



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Tłumaczenie tekstów naukowych z języka polskiego na język angielski i z języka angielskiego na język polski w Cement Wapno Beton - zadanie finansowane w ramach umowy nr 668/1/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.

Strona internetowa czasopisma Cement Wapno Beton - zadanie finansowane w ramach umowy nr 668/1/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.

Zagraniczni recenzenci Cement Wapno Beton - zadanie finansowane w ramach umowy nr 668/1/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.

Wzrost poziomu umiędzynarodowienia czasopisma Cement Wapno Beton - zadanie finansowane w ramach umowy nr 668/1/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.

Zapewnienie oryginalności materiałów publikowanych w Cement Wapno Beton - zadanie finansowane w ramach umowy nr 668/1/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.

Jan Fořt, Martin Keppert, Robert Černý*

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

Tynki wapienne zbrojone włóknami celulozowymi

Application of cellulose fiber reinforcement in lime plasters

Słowa kluczowe: tynki wapienne, popiół lotny z drewna, włókna celulozowe, właściwości mechaniczne tynków

Keywords: lime plasters, waste wood fly ash, cellulose fibers, mechanical performance of plasters

1. Wprowadzenie

Obecne tendencje w rozwoju nowych materiałów budowlanych opierają się na doskonaleniu ich właściwości i ich dostosowaniu do zasad zrównoważonego rozwoju. Z tego punktu widzenia wy-

1. Introduction

The current trend in the development of new building materials is based on the optimization of material characteristics and improvements of sustainability parameters. Utilization of eco-friendly raw materials is, from this point of view, essential for the accomplishment of this challenging task. Thus, the material designers and

*Corresponding author, email: cernyr@fsv.cvut.cz

korzystanie surowców ekologicznych jest niezbędne do realizacji takiego zadania. W związku z tym projektanci materiałów oraz inżynierowie muszą stosować rozwiązania wielofunkcyjne (1, 2). Między innymi bardzo obiecującą metodą jest stosowanie produktów ubocznych lub materiałów odpadowych, z różnych obszarów przemysłowych. W literaturze można wyróżnić wiele prac dotyczących wykorzystania popiołów lotnych, ścieków organicznych, dodatków naturalnych i wielu innych materiałów przyjaznych dla środowiska (3-5). Zastosowanie popiołów lotnych, powstających podczas spalania paliw kopalnych lub alternatywnych, okazało się dobrą metodą zmniejszenia stosowania spoiw wymagających dużego zużycia energii, do których należą cement lub wapno (6). Surowe przepisy rządowe dotyczące usuwania odpadów będą kładły nacisk na ponowne wykorzystywanie materiałów alternatywnych, którymi można zastąpić zasoby naturalne. Ponadto wykorzystanie odpadów lub produktów ubocznych jest dobrą metodą zmniejszania kosztów.

Wykorzystanie nietradycyjnych materiałów, pochodzących z różnych przemysłów może być także korzystne w ulepszaniu spoiw tradycyjnych, można wręcz stwierdzić historycznych (1, 7). Zgodność właściwości nowoczesnych i tradycyjnych elementów murowych stanowi kolejne trudne zadanie dla projektantów tych materiałów i wymaga uwzględnienia rozwiązań z przeszłości.

Bardzo dobrą metodą poprawy trwałości tynku wapiennego jest zastosowanie dodatku popiołu lotnego ze spalania biomasy (8). Materiał ten, zwykle pochodzący ze spalania drewna, słomy lub obu tych surowców, może być dodawany do mieszanek wiążących, a jego aktywność pucolanowa przyczynia się do poprawy właściwości wytwarzanych z nich tynków. Równocześnie znacznie wzrasta odporność na ich uszkodzenia wywołwane wilgocią (1). Zastosowanie dodatku różnych włókien może znacznie poprawić wytrzymałość na zginanie oraz zwiększyć energię pęknięcia tynków wapiennych. Zhu i in. (5) wykazali, że włókna polimerowe mogą znacznie zwiększyć wytrzymałość takich kompozytów. Jednak zastosowanie tych dodatków nie spełnia wymagań prac renowacyjnych obiektów historycznych (1). Z tego punktu widzenia stosowanie włókien naturalnych wydaje się być lepszym rozwiązaniem. Korzystny wpływ włókien naturalnych w powszechnie stosowanych spoiwach wykazało już wielu autorów (8-10). Na przykład Senff i in. (12) wykorzystali znane właściwości tynku wielofunkcyjnego, w przypadku którego dodatek włókien celulozowych znacznie poprawia odporność na wilgoć, jak również właściwości mechaniczne. Stwierdzono jednak poważny problem z kontrolowaniem reologii takich świeżych mieszanek.

W niniejszej pracy badano wpływ dodatku włókien celulozowych do tynków wapiennych, w ilości 20% masy materiałów pucolanowych. Doświadczeniami tymi objęto również określenie podstawowych właściwości fizycznych oraz izolacyjności cieplnej i wilgotnościowej.

engineers need to follow a multifunctional approach (1, 2). Among others, a very promising way for such improvements can be viewed in the application of secondary or waste products from various industrial areas. Across the literature, it is possible to distinguish many attempts aimed at the utilization of fly ash, organic sludge, natural additives and many other eco-friendly materials (3-5). The application of fly ash generated by the combustion of fossil or alternative fuels was found as an effective way for the decrease of consumption of energy-demanding binders, such as cement or lime (6). The strict government regulation concerning waste disposal will put emphasis on the reuse of alternative materials which can replace the natural resources.

