

Reologia zaczynów cementowych z dodatkiem wapna hydratyzowanego i eterem celulozy, a wybrane właściwości zapraw tynkarskich

The rheology of cement pastes with the addition of hydrated lime and cellulose ether in comparison with selected properties of plastering mortars

Edyta Spychał

Kielce University of Technology, Kielce, Poland

e-mail: espychal@tu.kielce.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zaczynów i zapraw cementowych modyfikowanych wapnem i eterem celulozy. Badania zaczynów obejmowały wyznaczenie właściwości reologicznych: granicy płynięcia i lepkości plastycznej. Dla zapraw określono gęstość objętościową, zawartość powietrza, skurcz, współczynnik retencji wody, zbadano ich proces wiązania i twardnienia przy użyciu metody ultradźwiękowej, uzupełniony o badanie wytrzymałości na ściskanie. Wyniki badań potwierdziły korzystny wpływ wapna hydratyzowanego i dodatku eteru celulozy na właściwości świeżej zaprawy tynkarskiej. Dodatek eteru celulozy powodował zwiększenie współczynnika retencji wody o co najmniej 10%, w porównaniu z zaprawami bez eteru. Wpływ eteru celulozy na retencję wody w zaprawie był większy niż wpływ wapna hydratyzowanego. Zarówno eter celulozy oraz wapno hydratyzowane powoduje wydłużenie wiązania i twardnienia, wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, przy jednoczesnym zmniejszeniu odkształceń skurczowych.

Słowa kluczowe: Cement portlandzki, Etery celulozy, Wapno hydratyzowane, Zaprawa tynkarska, Właściwości reologiczne

Summary

The article presents the results of the investigation of pastes and cement mortars, modified with lime and cellulose ether. Rheological measurements of pastes included yield stress and plastic viscosity. For mortars, bulk density, air content, shrinkage and water retention were determined. The setting and hardening process was investigated by the ultrasonic method, with the compressive strength measurements. The test results confirmed the beneficial effect of hydrated lime and cellulose ether addition on the properties of fresh plaster. The addition of cellulose ether increased the water retention coefficient by at least 10%, compared to mortars without cellulose ether. The effect of cellulose ether on water retention in the mortar was more significant than that of hydrated lime. Both cellulose ether and/or hydrated lime causes setting retardation as well as decrease of the hardening rate. Compressive strength is decreased while shrinkage deformation is reduced.

Keywords: Cellulose ethers, Hydrated lime, Plasters, Portland cement, Rheological properties

1. Wprowadzenie

Gotowe suche mieszanki do sporządzania zapraw na budowie są coraz częściej stosowane w budownictwie mieszkaniowym. Zwiększa się dzięki temu wydajność robót budowlanych, eliminowane są błędy technologiczne, zapewniając tym samym lepszą jakość wykończenia. Przemysłowe zaprawy to mieszaniny wielu składników, które powinny być tak zaprojektowane, aby materiał miał dobre właściwości, zarówno w stanie świeżym jak i stwardniałym.

1. Introduction

The dry pre-mixed compositions for mortars preparation at the construction site are being increasingly used in civil engineering. Owing to this, the efficiency of construction works is increasing and technological errors are being eliminated, thereby providing good quality materials. Dry pre-mixed mortars incorporate a large number of components, which should be appropriately proportioned, so that the building material has good properties.

Odpowiednio dobrane surowce powinny zapewnić między innymi dobrą urabialność, łatwość nakładania oraz obróbki, odporność na powstawanie rys skurczowych i dobrą przyczepność. Powszechnie stosowanym materiałem, poprawiającym właściwości plastyczne zaprawy, jest wapno hydratyzowane. Dostosowanie jakości zapraw do wymagań współczesnego przemysłu budowlanego wymaga także stosowania domieszek, które poprawiają właściwości techniczne produktu. Etery celulozy są jednymi z najczęściej stosowanych domieszek polimerowych, w technologii suchych zapraw (1-4). Ich wpływ na właściwości mechaniczne, mikrostrukturę, czy proces wiązania, pomimo powszechnego stosowania, nie został jednak jednoznacznie przedstawiony w literaturze. W wielu publikacjach można znaleźć sprzeczne informacje na ten temat (5-8). Wynikać to może z szerokiej gamy tych domieszek, różniących się składem i właściwościami, których szczegóły chronione są zwykle tajemnicą handlową. Etery celulozy stosowane są głównie w celu zmiany lepkości, urabialności i zwiększenia zdolności retencji wody w zaprawie (1,3,4,9). Odgrywają one ważną rolę w technologii suchych zapraw, pomimo że ich udział w składzie zapraw jest niewielki - zwykle nie przekracza 0,02-0,7% masy suchego materiału.

Proces wytwarzania eterów celulozy jest złożony i polega na chemicznej obróbce drobno zmielonej celulozy, o dużej czystości. Czysta celuloza jest białą, nierozpuszczalną w wodzie substancją. W procesie produkcji zostaje ona zmielona i poddana działaniu wodorotlenku sodu, co powoduje przejście w rozpuszczalną w wodzie alkalicelulozę. Alkaliceluloza poddawana jest procesowi eteryfikacji, którego produktem są właśnie etery celulozy. Zastosowanie dodatków oraz zmiany warunków eteryfikacji warunkują powstanie wielu odmian eterów celulozy, które różnią się rodzajem grup funkcyjnych, stopniem eteryfikacji, rozdrobnieniem, szybkością rozpuszczania w wodzie i lepkością (1,3). Do najczęściej stosowanych eterów celulozy należą: hydroksypropylometyloceluloza [HPMC] oraz hydroksyetylometyloceluloza [HEMC].

Ze względu na wiele rodzajów zapraw murarskich, tynkarskich czy klejowych oraz duże zróżnicowanie stosowanych w budownictwie eterów celulozy, odpowiedni dobór domieszki do poszczególnych zastosowań jest ważny i wymaga dużej praktyki. Ocena zakresu przydatności domieszek chemicznych w zastosowaniach praktycznych wymaga ciągle dodatkowych badań. Niewłaściwy dobór eteru celulozy może wpłynąć na utratę korzystnych właściwości reologicznych, czy powodować zbrzydlanie się składników zaprawy (1). Ponadto brak jest informacji jak domieszka ta wpływa na właściwości zapraw, zawierających w swoim składzie wapno. Kiedy zaprawę nakłada się na podłoże, część wody wchłaniana jest przez to podłoże. Chłonność podłoża, zmienne warunki klimatyczno-wilgotnościowe, a także metoda tynkowania, mają duży wpływ na właściwy dobór domieszki.

