently used pressure (150 – 200 MPa). Can be achieved by lower much pressure than which is normally used.

3. Experience from earlier studies

Findings about disintegration of concrete with high-speed water jet result from long term and extensive research. Photographs give an



Rys. 3. Pulsacyjny strumień wodny

Fig. 3. Pulsating water jet

dużą chwilowy wzrost ciśnienia do tak zwanego ciśnienia uderzeniowego w punkcie styku z powierzchnią obrabianego materiału. Ciśnienie uderzeniowe jest kilkakrotnie wyższe niż ciśnienie stałe wytworzone przez strumień ciągły. Dzięki oddziaływaniu na powierzchnię obrabianego materiału cyklicznie zmiennego ciśnienia (wysoka częstotliwość zmian - 20 kHz), rozpad materiału następuje przy kilkakrotnie niższych wartościach ciśnienia wody (30 MPa) w porównaniu z obecnie stosowanymi (150 – 200 MPa).

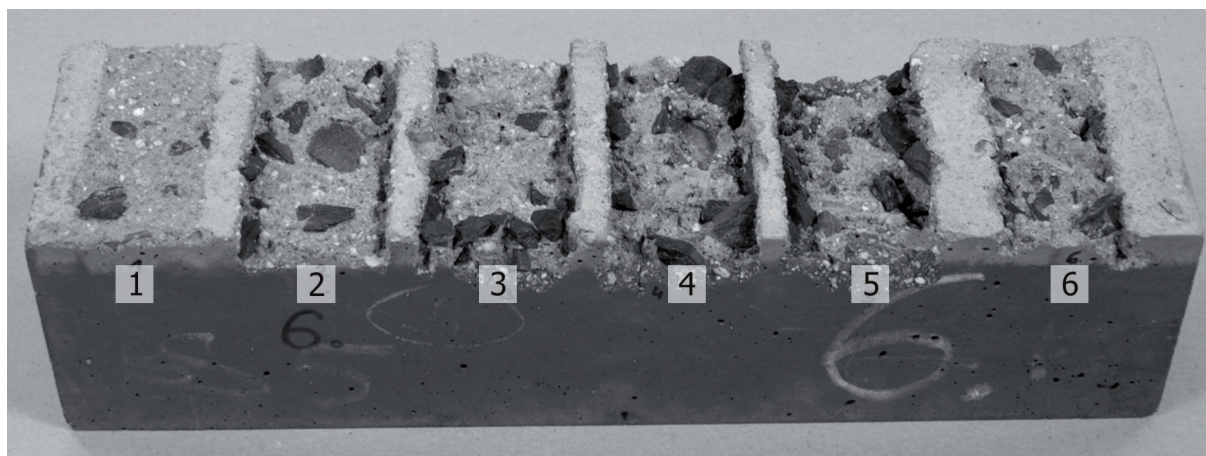
illustrative picture of results of concrete disintegration with different types of high speed water jets (e.g. Figures. 4 and 5). Surface of worked concrete was evaluated visually (using microscope with different magnification) and volume of disintegrated concrete or depth of cut were measured. Surrounding area was examined with respect to presence/absence of cracks.



Rys. 4. Bruzda utworzona na powierzchni płyty drogowej przez pulsacyjny oscylacyjny strumień uzyskany za pomocą urządzenia Aqua Cutter Robot HVD-6000. Zastosowano wahadłowy ruch dyszy. Wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 40 MPa

Fig. 4. Kerf created by pulsating oscillating jet on road panel. Kerf was created by Aqua Cutter Robot HVD-6000. Swinging motion of nozzle was used. Compressive strength of concrete was 40 MPa

Figure 5 shows examples of kerfs cut by rotating water jet in concrete made from two considerably different layers. Properties of top layer (without pigment) were intentionally worsened by high



Rys. 5. Bruzdy wykonane w próbce: dolna warstwa beton klasy C40/45, górna beton klasy C20/25. Wpływ prędkości przesuwu dyszy na głębokość bruzdy i objętość rozkruszonego betonu. Strumień rotacyjny: 1 – ciągły, prędkość przesuwu: 0,5 m/min, 2 – pulsacyjny, prędkość przesuwu: 0,5 m/min, 3 – pulsacyjny, prędkość przesuwu: 0,3 m/min, 4 – pulsacyjny, prędkość przesuwu: 0,2 m/min, 5 – pulsacyjny, prędkość przesuwu: 0,1 m/min, 6 – ciągły, prędkość przesuwu: 0,1 m/min

Fig. 5. Kerfs created in concrete of class C40/45 with top layer made from material with worse properties (concrete of class C20/25 with high dose of mixing water). Influence of traversing velocity on depth of cut and disintegrated volume – rotating jet (1 – continuous, traversing velocity: 0.5 m·min⁻¹, 2 – pulsating, traversing velocity: 0.5 m·min⁻¹, 3 – pulsating, traversing velocity: 0.3 m·min⁻¹, 4 – pulsating, traversing velocity: 0.2 m·min⁻¹, 5 – pulsating, traversing velocity: 0.1 m·min⁻¹, 6 – continuous, traversing velocity: 0.1 m·min⁻¹)

3. Doświadczenia z wcześniejszych badań

Wiedza na temat destrukcji betonu spowodowanej oddziaływaniem strumienia wodnego wysokiej prędkości wynika z wieloletnich i intensywnych badań. Zamieszczone zdjęcia (rys. 4 i 5) dają obraz destrukcji betonu w wyniku oddziaływań różnego typu strumieni wodnych wysokiej prędkości. Powierzchnie betonu poddanego obróbce oceniano za pomocą mikroskopu przy różnych powiększeniach oraz dokonywano pomiarów objętości betonu, który uległ rozpadowi, lub głębokości powstałej bruzdy. Oceniano również obszar otaczający bruzdę pod względem występowania ewentualnych spękań.