Moreover, the utilization of waste or by-products is a promising way towards cost reduction.

The utilization of non-tradition materials coming from various industrial fields can be also beneficial for the improvement of traditional binders with historical roots (1, 7). The compatibility between new and original components of masonry constitutes another challenging task for material designers and requires a historical-sensitive approach.

A very effective way towards the improvement of lime plaster durability can be viewed in the application of fly ash from biomass combustion (8). Such material, usually originating from wood, straw or combination of both, can be easily incorporated into plaster mixtures and due to its pozzolanic activity appropriately used for the improvement of mechanical properties. Also, the resistance against disintegration processes caused by moisture can be significantly increased (1). The application of various fibers can substantially improve the flexural strength and fracture energy of lime-based plasters. Zhu et al. (5) proved that polymeric fibers could remarkably increase the toughness of studied composites. However, the application of such materials does not meet the historical aspects of renovation works (1). On this account, the application of natural fibers seems to be more appropriate from the historical point of view. The positive effect of the utilization of natural fibers in common binders was already demonstrated by several authors (8-10). For example, the research of Senff et al. (12) followed the previously obtained knowledge and expanded it for the development of multifunctional plaster. Here, the incorporation of cellulose fibers significantly improved moisture buffering of the material, as well as the mechanical parameters. However, a major problem has risen in connection with the control of rheologic behaviour of fresh mixtures.

In the present work, the effect of cellulose fibers incorporated into lime plasters with 20% by mass of a pozzolanas additives is studied. Within the experimental analysis, the basic physical, mechanical, hygric and thermal properties are determined for the detailed characterization of the designed plasters.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

Popiół lotny pochodził z elektrowni wykorzystującej biomasę, który w dalszej części został oznaczony jako popiół z odpadów drzewnych (WWFA). W doświadczeniach stosowano go jako częściowy zamiennik wapna. Jego skład chemiczny określono metodą analizy fluorescencji rentgenowskiej. Z danych zawartych w tabelicy 1 wynika, że WWFA zawiera głównie SiO_2 (około 51,3% mas.), CaO (około 15,4% mas.) i Al_2O_3 (14% mas.).

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY WWFA

THE CHEMICAL COMPOSITION OF WWFA

Compound / Składnik	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Cl	SO_3	P_2O_5
Content, % of mass Zawartość, % masy	51.3	14.0	4.0	15.4	2.4	1.0	4.4	0.2	3.3	2.0

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY ZAPROJEKTOWANYCH MIESZANEK TYNKOWYCH

COMPOSITION OF DESIGNED PLASTERS

Mixture Mieszanka	Lime Wapno kg	Aggregate Kruszywo kg	Cellulose fibers Włókna celulozowe kg	Pozzolanas Pucolana kg	Water Woda, kg
R	3	9	-	0.9	3.20
LWC1	3	9	0.036	0.9	3.25
LWC2	3	9	0.072	0.9	3.30
LWC3	3	9	0.108	0.9	3.40
LWC4	3	9	0.144	0.9	3.50

Rozkład wielkości cząstek WWFA określono metodą laserową, aparatem Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch). Na rysunku 1 pokazano, że główny pik krzywej rozkładu cząstek WWFA znajduje się przy około 50 μm . Widać również, że WWFA zawiera nieco większe cząstki niż wapno. Niemniej jednak, skład ziarnowy WWFA uznano za odpowiedni i nie było wymagane dodatkowe mielenie.

Hydrofobizowane włókna celulozowe, stosowane jako zbrojenie matrycy gipsowej, pochodziły z makulatury. Długość włókien wynosiła od 2 do 4 mm. Na rysunku 2 pokazano stosowane włókna pod skaningowym mikroskopem elektronowym. Analizę wykonano za pomocą urządzenia JSM 6510 LV-Jeol o powiększeniu 5 - 300 000x.

Wapno hydratyzowane CL 90-S (zakłady wapiennicze Carmeuse, Republika Czeska, Mokrá) stosowano jako podstawowe spoiwo we wszystkich badanych tynkach.

