

Milena Pavlíková, Robert Černý

Department of Materials Engineering and Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

Krzemianowa powłoka ochronna na spękaną powierzchnię betonu

Effect of silicate protecting layers on cracked concrete

1. Wstęp

Konstrukcje betonowe są często narażone na oddziaływanie nie-sprzyjających warunków zewnętrznych, które negatywnie wpływają na ich właściwości i trwałość. Dlatego też ochrona betonu mająca na celu wydłużenie czasokresu pomiędzy kolejnymi remontami jest zagadnieniem bardzo ważnym. Przeciwdziałanie korozji może mieć różny charakter: do pracy w trudnych warunkach zazwyczaj typowany jest beton wysokowartościowy. Działaniem wtórnym jest zabezpieczenie powierzchniowe, które może polegać na impregnacji (środkami hydrofobizującymi i stabilizującymi), nakładaniu powłok (ograniczających dostęp wody i wnikanie substancji agresywnych), pokrywaniu folią (podobne działanie jak powłoki; różnica polega na innej grubości warstwy ochronnej), natryskiwaniu membran elastomerowych (najczęściej poliuretanowych tworzących warstwę wodoodporną i odcinającą dostęp powietrza), nakładaniu powłok klejowych i taśm izolacyjnych (najczęściej asfaltowych lub izolacyjnych modyfikowanych).

Skutki niesprzyjających warunków klimatycznych i działania środowiska agresywnego mogą prowadzić do uszkodzenia konstrukcji betonowej, jeżeli system zabezpieczeń nie jest należycie wykonany. Podstawowe znaczenie ma staranny dobór sposobu ochrony betonu, aby spełnione były następujące warunki: odporność na atak substancji agresywnych, bardzo dobre przyleganie, odporność na działanie czynników mechanicznych i odporność na wstrząsy termiczne. O doborze powłoki ochronnej decyduje wiele czynników. Wybór właściwego rozwiązania powinien uwzględniać wskazania

1. Introduction

Concrete structures can be exposed to adverse external conditions, which can negatively influence their properties and service life. Therefore, the concrete protection is very important for extension of the time period between concrete structure repairs. The concrete protection against corrosion can be divided into two basic types; the first one is called primary protection, for example concrete with great utility properties such as high performance concrete. The secondary protection is done using surface treatment which may include impregnation (particularly hydrophobic and stabilizing substances), coatings (restricting water transport and protecting particularly against aggressive substances), squeegees (the same action as coatings, they differ in the thickness of the applied layer only), sprayed elastomer membranes (most often PUR creating water- and air-proof layer on the surface) and glued or freely laid strip insulations (most often asphalt or modified insulations strips).

The effects of unfavorable weather conditions and aggressive environment can cause serious damage of concrete structures if the protective systems are not designed responsibly. So, it is essential that a corrosion protection system is selected with care to ensure it meets three specific demands: resistance to the penetration of corrosive substances, very good adhesion and resistance to chemical, mechanical and thermal stress. Many factors influence the choice of coatings for the protection of a structure or part of a structure. Selection of a coating system may be based on owner's own experience, standard specifications or on recommendations

normowe lub wytyczne producenta zabezpieczeń; nie bez znaczenia jest też doświadczenie wykonawcy prac. Wykonawca/inwestor musi się zmierzyć z wymaganiami norm, jak również uwzględnić koszt prac, technologię i właściwości zabezpieczenia. Niekiedy wybór powłoki jest narzucony przez przepisy prawne oraz przez zalecenia wynikające z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa, zdrowotności rozwiązania, spełnienia kryteriów dotyczących ochrony środowiska czy warunków technicznych.

Ochronna powłoka krzemianowa stanowić może stosunkowo tanie zabezpieczenie powierzchni konstrukcji betonowej umożliwiającej długoletnią trwałość i niezawodność. Warstwa tworzy się w wyniku syntezy uwodnionych krzemianów wapnia w porach i spękaniach na głębokości do 20 mm pod powierzchnią. Powstający produkt może wypełnić szczeliny o szerokości do 2 mm. W razie pojawienia się spękań wtórnych na powierzchni już zabezpieczonej produkt krzemianowy reaguje z wodą i nowe spękania o szerokości do 1 mm zostaną zapełnione. Jest to więc działanie autogeniczne, samonaprawcze. Ochronna warstwa krzemianowa może być zastosowana w wielu różnych konstrukcjach, na przykład do uszczelniania pokryć dachowych, powierzchni parkingów, nawierzchni drogowych, mostów kolejowych, doków i innych budowli narażonych na działanie wody (rysunki 1 i 2).



