

Odnawianie tynków: trwałość oraz właściwości mechaniczne, wilgotnościowe, ciepłne

Commercial renovation renders: mechanical, hygric, thermal and durability properties

1. Wstęp

Skład i metody odnawiania tynków, które są stosowane w praktyce renowacyjnej zabytkowych budowli wywodzą się z klasycznych technologii, jednak różnią się pod pewnymi względami. Zaprawa stosowana do odnawiania, którą nakłada się na zabytkową budowlę jest wieloskładnikowa. Proces zmian materiałów zachodzi przez cały czas w trakcie ich okresu eksploatacyjnego; zakłada się, że do naprawy stosuje się taki sam lub podobny materiał. Dokładnych właściwości tego rodzaju tynków nie można jednak znaleźć w normach czeskich lub w normach innych państw Unii Europejskiej. Z tego względu technolodzy często korzystają z zaleceń WTA 2-9-04 ID (1), które zostały opracowane przez zespół powiązany z niemieckim oddziałem stowarzyszenia WTA (Międzynarodowe Stowarzyszenie Naukowo-Technologiczne do Konserwacji Budynków oraz Pomników). W tych zaleceniach są podane właściwości świeżych i stwardniałych tynków do odnawiania i zasady ich sporządzania.

WTA 2-9-04 ID definiuje tynk do renowacji, jako suchą mieszaninę o dużej porowatości, wykazującą dużą szybkość transportu pary i zmniejszoną szybkość transportu wilgoci w kapilarach. Do innych rodzajów tynków opisanych w WTA należą brązowe tynki pokrywające, do wyrównywania murów i ścian, które nie muszą spełniać wszystkich wymagań tynków do renowacji. Innym rodzajem tynków stosowanych do renowacji są „tynki zabezpieczające”, które wyróżniają się dużą porowatością i bardzo dużą chłonnością (sorpcją), do krótkotrwałego stosowania (kilka miesięcy do dwóch lat). Usuwają one dużą ilość soli ze ścian w tym okresie, a następnie są usuwane i zastępowane zwykłymi lub renowacyjnymi tynkami.

Zwykle zaprawy renowacyjne do tynkowania opierają się na spoiwie stanowiącym mieszaninę wapna i cementu portlandzkiego, hydrofobizowanym oraz zawierającym domieszki powodujące powstawanie porów w trakcie wiązania tynku. Często stosowanym

1. Introduction

The composition and processing of renovation renders and systems, which are applied in the current practice of reconstruction of historical buildings, come from classical technologies, but they are different in some respect. Renovation plasters represent a heterogeneous element which is put into historical building. The diversification process takes place all the time because materials come through a service life; as a repair material the same or similar one is supposed to be used. The exact properties of this type of renders are, however, not prescribed in any standard in Czech Republic or in other EU countries. Therefore, the technologists often use WTA 2-9-04/D (1) recommendation which was elaborated by the group of persons who are associated with the corporation WTA Germany (International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monuments Preservation). In this recommendation the properties of fresh and hardened renovation plaster and rules for their preparation are described.

WTA 2-9-04/D defines renovation plaster as a dry mix with high porosity, high rate of water vapor transport and reduced capillary moisture transport. Other kind of plaster according to WTA is brown coat plaster for leveling of the masonry, which does not have to fulfill all requirements on renovation plaster. Yet another type of plasters used in renovation is “sacrificed plasters” which are porous plasters with very high sorptivity which are used just for a short time application (several months to two years). They remove high amount of salts from the masonry during this period and then they are removed and replaced by common plaster or renovation plaster.

The common renovation mortars for rendering are based on the lime-Portland cement binder mix, hydrophobized, and include admixture which generates pores during setting and hardening of plaster. The often used criterion for their hygric properties is the capillarity $W_{24} > 0.3 \text{ kg/m}^2$ and the depth of water permeation

wskaźnikiem określającym ich właściwości wilgotnościowe jest kapilarność $W_{24} > 0,3 \text{ kg/m}^2$ i głębokość wnikania wody $h < 5 \text{ mm}$. Kruszywo jest w większości przypadków drobne w zakresie 1–2 mm.

Co do hydrofobowych właściwości tynków zgłaszają jednak zastrzeżenia specjaliści z ochrony zabytków, które obejmują także małe wymiary ziarn kruszywa. W pierwszym przypadku główną przyczyną jest możliwość uszkodzeń zabytkowych ścian, związana z gromadzeniem się wilgoci w obszarach bliskich powierzchni pomiędzy tynkiem i ścianą i jej zamarzaniem w okresie zimowym. W drugim małe wymiary kruszywa mogą szkodzić wyglądowi zewnętrznemu fasady. Ponadto w większości przypadków do odnowy fasad zabytkowych budowli specjaliści od ochrony zabytków zalecają stosowanie zapraw opartych na wapnie lub wapnie hydraulicznym, nie zawierających domieszek zwiększających objętość porów.

Zakłada się, że pory powstaną w sposób naturalny w trakcie wiązania i twardnienia zaprawy. Objętość porów powinna więc być tylko zależna od rodzaju spoiwa i stosunku woda/składniki stałe. Z tego względu poszukiwanie rozwiązań mających na celu te specjalne wymagania w odniesieniu do zapraw stosowanych do renowacji są przedmiotem prac badawczych.

Binda i in. (2) omówili wybór zapraw do rekonstrukcji Katedry w Noto. Zalecili oni stosowanie zaprawy z wapna hydraulicznego; w przypadku braku tego wapna użycie wapna hydratyzowanego i pucolany okazało się korzystne. Arioglu i Acun (3) przedstawili analizę modernizacji za pomocą tradycyjnych zapraw i tynków wapiennych. Ich diagram pokazał zalecaną metodę doświadczalną: metodę doboru zapraw i tynków do napraw. Polecają oni stosowanie gotowych do użycia zapraw do napraw przeciwieście do wymagań i wniosków podanych przez Michoinová (4). Według niej zaprawa powinna być przygotowana z ciasta wapiennego i piasku, na miejscu budowy. Ashurst i Ashurst (5) zalecają zaprawę opartą na mieszaninie wapna i cementu portlandzkiego o stosunku 1:1 lub 2:1 jako przydatną do konserwacji budynków. Wiele prac dotyczyło badań zapraw i tynków opartych na wapnie hydratyzowanym i pucolanie, szczególnie na metakaolinie (6-14).

Pomimo częstego stosowania do rekonstrukcji zabytkowych budynków w całej Europie handlowe tynki do renowacji nie są w większości przypadków dobrze scharakteryzowane w oparciu o analizy obejmujące ich właściwości fizyczne i okres trwałości. Lista różnych producentów zawiera tylko informacje, że ich produkty spełniają zalecenia WTA 2-9-04/D, czasami podane są także wartości graniczne współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej, przewodność cieplna i ilość cykli zamrażania i rozmrażania. Choć ten rodzaj informacji jest korzystny dla użytkowników, nie pozwalają one jednak na przeprowadzenie obliczeniowej analizy zachowania cieplno-wilgotnościowego oraz okresu trwałości tynku (15). Innymi słowy nie można sprawdzić podstawowych funkcji tego tynku w przypadku jego zastosowania w różnych konstrukcjach i różnych warunkach klimatycznych.