2. Materials and methods

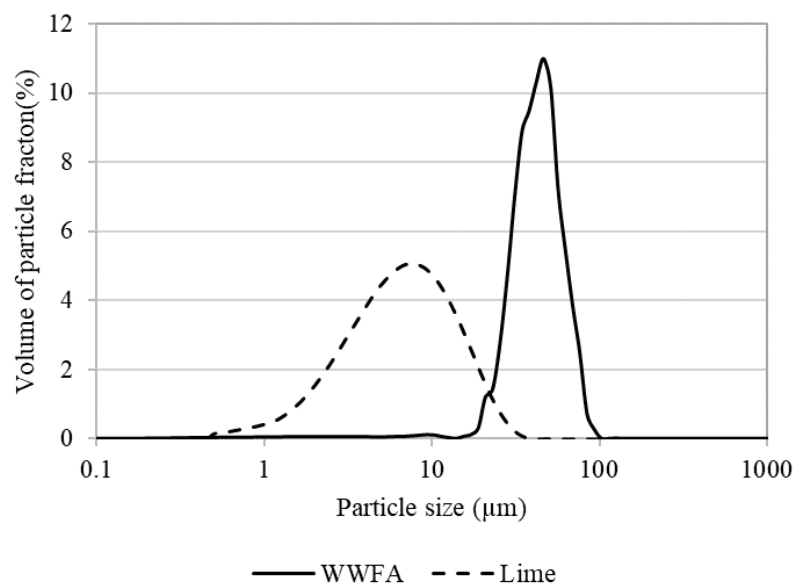
2.1. Materials

The fly ash originating from a biomass electricity plant [it will be denoted as waste wood fly ash (WWFA) in what follows] was used as a partial lime replacement. Its chemical composition was determined by X-ray fluorescence (XRF) analysis. Table 1 shows that the major part of WWFA was formed by SiO_2 (approx. 51.3 mass%), CaO (approx. 15.4 mass%), and Al_2O_3 (14 mass%).

The particle size distribution of WWFA was determined by Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch) laser diffraction measuring device.

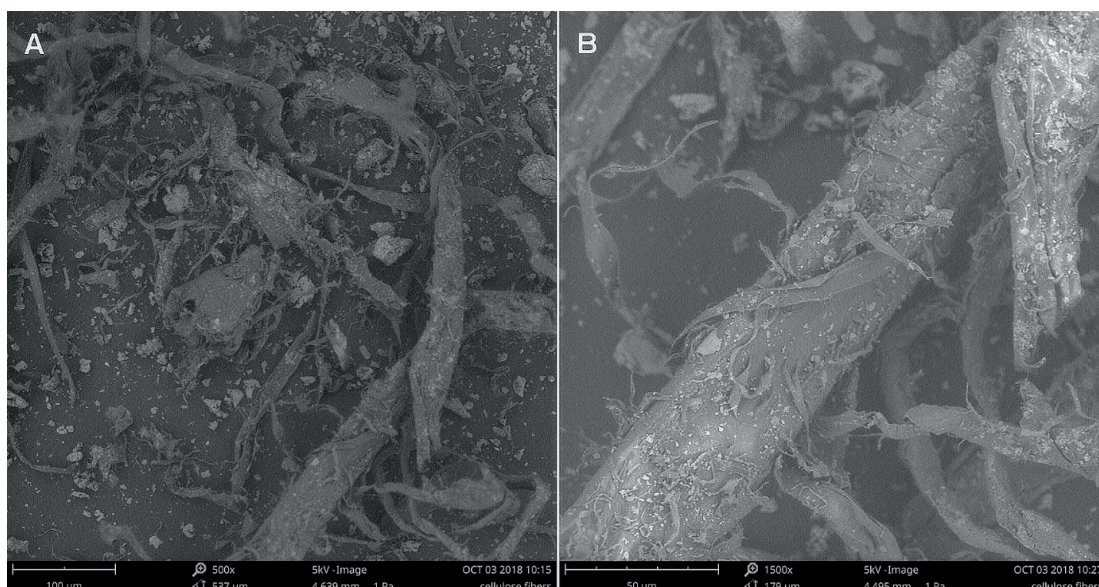
Fig. 1 shows that the main peak of the particle size distribution curve was close to 50 μm and WWFA had slightly bigger particles than lime. Notwithstanding, the granulometry of WWFA could be considered as suitable and no additional milling was required.

The hydrophobized cellulose fibers made from recycled paper were used as reinforcement of the plaster matrix. The length of the fibers was between 2 and 4 mm. Fig. 2 shows scanning electron microscope (SEM) images of the applied fibers. The analysis was performed by a JSM 6510 LV-Jeol device with a magnification of 5 – 300 000x.



Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek wapna i popiołu z odpadów drzewnych

Fig. 1. Particle size distribution curves of lime and WWFA



Rys. 2. A – Obraz włókien celulozowych; B – Zbliżenie do powierzchni włókien

Fig. 2. A – SEM image of cellulose fibers; B – Detail of fiber surface

W oparciu o pracę Fořta i in.(8), wapno zastępowano WWFA w ilości 20% mas. (8). Dodatek włókien celulozowych mieścił się w zakresie od 1 do 4% masy. Stosunek woda / spoiwo utrzymywano na takim poziomie aby zachować stałą urabialność świeżej mieszanki, którą określono za pomocą stolika do badania rozplywu. Szczegółowy skład projektowanych tynków podano w tablicy 2.

2.2. Metody

W celu zbadania wpływu WWFA na właściwości tynków wykonano pomiary podstawowych właściwości fizycznych, a mianowicie gęstość pozorną, gęstość właściwą matrycy i porowatość otwartą. Gęstość pozorną określono przez zważenie próbek o znanej objętości, którą obliczono używając wymiarów zmierzonych za pomocą suwmiarki cyfrowej. Gęstość matrycy zbadano za pomocą piknometru helowego Pycnomatic ATC (Thermo Scientific). Porowatość całkowitą obliczono na podstawie znajomości gęstości właściwej i pozornej.