Rys. 1 Naprawa spękań na stropie

Fig. 1. Sealing of roof cracks

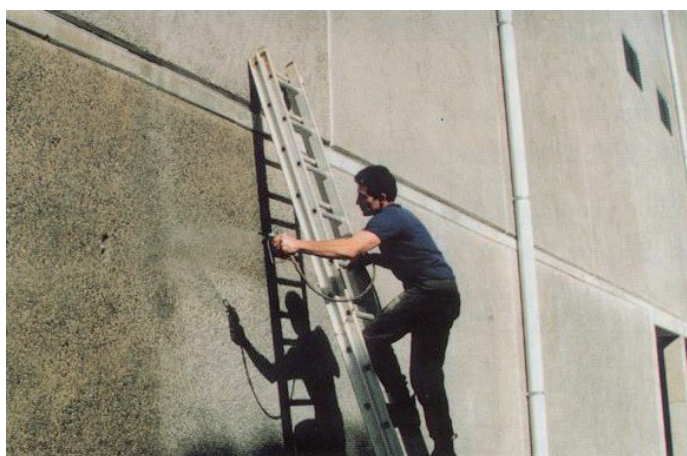
Informacje dotyczące działania i właściwości krzemianowych powłok ochronnych nie pojawiają się, jak dotychczas, zbyt często. W pracy opublikowanej w Australii (1) stwierdzono, że niektóre właściwości tych warstw, takie jak odporność na działanie wody i penetrację chlorków już zostały opisane, ale dokładnych danych nie przedstawiono. Jiříčková i Černý (2) przeprowadzili pomiary podstawowych parametrów opisujących transport wody i pary wodnej w betonie z kruszywem drobnoziarnistym bez powłoki ochronnej, jak również w betonie zaopatrzonym w ochronną warstwę krzemianową i wykazali, że skuteczność działania warstwy może nie być tak oczywista, jak przekonują o tym producenci krzemianowych materiałów na powłoki.

Prezentowana praca stanowi ciąg dalszy pracy poprzedniej (2), poświęconej podstawowym badaniom nad skutecznością ochron-

from the applicator or the coating manufacturer. There is a mix of the legislative requirements, cost, usage, and coating properties which any user is supposed to face. Authorities also influence the selection of coatings through legislation and by such recommended practices as safety, health, environment and technical recommendations.

Silicate protecting layers present a relatively cheap means which can preserve concrete construction during its whole service life. It is based on formation of hydrated calcium silicates in pores and cracks in the depth of up to 20 mm below the surface. Silicate layers can seal cracks of up to 2 mm width. In the case of secondary cracks formation in treated concrete surface the silicate layer can react again with water and reaction products fill in new cracks of up to 1 mm width. This phenomenon is called autogeneous treatment. The protective silicate layer can be applied in many cases, as in sealing of roofs, parking places, surfaces of roads, railway bridges, docks and water proofing constructions, see Figs. 1 and 2.

The exact information about behaviour and properties of silicate protecting layers is very sparse at present. CSIRO (1) stated that some properties such as the resistance against water and chloride penetration into concrete were already described but did not provide any exact information. Jiříčková and Černý (2) measured basic water and water vapour transport parameters of fine-grained concrete with and without silicate protecting layer and realized that the effectiveness of silicate coatings may not be so unambiguous as it is stated sometimes by the producers of silicate protection solutions.



Rys. 2. Naprawa spękań na ścianie betonowej

Fig. 2. Treatment of concrete wall cracks

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ

COMPOSITION OF FINE-GRAINED CONCRETE MIXTURES

Oznaczenie próbki Type of mixture	Ilość w kg/Amount in kg		Współczynnik wodno-cementowy Water/cement ratio
	CEM I 42.5R Hranice	Piasek/Sand 0/4 mm Bratčice	
SI	16.80	66.68	0.62
SII	16.40	65.10	0.50
SIII	16.40	65.10	0.45

nych powłok krzemianowych. W pracy przedstawione są wyniki pomiarów podstawowych parametrów opisujących transport wody i pary wodnej w próbkach betonów z kruszywem drobnoziarnistym, poddawanych obróbce termicznej w celu wygenerowania sieci spękań, zaopatrzonych w ochronne powłoki krzemianowe. Wyniki odnoszono do danych dla próbek kontrolnych bez spękań i bez powłoki ochronnej. Próbki betonów sporządzono przy zmiennych wartościach współczynnika wodno/cementowego.

2. Materiały, przygotowanie próbek

Badaniom poddano próbki betonów z drobnoziarnistym kruszywem, sporządzone przy różnych wartościach współczynnika wodno – cementowego, oznaczone jako SI – SIII. Skład mieszanek betonowych podano w tablicy 1.

Próbki uformowano w postaci standardowych kostek o krawędzi 100 x 100 x 100 mm lub jako beleczki 40 x 40 x 160 mm. Próbki przechowywane były w wodzie przez 28 dni, a następnie przez 7 dni w powietrzu o wilgotności względnej 50%. Kolejnym etapem było przycięcie próbek do rozmiarów wymaganych w dalszych badaniach i wygrzewanie do temperatury 600°C (z szybkością 3°C/min) w celu wytworzenia sieci spękań na powierzchni i w objętości próbek (próbki SITR – SIIITR). Połowa próbek nie została poddana obróbce cieplnej (próbki kontrolne SIR – SIIIR). Następnie na powierzchnię próbek naniesiono krzemianowe powłoki ochronne. Powierzchnie próbek spryskano wodą trzykrotnie w celu utworzenia uwodnionych krzemianów wapnia w warstwie zewnętrznej (rysunek 3).

Skład chemiczny powłoki krzemianowej jest podany w Tablicy 2.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY KRZEMIANOWEJ POWŁOKI OCHRONNEJ

RESULTS OF BASIC CHEMICAL ANALYSIS OF THE SILICATE PROTECTING LAYER

Zawartość % Amount of component in %		Straty prażenia w % dla pozostałości stanowiącej 27.11% suchej masy Annealing loss in % from 27.11% of dry matter		
Na ₂ O	SiO ₂	105-450°C	450-650°C	650-1000°C
5.81	18.32	14.82	0.51	0.13

3. Metody badań

Wszystkie pomiary przeprowadzono w stałych warunkach: w temperaturze 25±2°C przy wilgotności względnej 30±5%. Wyniki odnoszono do masy materiału w stanie suchym.