Na rysunku 5 pokazano przykłady bruzd utworzonych przez rotacyjny strumień wodny w próbce betonowej wykonanej z dwóch znacząco różnych warstw. Celowo obniżono jakość betonu górnej warstwy (bez pigmentu) dozując większą ilość wody zarobowej.

4. Przeprowadzone badania

4.1. Próbkki betonów

Próbki do badań przygotowano w taki sposób, aby ich obciążenie korozyjne odpowiadało rzeczywistym warunkom korozji, typowym dla naprawianych konstrukcji betonowych. Próbkki wykonano z betonów powszechnie stosowanych klas C25/30 oraz C30/37.

Próbki dojrzewały przez 28 dni w normowych warunkach. Po 28 dniach próbki świadkowe umieszczono w normalnym środowisku, natomiast pozostałe poddano wymienionym dalej rodzajom oddziaływania środowisk korozyjnych. Kontrolowaną degradację przygotowanych próbek betonu prowadzono w oparciu o wszystkie dostępne informacje o początkowym stanie materiału, procesie wytwarzania próbek oraz warunkach oddziaływania korozyjnego. Zastosowano następujące rodzaje obciążenia korozyjnego: zamrażanie - odmrażanie w obecności soli odładzających, ekspozycję w roztworze chlorków oraz w roztworze siarczanów.

Zamrażanie - rozmrażanie w obecności soli odładzających:

Próbki poddano cyklicznemu zamrażaniu w obecności środków odładzających. Pojedynczy cykl składał się z chłodzenia próbek w temperaturze - 15°C, a następnie ich ogrzewaniu do temperatury +20°C. Próbkki sześciennie były zanurzone jedną stroną w 3% roztworze NaCl, co miało modelować warunki rozmrażania w obecności substancji chemicznych. Próbkki ważono po każdym z czterech etapów: po 25, 50, 75 oraz 100 cyklach. Warunki ekspozycji odpowiadały wymaganiom Normy Czeskiej CSN 73 1326/Z1: Odporność nawierzchni betonowych na działanie wody i substancji odładzających. Badaniu rozpadu betonu przy zastosowaniu technologii strumienia wodnego poddawano jedynie ten bok próbkki, który był wcześniej zanurzony w roztworze NaCl.

dose of mixing water in the course of manufacturing process of the sample.

4. Experimental tests

4.1. Concrete samples

It was necessary to select representative samples of concrete before performing experimental disintegration. Different Samples were prepared so that their corrosion load was in accordance with real corrosion common for renovated concrete structures.

Different types of concrete samples were prepared. Samples were made from concrete classes C25/30 and C 30/37 in order to include commonly used material.

Then, samples were left to matured for 28 days in standardized conditions. After 28 days, referential concrete samples were placed in normal environment, other samples were exposed to above mentioned types of corrosive environment. Controlled degradation of prepared concrete samples was based on all available information of input material, manufacturing process of samples and conditions of corrosion action. Selected types of corrosion load were: Freezing-thawing in the presence of de-icers, solution of chlorides and solution of sulphates.

Description of corrosive process:

Freezing-thawing in the presence of de-icers: Samples were loaded with cyclic freezing exposure in the presence of chemical deicing agents. One loading cycle consists of cooling the samples to a temperature of - 15°C and subsequent heating to a temperature of +20°C while one side of the cube is immersed in 3% NaCl solution, which simulates chemical substances and thawing. Samples were weighed in four stages at 25 cycles, 50 cycles, 75 and 100 cycles. The expositions were according to Czech Standard CSN 73 1326/Z1 - Resistance of cement concrete surface to

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY BETONÓW

EXAMPLE OF CONCRETE SAMPLE MIX-DESIGN

	Mix-design No. 1 Concrete C25/30	Mix-design No. 2 Concrete C35/37
Cement CEM I 42.5 R Mokrá	380 kg	480 kg
Piasek/Sand 0 – 4 mm, site Žabčice	860	820 kg
Kruszywo grube, amfibolitowe Aggregate 8 – 16 mm, site Želešice, amphibolite aggregate	970 kg	926 kg
Woda / Water	209 kg	208 kg
w/c Water / Cement ratio w	0,55	0,43
Konsystencja - opad stożka Consistency – degree of slump	S3	S3
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Compressive strength after 28 days	28 MPa	39 MPa

Próbki betonowe w roztworze chlorkowym Cl^{-1} i roztworze siarczanowym SO_4^{2-} :

Próbki betonu (po 28 dniach dojrzewania w normalnym środowisku) umieszczono na 365 dni w hermetycznych pojemnikach z roztworami substancji korozyjnych. Regularnie co 14 dni oznaczano pH roztworów. Stężenie chlorków wynosiło 100 g NaCl/litr wody, natomiast siarczanów 51,2 g Na_2SO_4 /litr wody.

Następnie określono właściwości próbek betonowych (zarówno świadkowych jak i poddanych działaniu środowiska korozyjnego). Ich cechy fizyko-mechaniczne i chemiczne oceniano pod względem wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałości na rozciąganie warstw powierzchniowych, gęstości objętościowej, nasiąkliwości, wartości pH, analizy dyfrakcji promieni X, analizy termicznej różnicowej, zawartości i rozkładu porów powietrznych, stopnia uszkodzenia próbek, stopnia zaszarczenia i wielu innych dodatkowych badań przewidzianych dla danego rodzaju środowiska korozyjnego. Wszystkie uzyskane dane służą obecnie do sformułowania modelu matematycznego postępu destrukcji materiału.

W przypadku wszystkich próbek skorodowanych materiał do badań właściwości fizycznych betonu pobierano z dwóch miejsc:

- z wierzchniej warstwy próbki betonu – max do 5 mm grubości.
- z obszaru bruzdy powstałej w wyniku działania strumienia wodnego wysokiej prędkości. Głębokość bruzdy wynosiła 10 do 20 mm.