Do wyznaczenia wytrzymałości na zginanie i ściskanie zastosowano prasę hydrauliczną VEB WPM Leipzig, o sztywnej ramie i sile maksymalnej 3000 kN. Właściwości mechaniczne badanych tynków określano po 28 dniach dojrzewania. Badania wykonano na beleczkach o wymiarach 160 x 40 x 40 mm. Wytrzymałość na ściskanie mierzono na ich połówkach, po złamaniu w trakcie badania wytrzymałości na zginanie trzypunktowe; powierzchnia przyłożenia siły wynosiła 40 x 40 mm.

Przewodność cieplną i dyfuzyjność cieplną zbadano za pomocą przenośnego aparatu ISOMET 2114 (Applied Precision). ISOMET 2114 jest aparatem wyposażonym w różne rodzaje sond. Sondy igłowe są przeznaczone do badań materiałów porowatych, włóknistych lub miękkich, a sondy powierzchniowe przeznaczone są do badań materiałów twardych, do których należą tynki badane w tej pracy. Pomiar polega na analizie temperaturowej odpowiedzi badanego materiału na impulsy ciepłe generowane przez sondę.

Hydrated lime CL 90-S (Mokrá Plant of Carmeuse, Czech Republic) was used as the basic binder for all studied plasters. The lime was replaced by 20 mass% of WWFA according to the suggestion given by Fořt et al. (8). The addition of cellulose fibers applied ranging from 1 to 4 % by mass. The water/binder ratio was modified to maintain the same workability of fresh mixtures which was determined by the flow table test. The detailed composition of the designed plasters is given in Table 2.

2.2. Experimental methods

The basic physical properties of studied plasters, namely the bulk density, matrix density and open porosity, were measured to investigate the basic impact of the applied WWFA on material characteristics. The bulk density was determined by weighing the samples with known volume which was obtained using a digital calliper. The matrix density was measured by a helium pycnometer Pycnomatic ATC (Thermo Scientific). The total open porosity was calculated on the basis of the knowledge of bulk- and matrix density.

A hydraulic testing device VEB WPM Leipzig having a stiff loading frame with the capacity of 3000 kN was employed for the measurement of compressive and flexural strength. Mechanical properties of the studied plasters were determined after 28 days. For the experiments bars having dimensions of 160 x 40 x 40 mm were used. The compressive strength was measured on the portions of bars broken in the three-point bending test; the loading area was 40 x 40 mm.

The thermal conductivity and thermal diffusivity were determined by a handheld portable instrument ISOMET 2114 (Applied Precision). ISOMET 2114 is equipped with various types of probes, needle probes are for porous, fibrous or soft materials, and surface probes are suitable for hard materials such as plasters in this paper. The measurement is based on the analysis of the temperature respon-

Źródłem ciepła jest drut oporowy, który ma zapewniony możliwie najlepszy kontakt termiczny z powierzchnią próbki. Zakres pomiarowy przewodności cieplnej wynosi od 0,015 do 6 W/mK z dokładnością 5% przy rozdzielczości 0,001 W/mK.

Transport ciekłej wody w materiale określono badając współczynnik absorpcji wody oraz współczynnik dyfuzyjności wilgoci (13). Powierzchnie boczne próbek impregnowano tak aby były wodoszczelne i izolacyjne dla pary, a stronę czołową zanurzono w wodzie na głębokość 1-2 mm. Stały poziom wody w zbiorniku kontrolowano butelką Marriotte'a, z dwiema rurkami kapilarnymi. Jedną z rurek, o średnicy wewnętrznej 2 mm, była pod poziomem wody, a druga, o średnicy wewnętrznej 5 mm, znajdowała się powyżej poziomu wody. Zmianę masy rejestrowano wagą automatyczną. Współczynnik absorpcji wody A [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$] obliczono zgodnie ze wzorem [1]:

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad [1]$$

gdzie i [kg/m^2] to całkowita absorpcja wody, t czas absorpcji wody mierzony od początku pomiaru. Dyfuzyjność wilgoci κ_{app} [$\text{m}^2\text{s}^{-1/2}$] określa zależność [2]:

$$\kappa_{app} \approx \left(\frac{A}{w_c - w_0} \right)^2 \quad [2]$$

gdzie w_c [kgm^{-3}] to zawartość wilgoci w stanie równowagowym, a w_0 [kgm^{-3}] to początkowa zawartość wilgoci.

W celu określenia transportu pary wodnej w materiale wykorzystano metodę kubka w wariacie suchym (14). Metoda opiera się na pomiarze strumienia dyfuzji pary wodnej przez próbkę i pomiarze prężności pary w powietrzu pod i nad powierzchnią próbki. Przepuszczalność pary wodnej badano umieszczając próbki materiału na powierzchni kubka ze stali nierdzewnej, uszczelnionego plasteliną techniczną. Pomiarów dokonano na pięciu próbkach o wymiarach $100 \times 100 \times 50$ mm. W kubku, jako materiał sorpcyjny, stosowano żel krzemionkowy. Naczynia pomiarowe umieszczono w kontrolowanej komorze klimatycznej i okresowo ważono. Na podstawie przyrostu masy określono właściwości transportu pary wodnej przez próbki.