W tym artykule podano wyniki badań zbioru właściwości obejmujących mechaniczne, cieplne właściwości i trwałość czterech handlo-

$h < 5 \text{ mm}$. The aggregates are in most cases relatively fine, up to 1-2 mm.

The hydrophobicity of renders is, however, objected to reservation by the supervisory authorities of architectural heritage, as well as the small dimensions of aggregate grains. In the first case the main reason is the possible damage of historical masonry due to the accumulation of water in the area close to the render/masonry interface and its freezing in winter period. In the second the small size of aggregates can affect the optical properties of a façade. In addition, for the major part of renewal of historical building façades mortars based on lime or hydraulic lime without artificially increased volume of pores are preferred by the authorities responsible for the care of historical monuments. Pores are supposed to be formed in natural way during setting and hardening of mortar. Pore volume thus should be dependent on the kind of binder and on the water/solid ratio only. Therefore, solutions to meet the specific requirements for renovation mortars were sought by various investigators.

Binda et al (2) discussed the choice of mortar for the reconstruction of the Cathedral of Noto. They recommended a hydraulic lime for mortar; if a good hydraulic lime was not available the use of hydrated lime and pozzolana was found acceptable. Arioglu and Acun (3) presented an analysis of the restoration of traditional lime mortars and plasters. Their flow diagram showed a recommended experimental method for the process of design of repair mortars and plasters. They recommended application of ready-to-use repair mortars – quite contrary to the requirements and conclusions of the essay of Michoinová (4). According to her, the mortar has to be prepared from lime putty and sand on building site. Ashurst and Ashurst (5) rated a mortar based on the mix of lime and Portland cement in a ratio of 1:1 or 2:1 as acceptable for building conservation. Many investigators were active in investigations of mortars and plasters based on hydrated lime and pozzolana, particularly metakaolin (6-14).

Despite their frequent applications at reconstruction of historical buildings all over Europe, commercial renovation renders are mostly not well characterized from the point of view of building-physics- and service-life related analyses. The technical lists of the particular producers often include only information that their products comply with WTA 2-9-04/D recommendation, sometimes limiting values of water vapor diffusion resistance factor, thermal conductivity, and number of freeze/thaw cycles are given. Although this kind of information is certainly useful for the customers, it does not make possible any serious computational analysis of hygro-thermal performance and service life of the render (15). In other words, the proper function of such a render cannot be verified for different constructions and different climates.

In this paper, a complex set of mechanical, hygric, thermal and durability properties of four commercially produced plasters forming two brown coat-renovation plaster systems are studied. The same measurements are performed for the common lime plaster as well, for the sake of comparison.

wych tynków obejmujących dwa układy brązowych pokrywająco-renowacyjnych tynków. Tymi samymi pomiarami objęto zwykłe tynki w celach porównawczych.

2. Szczegóły doświadczeń

2.1. Materiały

Badano tynki renowacyjne produkcji Profi am Bau CM (oznaczone jako CP1) i LB Cemix (CP2). „Profi Sanierausgleichsputz WTA” (CP1-1) i „Cemix sanační podkladní omítka WTA” (CP2-1) były brązowymi pokrywająco-poziomującymi tynkami, „Profi Sanier-plus WTA” (CP1-2) i „Cemix sanační omítka WTA” (CP2-2) były renowacyjnymi tynkami zgodnymi z wymaganiami WTA. Wapienny tynk odniesienia (RLP) został sporządzony z wapna hydratyzowanego CL 90 (Carmeuse, Fabryka Mokrą, Czechy). Jako kruszywo stosowano odsiewany piasek kwarcowy i piasek bazaltowy (Provodín, Libochovany, Czechy), o uziarnieniu 0-4 mm, a stosunek piasek/wapno wynosił 9:1. Skład badanych materiałów podano w tabeli 1. Symbol w/ds oznacza stosunek masowy wody do masy suchych substancji stałych. Składniki mieszano w normowym mieszalniku przez 3 do 4 minut. Świeżą mieszankę umieszczano w formach w celu otrzymania próbek do badań. Próbki przechowywano w laboratorium w powietrzu o stosunkowo dużej wilgotności względnej przez 28 dni; periodycznie przeprowadzano zraszanie wodą próbek w celu zapewnienia poprawnego dojrzewania tynków.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BADANYCH TYNKÓW

COMPOSITION OF THE STUDIED PLASTERS.

Designation	Components	w/ds
RLP	Lime hydrate, quartz sand and basalt sand 0/4 mm	0.266
CP1-1	Lime hydrate, Portland cement, ground limestone, admixtures	0.175
CP1-2	White cement, ground limestone, perlite, admixtures	0.175
CP2-1	Lime hydrate, cement, mineral filler, admixtures	0.22
CP2-2	Lime hydrate, cement, mineral filler, admixtures	0.23

2.2. Metody badań

Gęstość nasypową ρ_b , porowatość otwartą i gęstość mieszanki ρ_{mat} oznaczano stosując metodę nasycania w próżni (16, 17). Doświadczenia obejmowały sześć próbek 50 x 50 x 25 mm. Strukturę porów oznaczono za pomocą metody rtęciowej. Stosowano w tym celu aparaty PASCAL 140 i 440 (Thermo Scientific).

Pomiary wytrzymałości na zginanie prowadzono na sześciu beleczkach 40 x 40 x 160 mm. Każdą próbkę ustawiano w taki sposób, że boki były poziome w trakcie jej przygotowywania i przyjmowały położenie pionowe w trakcie pomiaru. Pomiar wykonywano jako znane zginanie trzy-punktowe, stosując aparat WPM 50 kN. Odległość podpór wynosiła 100 mm. Wytrzymałość na zginanie obliczano zgodnie z wytycznymi podanymi w normie. Do oznaczania wytrzymałości na ściskanie wykorzystywano połówki pró-

2. Experimental details

2.1. Materials

Renovation plasters produced by Profi am Bau CM (denoted as CP1) and LB Cemix (CP2), were tested. „Profi Sanierausgleichsputz WTA” (CP1-1) and „Cemix sanační podkladní omítka WTA” (CP2-1) were brown coat/leveling plasters, „Profi Sanier-plus WTA” (CP1-2) and „Cemix sanační omítka WTA” (CP2-2) renovation plasters conforming to the WTA requirements. The reference lime plaster (RLP) was prepared using the lime hydrate CL 90 (Carmeuse, plant Mokrą, CZ). Sorted quartz sand and basalt sand (Provodín, Libochovany, CZ) of granulometry 0 – 4 mm was used as aggregates, in the sand/lime ratio of 9:1. The composition of studied materials is given in Table 1. The symbol w/ds means the ratio of the mass of water and the mass of dry substances. The components were mixed in standard mixer for 3 to 4 minutes. The fresh mixture was cast to specific moulds in order to prepare specimens for the tests. The specimens were cured on the air, in a laboratory with high relative humidity for 28 days; fine water spraying of samples was carried out periodically in order to ensure proper curing of plasters.

2.2. Experimental methods

The bulk density ρ_b , open porosity and matrix density ρ_{mat} were determined using the water vacuum saturation method (16, 17). In the experiment six samples of 50 x 50 x 25 mm were used. The pore structure was measured by mercury intrusion porosimetry. The experiments were carried out using the instruments PASCAL 140 and 440 (Thermo Scientific).