Właściwości próbek materiału pobranego z obszaru bruzdy określano, aby potwierdzić fakt rzeczywistych zmian parametrów fizyko-mechanicznych betonu w przekroju poprzecznym całej próbki. Badania właściwości warstwy pozostałej po działaniu strumienia wodnego umożliwiały weryfikację jej stanu i stwierdzenie, czy głębokość uzyskanej bruzdy była wystarczająca, aby odsłonić materiał o zadowalających parametrach fizyko-mechanicznych.

Przegląd procedur badawczych zastosowanych do określenia właściwości fizyko-mechanicznych i fizykochemicznych próbek betonu

Badania określonych właściwości fizyko-mechanicznych i fizykochemicznych przeprowadzono zgodnie z następującymi normami i procedurami badawczymi:

- CSN EN 12390-3 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- CSN EN 12390-5 Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.
- CSN EN 12390-7 Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu.
- CSN 73 1370 Nieniszczące badania betonu. Postanowienia ogólne.
- CSN EN 12504-2 Badania betonu w konstrukcjach - Część 2: Badanie nieniszczące – Oznaczanie liczby odbicia.
- CSN 73 1318 Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie betonu.
- CSN 73 1322 Oznaczenie mrozoodporności betonu.

water and defrosting chemicals. For testing the disintegration of concrete by using water jet technology only one side of the cube, which was immersed in NaCl solution, was used.

Concrete samples in solution of chlorides Cl^{-1} and in solution of sulphates SO_4^{2-} :

Samples of concrete (after 28 days in normal environment) were put in an airtight container with corrosive substances solutions for 360 days. Regularly after 14 days the pH of the solutions was measured. Chlorides concentration was 100 g NaCl in 1 liter of water. Sulphates concentration was 51.2 g Na_2SO_4 in 1 liter of water.

Then properties of concrete samples were described (both reference and degraded). Their physical-mechanical and chemical properties were defined in terms of compressive strength, tensile bending strength, tensile strength of surface layers, volume weight, water absorbing capacity, pH value, X-ray diffraction analysis, differential thermal analysis, content and distribution of air pores, degree of degradation of samples, degree of sulphation and other additional tests according to the type of corrosive environment. All gained information serve for formulation of mathematical model of material disintegration.

Material for testing of physical properties of concrete was taken from two places of all corroded samples:

- One sample was taken from the top layer of concrete sample – max 5 mm deep.
- The other sample was taken from the area of high-pressure water jet cuts. Cuts were from 10 to 20 mm deep (measured from the sample surface).

Properties of samples of this layer were determined to confirm the fact that physical-mechanical properties of concrete really change on the cross section area. The tests also determined properties of the layer remaining after water jet application and verified that the cut was deep enough to reach material with satisfactory physico-mechanical properties.

Overview of test procedures used for determination of the physical-mechanical and physico-chemical properties of concrete samples

Tests determined the physical-mechanical and physico-chemical properties were made according to these standards and test procedures:

- CSN EN 12390-3 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
- CSN EN 12390-5 Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimen.
- CSN EN 12390-7 Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.
- CSN 73 1370 Nondestructive testing of concrete. Common regulations.
- CSN EN 12504-2 Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number.
- CSN 73 1318 Determination of tensile strength of concrete.

- CSN 73 1326 Odporność nawierzchni betonowych na działanie wody i środków odładzających.
- CSN 73 2578 Badanie wodoszczelności wykończenia powierzchni konstrukcji budowlanych.
- CSN 72 0100 Podstawowa analiza silikatów – Postanowienia ogólne.
- CS EN 12390-8 Badania betonu - Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

Badania wykonane według zmodyfikowanych metod normowych:

- Zaproponowaliśmy zmienioną metodę oznaczenia wytrzymałości na ściskanie zgodnie z CSN 73 1373 Badania betonu metodą badania twardości.
- Zaproponowaliśmy zmienioną metodę oznaczenia wodoszczelności powierzchniowej warstwy betonu zgodnie z CSN 73 2578 Badanie wodoszczelności wykończenia powierzchni konstrukcji budowlanych.

Stosowane normy CSN EN to czeskie wersje Norm Europejskich EN.

4.2. Urządzenia zastosowane w technologii strumienia wodnego wysokiej prędkości

Do badania destrukcji betonu w warunkach laboratoryjnych zastosowano eksperymentalne urządzenie opracowane w Instytucie Geoniki w Ostrawie. W celu uzyskania niższych ciśnień i wyższych wydajności przepływu stosowano wysokociśnieniową pompę nurnikową KUNZ Hranice (strumienie ciągłe, pulsacyjne rotacyjne i płaskie). Przyrząd umożliwia wytworzenie strumienia wody o wydajności przepływu 45 litrów na minutę przy ciśnieniu 120 MPa. W celu uzyskania wysokich ciśnień i niskich prędkości przepływu stosowano pompę PTV o konstrukcji opartej na ciśnieniowych wielostrumieniowych układach przepływowych o mak-

Tablica 2 / Table 2

PARAMETRY STRUMIENI WODNYCH

PARAMETERS OF WATER JETS

Parametry ciągłego strumienia wody / Parameters of continuous water jet		
Ciśnienie Pressure, MPa [MPa]	Średnica dyszy / Diameter of water nozzle, mm	
350	0.1	
250	0.1	
Parametry strumienia wody o dużej szybkości (ciągły i pulsacyjny) Parameters of flat high speed water jet (continuous and pulsating)		
Ciśnienie Pressure, MPa	Ekwiwalentna średnica płaskiej dyszy Lechler Flat nozzle Lechler equivalent diameter, mm	
30	2.05	
Parametry rotacyjnego strumienia wody o dużej szybkości (ciągły i pulsacyjny) Parameters of rotating high speed water jet (continuous and pulsating)		
Ciśnienie Pressure, MPa	Głowica Barracuda – 2 dysze o średnicy Barracuda head – 2 nozzles diameter, mm	Częstość obrotów Rotating rate, rpm
30	1.19	1020

- CSN 73 1322 Determination of frost resistance of concrete.
- CSN 73 1326 Resistance of cement concrete surface to water and defrosting chemicals.
- CSN 73 2578 Test for water-tightness of surface finish of building structures.
- CSN 72 0100 Basic analysis of silicates - Common regulations.
- CS EN 12390-8 Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure.