Współczynnik dyfuzji pary wodnej D [m^2s^{-1}] obliczono na podstawie zmierzonych wartości zmiany masy, zgodnie z równaniem [3]:

$$D = \frac{\Delta m \cdot d \cdot R \cdot T}{S \cdot \tau \cdot M \cdot \Delta p_p} \quad [3]$$

gdzie Δm [kg] to ilość pary wodnej zawartej w próbce, d [m] grubość próbki, S [m^2] powierzchnia próbki, τ [s] czas prowadzenia pomiaru, Δm i Δp_p [Pa] różnica pomiędzy prężnością pary wodnej poniżej i powyżej badanej powierzchni próbki, R uniwersalna stała gazowa, M masa wody, T [K] temperatura bezwzględna.

Określając współczynnik dyfuzji D , ze wzoru [4] obliczono współczynnik oporu dyfuzyjnego pary wodnej μ [-]

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [4]$$

gdzie: D_a jest współczynnikiem dyfuzji pary wodnej w powietrzu.

se of the analyzed material to heat flow pulses. The heat flow is induced by electrical heating using a resistor heater having a direct thermal contact with the surface of the sample. The measurement range of the thermal conductivity is from 0.015 to 6 W/mK with the accuracy of 5% of reading + 0.001 W/mK.

The liquid water transport was characterized by the water absorption coefficient and apparent moisture diffusivity (13). The specimen was water- and vapor-proof insulated on four lateral sides and the face side was immersed 1-2 mm in the water. Constant water level in the tank was achieved by a Marriotte bottle with two capillary tubes. One of them, inside diameter 2 mm, was ducked under the water level. The second one, inside diameter 5 mm, was above water level. The automatic balance allowed recording the increase of mass. The water absorption coefficient A [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$] was calculated using the formula:

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad [1]$$

where i [kg/m^2] is the cumulative water absorption, t the time from the beginning of the water absorption experiment, the apparent moisture diffusivity κ_{app} [m^2s^{-1}] as

$$\kappa_{app} \approx \left(\frac{A}{w_c - w_0} \right)^2 \quad [2]$$

where w_c [kgm^{-3}] is the saturated moisture content and w_0 [kgm^{-3}] the initial moisture content.

The cup method in the dry-cup arrangement (14) was employed in the characterization of water vapor transport. It was based on measuring the diffusion water vapor flux through the specimen and partial water vapor pressure in the air under and above a specific specimen surface. Water vapor transmission properties of a studied material were found by placing a specimen of the material on the top of a stainless-steel cup, whereas the specimen was in contact with the cup sealed by technical plasticine. For the measurement 5 samples with dimensions of 100×100 mm and 50 mm thickness were used. The cup contained a sorption material, namely silica gel. Measuring cups were placed in a controlled climatic chamber and weighed periodically. The steady state values of mass gain were utilized for the determination of water vapor transport properties.

The water vapor diffusion coefficient D [m^2s^{-1}] was calculated from the measured data according to the equation

$$D = \frac{\Delta m \cdot d \cdot R \cdot T}{S \cdot \tau \cdot M \cdot \Delta p_p} \quad [3]$$

where Δm [kg] is the amount of water vapor diffused through the sample, d [m] the sample thickness, S [m^2] the specimen surface, τ [s] the period of time corresponding to the transport of mass of water vapor Δm , Δp_p [Pa] the difference between partial water vapor pressure in the air under and above specific specimen surface, R the universal gas constant, M the molar mass of water, T [K] the absolute temperature.

Using the diffusion coefficient D , the water vapor diffusion resistance factor μ [-] was determined,

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Podstawowe właściwości fizyczne

Podstawowe właściwości fizyczne badanych tynków podano w tabelicy 3. Uzyskane wyniki wskazują na nieznaczny spadek gęstości pozornej ze wzrostem udziału włókien celulozowych. Zaobserwowano również nieznaczny wpływ na mikrostrukturę materiału oraz brak wpływu na całkowitą porowatość otwartą. Jedynie w przypadku próbki LWC4 porowatość całkowita wzrosła z 37,6% do 40,9%. Dodatek włókien wpłynął na zmianę gęstości matrycy, jednak nie znaleziono korelacji tego wpływu.

3.2. Właściwości mechaniczne

Wyniki badań właściwości mechanicznych tynków przedstawiono na rysunku 3. Stwierdzono, że zastosowane włókna celulozowe mogą poprawić wytrzymałość na ściskanie, pomimo wzrostu porowatości całkowitej. Przy użyciu 4% masy włókien celulozowych wytrzymałość na ściskanie wzrosła z 1,76 do 2,19 MPa. Korzystny wpływ włókien celulozowych był wyraźnie większy w przypadku

Tabela 3 / Table 3

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE TYNKÓW

BASIC PHYSICAL PROPERTIES OF PLASTERS

Mixture Mieszanka	Bulk density Gęstość pozorna kg/m ³	Matrix density Gęstość właściwa kg/m ³	Total open porosity Całkowita porowatość otwarta % m ³ /m ³
R	1596.7	2558.6	37.6
LWC1	1578.0	2571.9	38.6
LWC2	1562.3	2566.8	39.1
LWC3	1548.1	2549.0	39.3
LWC4	1518.1	2572.1	40.9

wytrzymałości na zginanie. Wytrzymałość wzrosła z 0,73 MPa, dla tynku referencyjnego, do 1,35 MPa dla próbki LWC4.