For the bending strength measurements six bars 40 x 40 x 160 mm were used. Every bar was positioned in such a way that the sides that were horizontal during the preparation were in the vertical position during the test. The experiment was performed as a common three-point bending test using the WPM 50 kN device. The distance of the supporting cylinders was 100 mm. The bending strength was calculated according to the standard evaluation procedure. Compressive strength was determined on the halves of the specimens left over after the bending tests. The specimens were placed between the two plates of the WPM 100 kN device in such a way that their lateral sides adjoining during the preparation to the vertical sides of the moulds were in contact with the plates. In this way, the imprecision of the geometry on the upper cut off side was not affecting negatively the experiment. The compressive strength was calculated as the ratio of the ultimate force and the load area.

The wet-cup and dry-cup methods were employed in the measurements of water vapor transport parameters (16, 17). The water vapor diffusion coefficient D , water vapor diffusion permeability δ and water vapor diffusion resistance factor μ were the parameters determined. Three cylindrical specimens with the diameter 105

bek pozostałych po pomiarze wytrzymałości na zginanie. Próbkę umieszczano w prasie WPM 100 KN w ten sposób, że ich boki przylegające w trakcie ich przyrządzania do pionowych ścian formy były ułożone pod płytkami w prasie. W ten sposób niedokładność geometrii głównego przekroju boku nie wpływały niekorzystnie na wynik pomiaru. Wytrzymałość na ściskanie obliczano jako stosunek największej siły do obciążonej powierzchni.

Metody mokrej i suchej zlewki stosowano do pomiarów parametrów transportu pary wodnej (16, 17). Współczynnik dyfuzji pary wodnej D , przenikalność dyfuzyjną pary wodnej δ i współczynnik oporności dyfuzyjnej pary wodnej μ były oznaczanymi parametrami. Do pomiarów stosowano trzy próbki walcowe o średnicy 105 mm i grubości 20 mm. Współczynnik absorpcji wody A mierzono za pomocą znormalizowanego stanowiska pomiarowego do badania sorpcji wody (18). W doświadczeniach stosowano pięć próbek 50 x 50 x 20 mm. Względny dyfuzyjność wilgoci κ_{app} obliczano metodą Kumarana (19). Izotermy adsorpcji pary wodnej uzyskiwano z pomiarów metodą eksykatora (16). Próbki miały wymiar 40 x 40 x 10 mm.

Pomiar przewodności cieplnej jako funkcji zawartości wilgoci przeprowadzano za pomocą handlowego aparatu Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). Pomiar opierał się na zmianach temperatury analizowanego materiału na wywoływany przepływ ciepła. Przepływ ciepła zachodził pod wpływem ogrzewania za pomocą elektrycznego grzejnika oporowego, który stykał się bezpośrednio z powierzchnią próbki. Pomiar przeprowadzano na trzech kostkach o wymiarach 70 x 70 x 70 mm. Właściwą pojemność cieplną suchych próbek oznaczono za pomocą tego samego aparatu Isomet 2104. Jej zależność od zawartości wilgoci obliczano metodą opisaną w pracy (20).

Odporność na zamrażanie i rozmrażanie badano zgodnie z normą ČSN 72 2452 (21). Cykle zamrażania i rozmrażania obejmowały 4 godziny zamrażania w pojemniku o temperaturze $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ i dwie godziny rozmrażania w wodzie o temperaturze $+20^\circ\text{C}$. Jedna próba składała się z 15 cykli. Po 30 cyklach przeprowadzano je w dalszym ciągu aż do wystąpienia pierwszych widocznych uszkodzeń na powierzchni badanych próbek. Do tych badań przygotowano trzy zestawy złożone z trzech próbek o wymiarach 40 x 40 x 160 mm, w przypadku każdego materiału. Współczynnik odporności na mróz K oznaczano jako stosunek wytrzymałości na zginanie lub ściskanie próbek poddanych określonej liczbie cykli zamrażania i rozmrażania do wytrzymałości próbek, których nie poddawano zamrażaniu. Uważano, że materiał jest odporny na działanie mrozu jeżeli $K > 0,75$.

Badanie odporności na krystalizację soli rozpoczynano od wysuszenia próbek w 105°C . W trakcie jednego cyklu krystalizacji soli próbki zanurzano w roztworze soli na 8 godzin, a po ich wyjściu suszono je w 40°C przez 16 godzin. Stosowano następujące roztwory soli: 10 g/l NaNO_3 (7,295 g NO_3^- , 0,1177 mol NO_3^-), 10 g/l NaCl (6,066 g Cl^- , 0,171 mol Cl^-), 50 g/l Na_2SO_4 (33,815 g SO_4^{2-} , 0,352 mol SO_4^{2-}) i roztwory mieszane według (1) zawierające 35 g/l NaCl (21,232 g Cl^- , 0,5989 mol Cl^-), 5 g/l Na_2SO_4 (3,3814 g

mm and thickness 20 mm were used in the experiments. The water absorption coefficient A was measured using the standard experimental setup for water sorptivity studies (18). In the measurements five specimens of 50 x 50 x 20 mm were used. The apparent moisture diffusivity κ_{app} was calculated according to (19). The water vapor adsorption isotherms were measured by the desiccator method (16). The samples had a size of 40 x 40 x 10 mm.

The thermal conductivity as a function of moisture content was measured using the commercial device Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). The measurement was based on analysis of the temperature response of the analyzed material to heat flow impulses. The heat flow was induced by electrical heating using a resistor heater having a direct thermal contact with the surface of the sample. In the experimental work three cubic samples 70 x 70 x 70 mm were used. The specific heat capacity of dry specimens was determined by Isomet 2104 as well. Its dependence on moisture content was calculated using the theoretical procedure described in (20).

The frost resistance test was performed according to ČSN 72 2452 (21). A freeze-thaw cycle included 4 hours freezing in icebox at $-20 \pm 3^\circ\text{C}$ and 2 hours thawing in $+20^\circ\text{C}$ warm water. Each freeze/thaw period consisted of 15 cycles. After 30 cycles the further freeze/thaw testing proceeded until the first visible damage of the surface of test samples. Three sets of three 40 x 40 x 160 mm specimens were prepared for every material. Frost resistance coefficient K was determined as the ratio of bending or compressive strength of specimens subjected to the specified number of freezing and thawing cycles to the strength of reference specimens which did not undergo the frost resistance test. A material was considered frost resistant for $K > 0.75$.

In the salt crystallization resistance test the specimens were dried at first at 105°C . In one salt crystallization cycle, they were put in a specific salt solution for 8 hours, after taking out from the salt bath they were dried at 40°C for 16 hours. The following salt solutions were used: 10 g/l NaNO_3 (7.295 g NO_3^- , 0.1177 mol NO_3^-), 10 g/l NaCl (6.066 g Cl^- , 0.171 mol Cl^-), 50 g/l Na_2SO_4 (33.815 g SO_4^{2-} , 0.352 mol SO_4^{2-}) and mixed solution according to (1) including 35 g/l NaCl (21.232 g Cl^- , 0.5989 mol Cl^-), 5 g/l Na_2SO_4 (3.3814 g SO_4^{2-} , 0.0352 mol SO_4^{2-}) and 15 g/l NaNO_3 (10.943 g NO_3^- , 0.1765 mol NO_3^-). 40 salt crystallization cycles were applied for the 50 g/l Na_2SO_4 solution, 50 cycles for the remaining solutions. The corrosion resistance coefficient C_{corr} was then determined as the ratio of bending or compressive strength after the chosen number of salt crystallization cycles and bending or compressive strength of reference specimens stored in laboratory conditions. A material was considered resistant against salt crystallization for $C_{corr} > 0.75$.

