

## 11. TYNKI RENOWACYJNE – AKTUALNE ZAGADNIENIA

### 1. WPROWADZENIE

W renowacji budynków o znaczeniu historycznym częstą przyczyną zniszczeń jest źle funkcjonująca izolacja pozioma i pionowa ścian. Z powodu wadliwej izolacji wilgoć przedostaje się z gruntu do murów, poprzez ich porowatą strukturę, wskutek podciągania kapilarnego. W usuwaniu następstw spowodowanych podciąganiem kapilarnym wody najlepsze efekty uzyskuje się przy stosowaniu kompleksowych metod, polegających na fizycznym lub chemicznym odtwarzaniu bariery przeciwwilgociowej oraz osuszeniu i odsoleniu zawilgoconych ścian. Do osuszania i odsalania murów wykorzystuje się tynki renowacyjne o zróżnicowanych pod względem wielkości porach.

### 2. POROWATOŚĆ TYNKÓW RENOWACYJNYCH

W systemie tynków renowacyjnych wielkość porów jest zróżnicowana. Największą efektywność w osuszaniu murów wykazują tynki, dla których porowatość otwarta wynosi 35-45%. Przez porowatość otwartą rozumie się wyrażony w procentach stosunek objętości porów otwartych (wolnych przestrzeni między ziarnami kruszywa a cementem w utwardzonej zaprawie, połączonych wzajemnie ze sobą i z atmosferą) do całkowitej objętości materiału [2]. Przy wskazanej wyżej porowatości uzyskuje się system mikroporów oraz system połączonych ze sobą porów o większej średnicy. Tynki, których strukturę tworzą pory o niejednorodnej średnicy, oddziałują na transport roztworów soli ze zróżnicowanym natężeniem. Kapilarnie aktywne są pory o średnicy 1-60  $\mu\text{m}$  [1]. Dzięki występowaniu w nich stosunkowo wysokiego ciśnienia kapilarnego „wysysają” one wodne roztwory z dużych porów. W przypadku porów o wielkości poniżej 0,1  $\mu\text{m}$ , nazywanych porami żelowymi, dochodzi jedynie do wypełnienia ich wodą pod wpływem kondensacji kapilarnej. Pory o średnicy powyżej 60  $\mu\text{m}$  nie są już aktywne kapilarnie [3, 7]. Mają one zdolność przerywania kapilarnego podciągania wody i nazywają się porami powietrznymi, które można zapełnić jedynie wodą ciśnieniową. W trakcie procesu wysychania sole wykryształizowują się w pierwszej kolejności w porach kapilarnych o średnicy od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów [4]. Mimo że pory o większych średnicach nie są aktywne kapilarnie, to ich obecność w strukturze tynków jest niezbędna, ponieważ gwarantuje utrzymanie wysokiej przepuszczalności tynku względem pary wodnej w dłuższym okresie [7].

Pory w tynkach renowacyjnych można wytwarzać przez stosowanie domieszek napowietrzających, lekkiego kruszywa (perlitu, pumeksu itp.) lub kombinacji obu wymienionych składników. Duży wpływ na porowatość tynku, szczególnie w zakresie porów o mniejszych średnicach, ma również ilość cementu w recepturze, stosunek wodno-cementowy (w/c) oraz wielkość kruszywa [2].

Do tej pory zagadnienie korelacji składników receptur zapraw cementowych i porowatości było przedmiotem niewielu prac [6]. Głównie koncentrowano się w nich na szukaniu zależności między wielkością kruszywa, stosunkiem wodno-cementowym a porowatością. Nie podjęto również prób określenia wpływu domieszek na porowatość otwartą ani na inne właściwości fizyczne tynków renowacyjnych. Trudno też znaleźć w dostępnej literaturze informacje podające ilościowy stosunek porowatości tynków renowacyjnych i ich zdolności do akumulacji soli.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań pokazujące zależności między podstawowymi składnikami receptur, które są odpowiedzialne za kształtowanie porów, takimi jak lekkie kruszywo (lekki perlit) oraz domieszka napowietrzająca na bazie  $\alpha$ -olefinosulfonianu sodowego, a właściwościami tynków, takimi jak porowatość otwarta, rozkład objętości porów oraz zdolność do magazynowania soli.