Tests performed according to the modified standard procedure:

- We proposed a methodology for determining the strength of concrete in compression according to CSN 73 1373 Testing of concrete by hardness testing methods.
- We propose a methodology for determining the surface layer of waterproof concrete according to CSN 73 2578 Test for water-tightness of surface finish of building structures.

Standards CSN EN are the Czech version of the European Standards EN.

3.2. Apparatus used for high-speed water jet technology

Experimental device from the Institute of Geonics in Ostrava was used for disintegration of concrete in laboratory conditions. High-pressure plunger pump KUNZ Hranice was used for lower pressures and higher flow rates (continuous and pulsating rotating and flat jets). The device is capable of supplying high-pressure water at the rate of 45 liter per minute and pressure 120 MPa. PTV pump based on pressure multiplier Flow Systems with the maximum level of pressure 415 MPa was used for high pressures and lower flow rates. Different types of nozzles were used to generate high-speed water jets as cutting instruments. Conventional round jet was generated by standard water nozzles, flat nozzle Lechler, type 602571 with spray angle 15° was used for generating of flat jets, Rotating cutting head Barracuda (StoneAge) with two water nozzles inclined from vertical axis was also used. Acoustic pulse generator with frequency of 20 kHz was alternatively used for all types of nozzles. Movement of water jet on the above samples was controlled by X-Y table.

Kerfs on concrete samples were cut by continuous water jet, pulsating water jet, rotating continuous and rotating pulsating water jets, flat continuous and flat pulsating jets. Distance of worked concrete from nozzle was 40 mm for both pulsating and continuous flat jet. Distance from concrete to nozzle for continuous rotating jet was 20 mm and 40 mm for pulsating jet because the efficiency of pulsating jet is higher at this distance due to breaking up of the jet into slugs of water. Ultrasonic output was set to maximum during cutting by pulsating

symalnym poziomie ciśnienia 415 MPa. Do obróbki betonu stosowano różne rodzaje dysz do generowania strumieni wodnych wysokiej prędkości. Konwencjonalny zaokrąglony strumień uzyskiwano za pomocą standardowych dysz wodnych, natomiast płaskie strumienie wytwarzano za pomocą płaskich dysz Lechler, typu 602571 o kącie rozprysku 15°. Stosowano również obrotową głowicę tnącą Barrakuda (StoneAge) z dwiema dyszami wodnymi odchylonymi od osi pionowej. Alternatywnie do wszystkich typów dysz stosowano generator impulsów akustycznych o częstotliwości 20 kHz. Przepływ strumienia wodnego przyłożonego do próbek betonowych kontrolowano za pomocą stolika XY.

Obróbkę próbek betonowych realizowano za pomocą ciągłego strumienia wodnego, pulsacyjnego strumienia wodnego, rotacyjnego ciągłego i rotacyjnego pulsacyjnego strumienia, płaskiego ciągłego i płaskiego pulsacyjnego strumienia. Odległość dyszy od powierzchni obrabianego betonu wynosiła 40 mm zarówno w przypadku stosowania pulsacyjnego jak i ciągłego płaskiego strumienia. Dla strumienia ciągłego rotacyjnego odległość ta wynosiła 20 mm i 40 mm dla strumienia pulsacyjnego ze względu na jego większą efektywność przy tej odległości związaną z rozbijaniem strumienia wody. W czasie obróbki strumieniem pulsacyjnym generator ultradźwięków ustawiano na maximum. Szybkość obróbki różniła się zależnie od zastosowanego strumienia (od 0,1 m/min do 5 m/min); szybkość obróbki była taka sama w przypadku bruzd utworzonych zarówno przez ciągły jak i pulsacyjny strumień wodny. Oznaczano objętość odspojonego materiału z bruzdy lub jej głębokość. Powierzchnie obrabiane poddawano analizie makroskopowej.

5. Wyniki

5.1. Destrakcja betonu w wyniku działania pojedynczego strumienia wodnego (ciągłego i pulsacyjnego)

Pojedynczy strumień wodny użyto głównie dla celów laboratoryjnych i doświadczalnych. Efektywność strumienia łatwo ocenić dokonując pomiaru głębokości bruzdy. Ten rodzaj strumienia wodnego nie jest odpowiedni do stosowania na większych powierzchniach betonu. Pojedynczy strumień wodny przy jego ruchu oscylacyjnym lub wahadlowym stosowany jest do wykonywania głębszych bruzd. Efektywność pulsacyjnego strumienia wodnego w porównaniu do strumienia ciągłego jest zawsze większa; głębokość utworzonej bruzdy (zależnie od rodzaju i wytrzymałości betonu oraz parametrów strumienia wody) jest około 1,5 do 2 razy większa. Ciągły strumień wodny odrywa kawałki betonu; bruzdy utworzone przez strumień pulsacyjny są bardziej regularne, bez większych odprysków. Dolna powierzchnia bruzd utworzonych za pomocą pulsacyjnego strumienia wodnego jest bardziej szorstka niż powierzchnia

jet. Cutting rate differed according to jet used (from 0.1 m·min⁻¹ to 5 m·min⁻¹); cutting rate was the same for kerfs created by both continuous and pulsating water jets. Volume of material disintegrated from kerfs or depth of cut were measured. Cut surfaces were macroscopically analyzed.