3. Results and discussion

3.1. Basic material properties

The highest bulk density (Fig. 1) and lowest porosity (Table 2) had the reference lime plaster RLP which did not contain any specific

SO₄²⁻, 0,0352 mol SO₄²⁻) i 15 g/l NaNO₃ (10,943 g NO₃⁻, 0,1765 mol NO₃⁻). Zastosowano 40 cykli krystalizacji soli w przypadku roztworu 50 g/l Na₂SO₄, 50 cykli w przypadku pozostałych roztworów. Współczynnik odporności na korozję C_{corr} określono jako stosunek wytrzymałości na zginanie lub ściskanie po wybranej liczbie cykli krystalizacji soli do wytrzymałości próbek odniesienia, przechowywanych w warunkach laboratoryjnych. Materiał oceniano jako odporny na krystalizację soli gdy C_{corr} > 0,75.

Tablica 2 / Table 2

POROWATOŚĆ OTWARTA

OPEN POROSITY

Plaster	RLP	CP1-1	CP1-2	CP2-1	CP2-2
Open porosity, %	34.5	44.09	45.3	47.45	49.1

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Podstawowe właściwości materiału

Największą gęstość nasypową (rysunek 1) i najmniejszą porowatość (tablica 2) miał tynk wapienny RLP stanowiący próbkę odniesienia, który nie zawierał żadnych domieszek i jego struktura porowatości ulegała zmianom tylko pod wpływem dużego stosunku w/ds. Oba układy CP1 i CP2 spełniały podstawowe wymagania tynków do renowacji, dużą otwartą porowatość zgodnie z (1), która jest bardzo korzystnym czynnikiem ponieważ stwarza możliwość gromadzenia soli przechodzących z zabytkowej ściany. Tynk CP2 miał około 10% większą porowatość niż tynki CP1, pomimo dodatku perlitu do tynku CP1-2. W obu rodzajach renowacyjnych tynków brązowe tynki pokrywające miały nieznacznie mniejszą porowatość od tynków renowacyjnych. W związku z tym, że wszystkie handlowe tynki (tablica 1) zawierają tylko podstawowe dane podane przez producentów, dokładne wyjaśnienie różnych porowatości nie jest uwzględnione. Jednak można przypuszczać z dużym prawdopodobieństwem, że dodatek domieszki porotwórczej spowodował tę stwierdzoną dużą porowatość, ponieważ gęstość matrycy analizowanych tynków różniła się tylko o 5% od wapiennego tynku odniesienia (rysunek 1).

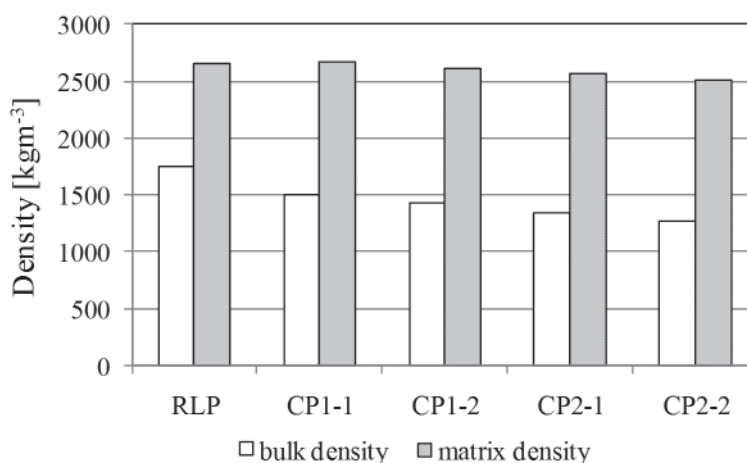
Rozkład porów w CP1-2 i obu CP2 był bardzo podobny (rysunek 2). Przyrost objętości porów zachodził stosunkowo powoli w zakresie 3 nm do 3 μm (w przypadku CP2-1 tylko do 1 μm), jednak nie występowało żadne maksimum na krzywej rozkładu wielkości porów. Natomiast w przypadku CP1-1 występował jeden pik przy 2 μm, a w przypadku RLP nawet nieco wyższy pik przy 0,6 μm.

3.2. Właściwości mechaniczne

Brązowe pokrywające tynki CP-1 i CP2-1 miały najwyższą wytrzymałość na ściskanie i zginanie (rysunek 3). Jest

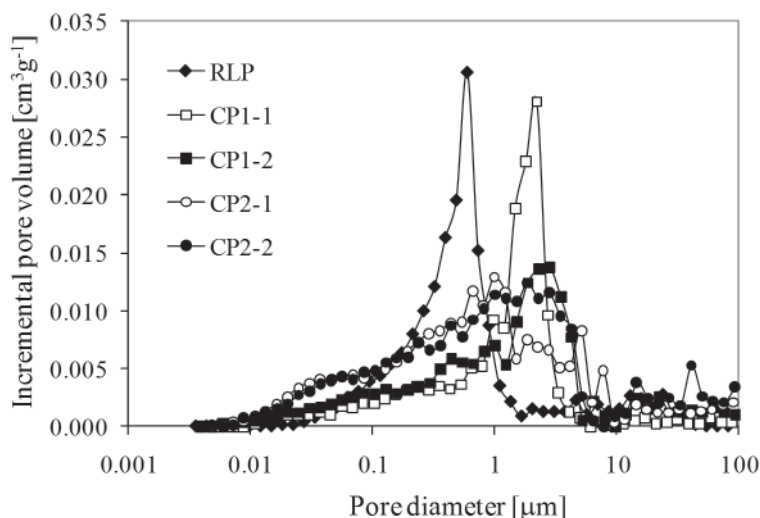
additives and its pore structure was affected only by the high w/ds ratio. Both CP1 and CP2 systems met the fundamental requirement of renovation plasters, the high open porosity in accordance with (1), which is a very positive factor because it makes possible to accumulate salts transferred from the historical walls. CP2 renders exhibited about 10% higher porosity than the corresponding CP1 renders despite the perlite addition in CP1-2. In both systems of renovation renders the brown coat plasters had slightly lower porosity than the renovation plasters. As the composition of all commercial renders (Table 1) was provided only in vague terms by the producers, the exact explanation of the differences in porosity cannot be given. However, there is a good reason to believe that the presence of foaming agents was responsible for the observed high porosities because the matrix density of the analyzed renders differed only within a 5% margin from the reference lime plaster (Fig. 1).