### 3. MATERIAŁ DO BADAŃ

W badaniach analizowano wpływ jednoczesnych zmian udziałów masowych dwóch niezależnych składników, tj. perlitu  $C_{Per}$  [kg/t] i domieszki napowietrzającej  $C_L$  [kg/t], na porowatość otwartą  $\phi$  [%], zdolność do akumulacji soli  $S_{AA}$  [kg/(m<sup>3</sup>·24 h)] oraz rozkład objętości porów utwardzonych zapraw renowacyjnych. W tym celu przygotowano próbki zapraw różniących się między sobą udziałem masowym perlitu i domieszki napowietrzającej. Ilości składników, których wpływu na analizowane parametry tynków renowacyjnych nie badano, były stałe w recepturze zaprawy i wynosiły odpowiednio: kruszywo marmurowe: 100 kg/t, domieszka zagęszczająca: 1 kg/t, wapno 50 kg/t, żywica polimerowa 10 kg/t. Każdorazowe zmiany wynikające ze zróżnicowanej ilości analizowanych składników uzupełniano piaskiem kwarcowym do 1000 kg. Nie rozpatrywano również wpływu rodzaju cementu ani zmian parametrów mieszania i zagęszczania próbek podczas ich formowania. Udziały masowe perlitu wynosiły:  $C_{Per} = 0,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0$  kg/t. Dla każdej ilości perlitu w poszczególnych zestawach zmieniano udziały masowe domieszki napowietrzającej, które wynosiły odpowiednio:  $C_L = 0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,8$  kg/t. Udziały masowe analizowanych składników w poszczególnych wariantach badań zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Udziały masowe cementu, perlitu i domieszki napowietrzającej w suchej mieszance tynków renowacyjnych w poszczególnych wariantach badań

Table 1. Mass fraction of cement, perlite and aeration admixture in dry renovating plasters mixture in each variant of research

Udział masowy składników									
$C_{Per}$ [kg/t]					$C_L$ [kg/t]				
$C_C = 150$ kg/t									
0	5	10	15	20	0,0	0,1	0,3	0,5	0,8

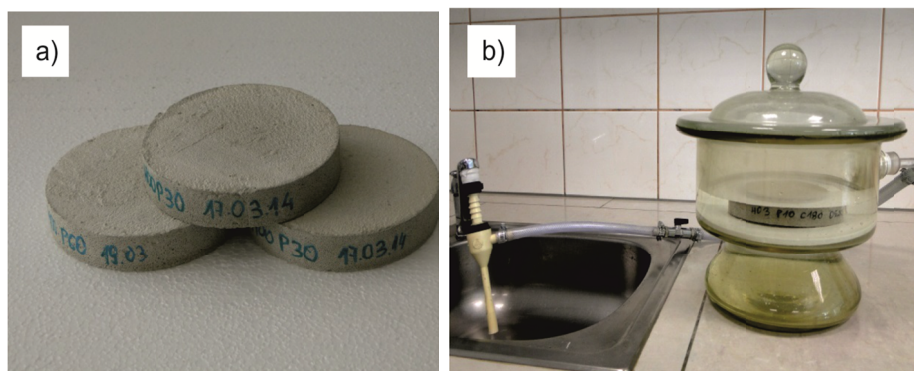
W celu wyeliminowania wpływu stosunku wodno-cementowego (w/c) na końcowe właściwości fizyczne utwardzonych zapraw, stosunek w/c we wszystkich wariantach badań był stały i wynosił 1,6.