Podstawowe właściwości betonów określano na podstawie przeprowadzanych w próżni pomiarów nasączenia wodą (3). Próbki były suszone wstępnie w suszarce próżniowej w temperaturze 70°C, w celu usunięcia wody związanej fizycznie. Następnie materiał umieszczano w szczelnym pojemniku, do którego wprowadzano z małą szybkością odpowietrzoną wodę. Po całkowitym

In this paper, the continuation of basic studies of silicate protection effectiveness given in (2) is presented. The basic material parameters and water and water vapour transport properties of several thermally cracked fine-grained concretes with different water/cement ratio provided by silicate protecting layers are analyzed and compared with the properties of the same concretes without protection and without cracks.

2. Materials and samples

Hardened fine-grained concrete mixtures with different water/cement ratio denoted SI – SIII were tested. Table 1 presents the exact composition of the studied mixtures.

The specimens were produced in the form of standard prisms with the size of 100 x 100 x 100 mm or 40 x 40 x 160 mm. Prisms were stored in water during 28-day curing period and then 7 days at 50 % relative humidity. The specimens were then cut to required sizes depending on the method of investigation. One half of the produced specimens was heated up to 600°C (heating rate of 3°C/min) to create cracks not only on the surface but also in bulk of samples. After that silicate protecting layers were applied on the surface of one half of specimens without cracks, denoted as SIR-SIIIR, and one half of heated samples with cracks, denoted as SITR-SIIITR (corresponding to the basic notation). Surface of treated samples was sprayed with water three times to form hydrated calcium silicates in the topmost layer, see Fig. 3.

The result of basic chemical analysis of the applied silicate coating is given in Table 2.



Rys. 3. Krzemianowa powłoka ochronna na powierzchni betonu

Fig. 3. Protecting silicate layer on concrete surface

3. Experimental methods

The measurements of all parameters took place in controlled conditions at 25±2°C and 30±5% relative humidity. Dry material mass was taken as the initial state for all experiments.

The basic properties were determined using the water vacuum saturation measurement (3). The sample was first dried in a vacuum oven at 70°C to remove the physically bound water. Then the material was placed into an airtight container, and deaired water was filled at a low inflow rate. Once the sample was immersed, the water supply was stopped and the specimen was kept under water and evacuated with a vacuum pump until its mass was stable. From the mass of the dry sample m_d , the mass of water-saturated sample m_w , and the mass of the immersed water-saturated sample m_a , the volume V (m³) of the sample was determined from the equation

zanurzeniu próbki dopływ wody zamykano, próbkę przetrzymywano w wodzie, a następnie ewakuowano z niej wodę za pomocą pompy próżniowej. Odpowietrzanie prowadzono do uzyskania stałej masy próbki. Z różnicy masy próbki nasyconej wodą m_w i suchej próbki m_d , na podstawie której obliczano masę wody nasycającej próbkę m_a , dostawano objętość próbki V (m^3) według następującego wzoru:

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w} \quad [1]$$

gdzie ρ_w – gęstość wody ($kg\ m^{-3}$).

Podstawowe właściwości, to znaczy zawartość wilgoci nasycającej próbkę w próżni w_{sat} ($kg\ m^{-3}$), gęstość pozorną ρ_b ($kg\ m^{-3}$), gęstość matrycy ρ_{mat} ($kg\ m^{-3}$), obliczano według następujących wzorów:

$$w_{sat} = \psi_0 \rho_w = \frac{m_w - m_d}{V} \quad [2]$$

$$\rho_b = \frac{m_d}{V} \quad [3]$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V(1 - \psi_0)} \quad [4]$$

gdzie ψ_0 jest porowatością otwartą, definiowaną jako stosunek objętości porów otwartych do całkowitej objętości materiału.

Pomiary wytrzymałości na ściskanie, jak również obliczenia modułu sprężystości przeprowadzono według normy ČSN EN 196-1 (4). Z każdej mieszanki sporządzano po trzy kostki o wymiarach 100 x 100 x 100 mm; badania przeprowadzono przy pomocy prasy DSM 2500 (5).

Transport pary wodnej w materiale porowatym charakteryzowany jest przeważnie poprzez podanie wartości współczynnika dyfuzji (m^2s^{-1}) lub przepuszczalności (s), w zależności od podejścia termodynamicznego jakie zastosuje się przy opisie zjawiska. Jeżeli gradient gęstości cząstkowej pary wodnej ρ_c (masa pary wodnej na jednostkę objętości materiału porowatego) potraktuje się jako siłę napędową stymulującą transport pary wodnej, wielkość strumienia pary wodnej j można będzie wyrazić za pomocą następującego równania:

$$j = -D \text{grad } \rho_c \quad [5]$$

Gradient ciśnienia cząstkowego pary wodnej p_v jako siła napędowa wymuszająca transport pary może być wyrażony wzorem:

$$j = -\delta \text{grad } p_v \quad [6]$$

W warunkach izotermicznych opisy podane w równaniach [5] i [6] są równoważne, a związek pomiędzy współczynnikiem dyfuzji i przepuszczalnością ma postać następującą:

$$D = \delta \frac{RT}{M} \quad [7]$$

gdzie R – uniwersalna stała gazowa ($J\ mol^{-1}K^{-1}$), M – masa molowa pary wodnej ($kg\ mol^{-1}$), T – temperatura bezwzględna (K).

W fizyce budowli stosowany jest również inny parametr, który można wyprowadzić na podstawie współczynnika D i przepuszczal-

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w} \quad [1]$$

where ρ_w is the density of water ($kg\ m^{-3}$).