The pore distribution of CP1-2 and both CP2s was very similar (Fig. 2). The incremental pore volume relatively slowly increased in the range of 3 nm to 3 μm (for CP2-1 only up to 1 μm) but not



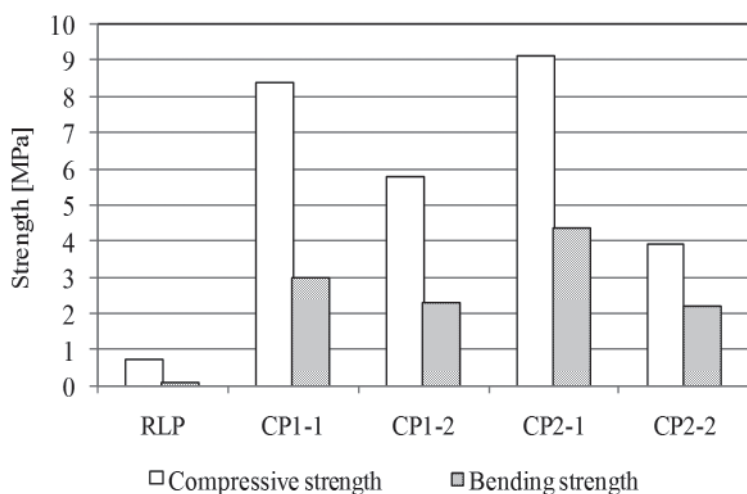
Rys. 1. Gęstość nasypowa i gęstość matrycy

Fig. 1. Bulk density and matrix density



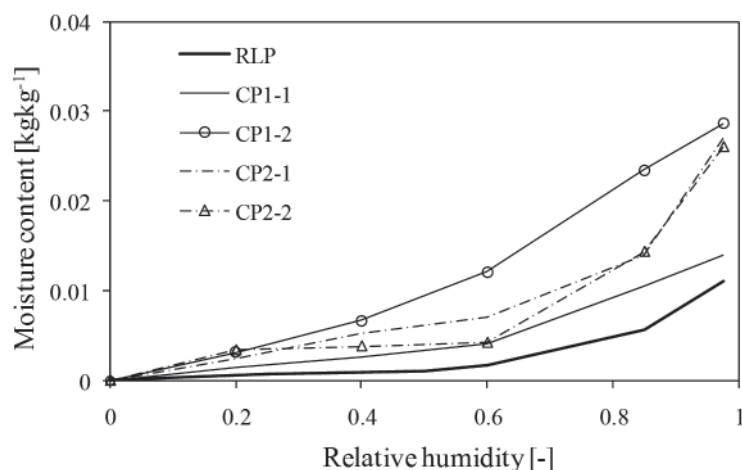
Rys. 2. Rozkład wielkości porów

Fig. 2. Pore size distribution



Rys. 3. Wielkości mechaniczne

Fig. 3. Mechanical properties



Rys. 4. Izotermy adsorpcji

Fig. 4. Adsorption isotherms

to korzystne dla tego rodzaju tynku, który może być narażony na wnikanie wody i soli ze ściany nośnej i możliwą krystalizację soli w okresie eksploatacji. Odpowiadające im tynki renowacyjne CP1-2 i CP2-2 miały również wystarczające właściwości z mechanicznego punktu widzenia. Wapienny tynk odniesienia RLP miał bardzo małą wytrzymałość, jak to już stwierdzono w poprzednich badaniach (8). Potwierdziło to jego nieprzydatność do stosowania w zabytkowych budowlach w czystej formie.

3.3. Właściwości wilgotnościowe

Czynnik oporu dyfuzji pary wodnej μ oznaczony za pomocą metody mokrej zlewki (tablica 3) był dla wszystkich badanych tynków mniejszy od 10, co oznacza, że tynki były bardzo przepuszczalne dla pary wod-

any clear peak was observed. CP1-1, on the other hand, exhibited a distinct peak at 2 μm and RLP an even slightly higher peak at 0.6 μm .

3.2. Mechanical properties

The brown-coat plasters CP1-1 and CP2-1 exhibited the highest compressive and bending strengths (Fig. 3). This was beneficial for this type of plaster which could be exposed for instance to water and salt penetration from the load bearing wall and possible salt crystallization during their service life. Their renovation counterparts CP1-2 and CP2-2 performed in satisfactory way from the mechanical point of view as well. The reference lime plaster RLP had very low strength as it was already observed in previous studies (8). This confirmed its inadvisability for use in historical buildings in its pure form.

3.3. Hygric properties

The water vapor diffusion resistance factor μ measured in the wet-cup arrangement (Table 3) was for all analyzed plasters lower than 10 which meant that the plasters were highly permeable for water vapor. This is a positive feature because water vapor can be easily removed from the load bearing wall. The values of μ factor measured by the dry-cup method were lowest for the reference lime plaster RLP, the highest for the brown coat CP2-1 and renovation plaster CP1-2. Although the μ values close to 30 may seem to be too high, it is necessary to point out that in the case that low relative humidity corresponding to the dry-cup method occurs in a wall, the need for water vapor removal is not very urgent. Also, taking into account that the majority of historical buildings is not provided by horizontal water-proof insulation which mostly leads to higher moisture contents in the building envelope walls the conditions with low relative humidity are not very likely to occur.

The slowest transport of liquid water was observed for the renovation plaster CP2-2, the second was CP1-2 (Table 4). Apparently, these plasters contained hydrophobic additives in high amounts; hence they soaked water in a limited extent only. The strategy of producers of these plasters was to reduce the transport of rainwater from surrounding environment which could increase the amount of moisture in a historical wall. The brown coats CP1-1

Tablica 3 / Table 3

PARAMETRY TRANSPORTU PARY WODNEJ

WATER VAPOR TRANSPORT PROPERTIES

Plaster	5/50%			97/50%		
	δ s	D m^2s^{-1}	μ -	δ s	D m^2s^{-1}	μ -
RLP	1.39E-11	1.91E-06	12.20	2.91E-11	4.00E-06	5.80
CP1-1	8.63E-12	1.19E-06	19.46	2.36E-11	3.25E-06	7.11
CP1-2	6.23E-12	8.56E-07	27.09	1.82E-11	2.50E-06	9.25
CP2-1	5.86E-12	8.05E-07	28.65	2.78E-11	3.81E-06	6.22
CP2-2	8.33E-12	1.15E-06	20.40	3.37E-11	4.63E-06	5.02

Tablica 4 / Table 4

PARAMETRY TRANSPORTU WODY
WATER TRANSPORT PROPERTIES

Plaster	A	K_{app}
	$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
RLP	0.192	4.20E-07
CP1-1	0.067	7.69E-08
CP1-2	0.027	3.68E-09
CP2-1	0.037	1.24E-08
CP2-2	0.019	1.88E-09

nej. Jest to korzystna właściwość, gdyż para wodna może zostać łatwo usunięta ze ściany nośnej. Wielkości czynnika μ oznaczone za pomocą metody suchej zlewki były najmniejsze dla wapiennego tynku odniesienia RLP, a największe dla brązowego tynku pokrywającego CP2-1 i tynku renowacyjnego CP1-2. Aczkolwiek wartości μ bliskie 30 mogą wydawać się za duże, należy jednak zaznaczyć, że w przypadku małej wilgotności względnej ściany, odpowiadającej suchej zlewce, potrzeba usunięcia pary wodnej nie jest pilna. Biorąc także pod uwagę, że większość zabytkowych budowli nie posiada poziomej izolacji chroniącej od wody, co w większości przypadków prowadzi do większej zawartości wilgoci w ścianach zewnętrznych budowli, warunki odpowiadające małej wilgotności względnej raczej nie występują.