Przedstawione w pracy wyniki doświadczeń dotyczą wpływu wodorotlenku wapnia i eteru celulozy na wybrane właściwości cementowej zaprawy tynkarskiej w stanie plastycznym, a także po związaniu.

The properly selected components should provide, i.a. good workability and adhesion, ease of applying and workability as well as shrinkage resistance and good adhesion. Lime is a commonly used material that improves the plastic properties of mortars. Adjusting the quality of mortars to meet the requirements of today's construction industry requires also the application of admixtures that improve the properties of the product. Cellulose ethers are among the most commonly used polymer admixtures in dry mortar technology (1-4). Despite being widely used, their impact on mechanical properties, microstructure, or the setting process has not been clearly described in the literature. Controversial data on this topic can be found in many publications (5-8). This may result from a wide variety of admixtures of various properties, the ways of etherification as well as from trade secrets of companies that are engaged in the production and sale of both cellulose ethers and mortars. Cellulose ethers are mainly used to change the viscosity, workability and increase the ability to retain water in the mortar (1,3,4,9). They play an important role in the technology of dry mortars, although their content is low – usually not exceeding 0.02 – 0.7% of dry substance.

The production process of cellulose ethers is complex and consists of chemical processing of finely ground cellulose, of high purity. Clear cellulose is a white, water-insoluble substance. In the production process, it is ground, then treated with sodium hydroxide, finally giving water-soluble alkali cellulose. Alkali cellulose undergoes etherification reactions with various reagents, yielding cellulose ethers. The use of admixtures and the changing conditions of cellulose etherification enable the formation of many types of ethers, which vary with respect to the functional group type, etherification degree, fragmentation, water dissolution rate and viscosity (1,3). Among the most commonly used cellulose ethers are hydroxypropyl methylcellulose [HPMC] and hydroxyethyl methylcellulose [HEMC].

Due to many types of mortars, plastering mortars or adhesive mortars and large variety of cellulose ethers used in the civil engineering, a proper selection of admixtures for a particular application is important and requires a lot of practice and needs still further research. A wrong selection of cellulose ether may result in the loss of beneficial rheological parameters, or cause lumping of mortars components (1). Moreover, there is no knowledge of how this admixture is influencing on the properties of mortars with lime. When the mortar is applied to the substrate, water may be absorbed by this substrate. Absorption by the substrate, climatic conditions, and plastering method, have a big impact on the proper admixture selection.

The results presented in the article refer to the impact of calcium hydroxide and cellulose ether on the selected properties of the plastering cement mortar in plastic state, as well as after setting.

2. Materials and methods

The investigation program included the evaluation of selected properties of plastering mortars and pastes, with the addition of

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY ZAPRAW

MIX PROPORTIONS OF MORTARS

zaprawa mortar	spoiwo (cement+wapno hydratyzowane) binder (cement+hydrated lime)	kruszywo drobne / fine aggregate		eter celulozy cellulose ether	woda water
		0,1+0,5mm	0,2+0,8mm		
	g	g		g	g
Z0	96	437	467	-	195
Z1	96	437	467	0,50	148
Z2	96	437	467	3,00	220
Z3	72+24	437	467	1,75	175
Z4	48+48	437	467	0,50	176
Z5	48+48	437	467	3,00	225

2. Materiały i metody

Program badań obejmował ocenę wybranych właściwości zapraw tynkarskich i zaczynów z dodatkiem wapna hydratyzowanego oraz polimerową domieszką w postaci eteru celulozy. W tym celu przygotowano receptury różniące się w swoim składzie rodzajem i proporcjami spoiwa, a także ilością domieszki. Skład poszczególnych mieszanek podano w tablicy 1.

Do badań zastosowano następujące surowce:

- cement portlandzki - CEM I 42,5R,
- wapno hydratyzowane, którego skład podano w tablicy 2,
- piasek kwarcowy - dwie frakcje: 0,1+0,5 mm i 0,2+0,8 mm,
- domieszkę polimerową w postaci eteru celulozy.

Zastosowany w badaniach eter celulozy to hydroksyetylometyloceluloza o lepkości 25 000 mPa·s, o małym stopniu modyfikacji chemicznej. Domieszka ta ma postać drobnego białego proszku [$< 0,063$ mm], pH 1% jej roztworu w wodzie wynosi 7,0.

Na rysunku 1 pokazano budowę łańcucha tej domieszki.

Stosunek wodno-spoiwowy został tak dobrany, aby uzyskać jednokąwą konsystencję zapraw o rozplywie 165 mm, mierzoną za pomocą stolika rozplywu zgodnie z normą PN-EN 1015-3:2000. Każdą próbkę przygotowano w ten sam sposób - do wymieszanych ze sobą suchych składników dodawano odpowiednią ilość wody tak, aby uzyskać wymaganą konsystencję. Wszystkie mieszanki sporządzono w klimatyzowanym laboratorium, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $65 \pm 5\%$, z zachowaniem stałego czasu mieszania zapewniającego prawidłowe uśrednienie badanego materiału [90 s mieszania + 30 s przerwy + 90 s mieszania].

Badania zawartości powietrza i gęstości objętościowej świeżych zapraw wykonano zgodnie z normami PN-EN 1015-6:2000+A1:2007 oraz PN-EN 1015-7:2000. Współczynnik retencji wody WRW oznaczono na podstawie metody zawartej w publikacji (10). Badanie polegało na określeniu procentowej zawartości wody, która pozostaje po krótkotrwałym odsysaniu

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY WAPNA HYDRATYZOWANEGO

CHEMICAL COMPOSITION OF HYDRATED LIME

Ca(OH) ₂	CaO+MgO	MgO	CO ₂	SO ₃
%	%	%	%	%
90,37	95,17	0,80	1,86	0,41

hydrated lime and polymer admixture of cellulose ether. For this purpose recipes with different kinds and proportions of binder, as well as the content of the admixture, were prepared. The mix proportions of particular mortars are presented in Table 1.