The basic properties, namely vacuum saturation moisture content w_{sat} ($kg\ m^{-3}$), bulk density ρ_b ($kg\ m^{-3}$), and matrix density ρ_{mat} ($kg\ m^{-3}$), of samples were calculated according to the equations

$$w_{sat} = \psi_0 \rho_w = \frac{m_w - m_d}{V} \quad [2]$$

$$\rho_b = \frac{m_d}{V} \quad [3]$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V(1 - \psi_0)} \quad [4]$$

where ψ_0 is the open porosity (-), which is defined as the ratio of the volume of open pores in material to its total volume.

Investigation of compressive strength and elastic modulus was carried out according to the norm ČSN EN 196-1 (4). Three samples of each concrete mixture with the size of 100 x 100 x 100 mm were tested with DSM 2500 testing device (5).

Water vapour transport in porous materials is mostly described by either the diffusion coefficient D (m^2s^{-1}) or the diffusion permeability δ (s), depending on the generalized thermodynamic forces in the phenomenological definition relations. If the gradient of water vapour partial density ρ_c (the mass of water vapour per unit volume of the porous material) is chosen as the thermodynamic force, the following relation for the flux of water vapour j can be formulated

$$j = -D \text{grad } \rho_c \quad [5]$$

For the gradient of partial pressure of water vapour p_v as the thermodynamic force we have

$$j = -\delta \text{grad } p_v \quad [6]$$

Under isothermal conditions, the definition equations [5] and [6] are equivalent, and the following relation between the diffusion coefficient and the diffusion permeability can be written

$$D = \delta \frac{RT}{M} \quad [7]$$

where R is the universal gas constant ($J\ mol^{-1}K^{-1}$), M the molar mass of water vapour ($kg\ mol^{-1}$), and T the absolute temperature (K).

There is also other coefficient widely employed in building physics, that can be derived from the two basic coefficients D and δ , namely the water vapour diffusion resistance factor defined as

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [8]$$

where D_a is the diffusion coefficient of water vapour in air (m^2s^{-1}).

In measuring the diffusion of water vapour in coating-substrate systems, as a matter of fact, not exactly the diffusion coefficient is determined but only its effective value for a two-layer system.

ności δ ; jest to współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej definiowany w sposób następujący:

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [8]$$

gdzie D_a – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu (m^2s^{-1}).

W badaniach dyfuzji pary wodnej poprzez warstwę podłoża z powłoką ochronną wyznaczana jest wartość efektywna współczynnika dyfuzji dla układu złożonego, dwuwarstwowego, a nie współczynnik dyfuzji poprzez warstwę.

Efektywny współczynnik dyfuzji pary wodnej D dla układu złożonego z podłoża betonowego z warstwą ochronną (6) może być wyznaczony jedną z powszechnie stosowanych metod. W prezentowanej pracy pomiary parametrów opisujących transport pary wodnej przeprowadzono zgodnie z czeską normą ČSN 72 7031 (7). Cylindryczne próbki o średnicy 95 mm i wysokości 20 mm wycięto z kostek normowych o wymiarach 100 x 100 x 100 mm i pokryto żywicą epoksydową tak, aby dyfuzja pary wodnej przebiegała tylko w jednym kierunku. Badania prowadzono w warunkach izotermicznych. Pomiar dyfuzji polegał na określeniu przepływu pary wodnej przez próbkę w jednym kierunku; mierzono też ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu poniżej i powyżej próbki. Próbki zamknięto szczelnie w pojemnikach zawierających wyprażony CaCl_2 (wilgotność względna - 5%), a następnie przenoszono do komory klimatycznej, w której były przechowywane w kontrolowanej atmosferze, w temperaturze $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, przy 35% wilgotności względnej. Ciężar pojemników z próbkami kontrolowano do osiągnięcia stałych wartości, które wykorzystano następnie w obliczeniach parametrów związanych z transportem pary wodnej.

Współczynnik dyfuzji pary wodnej został obliczony na podstawie danych pomiarowych w sposób następujący:

$$D = \frac{\Delta m \cdot d \cdot R \cdot T}{S \cdot \tau \cdot M \cdot \Delta p_p} \quad [9]$$

gdzie Δm – masa pary wodnej, która przedyfundowała przez próbkę (kg), d – grubość próbki (m), S – powierzchnia próbki (m^2), τ – czas odpowiadający dyfuzji masy Δm pary wodnej przez próbkę (s), Δp_p – różnica prężności cząstkowych pary wodnej w powietrzu poniżej i powyżej powierzchni próbki (Pa), R – uniwersalna stała gazowa ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), M – masa molowa pary wodnej (kg mol^{-1}), T – temperatura bezwzględna (K).

Najprostszym sposobem na opisanie transportu wody w betonie jest posłużenie się pojęciem sorpcyjności S ($\text{m s}^{-1/2}$), która definiowana jest w następujący sposób (8):

$$I = S \cdot t^{1/2} \quad [10]$$

gdzie I – masa wody zaabsorbowanej przez próbkę (m), t – czas (s).