Ze względu na znaczną nasiąkliwość kruszywa lekkiego, rzutującą na zmianę stosunku w/c, a tym samym na końcowe parametry otrzymanej zaprawy, zastosowano wstępne moczenie kruszywa bezpośrednio przed wykonaniem mieszanki. Zabieg ten ma służyć wyeliminowaniu odciągania wody przez kruszywo z zaczynu cementowego.

#### 4. METODYKA PRZEPROWADZANIA BADAŃ

##### Określenie porowatości otwartej

Do określenia porowatości otwartej próbek tynków renowacyjnych zastosowano metodykę opisaną w instrukcji WTA nr 2-9-04/D [9]. W tym celu przygotowano po trzy próbki tynków w postaci walców o średnicy 100 mm i wysokości 20 mm z wykorzystaniem automatycznej mieszarki do zapraw. Próbki sezonowano przez 28 dni. Przed samym badaniem umieszczono je w eksykatorze na 12 h z zachowaniem wilgotności względnej powietrza  $f < 10\%$ . Po tym czasie próbki zważono na wadze analitycznej z dokładnością do 0,01 g i umieszczono ponownie w eksykatorze na ruszcie stalowym. Za pomocą pompy wodnej ciśnienie w eksykatorze doprowadzono do 10 mbar. W takich warunkach próbki pozostawiono na 2 h. Po tym czasie do eksykatora wprowadzono izopropanol, który aplikowano stopniowo: najpierw do ilości wystarczającej na zwilżenie dolnej powierzchni próbki, a następnie przez 30 min poprzez wkraplanie aż do momentu, kiedy cała powierzchnia próbki została całkowicie zwilżona. Tak przygotowaną próbkę zalano izopropanolem w takiej ilości, aby wysokość lustra cieczy znajdowała się 5-20 mm nad górną powierzchnią próbki. Następnie uruchomiono pompę wodną (rys. 1).



Rys. 1. Badanie porowatości otwartej: a) próbki do badań; b) stanowisko pomiarowe

Fig. 1. Open porosity test: a) test samples; b) test-bench

W takich warunkach próbki przechowywano przez 3 h, do momentu gdy wszystkie bąbelki powietrza zostały usunięte z powierzchni próbki. Po ich wyjęciu, osuszono je powierzchniowo za pomocą suchej gąbki i zważono na wadze analitycznej z dokładnością do 0,01 g. Jako wynik pomiaru przyjmowano średnią wartość uzyskaną z trzech niezależnych eksperymentów.

Porowatość obliczono ze wzoru:

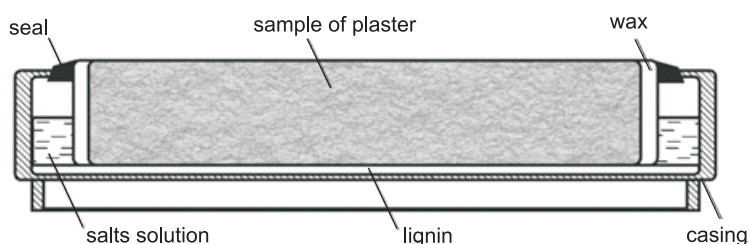
$$\phi = \frac{\rho \cdot m_I}{\rho_I \cdot m_D} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- $m_I$  – masa izopropanolu pochłoniętego przez próbkę, obliczona z różnicy między masą próbki nasączonej  $m_S$  a masą próbki suchej,
- $m_D$  – masa suchej próbki,
- $\rho$  – gęstość pozorna próbki tynku renowacyjnego [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],
- $\rho_I$  – gęstość izopropanolu  $784 \text{ kg}/\text{m}^3$  w temperaturze  $2^\circ\text{C}$ .