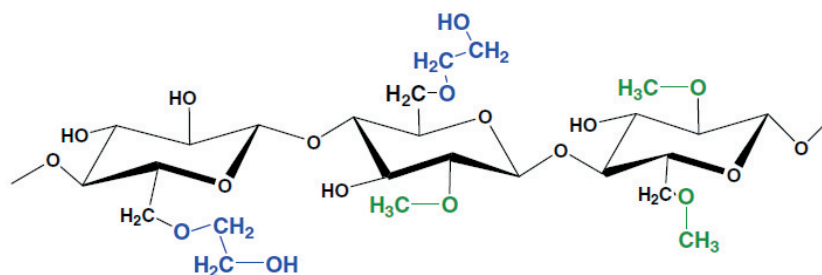
The following raw materials were used:

- ordinary Portland cement - CEM I 42.5R,
- hydrated lime, which composition is given in Table 2,
- quartz sand - two fractions: 0.1 mm ÷ 0.5 mm and 0.2 mm ÷ 0.8 mm,
- cellulose ether

Cellulose ether used in tests is the hydroxyethyl methylcellulose, with viscosity of 25000 mPa·s, of low degree of chemical modification. This admixture has the form of very fine white powder [< 0.063 mm], pH of its 1% solution in water is 7.0.

Figure 1 shows the structure of the polymeric chain of this admixture.

The water to binder ratio was selected to obtain the constant consistency of 165 mm flow measured with the flow table, according



Rys.1. Budowa cząsteczki hydroksyetylometylocelulozy (6)

Fig.1. Structure of the hydroxyethyl methylcellulose (6)

wody przez bibułę filtracyjną, w określonych warunkach i w określonym czasie. Pomiarów wykonywano po 10, 30 i 60 minutach, oznaczając tą wartość jako WRW10, WRW30 i WRW60. Uzyskane wyniki badań dają informacje dotyczące zachowania zaprawy, pozostającej w kontakcie z materiałem o dużych zdolnościach adsorpcyjnych.

Przebieg procesu wiązania i twardnienia badano przy użyciu metody ultradźwiękowej. Badanie polegało na rejestracji prędkości fali ultradźwiękowej, której wartość ulegała zmianie w trakcie wiązania materiału. Z przygotowanej świeżej zaprawy, bezpośrednio po wymieszaniu wszystkich składników, pobierano próbkę materiału, którą umieszczano na cały czas trwania badania w próbniku. Wyniki pomiarów rejestrowano automatycznie co 60 sekund, przez 48 godzin. Dla każdej z zapraw podano maksymalną prędkość fali ultradźwiękowej zmierzoną po 48 godzinach. Jako okres indukcji przyjmuje się czas od początku pomiarów do momentu wyraźnej zmiany prędkości fali ultradźwiękowej. Badanie przy użyciu metody ultradźwiękowej zostało uzupełnione o oznaczenie odkształceń skurczowych po 28 dniach oraz wytrzymałości na ściskanie po 365 dniach dojrzewania, wykonane zgodnie z normami PN-EN 1015-11:2001 oraz PN-85/B-04500. Dostosowano warunki dojrzewania próbek do takich, w jakich prowadzone było doświadczenie metodą ultradźwiękową. Za ostateczny wynik przyjęto średnią z trzech pomiarów [skurcz] lub dziewięciu pomiarów [wytrzymałość na ściskanie], dla każdej z zapraw.

Przydatność praktyczną badanych zapraw określono na podstawie subiektywnej oceny specjalisty. W tym celu została wymurowana ściana z cegły wapienno-piaskowej. Na zagruntowaną powierzchnię narzucano przygotowane tynki. Ocena przebiegała dwuetapowo. Pierwszego dnia badań oceniano - konsystencję, lepkość, łatwość tynkowania, przyczepność zaprawy do podłoża, ocenę ewentualnych trudności. Drugiego dnia sprawdzano podatność tynku na obróbkę [wygładzanie, korekty powierzchni]. Każdy etap doświadczeń oceniano w skali 1-10. Dodatkowo uzyskano informacje na temat możliwej metody aplikacji poszczególnych zapraw tynkarskich.

Pomiary reologiczne zaczynów przeprowadzono przy użyciu reometru Viskomat NT. Do opisu właściwości reologicznych zastosowano model Bingham, w zmodyfikowanej formie umownej, w której g [Nmm] i h [Nmm·s] to wielkości opisujące odpowiednio granicę płynięcia i lepkość plastyczną (11,12). Właściwości reologiczne zaczynów określono na podstawie krzywych płynięcia dla malejących szybkości ścinania, po 10 i 60 minutach.

3. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie wyników podanych w tablicy 1 można zauważyć, że ilość wody potrzebna do uzyskania założonej konsystencji jest bardzo zróżnicowana i znajduje się w przedziale od 148 g do 225 g. Ilość wody w przypadku zaprawy wzorcowej wynosi 195 g. Należy podkreślić, że wygląd próbki Z0 i jej konsystencja różniły się znacznie od pozostałych zapraw. Ulega ona szybkoj

to the PN-EN 1015-3:2000 standard. Each sample was prepared in the same manner – an appropriate amount of water was added to the mixed dry ingredients so as to obtain the required consistency. All mixtures were prepared in an air-conditioned laboratory at the temperature of $20 \pm 2^\circ \text{C}$ and at a relative humidity of $65 \pm 5\%$, maintaining constant stirring time, which ensured the correct averaging of the tested material: 90 s mechanical stirring + 30 s pause + 90 s mechanical stirring.

Determination of air content and bulk density of fresh mortars were carried out according to the PN-EN 1015-6:2000+A1:2007 and PN-EN 1015-7:2000 standards. Water Retention Value [WRV] was determined, basing on the procedure included in (10). The test consisted of determination of the water percentage that remains after a short suction of water through a filter paper, under specified conditions in a defined period of time. Measurements were made at 10, 30 and 60 minutes, marking this parameter as WRV10, WRV30, and WRV60. The research results obtained provide the information on the behaviour of mortar in contact with a material having high adsorption capacity.

The setting and hardening process was determined using the ultrasonic wave velocity method. The study was based on ultrasonic wave velocity recording, the value of which changed as the material was setting. From the freshly prepared mortar, immediately after all the components had been mixed, a sample of the material was collected, which was afterward placed in the sampler for the duration of the test. The results of the measurements were recorded automatically every 60 seconds for a continuous period of 48 hours. A maximum ultrasonic wave velocity after 48 hours were given for each mortar. The time lasting from the beginning of the measurement until a clearly visible ultrasonic wave velocity change is assumed as the period of induction. The test carried out with the ultrasonic method was completed with the designation of shrinkage deformation after 28 days and compressive strength test after 365 days of curing, according to the PN-EN 1015-11:2001 and PN-85/B-04500 standards, adjusting the samples maturing conditions to the same level, as in the ultrasonic method test. The mean of three for shrinkage and nine for compressive strength measurements for each of the mortars, were assumed to be the ultimate results.