W przeciwieństwie do prac badawczych Senffa i in. (12), uzyskane wyniki wykazały korelację pomiędzy właściwościami mechanicznymi a zawartością włókien celulozowych. Wyjaśnieniem mogą być hydrofobowe właściwości zastosowanych w tej pracy włókien i wynikający z tego mniejszy stosunek woda/spoiwo. Efektywność zbrojenia włóknami jest wypadkowym wspólnego działania następujących czynników: [a] mikrostruktura i trwałość matrycy, [b] wytrzymałość zastosowanych włókien oraz [c] wiązanie między włóknami i matrycą (15). W przypadku badanych w tej pracy tynków włókna celulozowe

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [4]$$

where D_a is the diffusion coefficient of water vapor in the air.

3. Results and discussion

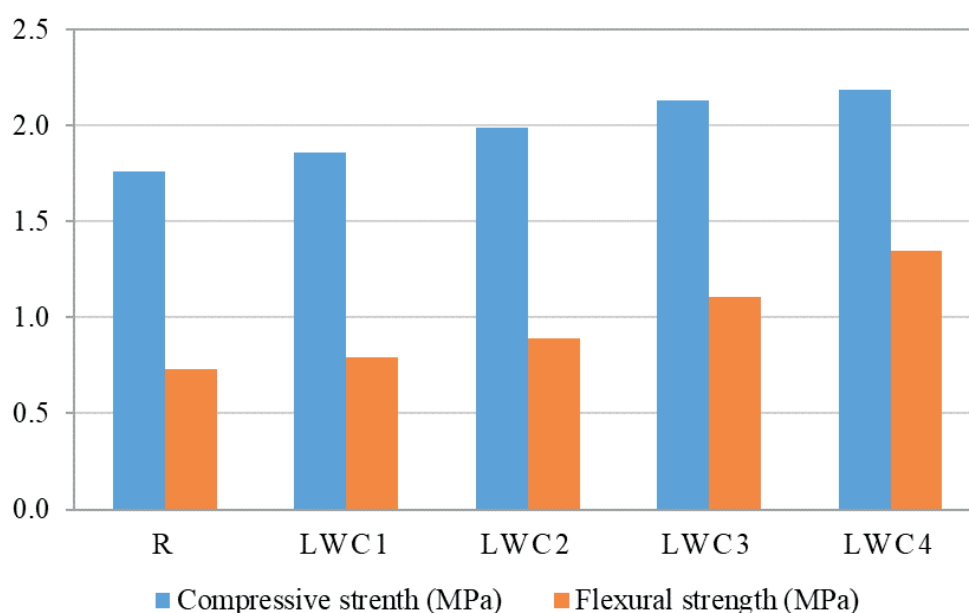
3.1. Basic physical properties

The basic physical properties of studied plasters are given in Table 3. The obtained results show a minor decrease in bulk density in line with the increased amount of applied cellulose fibers. However, the observed changes affected the material structure only slightly and did not result in a significant increase of total open porosity. The reference total open porosity of 37.6% increased only to 40.9% for the LWC4 mixture. The matrix density was affected only marginally by the presence of fibers and no trend was found.

3.2. Mechanical properties

The results of the mechanical performance of studied plasters are given in Fig. 3. It was found out that the applied cellulose fibers could improve the compressive strength despite of the increase of total open porosity. The compressive strength increased from the reference 1.76 MPa to 2.19 MPa when 4% by mass of cellulose fibers were applied. In the case of flexural strength the positive effect of cellulose fibers was obviously more pronounced; it increased from 0.73 MPa for the reference plaster to 1.35 MPa for LWC4.

Contrary to the research work of Senff et al. (12), the achieved results exhibited a positive correlation



Rys. 3. Właściwości mechaniczne badanych tynków

Fig. 3. Mechanical properties of studied plasters

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNE TYNKÓW

THERMAL PROPERTIES OF PLASTERS

Sample Próbka	λ W/(mK)	a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
R	0.55	0.36
LWC1	0.54	0.36
LWC2	0.53	0.35
LWC3	0.51	0.33
LWC4	0.49	0.31

wzmacniały matrycę wapienno-pucolanową, co wskazywało na wzajemny, pozytywny wpływ czynników [a], [b] i [c]. Wydaje się, że postrzępiona powierzchnia zastosowanych włókien celulozowych [rysunek 2] polepszyła trwałe wiązanie włókien z matrycą.

3.3. Właściwości termiczne

Przewodność i dyfuzyjność cieplną podano w tablicy 4. Zaobserwowano jedynie niewielkie zmiany, które można przypisać zmianom porowatości całkowitej. Przewodność cieplna spadła z 0,55 W / mK dla tynku referencyjnego do 0,49 W / mK dla próbki LWC4. Dyfuzyjność cieplna wykazała podobną zależność. Dodatek włókien celulozowych nie wpłynął zatem w większym stopniu na właściwości cieplne projektowanych tynków. Podobną zależność między ilością dodanych włókien oraz właściwościami termicznymi opisali Boumhaout i in. (16), którzy badali wpływ włókien z palmy daktylowej na termomechaniczne właściwości zapraw.