Równanie [10] jest uproszczoną postacią ogólnego wzoru opisującego skumulowaną masę wody, w którym występuje też pierwiastek kwadratowy z czasu; tak więc równanie to nawiązuje do postaci, jaka stosowana jest powszechnie w teorii procesów

The effective diffusion coefficient of water vapour D for the coating-substrate system (6) can be determined by common methods such as the cup method. In this work, the measurement of water vapour transport parameters was based on the standard ČSN 72 7031 (7). Firstly, cylindrical samples with the size of 95 mm in diameter and 20 mm in height were cut from the standard prism 100 x 100 x 100 mm and water-vapour-proof insulated with epoxy resin to ensure one dimensional water vapour transport. The measurement was carried out in steady state under isothermal conditions. It was based on one-dimensional water vapour diffusion, measuring the water vapour diffusion flux through the specimen and partial water vapour pressure in the air under and above specific specimen surface. The measured samples were sealed into the cups containing burnt CaCl_2 (5% relative humidity), then they were placed in a controlled climatic chamber at $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ and 35% relative humidity. The sealed cups with samples were weighed periodically. The steady state values of mass gain were utilized for the determination of water vapour transport properties.

The water vapour diffusion coefficient was calculated from the measured data according to the equation

$$D = \frac{\Delta m \cdot d \cdot R \cdot T}{S \cdot \tau \cdot M \cdot \Delta p_p} \quad [9]$$

where Δm is the amount of water vapour diffused through the sample (kg), d the sample thickness (m), S the specimen surface (m^2), τ the period of time corresponding to the transport of mass of water vapour Δm (s), Δp_p the difference between partial water vapour pressure in the air under and above specific specimen surface (Pa), R the universal gas constant ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), M the molar mass of water (kg mol^{-1}), T the absolute temperature (K).

The simplest way to describe liquid water transport is using the sorptivity concept. The sorptivity S ($\text{m s}^{-1/2}$) is defined (8) as

$$I = S \cdot t^{1/2} \quad [10]$$

where I is the cumulative mass of water imbibed (m), t the time (s).

Equation [10] is a simplification of the general expression for the cumulative mass of water in terms of the square-root-of-time rule commonly employed in the theory of transport processes in porous media (9), which is obtained by dividing the original equation

$$i = A \cdot t^{1/2} \quad [11]$$

by the density of water, ρ_w . In equation [11], i is the real cumulative mass of water (kg m^{-2}), and A the water absorption coefficient ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$)

$$A = S \cdot \rho_w \quad [12]$$

In this paper, liquid water transport in the sorptivity concept was analyzed using one-dimensional free imbibition experiment. Specimens with the size of 40 x 40 x 20 mm were cut from standard prisms and then water and vapour-proof insulated with epoxy resin on four lateral sides, and after that dried in an oven. The face side of each sample was immersed 1-2 mm into water on top of a satu-

transportu masy w ośrodkach porowatych (9). Równanie to można otrzymać dzieląc stronami równanie o postaci:

$$i = A \cdot t^{1/2} \quad [11]$$

przez gęstość wody ρ_w . W równaniu [11] i jest masą wody skumulowanej w próbce (kg m^{-2}), a A – współczynnikiem absorpcji ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$)

$$A = S \cdot \rho_w \quad [12]$$

W prezentowanej pracy, w celu dokonania opisu transportu wody z zastosowaniem pojęcia sorpcyjności, przeprowadzono eksperymenty, w których swobodne podciąganie wody przez próbkę betonu zachodziło jednowymiarowo, wzdłuż jednej osi. Próbki o wymiarach 40 x 40 x 20 mm wycinano z kostek normowych, zabezpieczano przed dostępem wilgoci za pomocą żywicy epoksydowej, którą nakładano na boczne cztery ściany próbek, a następnie suszono. Ścianę czołową każdej próbki umieszczano na głębokości 1-2 mm w wodzie na powierzchni nasyconej wodą gąbki. Masa próbki była systematycznie kontrolowana. Współczynnik absorpcji A obliczano na podstawie liniowej części wykresu $i = i(t^{1/2})$. Następnie obliczano pozorną dyfuzyjność wilgoci w oparciu o próżniowe pomiary ilości wody, jak również współczynnik absorpcji dla wody według równania:

$$K_{app} \approx \left(\frac{A}{W_{sat} - W_0} \right)^2 \quad [13]$$

gdzie w_{sat} i w_0 – zawartość wody w stanie nasycenia i zawartość wody w próbce przed pomiarem (kg m^{-3}) (10).

4. Wyniki badań i dyskusja

W Tablicy 3 przedstawiono podstawowe właściwości badanych materiałów.

Badano następujące parametry materiałów: ciężar objętościowy, gęstość i porowatość całkowitą. Próbki kontrolne bez spękań wykazywały większe wartości badanych parametrów. Porowatość całkowita wzrastała z w/c.

W Tablicy 4 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości.

Z przedstawionych danych wynika, że, jak można było oczekiwać, betony drobnokruszywowe serii SIII o najniższym w/c charakteryzują się najwyższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości.

Obliczone średnie wartości współczynnika dyfuzji pary wodnej, jak również współczynniki określające odporność na dyfuzję pary wodnej w przypadku próbek poddanych obróbce termicznej i powierzchniowej są przedstawione w Tablicy 5.

Dla próbek betonów drobnokruszowych różniących się współczynnikiem wodno – cementowym uzyskano bardzo podobne wyniki; różnice mieściły się w granicach błędów pomiarów szacowanych na 10% i wynikały głównie z wahań temperatury.

rated sponge. The sample mass was measured continuously. The water absorption coefficient A was then calculated from the linear part of the $i = i(t^{1/2})$ function. Then, apparent moisture diffusivity was calculated from the vacuum saturation moisture content and water absorption coefficient according the equation

$$K_{app} \approx \left(\frac{A}{W_{sat} - W_0} \right)^2 \quad [13]$$

where w_{sat} and w_0 are the saturated and initial moisture content (kg m^{-3}), respectively (10).