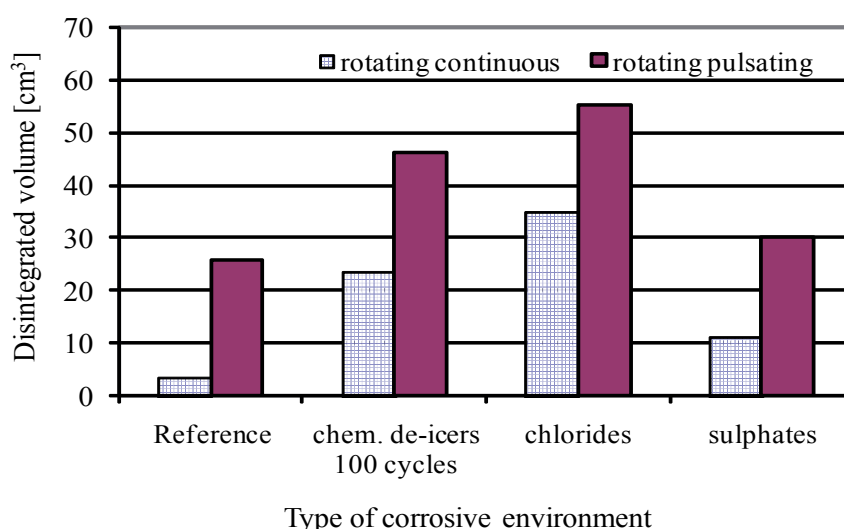
4. Results

4.1. Disintegration of concrete with single water jet (continuous and pulsating)

Single water jet was used mainly for laboratory and experimental purposes. Efficiency is easy to be evaluated by measuring the depth of cut. This type of water jet is not suitable for working on larger areas of concrete. Single water jet with oscillating or swinging movement is used for demolition of thicker layers. Efficiency of pulsating water jet is always higher compared to continuous jet; created kerf (depending on type and strength of concrete and parameters of water jet) is approximately 1.5 – 2 times deeper. Continuous water jet breaks out pieces of concrete; kerfs created by pulsating jet are more regular, without larger chipping. Bottom surface of the kerfs cut by pulsating water jet is more rough than surface of kerf cut by continuous jet. This can be used for applications requiring good adhesion of coats, layers or new material.

4.2. Disintegration of concrete with rotating jets (continuous and pulsating)

Rotating jets are commonly used technology for treating larger areas of concrete – cleaning, removing of surface layers. The most simple solution is rotating head with two nozzles, however there are tools with several nozzles. Higher number of nozzles brings a problem of proper position of nozzles to distribute energy of jets as regularly as possible depending on movement of the head. It was verified that rotating pulsating water jet disintegrates higher



Rys. 6. Objętość usuniętego betonu (cm³), rodzaj strumienia wodnego: rotacyjny pulsacyjny i rotacyjny ciągły. Prędkość przesuwu 0,2 m/s

Fig. 6. Disintegrated volume of concrete (cm³), type of water jet: rotating pulsating and rotating continuous. Cutting rate 0.2 m·s⁻¹

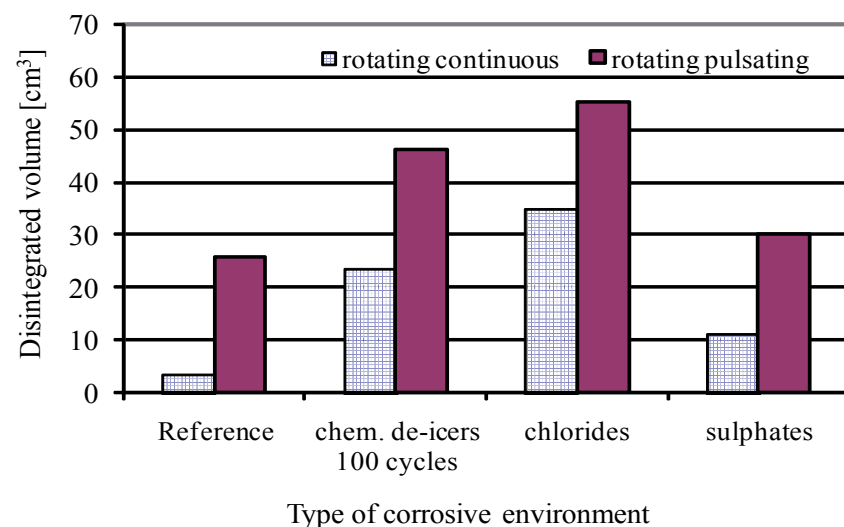
bruzd powstałych w wyniku działania strumienia ciągłego. Zatem ten rodzaj strumienia może być stosowany tam, gdzie wymagana jest dobra przyczepność później nakładanych powłok lub warstw materiałów naprawczych.

5.2. Destrakcja betonu w wyniku działania strumieni rotacyjnych (ciągłego i pulsacyjnego)

Technologia strumieni rotacyjnych jest powszechnie stosowana do obróbki większych powierzchni betonu – czyszczenia, usuwania wierzchnich warstw. Najprostszym rozwiązaniem w tej technologii jest głowica rotacyjna z dwiema dyszami. Niemniej jednak stosuje się również przyrządy z większą liczbą dysz. W tym ostatnim rozwiązaniu pojawia się problem właściwego ustawienia dysz, tak aby zapewnić równomierny rozkład energii strumienia zależnie od ruchu głowicy. Wykazano, że w tych samych warunkach rotacyjny pulsacyjny strumień wodny powoduje rozpad większej ilości betonu w porównaniu do strumienia ciągłego; ilość ta była około 2,3 – 6,3 razy większa. Szybkość przesuwu głowicy ma tu szczególnie istotne znaczenie: przy większej prędkości przesuwu energia ciągłego strumienia wodnego jest niewystarczająca do rozkruszenia powierzchniowej warstwy, podczas gdy pulsacyjny strumień wodny zapewnia odpowiedni stopień destrukcji betonu.

5.3. Destrakcja betonu w wyniku działania płaskiego strumienia wodnego (ciągłego i pulsacyjnego)

Tego typu strumieni wodnych nie stosuje się do renowacji elementów betonowych, ze względu na ich niską efektywność. Wyniki badań laboratoryjnych wykazały natomiast, że w takich samych warunkach zdolność płaskiego pulsacyjnego strumienia wodnego do rozdrabniania betonu jest około 7,2 razy wyższa niż ciągłego strumieniem wodnego.