The applicability of the investigated mortars was estimated on the basis of the subjective rating by a specialist - an expert plasterer. For this purpose, a wall of sand-lime brick was built and the primed surface was coated with plaster. The rating proceeded in two stages. On the first day of the investigation consistency, viscosity, the ease of plastering, the adhesion of the mortar to the substrate and the assessment of potential difficulties were evaluated. On the second day, the plaster susceptibility to treatment i.e. smoothing and surface correction was checked. Each stage of the study was evaluated on a scale of 0-10. In addition, information on the possible method of application of individual plastering mortars was obtained.

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ ZAPRAW

RESULTS OF MORTARS TESTS

Właściwości / Propertie	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
zawartość powietrza / air content, %	8,5	17,5	40,0	34,0	25,0	36,0
gęstość objętościowa / bulk density, kg/m ³	1950	1670	1210	1330	1570	1240
skurcz po 28 dniach / shrinkage after 28 days, mm/m	1,1	0,46	0,53	0,42	0,48	0,54

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ ZACZYNÓW

RESULTS OF PASTES TESTS

Właściwości / Properties	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
lepkość plastyczna h po 10 min / plastic viscosity h after 10 min, Nmm·s	0,43	2,17	10,3	12,0	2,60	20,4
lepkość plastyczna h po 60 min / plastic viscosity h after 60 min, Nmm·s	0,43	2,13	13,6	12,2	2,43	19,2
granica płynięcia g po 10 min yield stress g after 10 min, Nmm	0,09	0,48	11,8	12,1	1,31	31,8
granica płynięcia g po 60 min yield stress g after 60 min, Nmm	0,08	0,35	14,4	11,0	1,07	26,9

sedymantacji, ma braki spójności i plastyczności, i konsystencję „mokrego piasku”. Zaprawy zawierające w swoim składzie eter celulozy w ilości 3,0 g miały większe zapotrzebowanie na wodę. Zwiększenie dodatku eteru celulozy wiązało się z reguły ze zwiększeniem wodożądności zaprawy. Z przeprowadzonych badań wynika, że nie zawsze zależność ta jest spełniona, co można stwierdzić na przykładzie zapraw Z1, Z3 i Z4. Zaprawy te potrzebują mniej wody do uzyskania założonej konsystencji, w porównaniu z zaprawą wzorcową. Przyczyn tego zjawiska można upatrywać w oddziaływaniu domieszki na zaczyn cementowy. Zaczyn z dodatkiem eteru celulozy ma większą lepkość, a co za tym idzie większą kohezję i zdolność do łączenia ziaren piasku. Tworząca się wokół ziaren piasku warstwa zaczynu zmniejsza tarcie, ułatwiając przemieszczanie się ziaren składników zaprawy względem siebie. Ogranicza to segregację zaprawy.

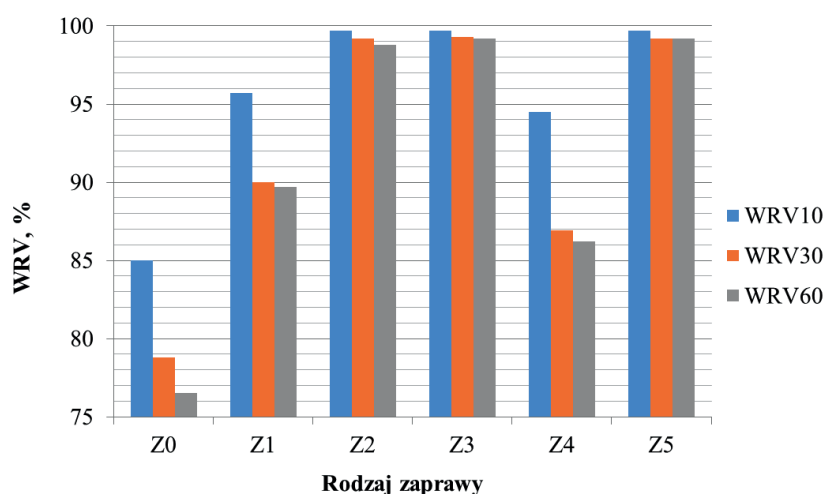
Na podstawie wyników badań właściwości zapraw w stanie plastycznym [tablica 3] można stwierdzić, że zaprawa wzorcową Z0 wykazuje największą gęstość objętościową i najmniejszą zawartość powietrza. Dodanie eteru celulozy i zamiana części spoiwa na wapienne, powodują wzrost zawartości powietrza w mieszance, w skrajnym przypadku prawie pięciokrotnie [zaprawa Z2]. Powoduje to znaczne zmniejszenie gęstości objętościowej, co wpływa korzystnie na mniejsze zużycie materiału w trakcie tynkowania.

W oparciu o dane przedstawione na rysunku 2, można stwierdzić, że wszystkie modyfikowane zaprawy mają współczynnik retencji wody, mierzony po 10 minutach, większy niż 90%. Największy wskaźnik WRW, większy od 98%, w ciągu całego badania uzyskały zaprawy Z2, Z3 i Z5, modyfikowane eterem celulozy w ilości 1,75 g i 3,0 g. Dla zapraw, w których domieszka dodana była w ilości 0,5 g wskaźnik maleje w czasie, co świadczy o mniejszej skutecz-

Rheological measurements were carried out using the Viskomat NT rheometer. Bingham model equation was used in the rheological tests in contractual form, where g [Nmm] and h [Nmm·s] are parameters describing respectively yield stress and plastic viscosity (11,12). Rheological properties of the slurries were determined on the basis of the flow curves for decreasing shear rates, after 10 and 60 minutes.