4. Experimental results and discussion

Table 3 presents basic material properties.

Bulk density, matrix density and total open porosity, were the studied parameters. The basic fine-grained concrete mixtures without cracks had higher bulk density and lower open porosity than the same fine-grained concrete mixtures with cracks as expected. The total open porosity decreased with decreasing water/cement ratio.

The average values of measured compressive strength and elastic modulus are presented in Table 4.

The measured results show that the highest compressive strength and highest elastic modulus had the fine-grained concrete SIII, which had the lowest water/cement ratio. As with the basic properties, this was again an expected behaviour.

The calculated average values of water vapour diffusion coefficient and water vapour diffusion resistance factor for basic, heated and surface treatment provided samples of fine-grained concretes are presented in Table 5.

The water/cement ratio of basic fine-grained concrete mixtures exhibited no influence on water vapour transport, the measured values of water vapour diffusion resistance factor were similar, differences were within the error range of the measuring method which can be estimated as 10% and is mainly due to temperature fluctuations during measurement. Crack formation due to heating (samples denoted as SIT-SIIIT) caused an about 50% decrease

Tablica 3 / Table 3

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU
BASIC MATERIAL PROPERTIES

Oznaczenie próbki Type of mixture	ρ_b	ρ_{mat}	ψ
	kg m ⁻³		%
SI	2 122	2 611	18.7
SIT	1 988	2 582	22.5
SII	2 100	2 488	15.6
SIIT	2 005	2 615	23.3
SIII	2 144	2 524	15.1
SIIIT	2 108	2 628	19.8

Spękania wskutek obróbki termicznej (próbki oznaczone jako SIT – SIIIT) spowodowały spadek odporności na dyfuzję pary wodnej o około 50% w porównaniu z próbkami kontrolnymi bez spękań. Również wpływ w/c nie wydawał się zbyt znaczący. Zastosowanie krzemianowych powłok ochronnych przyniosło w efekcie wzrost współczynników odporności na dyfuzję pary wodnej. W przypadku próbek bez spękań wartości μ były do trzech razy wyższe, zaś w przypadku próbek z wprowadzonymi poprzez obróbkę termiczną spękaniami – do dwóch razy. Oznacza to, że zastosowanie krzemianowej powłoki ochronnej znacznie ogranicza transport pary wodnej do wnętrza badanych betonów.

Tablica 6 pokazuje wyniki pomiarów parametrów związanych z transportem wody w betonie.

Wartości współczynników absorpcji wody dla próbek kontrolnych zmniejszały się z malejącym współczynnikiem wodno – cementowym; zaobserwowano również zmniejszenie ilości wody nasycającej próbkę. Wytworzenie sieci spękań spowodowało nawet dziesięciokrotny wzrost współczynnika absorpcji wody – zmiana parametrów opisujących transport wody „ciekłej” okazała się więc bardziej znacząca niż w przypadku transportu pary wodnej. Zjawisko to zauważono wcześniej i jest ono najprawdopodobniej związane z pojawieniem się w betonie wraz ze spękaniami „ścieżek dostępu” umożliwiających uprzywilejowany transport wody.

Znaczący wpływ krzemianowej powłoki ochronnej w kierunku ograniczenia transportu wody zaobserwowano jedynie w przypadku próbek wstępnie spękanych. Współczynnik absorpcji wody zmniejszał się prawie czterokrotnie i był bardziej znaczący w przypadku betonów sporządzonych przy wysokim w/c. Natomiast właściwości transportowe betonu nie poddawanego obróbce cieplnej w celu wytworzenia spękań w zasadzie nie uległy zmianie po naniesieniu powłoki.

Wartości współczynników absorpcji wody dla próbek betonu poddawanego obróbce cieplnej w celu wytworzenia spękań po-
Tablica 5 / Table 5

PARAMETRY OPISUJĄCE TRANSPORT PARY WODNEJ W BETONIE
WATER VAPOUR TRANSPORT PARAMETERS

Oznaczenie próbki Type of mixture	D, m ² s ⁻¹	μ , -
	5-35% RH	5-35% RH
SI	4.2E-07	55
SIT	1.1E-06	21
SIR	4.8E-07	147
SITR	6.2E-07	37
SII	4.1E-07	58
SIIT	1.4E-06	16
SIIR	1.5E-07	160
SIITR	7.8E-07	29
SIII	4.5E-07	52
SIIT	1.0E-06	23
SIIR	1.7E-07	139
SIITR	5.5E-07	43

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

MECHANICAL PARAMETERS

Oznaczenie próbki Type of mixture	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	Moduł sprężystości Elastic modulus, GPa
SI	50.5±3.0	28.2±1.0
SII	70.0±1.0	33.3±3.5
SIII	75.0±2.0	35.7±3.5

of water vapour diffusion resistance factor as compared with basic fine-grained concrete mixtures. The effect of water/cement ratio was not very significant for this type of samples as well. The application of silicate protecting layer always led to increase of water vapour diffusion resistance factor. In the case of samples without cracks μ values were up to three times higher due to silicate protection, in the case of samples with cracks up to two times. It means that silicate protecting layer application considerably reduced water vapour transport through the studied concretes.

Table 6 shows results of liquid water transport parameters measurement.

The values of water absorption coefficient of basic concrete mixtures decreased with decreasing water/ cement ratio which corresponded with the decreasing saturated moisture content. Crack formation induced up to ten times increase of water absorption coefficient, thus it was more remarkable for liquid water transport than for water vapour transport. This feature was observed before for other cracked concretes and is most probably related to the appearance of preferential paths for water transport.