### Określenie zdolności akumulacji soli przez utwardzone zaprawy renowacyjne

Do określenia zdolności do akumulacji soli przez utwardzone zaprawy renowacyjne przygotowano po trzy próbki w postaci krążków o średnicy 100 mm i wysokości 20 mm za pomocą automatycznej mieszarki do zapraw. Próbki sezonowano przez 28 dni. Przed samym badaniem boczne ścianki próbek pokryto woskiem parafinowym, a następnie umieszczono w eksykatorze na 12 h z zachowaniem wilgotności względnej powietrza  $f < 10\%$ . Po tym czasie zważono je na wadze analitycznej z dokładnością do 0,01 g, a potem zamontowano w naczynku z dnem wyłożonym ligniną (rys. 2). Przestrzeń między ściankami naczynka a brzegami próbki uszczelniono silikonem. Dno naczynka wypełniono roztworem soli po przebiciu się przez silikon za pomocą strzykawki z igłą. Skład 1 kg roztworu soli był następujący: 35 g NaCl, 5 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 15 g NaNO<sub>3</sub>, woda (uzupełnienie do 1000 g). Schemat naczynka badawczego wraz z próbką przedstawiono na rysunku 2. Przygotowane w ten sposób próbki zważono wraz z naczynkiem i pozostawiono na 24 h w temperaturze 25°C i względnej wilgotności powietrza 60-65%. Po tym czasie naczynie wraz z próbką zostało ponownie zważone, uzupełniono ubytek roztworu soli i całość pozostawiono na kolejne 24 h. Czynność tę powtarzano do momentu, kiedy na powierzchni próbek pojawiły się pierwsze wykwity soli (w sumie 8 cykli). Po tym czasie próbki rozmontowano, wyjęto z obudowy, oczyszczono z resztek silikonu, a następnie suszono w temperaturze 45°C do stałej masy. Zdolność do akumulacji soli  $S_{AA}$  wyznaczono jako iloraz masy zakumulowanych soli przez próbkę tynku renowacyjnego do jej objętości i do czasu. Wynik wyrażono w kg/(m<sup>3</sup>·24 h). Jako wynik jednego pomiaru przyjmowano wartość średnią uzyskaną z trzech niezależnych eksperymentów.



Rys. 2. Schemat naczynka badawczego wraz z próbką do pomiaru zdolności akumulacji soli przez utwardzone zaprawy renowacyjne

Fig. 2. Drawing of a research vessel with a sample for measuring accumulation of salts in hardened renovation mortars

### Wyznaczenie rozkładu objętości porów

Do wyznaczenia rozkładu objętości porów zastosowano metodę perymetrii rtęciowej. Polega ona na określeniu objętości rtęci, która pod zwiększonym ciśnieniem wypełnia pory. Do wyznaczenia średnicy porów posłużono się równaniem Washburna (2):

$$\Delta p = - \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \Theta}{r} \quad (2)$$

gdzie:

- $r$  – promień porów,
- $\gamma$  – napięcie powierzchniowe rtęci,
- $\Theta$  – graniczny kąt zwilżania,
- $\Delta p$  – różnica ciśnienia rtęci i ciśnienia gazu w porach ( $p_1 - p_0$ ).

Proporcjonalność promieni porów do działającego ciśnienia spełniona jest przy następujących założeniach:

- pory mają kształt cylindryczny,
- napięcie powierzchniowe i kąt zwilżania są stałe podczas analizy,
- materiał stały nie ulega deformacji pod wpływem ciśnienia (nie zmienia się struktura porowata w czasie analizy).

W pracy korzystano z wyników otrzymanych na porozymetrze Carlo-Erba 4000. Zakres, dla którego można wyznaczyć tą metodą promienie porów, wynosi od 7,5  $\mu\text{m}$  do 1,8 nm, tzn. od makroporów do wielkości zbliżonej do dolnej granicy mezoporów. Górny zakres perymetrii rtęciowej może być rozszerzony do 200  $\mu\text{m}$  przez mierzenie penetracji rtęci przy wyrównywaniu ciśnienia do atmosferycznego (po odgazowaniu i napełnieniu rtęcią). Zwykle wykonuje się to jako pierwszy etap pomiaru w aparacie, w którym przeprowadza się odgazowanie próbki i napełnianie dylatometru rtęcią.