3.4. Właściwości wilgotnościowe

Dodatek włókien celulozowych nie wpływa w większym stopniu na właściwości transportu wody [tablica 4]. Zarówno współczynnik absorpcji wody, jak i dyfuzyjność wilgoci zmieniają się tylko nieznacznie. Zmiany można przypisać wzrastającej porowatości całkowitej [tablica 3]. Głównym powodem była prawdopodobnie hydrofobizacja zastosowanych włókien celulozowych. W związku z tym wyniki uzyskane w niniejszym artykule były wprost sprzeczne z badaniami Senffa i in. (12), którzy opisali znaczny wzrost wskaźników absorpcji wody i kapilarności w przypadku nieprzetworzonych włókien celulozowych. Podobnie Nindiyasari i in. (10) oraz Dalmy i in. (17) podali, że zastosowanie nieprzetworzonych

Tablica 6 / Table 6

DYFUZYJNOŚĆ PARY WODNEJ W TYNKACH

WATER VAPOR TRANSMISSION PROPERTIES OF PLASTERS

Mixture Mieszanka	μ (-)	D m^2/s
R	13.21	1.77E-06
LWC1	12.87	1.81E-06
LWC2	12.36	1.84E-06
LWC3	11.49	2.01E-06
LWC4	11.12	2.04E-06

Tablica 5 / Table 5

TRANSPORT CIEKŁEJ WODY W BADANYCH TYNKACH

WATER TRANSPORT PROPERTIES OF PLASTERS

Mixture Mieszanka	A $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$	K_{app} m^2/s
R	0.163	4.93E-07
LWC1	0.165	4.99E-07
LWC2	0.17	5.18E-07
LWC3	0.169	5.04E-07
LWC4	0.172	5.17E-17

between mechanical parameters and dosage of cellulose fibers. The explanation can be found in the hydrophobization of the fibers applied in this paper and the consequent lower water/binder ratio. The effectiveness of the fiber reinforcement depends on the synergy between the following variables: (a) the structure and stability of material matrix, (b) the strength of the applied fibers, (c) the bonds between fibers and matrix (15). In the case of plasters analyzed in this paper, the cellulose fibers exhibited a reinforcing capability in the lime-pozzolanas matrix, which indicated the desired synergy. Apparently, the ragged surface of applied cellulose fibers (Fig. 2) was responsible for the achievement of firm bonds between fibers and matrix.

3.3. Thermal properties

Thermal conductivity and thermal diffusivity are given in Table 3. Only minor changes were observed which can be ascribed to the changes in total open porosity. Thermal conductivity decreased from 0.55 W/mK for the reference plaster to 0.49 W/mK for LWC4, thermal diffusivity followed a similar trend. The incorporation of cellulose fibers did not thus affect the thermal properties of designed plasters to a greater extent. Similar relationship between the amount of used fibers and thermal properties was described by Boumhaout et al. (16), who studied the effect of date palm fibers on thermomechanical properties of mortar.

3.4. Hygric properties

The incorporation of cellulose fibers did not affect the water transport properties in a significant way (Table 4). Both water absorption coefficient and apparent moisture diffusivity changed only slightly; the changes can be attributed to the increasing of total open porosity (Table 3). Apparently, the main reason was the hydrophization of the applied cellulose fibers. Therefore, the results obtained in this paper were in direct contradiction with the research of Senff et al. (12), who described a significant increase of water absorption and capillarity indexes when untreated cellulose fibers were used. Similarly, Nindiyasari et al. (10) or Dalmy et al. (17) reported that the application of untreated cellulose fibers substantially modified the hygric behaviour of plasters. The effect of applied fibers on the water vapor transmission properties (Table 5) was similar as in the case of liquid water transport properties; the differences were mainly due to the increased total open porosity (Table 3).

włókien celulozowych znacznie zmieniło właściwości wilgotnościowe tynków. Wpływ zastosowanych włókien na transport pary wodnej [tablica 6] był podobny jak w przypadku transportu wody [tablica 5], różnice wynikały głównie ze zwiększonej porowatości całkowitej [tablica 3].

5. Wnioski

W artykule przedstawiono doświadczalną analizę wpływu hydrofobizowanych włókien celulozowych do zbrojenia tynków wapiennych z dodatkiem popiołów lotnych ze spalania odpadów drzewnych na ich właściwości. Pomiar podstawowych właściwości fizycznych, termicznych i właściwości wilgotnościowych projektowanych tynków pokazały wpływ włókien celulozowych jako ich naturalnego zbrojenia. Zastosowanie włókien nie wpłynęło niekorzystnie na urabialność świeżych mieszanek, co można przypisać ich hydrofobizacji. Nie stwierdzono pęcznienia podczas przygotowywania mieszanki, co było opisywane przez innych autorów. Ostatecznie zastosowane włókna celulozowe wykazywały jedynie niewielki wpływ na podstawowe właściwości fizyczne stwardniałych mieszanek, a właściwości cieplne nawet nieznacznie się polepszyły, co jest efektem ubocznym większej porowatości całkowitej. Najbardziej wyraźnym zmianom uległy właściwości mechaniczne badanych tynków, które poprawiały się wraz ze wzrostem dodatku włókien celulozowych. Największą poprawę zaobserwowano w przypadku wytrzymałości na zginanie.