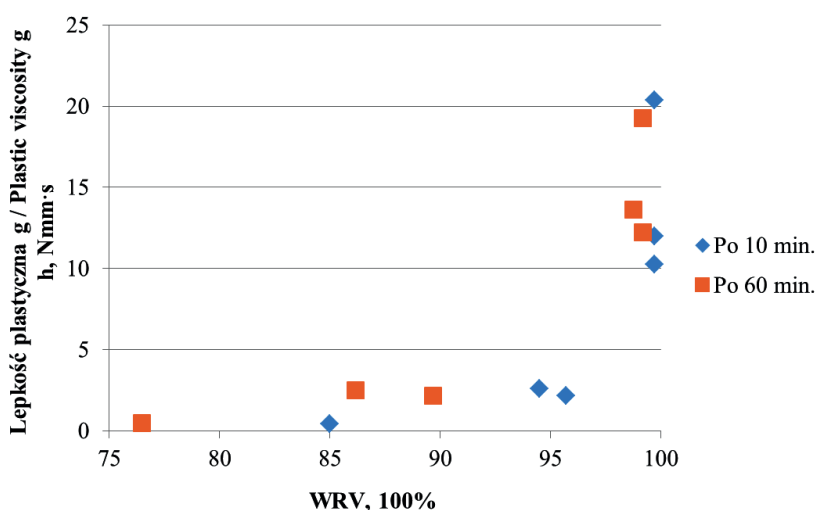
3. Results and analysis.

According to the values given in Table 1, it becomes clearly noticeable, that the water amount needed to obtain the desired consistency is strongly variable and is in the range from 148 g to 225 g. The water content in the case of the control mortar is 195 g. It has to be pointed, that the appearance and consistency of the Z0 sample were significantly different from other mortars. It has high sedimentation, lacks in cohesion and plasticity and has



Rys. 2. Wyniki badań retencji wody zapraw Z0+Z5 po 10, 30 i 60 minutach

Fig. 2. Tests of water retention in time for mortars Z0+Z5



Rys. 3. Zależność lepkości plastycznej zaczynów od wskaźnika WRW zapraw

Fig. 3. Relationship of plastic viscosity for pastes and WRV index for investigated mortars

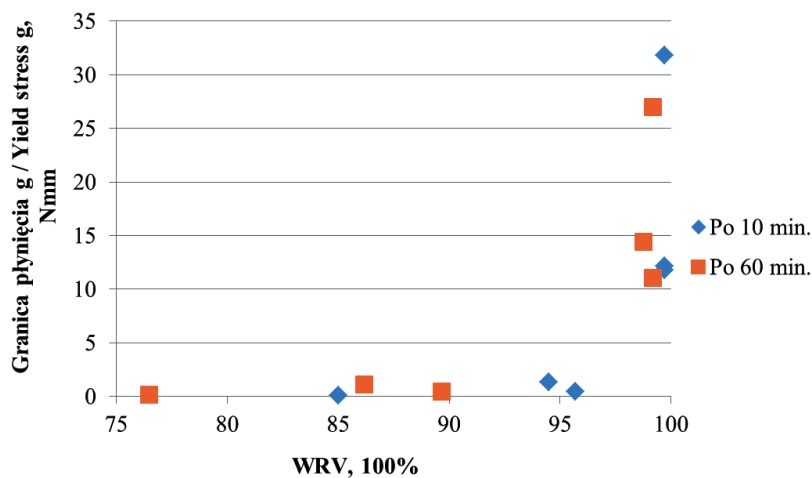
ności eteru celulozy, dodanego w takiej ilości. Zaprawa wzorcowa ma znacznie gorszą zdolność do retencji wody. Świadczy to o korzystnym wpływie eteru celulozy na zdolność do retencji wody w zaprawie. Im większa ilość tej domieszki w składzie zaprawy, tym większa retencja wody, co jest korzystne. Biorąc pod uwagę klasyfikację podaną przez Brumauda i innych (9) wszystkie modyfikowane zaprawy mają dużą zdolność do retencji wody, największej w 3-stopniowej skali. Duży wskaźnik WRV jest szczególnie ważny w przypadku nakładania materiału na podłoże o dużej chłonności, czy w trakcie tynkowania, w czasie zmiennych warunków temperaturowo-wilgotnościowych.

Dodatkowe informacje można uzyskać zestawiając wyniki pomiarów reologicznych [tablica 4] z wynikami badań retencji wody, co obrazują rysunki 3 i 4. Zaprawy z dodatkiem eteru celulozy w ilości 1,75 g i 3,0 g mają większą lepkość, która dodatkowo zwiększa się w czasie, co wpływa na większy wskaźnika WRV utrzymujący się na poziomie większym od 99%, w trakcie całego badania. Granica płynięcia i lepkość plastyczna dla zaczynu Z0 były najmniejsze. Największą lepkość plastyczną i granicę płynięcia miał zaczyn Z5, zawierający 48 g wapna [50% masy spoiwa] i eter celulozy w ilości 3,0 g. Zamiana spoiwa w 50% na spoiwo wapienne powoduje dwukrotne zwiększenie lepkości i prawie trzykrotne zwiększenie granicy płynięcia. Także domieszka eteru celulozy w każdym przypadku wpływa na zwiększenie granicy płynięcia i lepkości plastycznej. Lepkość plastyczna jak i granica płynięcia przyjmują niższe wartości w przypadku zapraw, dla których wskaźnik WRV wynosił <96%. Zaprawy o retencji wody większej niż 96% mają lepkość plastyczną i granicę płynięcia większe odpowiednio od 10 Nmm·s i 10 Nmm, w trakcie trwania całego badania. Widać wyraźny podział materiałów na dwie grupy - o małym wskaźniku WRV i małej

the consistency of "wet sand". Mortars containing cellulose ether in the amount of 3.0 g in their composition, had higher water demand. The increase of admixture content usually involved the increase of mortars water demand. Performed tests determine, that not always this relationship is fulfilled, what can be noticed on the basis of Z1, Z3, and Z4 mortars. These mortars need less water to obtain desirable consistency, compared to the model mortar. The reasons for this phenomenon can be sought in properties of the admixture, which causes a lubricant effect, facilitating the movement of grains within the mortar. Cement paste modified with cellulose ether had higher viscosity and thus better cohesion. The layer of paste covers the surfaces of the sand grains decreasing friction and improving plasticity. Increase of viscosity results in improved stability of the mortar.