## 5. INTERPRETACJA WYNIKÓW

Do opisu współzależności czynników (domieszki napowietrzającej i perlitu) i parametrów fizycznych komponentów STR (porowatość, zdolność do akumulacji soli) zastosowano metodę regresji wielorakiej, a do jej matematycznego przedstawienia – wielomiany liniowo-kwadratowe:

$$\hat{y} = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_{11} \cdot x_1^2 + B_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3)$$

Za miarę adekwatności modelu do badanego obiektu przyjęto wartość współczynnika korelacji wielowymiarowej  $R$ , przyrosty kwadratów współczynników korelacji wielowymiarowej  $R^2$ . Za każdym razem konfrontowano wartość obliczeniową statystyki F Snedecora z wartością krytyczną, odczytywaną z tablic rozkładu F Snedecora przy liczbie stopni swobody  $k$  i  $n-k-1$ , na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , gdzie  $k$  oznacza liczbę współczynników funkcji regresji,  $n$  – liczbę planowanych eksperymentów. Przy ocenie współzależności właściwości STR i analizowanych czynników najlepsze równanie regresji dobierano metodą odrzucania, badając istotność członów regresji.

Liczba punktów pomiarowych (eksperymentów) obejmowała cały zakres pomiarowy przestrzeni zdarzeń. Przestrzeń zdarzeń ustalono na podstawie kart technicznych analizowanych składników, karty zaś otrzymano od producentów. Liczba pomiarów w poszczególnych wariantach była stała i wynosiła  $5 \times 5 = 25$  pomiarów (spełniony był warunek minimalnej liczby pomiarów  $N - K - 1 \gg 1$ , gdzie:  $N$  – liczba pomiarów = 25,  $K$  – liczba współczynników modelu = 5).

## 6. WYNIKI I DYSKUSJA

### Test analizy wariancji według klasyfikacji podwójnej ANOVA

W celu sprawdzenia, czy jednoczesne zmiany udziałów kruszywa lekkiego, czyli perlitu  $C_{Per}$  [kg/t] i domieszki napowietrzającej  $C_L$  [kg/t], wpływają w sposób statystycznie istotny na porowatość  $\phi$  oraz zdolność akumulacji soli  $S_{AA}$  tynków renowacyjnych, utworzono macierz korelacji umożliwiającą obliczenie współczynników korelacji Pearsona i ocenę ich istotności. W tym celu przeprowadzono wnioskowanie statystyczne przy użyciu testu analizy wariancji według klasyfikacji podwójnej ANOVA.

Obliczone wartości statystyk  $F(C_{Per})$  i  $F(C_L)$  porównywano z odczytanymi z tablicy rozkładu F Snedecora z wartościami krytycznymi  $F(C_{Per}, \alpha)$  i  $F(C_L, \alpha)$ . Jeżeli zachodziła nierówność  $F(C_{Per}) \geq F(C_{Per}, \alpha)$  lub  $F(C_L) \geq F(C_L, \alpha)$ , to hipotezę zerową  $H_0$  odrzucano (co oznacza wykazanie istotnego wpływu czynnika  $A$  w doświadczeniu). Jeżeli zachodziła nierówność  $F(C_{Per}) < F(C_{Per}, \alpha)$  lub  $F(C_L) < F(C_L, \alpha)$ , to nie udowodniono istotnego wpływu danego czynnika.

Na podstawie analizy wyników testu zestawionych w tabeli 2 stwierdzono, że w przypadku badania jednoczesnego wpływu zmian wielkości  $C_{Per}$  oraz  $C_L$  na analizowane parametry zapraw renowacyjnych:  $\phi$  i  $S_{AA}$ , we wszystkich przypadkach wartości obliczeniowe statystyk F Snedecora są większe od wartości krytycznej odczytanej z tablic. Tak więc zarówno  $C_{Per}$ , jak i  $C_L$  mają wpływ na  $\phi$  i  $S_{AA}$  w sposób statystycznie istotny.