Podsumowując, zastosowanie włókien celulozowych jako zbrojenia matrycy wapienno-pucolanowej ogólnie przyniosło pozytywne efekty. Najważniejsze jest, że z powodzeniem zaprojektowano mieszanki przyjaznych dla środowiska tynków, które można wykorzystać do renowacji budynków zabytkowych. Kolejny korzystny wynik to wykorzystanie naturalnych składników, którymi można zastąpić, niezgodne w kontekście historycznym, materiały nowoczesne.

Podziękowania

Badania zostały wsparte przez Czeską Fundację Nauki, w ramach projektu nr 18-03997S.

Literatura / References

- D. Barnat-Hunek, R. Siddique, B. Klimek, M. Franus, The use of zeolite, lightweight aggregate and boiler slag in restoration renders, *Construction and Building Materials*, 142, 162-174, (2017).
- E. Vejmelková, P. Máca, M. Keppert, P. Rovnaníková, R. Černý, Commercial renovation renders: mechanical, hygric, thermal and durability properties, *Cement Wapno Beton*, 16(5), 288-296, (2011).
- G. Di Bella, V. Fiore, G. Galtieri, C. Borsellino, A. Valeza, Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene), *Construction and Building Materials*, 58, 159-165, (2014).
- W. Roszczyniański (jr), P. Stepien, E. Tkaczewska, W. Roszczyniański, The reliability of pozzolanic activity assessment methods in testing different fly ashes, *Cement Wapno Beton*, 5, 323-333, (2014).
- C. Zhu, J. X. Zhang, J. H. Peng, W. X. Cao, J. S. Liu, Physical and mecha-

5. Conclusions

An experimental analysis of the effect of hydrophobized cellulose fibers incorporated into lime plasters with waste wood fly ash admixture was presented. The measurements of basic physical, mechanical, thermal, and hygric properties of the designed plasters revealed the potential of cellulose fibers as a natural reinforcement. Their application did not affect negatively the workability of fresh mixtures which could be attributed to their hydrophilization; swelling during mixture preparation described by other authors was not observed. Consequently, the incorporated cellulose fibers exhibited only minor impact on basic physical and hygric properties of hardened mixes, the thermal properties were even slightly improved as a side effect of the higher total open porosity. The most distinct changes were observed in the mechanical performance of the developed plasters which increased with the increasing dosage of cellulose fibers; the most remarkable improvement was achieved for flexural strength.

In a summary, the application of cellulose fibers in the lime-pozzolanas matrix in this paper brought along overall positive effects. The successful design of environmental friendly durable plasters, which can be utilized for the renovation of historical buildings, can be considered as the most important outcome. Another positive factor presents the utilization of natural components, which can replace modern materials that are not in line with the historical context.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under project No. 18-03997S.

nical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers, *Construction and Building Materials*, 163, 695-705, (2018).

R. Prasad, V. V. P. Kumar, A study of concrete strength and durability by mineral additives optimization in conventional low, medium and high grades concretes, *Cement Wapno, Beton*, 22(4), 299-310, (2017).

F. Iucolano, D. Caputo, F. Leboffe, B. Liguori, Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers, *Construction and Building Materials*, 99, 184-191, (2015).

J. Fořt, M. Čáchová, E. Vejmelková, R. Černý, Mechanical and hygric properties of lime plasters modified by biomass fly ash, In: 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering: Construction - The Formation of Living Environment, Moscow, 25.-27.4. IOP Conference Series, 365(3), 032059, (2018).

I. Palomar, G. Barluenga, A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers, *Construction and Building Materials*, 160, 136-144, (2018).

F. Nindiyasari, E. Griesshaber, T. Zimmermann, A. P. Manian, C. Randow, R. Zehbe, L. Fernandez-Diaz, A. Ziegler, C. Fleck, W. W. Schmahl, Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite, *Journal of Composite Materials*, 4, (2015).

J. Hroudova, A. Korjenic, J. Zach, M. Mitterboeck, Development of a thermal insulation plaster with natural fibres and the investigation of its heat and moisture behavior, *Bauphysics*, 39(4), 261-271, (2017).

L. Senff, G. Ascensao, V. M. Ferreira, M. P. Seabra, J. A. Labrincha, Development of multifunctional plaster using nano-TiO₂ and distinct particle size cellulose fibers, *Energy and Buildings*, 158, 721-735, (2018).

M. K. Kumaran, Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 22, 349-355, (1999).

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).

A. Zaborski, Constitutive model for restricted compression of fiber concrete, *Cement Wapno Beton*, 21(1), 46-56, (2016).

M. Boumhaout, L. Boukhattem, H. Hamdi, B. Benhamou, F. A. Nouh, Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibres mesh, *Construction and Building Materials*, 135, 241-250, (2017).

P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krauz, Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum, *Journal of Materials Science*, 43, 793-803, (2010).