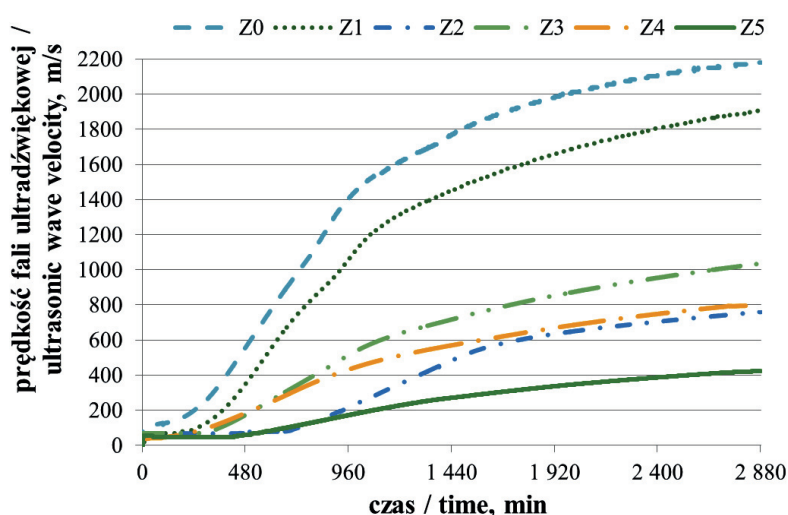
The results of the investigation of the properties of fresh mortars presented in Table 3 show that the control mortar Z0 has the highest bulk density and the lowest air content. The addition of cellulose ether and partial replacement of cement with lime causes a reduction of bulk density, which favourably affects the output. Moreover, the use of admixture caused a notable increase of air content in the mixture, up to 5 times in the case of Z2 mortar.

Based on the data presented in Fig. 2, it can be concluded that all the modified mortars have WRV higher than 90% after 10 minutes. Throughout the study, the Z2, Z3 and Z5 mortars modified with cellulose ether in the amounts of 1.75 g and 3.0 g achieved the highest WRV ratios, exceeding 98%. For mortars, in which the additive content was of 0.5 g, the ratio decreases in time, which shows smaller efficiency of cellulose ether added in this amount. The reference mortar, on the other hand, has far poorer properties. Thus, it is advisable to use cellulose ether. The higher the content of this admixture in mortar composition, the better water retention.



Rys. 4. Zależność pomiędzy granicą płynięcia zaczynów a wskaźnikiem WRV zapraw

Fig. 4. Relationship between plastic viscosity for pastes and WRV index for investigated mortars



Rys. 5. Pomiary propagacji fali ultradźwiękowej w zaprawach Z0+Z5

Fig.5. Sound wave propagation velocity in Z0+Z5 mortars

granicy płynięcia oraz lepkości. Są one przeznaczone do ręcznego nakładania tynku i zaprawy o dużym wskaźniku WRW, mają dużą granicę płynięcia i lepkość plastyczną - materiały stosowane do tynkowania sposobem mechanicznym.

Warto również zaznaczyć, że w przypadku zaczynów Z0 i Z1 w trakcie badań reologicznych, po 60 minutach wystąpiła sedimentacja składników. Porównując próbki o tej samej ilości eteru celulozy, ale różniące się rodzajem spoiwa [Z1 i Z4], stwierdzono korzystny wpływ wapna. W próbce Z4 brak było widocznej sedimentacji składników, zaczyn wykazywał spójność i jednorodność w całej masie.

Z krzywych na rysunku 5 widać, że wapno hydratyzowane i eter celulozy opóźniają proces wiązania. Zaprawa cementowa z domieszką w ilości 3,0 g ma najdłuższy okres indukcji, a więc do gwałtownej zmiany prędkości fali, świadczący o opóźnieniu procesu wiązania zaprawy (13). Najmniejszą prędkość fali ultradźwiękowej wykazała zaprawa Z5. W przypadku zapraw z domieszką eteru celulozy w ilości 0,5 g, okres indukcji jest krótszy. Porównując zaprawy cementowe z eterem celulozy i cementowo-wapienne z eterem celulozy widać, że domieszka polimerowa w obydwu przypadkach wpływa na opóźnienie procesu wiązania, ale dodanie wapna do zaprawy zawierającej 3 g domieszki zmniejsza jej działanie, w efekcie skracając czas indukcji. Wynikać to może z większej zdolności domieszki do retencji wody. W przypadku zaprawy cementowo-wapiennej część wody absorbuje domieszka, a część wapno. Spoiwo to ma mniejszą zdolność retencji wody, stąd wniosek, że szybciej oddaje wodę do podłoża.

W tabelicy 5 zestawiono wyniki pomiarów ultradźwiękowych z wynikami badania wytrzymałości. Duża prędkość fali ultradźwiękowej świadczy o dużej wytrzymałości. Z przedstawionych wyników widać, że wapno i eter celulozy wpływają na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, i jednocześnie zmniejszeniu ulega skurcz tych zapraw [tabela 3]. Porównując wyniki badania skurczu zaprawy wzorcowej z wynikami zapraw zawierających w swoim składzie

Taking into account the classification given by Brumaud et al. (9) all modified mortars belong to the group with a high water retention ratio, the highest in 3-degree scale. The high value of WRV is particularly important in the case of applying the material on substrate with high absorptivity, or in the case of plastering during varying temperature-humidity conditions.

Additional information may be obtained by combining the results of rheological measurements presented in Table 4 with the results of water retention studies, which is shown in Figs. 3 and 4. Mortars with cellulose ether content of 1.75 g and 3.0 g, have higher viscosity, which further increases in time and therefore results in higher WRV ratio, keeping the level of over 99% throughout the study. Yield stress and plastic viscosity were the lowest for the Z0 paste. The Z5 paste with lime content of 48 g [50% of the binder] and 3 g of cellulose ether had the highest plastic viscosity and yield stress. The addition

of cellulose ether causes the increase of the g and h parameters in each case. The 50% replacement of Portland cement with lime causes a double increase in viscosity and a triple increase in yield stress. Plastic viscosity, as well as yield stress, take on lower values in the case of mortars with WRV lower than 96%. In the case of mortars with WRV higher than 96% plastic viscosity and yield stress exceed 10 Nmm·s and 10 Nmm, respectively, during the whole test. A clear division of materials into two groups can be seen – one of them has low WRV and low rheological parameters, which results in manual applying, whereas the second group with high WRV, high values of yield stress and plastic viscosity is recommended for mechanical plastering.

It is also worth adding, that for pastes Z0 and Z1 sedimentation of components during rheological measurements after 60 minutes, had been noticed. Comparing samples with the same content of cellulose ether, but differing in the type of binder [Z1 and Z4], a beneficial effect of lime had been noticed. Visible sedimentation of components wasn't noticed in the Z4 sample. The paste had cohesion and homogeneity in the whole mass.