Najwolniejszy transport ciekłej wody występował w przypadku tynku renowacyjnego CP2-2, a drugim był tynk CP1-2 (tablica 4). Widocznie te tynki zawierały znaczne ilości dodatków hydrofobowych, z tego względu wchłaniały one wodę tylko w ograniczonym stopniu. Dążeniem producentów tych tynków było zmniejszenie transportu wody deszczowej z otoczenia, która mogłaby zwiększyć zawartość wilgoci w zabytkowej ścianie. Brązowe tynki pokrywające CP1-1 i CP2-1 zachowywały się również stosunkowo dobrze z punktu widzenia transportu wody, chociaż ich współczynnik absorpcji wody A był dwa do trzech razy większy niż odpowiadającym im tynkom renowacyjnym w tym układzie [największy A spośród tynków renowacyjnych miał tynk CP1-1 co można było wyjaśnić obecnością piku przy $2 \mu\text{m}$ na krzywej rozkładu porów (rysunek 2)]. Największa szybkość transportu wody występowała w wapiennym tynku odniesienia, co jeszcze raz potwierdza brak jego przydatności do prac renowacyjnych zabytkowych budowli.

Najmniejszą zdolność adsorpcji pary wodnej wykazał tynk z samego wapna RLP (rysunek 4) co odpowiada jego najmniejszej porowatości (tablica 2). Tynk renowacyjny CP1-2 miał znacznie większą adsorpcję wody niż jego brązowy odpowiednik pokrywający CP1-1 co prawdopodobnie było związane z obecnością perlitu w tynku CP1-2. Z drugiej strony CP2-1 i CP2-2 wykazywały prawie taki sam poziom adsorpcji pary wodnej, co pozostawało w zgodności z ich podobnym składem.

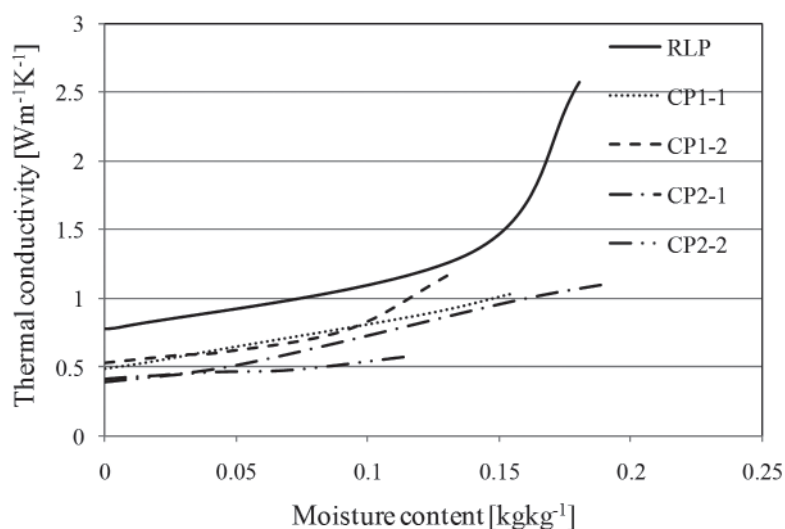
and CP 2-1 performed also relatively well from the point of view of water transport although their water absorption coefficients A were two to three times higher than for the corresponding renovation plasters in the systems (the highest A among the renovation plaster systems was observed for CP1-1 which could be explained by the presence of the $2 \mu\text{m}$ peak on its pore distribution curve – Fig. 2). The far and away the fastest water transport occurred in the reference lime plaster which underlined its unfitness for use at building renovation.

The lowest capability of water vapor adsorption exhibited the pure lime plaster RLP (Fig. 4) which corresponded with its lowest porosity (Table 2). The renovation plaster CP1-2 showed much higher water adsorption than its brown coat counterpart CP1-1 which was probably due to the presence of perlite in CP1-2. On the other hand, CP2-1 and CP2-2 were presented by almost the same level of water vapor adsorption which was in accordance with their similar composition.

3.4. Thermal properties

The measurements of thermal properties of analyzed plasters in dry state are presented in Table 5. The lowest thermal conductivity λ exhibited CP2-1 and CP2-2 which was in accordance with their highest porosity (Table 2). The thermal conductivity of CP1-1 and CP1-2 was only slightly higher which reflected the only small differences in porosity. The highest thermal conductivity showed the reference lime plaster with the lowest porosity. The specific heat capacity c of reference lime plaster was about 20-30% lower than for the brown coats and renovation plasters. This was probably due to the admixtures (foaming agents, hydrophobizers) with higher specific heat capacity in CP1 and CP2. The values of thermal diffusivity a in dry state (Table 5) were largely affected by the thermal conductivity and followed similar trends.

The thermal conductivity of the reference lime plaster RLP increased up to three times for the moisture contents between dry state and capillary saturated state (Fig. 5). The renovation plasters



Rys. 5. Przewodność cieplna

Fig. 5. Thermal conductivity

3.4. Właściwości cieplne

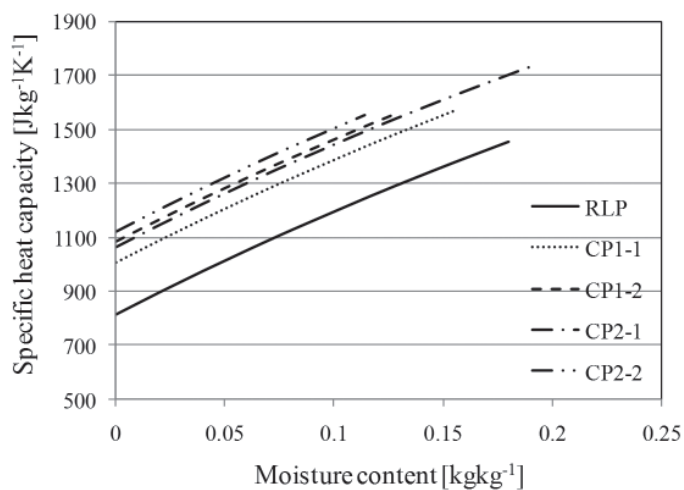
Pomiary właściwości cieplnych badanych tynków w stanie suchym podano w tablicy 5. Najmniejszy współczynnik przewodności cieplnej λ wykazywały CP2-1 i CP2-2 co zgadzało się z ich dużą porowatością (tablica 2). Przewodność cieplna CP1-1 i CP1-2 była tylko nieznacznie większa, co miało uzasadnienie w małej różnicy porowatości. Największą przewodność cieplną wykazał wapienny tynk odniesienia oraz najwyższą porowatość. Właściwa pojemność cieplna c wapiennego tynku odniesienia była o około 20-30% mniejsza niż brązowych tynków pokrywających i renowacyjnych. Było to prawdopodobnie spowodowane dodatkami domieszek (domieszka porotwórcza, hydrofobizująca), w przypadku większej pojemności cieplnej CP1 i CP2. Dyfuzyjność cieplna a w stanie suchym (tablica 5) była bardzo uzależniona od przewodności cieplnej i wykazywała podobne tendencje.