Rys. 7. Objętość rozdrabnionego betonu (cm³), rodzaj strumienia wodnego: płaski pulsacyjny i płaski ciągły. Szybkość przesuwu: 0,2 m/s

Fig. 7. Disintegrated volume of concrete (cm³), type of water jet: flat pulsating and flat continuous. Cutting rate 0.2 m·s⁻¹

amount of concrete than continuous jet under the same conditions; the amount is approximately 2.3 – 6.3 times higher. Cutting rate has particularly high influence: energy of continuous water jet with higher cutting rate is not sufficient for disintegration of surface layer, whereas pulsating water jet is capable of reasonable level of disintegration.

4.3. Disintegration of concrete with flat water jet (continuous and pulsating)

This type of water jet has not been used for renovation of concrete for its low efficiency. However, results of laboratory experiments show that disintegration power of flat pulsating water jet is approximately 7.2 times higher than that of flat continuous water jet under the same conditions.

4.4. Quality of treated concrete surface

Results of macroscopic analysis of newly formed surface after cutting with different types of water jet are described in details below.

While continuous water jet moves only surface layer of cement stone (under given test conditions), or partly exposes aggregate in concrete (rotary continuous jet), pulsing water jet removes cement stone to the very aggregate, which forms a relief embossed on the new surface.

Macroscopic description of newly formed surface after cutting with:

Flat pulsing water jet

Cement stone is removed down to aggregate, which is embossed.

Surface of aggregate is roughened, roughness is caused by grains of silica and spars; cement stone is cleared from the surface of grains. Grains are morphologically outlined and slightly embossed on the surface. Granites show accentuated foliation formed by alignment of scales of biotite; some of grains are cleft out along

the faces of foliation. Cement stone is considerably damaged, removed from sand grains. These cause roughness of this surface. Sharp contact of cement stone with aggregate, surface shrink cracks are marked.

Flat continuous water jet

Only surface layer of cement stone is removed, numerous shrink cracks are shown.

Surface of aggregate is roughened, roughness is caused by grains of silica and spars; cement stone is cleared from the surface of grains. Only one grain is exposed. Cement stone is slightly damaged, only a thin layer of cement is removed from the surface. About one quarter of the surface shows erosion of cement stone with marked sand grains. Contact of cement stone and aggregate is not exposed. Surface shrink cracks are considerably marked.

5.4. Jakość poddanych obróbce powierzchni betonowych

Wyniki analizy makroskopowej nowo powstałej powierzchni po obróbce prowadzonej za pomocą różnych rodzajów strumieni wodnych szczegółowo opisano poniżej.

O ile ciągły strumień wodny usuwa jedynie wierzchnią warstwę kamienia cementowego (w danych warunkach badania) lub częściowo odsłania kruszywo w betonie (rotacyjny ciągły strumień), o tyle pulsacyjny strumień wodny usuwa kamień cementowy do samego kruszywa tworząc specyficzną rzeźbę nowej powierzchni.

Makroskopowy opis nowo uformowanej powierzchni po obróbce:

Płaski pulsacyjny strumień wodny

Kamień cementowy został usunięty do kruszywa, które uległo odsłonięciu. Powierzchnia kruszywa jest szorstka. Szorstkość ta jest spowodowana ziarnami krzemionki i szpatu. Ziarna kruszywa nie wykazują zanieczyszczenia kamieniem cementowym. Morfologicznie są wyodrębnione z nieznacznie zarysowaną rzeźbą na powierzchni betonu. Granity wykazują uwydatnione rozwarstwienie spowodowane ułożeniem złuszczeń biotyty; niektóre ziarna uległy rozłupaniu wzdłuż powierzchni rozwarstwienia. Kamień cementowy uległ znacznemu zniszczeniu i nie utrzymuje się na ziarnach piasku. W rezultacie powierzchnia betonu jest szorstka. Wyraźnie zaznacza się styk kamienia cementowego z kruszywem i powierzchniowe rysy skurczowe.

Płaski ciągły strumień wodny

Usunięta jest jedynie wierzchnia warstwa kamienia cementowego, widoczne są liczne rysy skurczowe. Powierzchnia kruszywa jest szorstka. Szorstkość ta jest spowodowana ziarnami krzemionki i szpatu. Ziarna kruszywa nie wykazują zanieczyszczenia kamieniem cementowym. Całkowitemu odsłonięciu uległo zaledwie jedno ziarno. Kamień cementowy naruszony jest w nieznacznym stopniu. Jedynie jego cienka warstwa jest usunięta z powierzchni. Około jednej czwartej powierzchni wykazuje oznaki erozji kamienia cementowego z widocznymi ziarnami piasku. Połączenie pomiędzy kamieniem cementowym i kruszywem nie zostało naruszone. Wyraźnie widoczne są rysy skurczowe.

Rotacyjny pulsacyjny strumień wodny

Powierzchnia zniszczona jest na średniej głębokości, kruszywo w betonie zostało częściowo odsłonięte. Powierzchnia kruszywa jest szorstka. Szorstkość ta jest spowodowana ziarnami krzemionki i szpatu. Ziarna kruszywa nie wykazują zanieczyszczenia kamieniem cementowym. Niektóre ziarna uległy rozłupaniu wzdłuż powierzchni spękań w nich występujących. Ziarna są morfologicznie wyodrębnione i odsłonięte do około jednej piątej swojej wysokości. Granity wykazują rozwarstwienie spowodowane ułożeniem złuszczeń biotyty. Kamień cementowy, mocno uszkodzony, został usunięty z otoczenia ziaren kruszywa. W otoczeniu ziaren piasku nie obserwuje się go w ogóle. Odsłonięte ziarna piasku zapewniają szorstkość powierzchni. Połączenie pomiędzy kamieniem cemen-

Rotary pulsing water jet

Medium depth of surface is damaged, aggregate in concrete partly is exposed .