Significant effect of silicate protection on liquid water transport was observed for cracked concrete substrates only; the water absorp-

Tablica 6 / Table 6

PARAMETRY OPISUJĄCE TRANSPORT WODY W BETONIE
LIQUID WATER TRANSPORT PARAMETERS

Oznaczenie próbki Type of mixture	A kg m ⁻² s ^{-1/2}	w_{sat} kgm ⁻³	κ m ² s ⁻¹
SI	1.10 E-2	186.60	3.50E-9
SIT	19.10 E-2	223.90	7.30E-7
SIR	1.70 E-2	-	-
SITR	5.00 E-2	-	-
SII	0.90 E-2	155.50	3.35E-9
SIIT	7.80 E-2	232.70	1.10E-7
SIIR	2.10 E-2	-	-
SIITR	2.70 E-2	-	-
SIII	0.70 E-2	150.30	2.20E-9
SIIT	5.10 E-2	197.10	6.70E-8
SIIR	1.60 E-2	-	-
SIITR	2.70 E-2	-	-

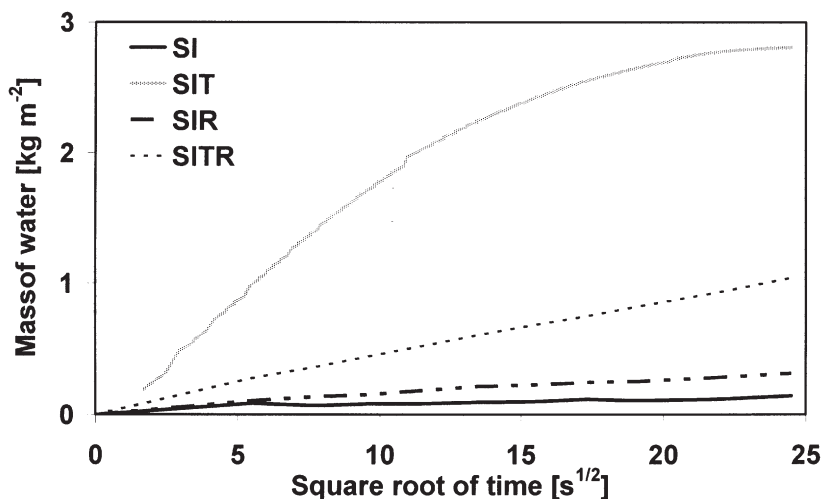
krytych warstwą krzemianową były nawet wyższe niż dla spękanych próbek „podkładek”, co wiąże się ze sposobem przygotowywania ich powierzchni pod nałożenie powłoki ochronnej – oczyszczaniem strumieniem śrutu w celu otworzenia porów powierzchniowych. Na rys. 4 – 6 zobrazowano przebieg absorpcji wody w poszczególnych typach próbek. W przypadku próbek betonowych bez wytworzonych wstępnie spękań krzemianowa powłoka ochronna mogła zapobiec podciąganiu wody w ciągu krótkiego czasu – zazwyczaj około 30s. Bardzo prawdopodobną przyczyną takiego zachowania jest niedostateczna grubość powłoki ochronnej.

6. Wnioski

Wyniki badań przeprowadzonych w prezentowanej pracy wykazują, że krzemianowa powłoka ochronna może stanowić dobre zabezpieczenie uszkodzonego betonu przed penetracją wody. Rozwiązania takie nie jest jednakże uniwersalne. Właściwości ochronne powłoki, jak wykazano w pracy, mogą okazać się mało skuteczne w przypadku poważnych uszkodzeń powierzchni betonu. W betonach zwykłych, nawet tych wytworzonych przy wysokim współczynniku w/c, penetracja wody ma miejsce niezależnie od obecności powłoki ochronnej.

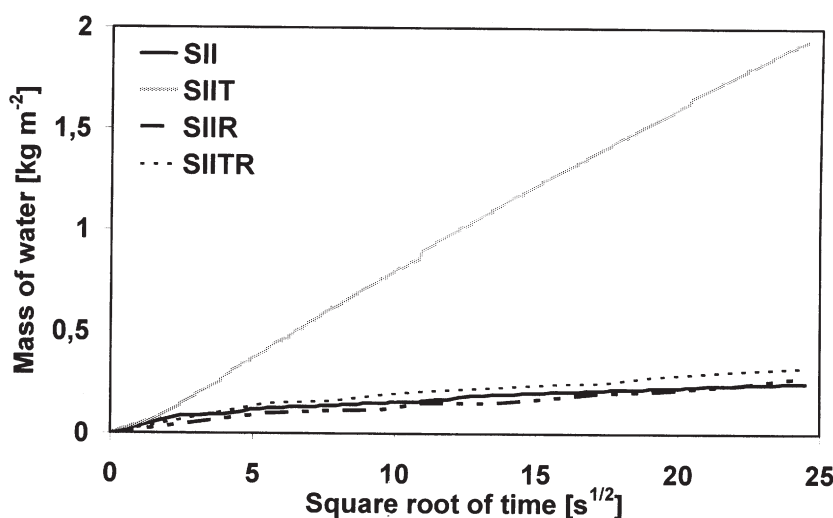
Podziękowanie

Praca sfinansowana została przez Czeską Fundację Nauki, w ramach grantu No 103/05/2376.