According to the measurements shown in Fig. 5 it can be noticed, that lime and cellulose ether delay the setting. Cement mortar with an addition of 3.0 g has the longest induction period, what is the evidence of setting process delay (13). The lowest rate of ultrasonic wave was measured for Z5 mortar. For mortars with the cellulose ether addition of 0.5 g, the induction period was shorter. Comparing cement mortars with the addition of cellulose ether to cement-lime mortars with cellulose ether it becomes noticeable, that the polymer admixture caused the delay of the setting process in both cases, but adding lime to the mortar limits the effect of admixture, which results in shortening the induction period for samples with 3.0 g of admixture. It may result to the better ability of the admixture to retain water. In the case of cement-lime mortar, one part of water is absorbed by the admixture and the other by lime. This binder has a lower ability of water retention hence, the faster water return to the system.

Tablica 5 / Table 5

SZYBKOŚĆ PROPAGACJI FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ I WYTRZYMAŁOŚĆ ZAPRAW
SOUND WAVE PROPAGATION VELOCITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTARS

zaprawa mortar	maksymalna prędkość fali ultradźwiękowej maximum velocity of sound wave	wytrzymałość na ściskanie compressive strength
	m/s	MPa
Z0	2180	3,05
Z1	1910	2,89
Z2	760	0,63
Z3	1040	0,89
Z4	800	0,59
Z5	420	0,50

The results achieved with the ultrasonic method compared to the results of studies on mechanical properties are shown in Table 5. High value of ultrasonic wave velocity reflects in high compressive strength and vice versa. Based on results it's clearly noticeable that both lime and cellulose ether affect the reduction of compressive strength, but the mortars' shrinkage decreases [Table 3]. Comparing the results of shrinkage for the model mortar and those containing lime and cellulose ether in their composition, shrinkage deformations decrease by about 50%. Lower shrinkage may be associated with slower setting and hardening of Z1 to Z5 mortars compared to Z0 mortar, which is a particular effect of cellulose ether admixture.

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI BADANIA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ZAPRAW
RESULTS OF WORKABILITY TESTS ON SITE

Oznaczenie zapraw Mortar designation	Ocena właściwości użytkowych Evaluation of workability at application	Ocena jakości obróbki Evaluation of processing quality	Metoda aplikacji / Application method	
			ręczna / manual	mechaniczna / mechanical
Z0	2	0	+	
Z1	8,5	8	+	
Z2	3	1	+	
Z3	7	8		+
Z4	2	6	+	
Z5	3,5	3,5		+

Tablica 7 / Table 7

OCENA OPISOWA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ZAPRAW
DESCRIPTIVE ASSESMENT OF MORTARS WORKABILITY

Zaprawa / Mortar	Ocena właściwości aplikacyjnych / Evaluation of workability	Ocena jakości obróbki / Evaluation of processing quality
Z0	konsystencja mokrego piasku, mała lepkość / wet sand consistency, low viscosity	brak możliwości obróbki / lack of processing capabilities
Z1	konsystencja dobra do narzucania ręcznego, tynk mało wydajny, dobre właściwości użytkowe / consistency good for manual coating, low efficiency of plaster, good workability properties	wiąże równomiernie, dobry czas obróbki / binds evenly, good processing time
Z2	klei się do narzędzi, brak przyczepności do ściany / sticks to tools, no adhesion to the wall	trudny do obróbki, trudno wygładzić powierzchnię, z wierzchu zbyt suchy / difficult to process, it's difficult to smoothen the surface, surface is too dry
Z3	konsystencja dobra do narzutu, dobra przyczepność do ściany / consistency good for coating, sticks well to the wall	łatwy do obróbki, mała wodożądność, dobrze się zaciera / easy to process, low water demand, slurs well
Z4	konsystencja akceptowalna / acceptable consistency	stosunkowo łatwy do obróbki / relatively easy to process
Z5	splywa po nałożeniu cienkiej warstwy / flows after imposing thin layer	wiąże prawidłowo, nie potrzebuje dużo wody do obróbki końcowej / good setting, doesn't need too much water for final processing

wapno hydratyzowane i eter celulozy widać, że odkształcenia skurczowe zmalały o około 50%. Mniejszy skurcz może być związany z wolniej zachodzącymi procesami wiązania i twardnienia zapraw Z1÷Z5 w stosunku do zaprawy Z0, na co szczególnie wpływ ma domieszka eteru celulozy.

W tablicach 6 i 7 przedstawiono właściwości robocze badanych zapraw. Na podstawie przeprowadzonych badań, zgodnie z subiektywną oceną specjalisty, stwierdzono, że najlepsze właściwości użytkowe mają zaprawy Z1 oraz Z3, najgorsze - zaprawa Z0. Wyniki te potwierdzają słuszność modyfikacji zapraw tynkarskich wapnem i eterem celulozy. Zaprawy Z0, Z1, Z2 i Z4 można nakładać w sposób ręczny, natomiast zaprawy Z3 i Z5 - mechanicznie. Wnioski te pokrywają się z wynikami oceny właściwości reologicznych. Zaprawy do nakładania ręcznego mają małą lepkość plastyczną, a zaprawy stosowane mechanicznie - dużą lepkość. Duża lepkość ma także wpływ na większą spójność zaprawy, a także ogranicza lub eliminuje sedymentację jej składników. Ocena opisowa przedstawiona w tablicy 7 dostarcza uzupełniających informacji o wpływie wapna hydratyzowanego i eteru celulozy na właściwości użytkowe zapraw. Eter celulozy dodany w odpowiedniej ilości, zapewnia właściwą lepkość zaprawy, materiał dobrze trzyma się kielni i nie spływa ze ściany. Wapno dodatkowo poprawia plastyczność materiału co ułatwia obróbkę. Porównując właściwości zapraw Z1 i Z3, dla których końcowa ocena punktowa była najwyższa, zaprawa Z3 wymaga w drugim etapie mniej wody do wygładzenia tynku i mniej nakładu pracy, do uzyskania gładkiej powierzchni. Co ważne, z punktu widzenia dalszych robót wykończeniowych, zaprawy zawierające wapno mają jaśniejszą barwę od zapraw cementowych.