Surface of aggregate is roughened, roughness is caused by grains of silica and spars; cement stone is cleared from the surface of grains. Some of grains are cleft out along faces of cracks in grains of aggregate. Grains are morphologically embossed and exposed to about one fifth of their height. Granites show foliation caused by alignment of scales of biotite. Cement stone is clearly removed from surroundings of grains of aggregate, strongly damaged. It is totally removed from surrounding area of sand grains. Sand grains cause roughness of this surface. Contact of cement stone and aggregate is not sharp after action of water jet, cement stone binds aggregate well.

Rotary continuous water jet

About 50% of original surface is preserved, the rest is slightly damaged, aggregate in concrete is partly exposed.

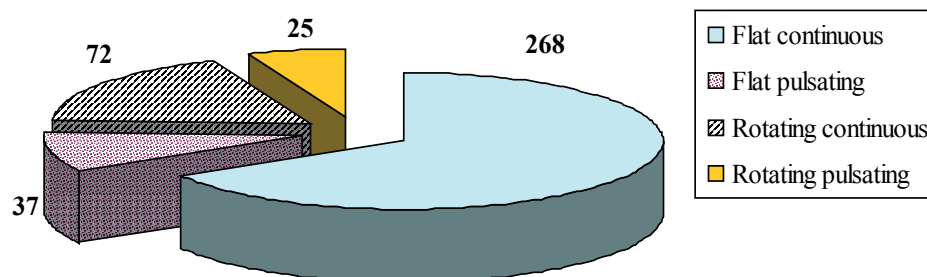
Surface of aggregate is roughened, roughness is caused by grains of silica and spars; cement stone is cleared from the surface of grains. Some grains are only exposed or cleft out of the matrix of cement stone. Granites show foliation caused by alignment of scales of biotite. Surface of grains is totally cleared from cement stone. Grains are cleft out along cracks or foliation in aggregate. A part of surface of cement stone is preserved without damage, cement stone is without any marks of damage. In damaged part, cement stone is superficially removed from surrounding area of aggregate and damaged. Cement stone is also removed from surrounding area of sand grains. Sand grains cause roughness of this surface. Contact of cement stone and aggregate is not sharp after action of water jet, grains of aggregate are not embossed, and aggregate is bound in matrix of cement stone. Isolated and thin cracks are marked by action of water jet.

5. Conclusion

Different types of concrete samples were tested in series of extensive experiments of disintegration in laboratory conditions. Concrete placed in normal environment was used for reference samples. Other concrete samples were subject to action of different types of corrosive environment (chlorides, sulphates, freezing combined with action of chemical de-icers).

Technology of high-speed water jet is selective; if properly adjusted, it removes only corroded or degraded layer of concrete and saves compact material. Another advantage of this technology is that it creates no cracks, which could possibly weaken the whole structure. This property is common for both pulsating and continuous water jets, however, pulsating jet can remove degraded layer much faster under the same working conditions. Determining factors for disintegration of different types of degraded concrete were parameters of top layer, in particular occurrence of cracks,

Specific energy (kJ/cm³) according water jet type



Rys. 8. Energia właściwa konieczna do usunięcia 1 cm³ betonu poddawane działaniu różnych rodzajów strumieni wodnych (ciśnienie wody 30 MPa, szybkość przesuwu 0,2 m/s)

Fig. 8. Specific energy necessary for disintegration of 1 cm³ of concrete of stated types of water jets (water pressure 30 MPa, cutting rate 0.2 m·s⁻¹)

towym i kruszywem nie zostało naruszone po działaniu strumienia wodnego, kamień cementowy dobrze spaja kruszywo.

Rotacyjny ciągły strumień wodny

Zachowało się około 50% pierwotnej powierzchni, pozostała część uległa nieznacznemu uszkodzeniu, kruszywo w betonie zostało częściowo odsłonięte. Powierzchnia kruszywa jest szorstka. Szorstkość ta jest spowodowana ziarnami krzemionki i szpatu. Ziarna kruszywa nie wykazują zanieczyszczenia kamieniem cementowym. Jedynie niektóre ziarna uległy odsłonięciu lub odspojeniu od matrycy kamienia cementowego. Granity wykazują rozwarstwienie spowodowane ułożeniem złuszczeń biotyту. Ziarna są rozłupane wzdłuż występujących w nich spękań lub rozwarstwień. Część powierzchni kamienia cementowego zachowała się nieuszkodzona, kamień cementowy nie wykazuje żadnych oznak zniszczenia. W części uszkodzonej, wierzchnia warstwa kamienia cementowego została zniszczona i usunięta z otoczenia ziaren piasku. Odsłonięte ziarna piasku zapewniają szorstkość powierzchni. Połączenie pomiędzy kamieniem cementowym i kruszywem nie zostało naruszone po działaniu strumienia wodnego, ziarna kruszywa nie uległy odspojeniu i są związane matrycą kamienia cementowego. W wyniku działania strumienia wodnego uwidoczniły się pojedyncze wąskie rysy.

6. Wnioski

Technologia strumienia wodnego wysokiej prędkości ma charakter selektywny. Jeśli jest właściwie stosowana, umożliwia usunięcie jedynie skorodowanej i uszkodzonej warstwy betonu przy zachowaniu materiału związłego. Inną zaletą tej technologii jest brak powstawania rys, które mogłyby osłabić materiał w konstrukcji. Zarysowań nie powoduje zarówno strumień wodny pulsacyjny jak i ciągły, przy czym w tych samych warunkach pracy za pomocą strumienia pulsacyjnego znacznie szybciej można usunąć uszkodzoną warstwę betonu. Destrukcję różnych rodzajów uszkodzonego betonu oceniano na podstawie parametrów górnej warstwy, a w szczególności w oparciu o występowanie rys, oznak erozji warstwy powierzchniowej. Zwarty beton poddawany obróbce realizo-

erosion of surface layers or, on the contrary, action of corrosive agents with the effect of partial encapsulation of surface pores. Compact concrete manufactured without any technological disorder shows the highest resistance to penetration of water jet (both continuous and pulsating).