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE W STANIE SUCHYM
THERMAL PROPERTIES IN DRY STATE

Plaster	λ	c	a
	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$
RLP	0.78	817	0.547
CP1-1	0.481	1005	0.319
CP1-2	0.532	1083	0.345
CP2-1	0.409	1062	0.286
CP2-2	0.384	1122	0.27

Przewodność cieplna wapiennego tynku odniesienia RLP wzrastała aż trzykrotnie w związku ze zwiększaniem wilgotności od stanu suchego do stanu nasycenia kapilar (rysunek 5). Tynki renowacyjne i ich odpowiedniki brązowe pokrywające uległy korzystnym zmianom pod wpływem hydrofobizacji, co zmniejszyło ich wilgotność odpowiadającą nasycenom kapilarom. Najmniejszą przewodność cieplną w całym zakresie zmian wilgotności wykazał tynk CP2-2; w stanie nasycenia wodą była ona tylko o 50% większa niż w sta-



Rys. 6. Właściwa pojemność cieplna

Fig. 6. Specific heat capacity

and their brown coats were positively affected by their hydrophobization which decreased their capillary saturation moisture contents. The lowest thermal conductivity in the whole range of moisture content exhibited CP2-2; in the water saturated state it was only 50% higher than in dry state. The specific heat capacity of all plasters increased with moisture content in almost linear way (Table 6) which reflected the theoretical considerations explained in more detail in (20).

3.5. Durability properties

The frost resistance of CP1-2, CP2-1 and CP2-2 was very good (Table 6). The values of $K > 0.75$ were achieved for CP1-2 up to 50 cycles, for CP2-1 and CP2-2 up to 62 cycles. The brown coat CP1-1 did not meet the $K > 0.75$ criterion for bending strength (which is the decisive factor because K based on compressive strength is not considered in the ČSN 722452 standard) already for 15 cycles. The K values of the reference lime plaster RLP are not given in Table 5 because the specimens were disintegrated already after the first 15 cycles.

The best salt crystallization resistance exhibited CP1-2 which met the $C_{\text{corr}} > 0.75$ criterion for both compressive and bending strength and all salt solutions (Table 7). CP2-1 and CP2-2 did not pass the salt crystallization test for bending strength and NaNO_3 solution but the values of C_{corr} were still relatively high. The worst results among the renovation renders achieved CP1-1 which failed in the bending-strength test for NaNO_3 , Na_2SO_4 and the mixed solution. Similarly as in the frost resistance test, the specimens of reference lime plaster were disintegrated after the salt crystallization test.

4. Conclusions

The basic physical properties: mechanical and hygric water and heat transport and storage properties of two pairs of commercial renovation plasters and brown coats forming together renovation systems measured in the paper can serve two basic purposes.

Firstly, they can be used in a preliminary empirical assessment of suitability of the particular plasters in historical buildings as it was done in this paper. The pair of plasters CP2-1, CP2-2 was from this point of view more prospective than CP1-1 and CP1-2. The high values of compressive and bending strength were their first advantage, the low liquid water transport parameters the second, the very good durability parameters the third. Together with the low water vapor diffusion resistance factor in the range of higher relative humidity, relatively low thermal conductivity and high open porosity they present a set of parameters which seems to make good prerequisites for successful application of the plasters at building renovation. The renovation plaster CP1-2 exhibited only slightly worse properties than CP2-1 and CP2-2, for instance somewhat higher water transport parameters. However, the brown coat CP1-1 showed significantly worse frost resistance and salt crystallization resistance, which limits its use for renovation purposes.

Tablica 6 / Table 6

WSPÓŁCZYNNIK ODPORNOŚCI NA MRÓZ

FROST RESISTANCE COEFFICIENT

Plaster	As the ratio of bending strengths			As the ratio of compressive strengths		
	15 cycles	30 cycles	X cycles	15 cycles	30 cycles	X cycles
CP1-1	0.58	0.58	0.45 – 35 c	1.10	0.89	0.82 – 35 c
CP1-2	1.15	1.00	0.75 – 50 c	1.28	1.27	0.91 – 50 c
CP2-1	1.29	1.23	1.11 – 62 c	1.17	0.98	0.98 – 62 c
CP2-2	1.00	0.91	0.86 – 62 c	0.92	0.85	0.83 – 62 c

Tablica 7 / Table 7

WSPÓŁCZYNNIK ODPORNOŚCI NA KRYSZALIZACJĘ SOLI WYLICZONY JAKO STOSUNEK WYTRZYMAŁOŚCI NA ZGINANIE DO WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

CORROSION RESISTANCE COEFFICIENT C_{corr} FOR THE SALT CRYSTALLIZATION TEST CALCULATED AS RATIO OF BENDING STRENGTHS R_f AND COMPRESSIVE STRENGTHS R_c

Plaster	NaNO ₃		NaCl		Na ₂ SO ₄		Mixed solution	
	C_{corr} as $R_f / R_{f,ref}$	C_{corr} as $R_c / R_{c,ref}$	C_{corr} as $R_f / R_{f,ref}$	C_{corr} as $R_c / R_{c,ref}$	C_{corr} as $R_f / R_{f,ref}$	C_{corr} as $R_c / R_{c,ref}$	C_{corr} as $R_f / R_{f,ref}$	C_{corr} as $R_c / R_{c,ref}$
CP1-1	0.58	1.29	0.83	1.11	0.71	1.40	0.61	1.24
CP1-2	0.85	1.08	1.30	1.27	1.15	1.02	0.90	1.25
CP2-1	0.64	0.90	0.88	0.98	1.24	0.90	1.06	1.02
CP2-2	0.68	0.77	0.77	0.73	1.41	0.92	0.91	1.08

nie suchym. Właściwa pojemność cieplna wszystkich tynków rosła z zawartością wilgoci, prawie w sposób liniowy (tablica 6), co oddaje rozważania teoretyczne wyjaśnione szczegółowo w innej pracy (20).

3.5. Trwałość

Odporność na mróz tynków CP1-2, CP2-1 i CP2-2 była bardzo dobra (tablica 6). Poziom $K > 0,75$ został osiągnięty w przypadku CP1-2 aż do 50 cykli, w przypadku CP2-1 i CP2-2 aż do 62 cykli. Brązowy tynk pokrywający CP1-1 nie spełnił wymagania $K > 0,75$ w odniesieniu do wytrzymałości na zginanie już po 15 cyklach (co stanowi decydujący czynnik, gdyż K oparte na wytrzymałości na ściskanie nie jest uwzględniane w normie ČSN 722452). Wartości K wapiennego tynku odniesienia RLP nie podano w tablicy 5, gdyż próbki uległy zniszczeniu już po 15 cyklach.

Najlepszą odporność na krystalizację soli wykazał tynk CP1-2, który spełnił wymaganie $C_{corr} > 0,75$, tak w przypadku wytrzymałości na ściskanie jak i na zginanie we wszystkich roztworach soli (tablica 7). CP2-1 i CP2-2 nie spełniły warunków odporności na krystalizację soli w przypadku wytrzymałości na zginanie i w roztworze NaNO₃, jednak uzyskane wartości C_{corr} były stosunkowo dobre. Najgorszy wynik w przypadku tynków renowacyjnych osiągnął CP1-1, który nie spełnił wymagania w zakresie wytrzymałości na zginanie w przypadku NaNO₃, Na₂SO₄ i roztworu mieszanego. Podobnie jak w przypadku badania odporności na mróz próbki z wapiennej zaprawy odniesienia uległy rozpadowi po krystalizacji soli.

The second, more efficient way of using the measured parameters is in computer simulation tools. The obtained data can be used as input parameters of service life assessment models making possible simulations of real conditions which the particular plaster systems will be exposed to on building site, in a specific construction system. This should be the preferential use of measured parameters in the future.