4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników doświadczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- potwierdzono korzystny wpływ wapna hydratyzowanego i domieszki eteru celulozy na właściwości świeżej zaprawy tynkarskiej,
- zaprawa bez eteru celulozy ma mały współczynnik retencji wody, co najmniej mniejszy o 10% w porównaniu z zaprawami z domieszką,
- eter celulozy ma większy wpływ na retencję wody niż wapno, większa ilość domieszki pozwala utrzymać wodę w zaprawie na tym samym poziomie przez dłuższy czas. Jest to szczególnie ważne w przypadku podłoża o dużej chłonności, czy wykonywania robót tynkarskich w zmiennych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych,
- zwiększenie dodatku eteru celulozy oraz/lub dodanie wapna powoduje opóźnienie wiązania i twardnienia, wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, przy jednoczesnym zmniejszeniu odkształceń skurczowych,
- poprawnie dobrane proporcje wapna i eteru celulozy pozwalają zapewnić odpowiednie właściwości użytkowe zaprawy: dobrą urabialność, plastyczność i łatwość obróbki,

Tables 6 and 7 present the results of the assessment of the performance of the tested mortars. Based on the studies conducted, according to the subjective rating of a specialist – an expert plasterer, it was found that Z1 and Z3 mortars had the best workability, whereas the worst - Z0 mortar. These results confirm the necessity of the modification of plastering mortars with lime and cellulose ether. Analysing the possible method of application, the Z0, Z1, Z2, and Z4 mortars are materials easily applicable manually, whereas the Z3 and Z5 mortars - mechanically. This information coincides with the results received on the basis of rheological properties. Mortars applied manually have low plastic viscosity, whereas these laid mechanically - by high viscosity. High plastic viscosity also leads to better cohesion of the mortar as well as reduces or even eliminates the sedimentation of its components. Descriptive rating [Table 7] gives complementary information about the influence of lime and polymer admixture on the application properties of mortar. Cellulose ether, added in the proper amount, determines proper viscosity of the mortar, the material clings to the float and doesn't flow down the wall. Lime also improves the flexibility of the material and the ease of processing. The comparison of the properties of mortars Z1 and Z3, for which the final rating is the highest, shows that mortar Z3 in the second stage requires less water to smoothen the plaster and less effort to achieve the smooth surface. What is important from the viewpoint of further finishing works, lime-containing mortars have a brighter colour than cement mortars.

4. Conclusions

The obtained experiments results permit to draw the following conclusions:

- a positive effect of the hydrated lime and cellulose ether admixture on the properties of plaster in both fresh and hardened states was confirmed,
- mortar without cellulose ether has low water retention coefficient WRV, at least 10% lower, compared to mortars with admixture,
- cellulose ether has a greater influence on the rate of WRV than lime, higher content of admixture keeps the water in the mortar at the same level for a long time, which is especially important in the case of high absorption substrate, or when performing plastering with varying temperature and humidity conditions,
- increasing the content of the cellulose ether and/or the addition of lime retards the setting and hardening and cause the reduction of compressive strength, as well as decreases shrinkage deformations,
- properly balanced proportions of lime and cellulose ether help ensure proper application properties - good workability, plasticity and better processing,
- hydrated lime and cellulose ether affect the yield stress and plastic viscosity,
- the dependence of plastic viscosity and yield stress on the water retention capacity in mortars with cellulose ethers was found,
- rheological parameters are a valuable addition to the information about the standard and technical properties of plastering

- wapno hydratyzowane i eter celulozy mają wyraźny wpływ na granicę płynięcia i lepkość plastyczną,
 - stwierdzono zależność lepkości plastycznej i granicy płynięcia od zdolności retencji wody w zaprawach z eterami celulozy,
- mortars, results obtained on the basis of rheological properties measurements are reflected in the level of water retention value WRV as well as in the mortars workability,
- proper choice of plastering mortars components – content of cellulose ether and lime is crucial for mortars properties.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane ze środków statutowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego NBS 16/18.

Literatura

1. S. Chłądzyński, G. Malata, „Składniki zapraw klejowych do płytek. Część II-Metyloceluloza”, *Izolacje* **3**, 30-34 (2008).
2. M. Sobala, K. Nosal, P. Pichniarczyk, „Wpływ metylocelulozy na właściwości klejowych zapraw cementowych”, *Cem. Wapno Beton* **6**, 359-365 (2010).
3. Ł. Kotwica, J. Małolepszy, „Rola i działanie domieszek chemicznych modyfikujących lepkość zaczynów cementowych”, 99-107, VIII Sympozjum Naukowo-Techniczne. Reologia w Technologii Betonu, Gliwice 2006.
4. J. Michalak, „Chemia budowlana. Zaprawy budowlane”, *Przemysł Chemiczny* **81**, 160-164 (2002).
5. B. Łąźniewska-Piekarczyk, „Wpływ rodzaju domieszek stabilizujących lepkość (DSL) na właściwości samozagęszczających się zapraw i betonów”, *Cem. Wapno Beton* **16**, 44-51 (2011).
6. L. Patural, P. Marchal, A. Govin, P. Grosseau, B. Ruot, O. Devès, „Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars”, *Cem. Concr. Res.* **41**, 46-55 (2011).
7. J. Pourchez, A. Peschard, P. Grosseau, R. Guyonnet, B. Guilhot, F. Vallée. „HPMC and HEMC influence on cement hydration”, *Cem. Concr. Res.* **36**, 288-294 (2006).
8. E. Jumate, D.L. Manea, C. Aciu, L. Molnar, R. Fehete, „Innovative materials made by adding cellulose ethers to cement mortars”, *Proc. Techn.* **19**, 291-298 (2015).
9. C. Brumaud, H. Bessaies-Bey, C. Mohler, R. Baumann, M. Schmitz, M. Radler, N. Roussel, „Cellulose ethers and water retention”, *Cem. Concr. Res.* **53**, 176-184 (2013).
10. J. Małolepszy (red.) „Podstawy technologii materiałów budowlanych metody badań”, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
11. J. Gołaszewski, T. Ponikiewski, A. Kostrzanowska, „Wpływ popiołu lotnego wapiennego na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych”, 177-200, XVII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki. Uzdatnianie popiołów z energetyki, Warszawa 2010.
12. J. Szwabowski, „Reologia mieszanek na spoiwach cementowych”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
13. E. Spychał, „Zastosowanie metody ultradźwiękowej w badaniu procesów wiązania i twardnienia zapraw cementowych modyfikowanych wodorotlenkiem wapnia i eterem celulozy”, *Współczesne problemy budownictwa*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 30-40, Kielce 2016