The specific energy according used water jet types was calculated. The energy was calculated for flat continuous, flat pulsating, rotating continuous and rotating pulsating jets (parameters of jets are given in Table 2). Comparison of efficiency of flat pulsating jet and

rotating continuous jet commonly used for renovation (Fig. 8) is rather interesting. Flat pulsating jet can disintegrate about twice as much concrete with the same energy consumption. Since acoustic energy for generation of pulses in pulsating water jet is negligible compared to total energy necessary for generating of the jet (cca 1-2%), it seems that flat pulsating jet can become a serious competitor of rotating heads (10).

The advantage of the experiments with the interaction *concrete - high-speed water jet* was tested with different types of high-speed water jets. Classical technology of single continuous water jet generated with single nozzle was tested as well as rotating water jets generated by multiple nozzles (used mainly for renovation of larger areas). Flat continuous water jet, flat pulsating water jet, rotating continuous water jet and rotating pulsating water jet were tested for the first time. Results of experimental disintegration with different types of jets were compared and evaluated. Complex results of experimental work are being processed and will be used for formulation of model of disintegration of degraded construction material with water jets.

Acknowledgement

Presented research was supported by project MSM0021630511 Progressive Building Materials with Utilization of Secondary Raw Materials and their Impact on Structures Durability, project FR-TI1/387 and grant project of GACR No. 103/07/1662. Authors are thankful for the support shown.

Literatura / References

1. J. Foldyna, L. Sitek, B. Švehla & Š. Švehla, Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. *Ultrasonic Sonochemistry*, 131-137 (2004).
2. J. Foldyna, L. Sitek, P. Jekl, P. Martinec, D. Nováková, L. Wolf, B. Švehla, Testing of pulsating jets in a granodiorite quarry. *Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał* związanych. Monografie. pp.67-80, ISBN 83-915742-9-6, AGH Kraków, 2007.
3. De Haller, Schweiz. Bauzg. 260, 1933.

wanej bez jakichkolwiek problemów technologicznych charakteryzuje się wysoką odpornością na penetrację strumienia wodnego (zarówno ciągłego jak i pulsacyjnego).

Obliczono zużycie energii właściwej dla poszczególnych typów stosowanych strumieni wodnych. Obliczenia przeprowadzono dla strumieni: płaskiego ciągłego, płaskiego pulsacyjnego, rotacyjnego ciągłego i rotacyjnego pulsacyjnego (parametry strumieni podano w tablicy 2). Porównanie efektywności płaskiego pulsacyjnego strumienia oraz rotacyjnego ciągłego przy ich stosowaniu w renowacji daje interesujące wyniki (rys. 8). Strumień płaski pulsacyjny może spowodować rozpad dwukrotnie większej ilości betonu przy tym samym zużyciu energii. Z uwagi na fakt, iż w przypadku pulsacyjnego strumienia wodnego energia akustyczna konieczna do wytworzenia impulsów jest znikoma w porównaniu do całkowitej energii potrzebnej do pracy strumienia (około 1–2%), zastosowanie płaskiego strumienia pulsacyjnego wydaje się być rozwiązaniem konkurencyjnym dla głowic rotacyjnych (10).

Wpływ korzystnego oddziaływania technologii strumienia wodnego wysokiej prędkości na beton badano stosując różne rodzaje strumieni wodnych wysokiej prędkości. Testom poddano zarówno klasyczną technologię pojedynczego strumienia wodnego generowanego przez pojedynczą dyszę jak i technologie strumieni rotacyjnych generowanych przez wiele dysz (stosowane głównie do renowacji większych powierzchni). Po raz pierwszy testowano płaski ciągły strumień wodny, płaski pulsacyjny strumień wodny, rotacyjny ciągły strumień wodny oraz rotacyjny pulsacyjny strumień wodny. Uzyskane wyniki destrukcji betonu spowodowane działaniem różnych rodzajów strumieni porównano i oceniono. Wyniki wszystkich przeprowadzonych doświadczeń aktualnie są analizowane i będą stanowić podstawę do stworzenia modelu postępu destrukcji uszkodzonego materiału konstrukcji spowodowanego działaniem strumieni wodnych.

Podziękowania

Przedstawione badania wykonano w ramach projektu MSM0021630511 Progresywne materiały budowlane z wykorzystaniem materiałów odpadowych oraz ich wpływ na trwałość konstrukcji, projekt FR-TI1/387 oraz grant GACR No. 103/07/1662. Autorzy dziękują za okazaną pomoc.

4. A. W. Momber, Wear of rocks by water flow. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*: 51-68 (2004).
5. F. J. Heymann, High-speed impact between a liquid drop and a solid surface. *Journal of Applied Physics*: 5113-5122 (1969).
6. G. P. Thomas & J. H. Brunton, Drop impingement erosion of metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, January 27, 549-565 (1970).
7. F. P. Bowden & J. E. Field, The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, November 24, 331-352 (1964).
8. N. L. Hancox & J. H. Brunton, The erosion of solids by the repeated impact of liquid drops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, July 28, 121-139 (1966).
9. L. Sitek, L. Bodnárová, J. Foldyna, R. Hela, J. Ščučka, P. Jekl, D. Nováková, Pulsating rotating water jet for removing surface layers. *Proceedings of the Int. Conf. Repair (Sanace)*, ISBN 1211-3700, p. 341-348, Brno 2007 (in Czech).
10. L. Sitek, P. Martinec, J. Foldyna, J. Ščučka, L. Bodnárová, R. Hela, V. Mádr., Flat water jets for disintegration of concrete. *Proceedings of the Int. Conf. Repair (Sanace)*, Brno 2008 (in Czech).
11. S. Hilmersson, Hydrodemolition of concrete structures: basics and field experience. *Water Jet Applications in Construction Engineering*. A. A. Balkema, p. 163-176, Rotterdam, Brookfield 1998.
12. H. Toutanji, G. Ortiz, The effects of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. *Composite Structures* 53, 457-462 (2001).