Rys. 4. Krzywe absorpcji wody; beton drobnokruszowy SI

Fig. 4. Suction curves of fine-grained concrete SI

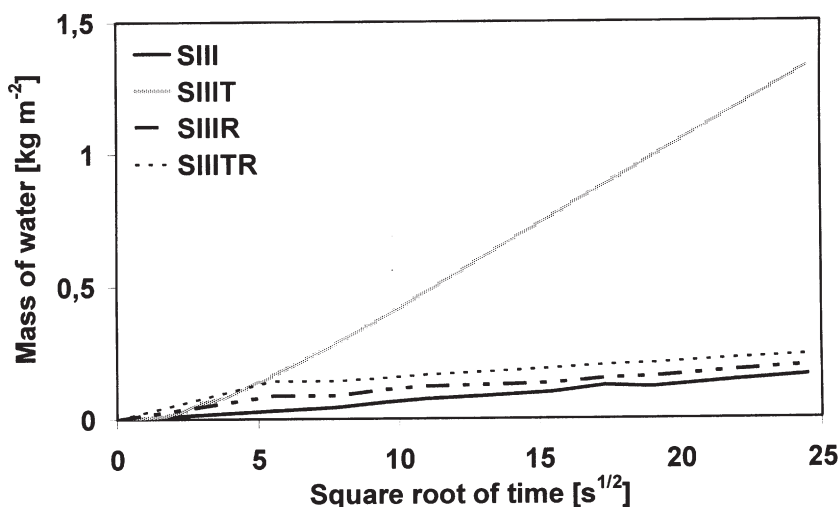


Rys. 5. Krzywe absorpcji wody; beton drobnokruszowy SII

Fig. 5. Suction curves of fine-grained concrete SII

tion coefficient decreased down to almost four times and was more remarkable for concretes with higher water/cement ratio. However, the liquid water transport properties of concrete substrates without cracks remained basically unaffected by the presence of the studied silicate protection layers.

The water absorption coefficients of treated samples were even higher than those of concrete substrates but it was probably caused by the way of preparation of concrete surfaces for silicate layer deposition (shot blasting using small steel balls to open surface pores). Figs. 4-6 show details of the course of the water absorption process for typical specimens of each type. Clearly, for concrete specimens without cracks the silicate protecting layer could prevent water suction for only short time, typically about 30 s. The most probable reason for this finding could be the insufficient thickness of the protecting layer.



Rys.6. Krzywe absorpcji wody; beton drobnokruszowy SIII

Fig. 6. Suction curves of fine-grained concrete SIII

Literatura / References

1. CSIRO, Building, Construction and Engineering. NSW, Australia, 1999.
2. M. Jiříčková, R. Černý, Basic Water and Water Vapour Transport Parameters of Fine Grained Concrete with Silicate Protecting Layer. Cement Wapno Beton, Vol. 11/73, 2006, 86-92.
3. S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Černý, Z. Pavlík, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge, Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 27, 2004, 307-325.
4. ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu. Stanovení pevnosti.
5. J. Němeček, P. Padevět, B. Patzák, Z. Bittnar, Effect of Transversal Reinforcement in Normal and High Strength Concrete Columns. Materials and Structures, Vol. 38, 2005, 665-671.
6. R. Černý, J. Poděbradská, J. Drchalová, Water and Water Vapor Penetration through Coatings, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 26, 2002, 165-177.
7. ČSN 72 7031. Měření součinitele difúze vodní páry stavebních materiálů metodou bez teplotního spádu.
8. C. Hall, Water sorptivity of mortars and concretes: a review, Magazine of Concrete Research, Vol. 41, 1989, 51-61.
9. O. Krischer, Die wissenschaftliche Grundlagen der rocknungstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1963.
10. M. K. Kumaran, Report on Measurements to Determine Moisture Diffusivity of Eastern White Pine, IEA Annex XXIV Report T3-CA-92/04, 1994.

6. Conclusions

The experimental results presented in this paper showed that silicate protecting layers may become a good solution to prevent damaged concrete from water penetration. However, their applicability could not be considered as unambiguous and universal. The protection capability of this type of layers was shown to be limited just for heavily damaged concrete surfaces. Water penetration into common concretes, even those with higher water/cement ratio was found to be basically unaffected by the presence of the studied silicate protection.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under grant No 103/05/2376.

Warunki prenumeraty na 2008 r.

Wpłat na prenumeratę można dokonywać na ogólnie dostępnych blankietach w Urzędach Pocztowych (przekazy pieniężne) lub Bankach (polecenie przelewu), przekazując środki na adres: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 30-003 Kraków, ul. Lubelska 29, kol. 4/5.

Konto: PKO BP S.A. I O/Kraków nr 45 1020 2892 0000 5102 0226 6583

Na blankiecie wpłat należy czytelnie podać nazwę zamawianego czasopisma, liczbę zamawianych egzemplarzy, okres prenumeraty oraz własny adres.

„Cement-Wapno-Beton” – dwumiesięcznik
Cena 1 egz. – 40 zł,

Prenumerata roczna – 240 zł
Prenumerata roczna – 80 € lub 100\$

Zamówienia na prenumeratę można przysyłać bezpośrednio na e-mail lub faxem do redakcji podając numer NIP-u.

Ogłoszenia przyjmuje: Redakcja „Cement-Wapno-Beton” Sp. z o.o., ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków, tel./fax: +48 12 632 29 95.

Adres do korespondencji: ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków

e-mail: cwb@polskicement.com.pl

Redakcja nie bierze odpowiedzialności za treść publikowanych ogłoszeń