It should be noted that all analyzed renovation plasters were produced using cement as a substantial part of their composition. This was the main reason for the very good mechanical and durability properties. They also contained hydrophobization admixtures in significant amounts, which were reflected in the slow liquid water transport. These favorable properties can certainly ensure a relatively long service life of the studied renovation plasters when they are used on a historical building. However, the current trends in some European countries consisting in the recommended use of materials and technologies as close as possible to the original construction, which began to prevail at the care of historical monuments, already led to the restrictions in using cement and hydrophobizers at the renovation of surface layers. This may present serious problems in future use of common renovation render systems offered on the current market. Possible way out of these difficulties may lie in using pozzolanic additions which were used in plasters since ancient times (22).

4. Wnioski

Zbadano podstawowe właściwości mechaniczne i wilgotnościowe; transport wody i ciepła dwóch par handlowych tynków do renowacji i brązowych pokrywających, które tworzyły razem układ renowacyjny, co może służyć do dwóch celów.

Po pierwsze mogą one być wykorzystane do wstępnej empirycznej oceny przydatności poszczególnych tynków do prac przy budowach zabytkowych, jak tego dokonano w artykule. Para tynków CP2-1 i CP2-2 miała korzystniejsze właściwości niż para CP1-1 i CP1-2. Duża wytrzymałość na zginanie i ściskanie stanowiła ich pierwszą cechą pozytywną, a mały transport wody drugą, w końcu dobra trwałość stanowiła trzecią. Razem z małym oporem dyfuzji pary wodnej w zakresie dużych wilgotności względnych, stosunkowo małe przewodnictwo cieplne i duża porowatość otwarta stanowią zbiór parametrów, które korzystnie świadczą o dobrej przydatności tych tynków do renowacji budynków. Tynk renowacyjny CP1-2 wykazuje tylko nieznacznie gorsze właściwości od tynków CP2-1 i CP2-2, na przykład nieco większe parametry transportu wody. Jednak, brązowy tynk pokrywający CP1-1 wykazał znacznie gorszą odporność na mróz i krystalizację soli, co ogranicza jego stosowanie w celach renowacyjnych. Drugą skuteczniejszą metodą wykorzystania danych pomiarowych jest symulacja komputerowa. Otrzymane wyniki można wykorzystać jako dane wejściowe w modelu, który naśladuje warunki spotykane w praktyce, w których tynk będzie eksploatowany w budowlach, w szczególnych układach konstrukcyjnych. Stanowi to najlepsze wykorzystanie zmierzonych parametrów w przyszłości.

Trzeba zaznaczyć, że wszystkie badane tynki renowacyjne zostały wyprodukowane przy zastosowaniu cementu jako podstawowego składnika. To było podstawowym czynnikiem gwarantującym bardzo dobre właściwości mechaniczne i trwałość. Zawierały one także znaczny dodatek domieszek hydrofobizujących, co powodowało wolny transport wody. Te korzystne właściwości mogą niewątpliwie zapewnić stosunkowo długi okres eksploatacji badanych tynków renowacyjnych w przypadku ich zastosowania w zabytkowych budowlach. Jednak obecne tendencje w niektórych krajach europejskich sprowadzają się do zalecania stosowania materiałów i technologii możliwie bliskich tych zastosowanych w zabytkowych budowlach, co zaczyna przeważać w pracach renowacyjnych i pociąga za sobą ograniczenia w użyciu cementu i domieszek hydrofobowych do napraw warstw powierzchniowych. Może to stwarzać poważne problemy w przyszłości w stosowaniu zwykłych tynków renowacyjnych znajdujących obecnie na rynku. Możliwą drogą do pokonania tych trudności jest stosowanie dodatków pucolanowych, które były używane w tynkach, w pracach starożytnych.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under grant No. 103/09/0780.

Literatura / References

1. WTA 2-9-04/D Sanierputzsysteme. WTA-Publications, Pfaffenhofen 2005.
2. L. Binda, G. Baronio, C. Tiraboschi, C. Tedeschi, Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto. *Construction and Building Materials*, **17**, 629-639 (2003).
3. N. Arioglu, S. Acun, A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system and approach. *Building and Environment*, **41**, 1223-1230 (2006).
4. D. Michoinová, Preparation of Lime Plasters in the Care of Historical Monuments (in Czech). ČKAIT, Prague 2006.
5. J. Ashurst, N. Ashurst, N. 2005. Mortars, Plasters & Renders, English Heritage Technical Handbook, Vol. 3. Asghate Publishing, Aldershot, Hants 2005.
6. M. F. Rojas, J. Cabrera, The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. *Cement and Concrete Research*, **32**, 133-138 (2002).
7. M.F. Rojas, Study of hydrated phases present in a MK-lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction. *Cement and Concrete Research*, **36**, 827-831 (2006).
8. R. Černý, A. Kunca, V. Tydlitát, J. Drchalová, P. Rovnaníková, Effect of Pozzolanic Admixtures on Mechanical, Thermal and Hygric Properties of Lime Plasters. *Construction and Building Materials* **20**, 849-857 (2006).
9. A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou, S. Anagnostopoulou, Evaluation of pozzolanic activity and physicomchanical characteristics in metakaolin-lime pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **84**, 157-163 (2006).
10. C. Fortes-Revilla, S. Martinez-Ramirez, M. Teresa Blanco-Varela, Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables. *Cement & Concrete Composites*, **28**, 458-467 (2006).
11. A. Sepulcre-Aguilar, F. Hernández-Olivares, Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry. *Cement and Concrete Research*, **40**, 66-76 (2010).
12. N. Billong, U.C. Melo, D. Njopwouo, F. Louvet, J.P. Bonnet, Effect of mixture constituents on properties of slaked lime-metakaolin-sand mortars containing sodium hydroxide. *Cement & Concrete Composites*, **31**, 658-662 (2009).
13. N. Billong, U.C. Melo, E. Kamseu, J.M. Kinuthia, D. Njopwouo, Improving hydraulic properties of lime-rice husk ash binders with metakaolin. *Construction and Building Materials*, **25**, 2157-2161 (2011).
14. M. R. Veiga, A. Velosa, A. Magalhaes, Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, **23**, 318-327 (2009).
15. V. Kočí, J. Maděra, R. Černý, P. Rovnaníková, Application of a combined computational-experimental approach for the service life estimate of exterior plasters of historical buildings. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI. WIT Transactions on the Built Environment*, **109**, 303-314, (2009).

16. 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*, **27**, 307-325 (2004).
17. E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Keppert, Z. Keršner, P. Rovnaníková, M. Ondráček, M. Sedlmajer, R. Černý, Fly-Ash Influence on the Properties of High Performance Concrete. *Cement Wapno Beton*, **13/75**, 189-204 (2009).
18. E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Jerman, R. Černý, Free Water Intake as Means of Material Characterization. *Journal of Building Physics*, **33**, 29-44 (2009).
19. M. K. Kumaran, Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, **22**, 349-355 (1999).
20. M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, R. Černý, Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes. *Cement Wapno Beton* **16/78**, 18-29 (2011).
21. ČSN 72 2452, Testing of frost resistance of mortar. Czechoslovak Standardization Institute, Prague 1968.
22. S. Chandra, Binders yesterday and today in India. *Cement Wapno Beton* **15/77**, 31-49 (2010).