Tabela 2. Ocena wpływu udziałów masowych perlitu  $C_{Per}$  i domieszki napowietrzającej  $C_L$  na porowatość  $\phi$  tynków renowacyjnych

Table 2. Assessment of influence of perlite  $C_{Per}$  and aeration admixture  $C_L$  mass fraction on renovating plasters porosity  $\phi$

Eksperyment	Analizowany parametr				Eksperyment
	$F(C_{Per})$	$F(C_{Per}, \alpha)$	$F(C_L)$	$F(C_L, \alpha)$	
$\phi = f(C_L; C_{Per})$	50	2,9	46	3,29	5 x 5 = 25
$S_{AA} = f(C_L; C_{Per})$	231	2,9	76	3,29	5 x 5 = 25

Oznaczenia:  $F(C_{Per})$  i  $F(C_L)$  – wartości obliczeniowe statystyki F Snedecora,  $F(C_{Per}, \alpha)$  i  $F(C_L, \alpha)$  – wartości krytyczne z tablic rozkładu F Snedecora na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  przy liczbie stopni swobody  $(z - 1)$  i  $(w - 1) \cdot (z - 1)$ .

### Obliczenie charakterystyk zastępczych, ocena istotności wyznaczonych funkcji regresji i sprawdzenie istnienia linii przegięcia

Do oceny skutków jednoczesnego oddziaływania zmian  $C_L$ ,  $C_{Per}$  na  $\phi$  i  $S_{AA}$  zastosowano regresję wielokrotną wraz z wyznaczeniem stosownych funkcji zaproksymowanych wielomianami liniowo-kwadratowymi (3). Współczynniki funkcji regresji oraz wartości statystyk podsumowujących zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki regresji wielokrotnej jednoczesnego oddziaływania zmian udziałów masowych perlitu  $C_{Per}$  oraz domieszki napowietrzającej  $C_L$  na porowatość  $\phi$  wraz z oceną istotności wyznaczonych funkcji regresji

Table 3. Results of multiple regression of simultaneous effect of changes in mass fractions of perlite  $C_{Per}$  and aeration admixture  $C_L$  for porosity  $\phi$  with the assessment of significance of demarcated regression function

Analizowana funkcja	Współczynniki funkcji regresji						Parametry regresji			
	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_{11}$	$B_{22}$	$B_{12}$	$R^2$	$R$	$F_{obl}$	$F_{kr}$
$\phi = f(C_L; C_{Per})$	35,58	56,34	0,64	-52,94	0,01	-0,45	0,96	0,93	22,55	4,17
$S_{AA} = f(C_L; C_{Per})$	21,36	55,91	0,92	-35,48	-0,01	0,20	0,96	0,98	100,2	4,17

Oznaczenia:  $F_{obl}$  – wartość statystyki F Snedecora,  $F_{kr}$  – wartość krytyczna rozkładu F Snedecora wyznaczona z tablic rozkładu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ,  $R^2$  – współczynnik determinacji,  $R$  – współczynnik korelacji.

Aby wystąpiło równanie regresji, przydatne do opisu badanych zjawisk, a jednocześnie spełniające wymogi istotności na poziomie prawdopodobieństwa  $p = 0,95$ ,  $\alpha = 0,05$ , powinien być spełniony warunek wyjściowy, zgodnie z którym:

$$F_{obl} = F(K; N - K - 1) \geq F_{kr} \quad (4)$$

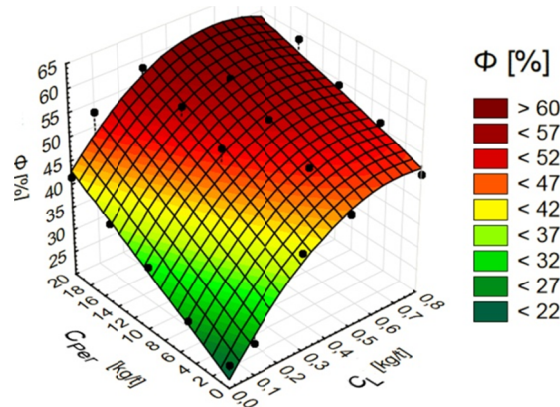
gdzie:

$F_{kr}$  – wartość krytyczna statystyki wyznaczona z tablic rozkładu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  i przy liczbie swobody  $K$  i  $N - K - 1$  F Snedecora.

Na podstawie analizy wyników statystyk podanych w tabeli 3 stwierdzono, że we wszystkich wariantach badań spełnione są wymogi istotności na poziomie  $p = 0,95$  i  $\alpha = 0,05$ . Tak więc wzory regresji opisane równaniami liniowo-kwadratowym są przydatne do opisu badanych zjawisk.

### Ocena wpływu perlitu i domieszek napowietrzających na porowatość utwardzonych zapraw renowacyjnych

Jednoczesne oddziaływanie zmian udziału perlitu  $C_{Per}$  [kg/t] oraz domieszki napowietrzającej  $C_L$  [kg/t], przy  $C_C = 150$  kg/t, na porowatość utwardzonej próbki zaprawy renowacyjnej  $\phi$  [%] pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres powierzchniowy funkcji regresji  $\hat{\phi} = f(C_L, C_{Per})$  dla  $C_C = 150$  kg/t

Fig. 3 Surface chart of regression function for  $C_C = 150$  kg/t

Na podstawie analizy zmian porowatości otwartej  $\phi$  (rys. 3) stwierdzono, że wraz ze wzrostem udziału masowego perlitu zwiększa się porowatość zaprawy  $\Phi$ . Udział perlitu  $C_{Per}$  w recepturze tynku oddziałuje na porowatość tynku liniowo. Stwierdzono natomiast, że wraz ze wzrostem udziału domieszki napowietrzającej  $C_L$  porowatość wzrasta, osiągając wartość maksymalną. Przy dalszym zwiększaniu  $C_L$  wartość parametru  $\Phi$  nieznacznie się zmniejsza. W celu sprawdzenia, czy badana funkcja ma linię przegięcia, rozpatrzono warunek konieczny i wystarczający jej istnienia. Warunkiem tym jest zerowanie się pierwszych pochodnych cząstkowych:

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \hat{C}_L} = 72,54 - 102,94 \cdot C_L - 0,58 \cdot C_{Per} = 0 \quad (5)$$

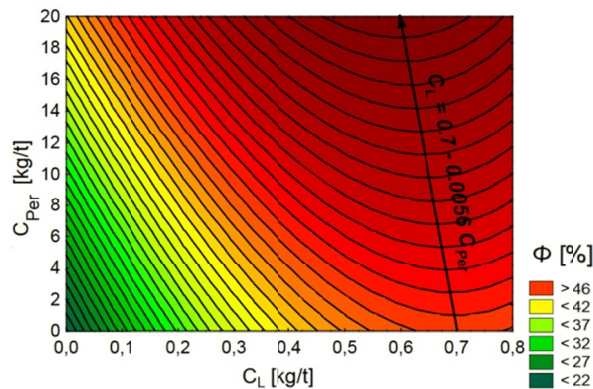
$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \hat{C}_{Per}} = 1,1 - 0,58 \cdot C_L - 0,0046 \cdot C_{Per} = 0 \quad (6)$$

Po przekształceniu otrzymano równania linii przęgięcia:

$$C_L = 0,7 - 0,0056 \cdot C_{Per} \quad (7)$$

$$C_{Per} = 239 - 126,09 \cdot C_L \quad (8)$$

Na rysunku 4 przedstawiono wykres warstwiczny zmian porowatości opisanych funkcją  $\hat{\phi}_2 = f(C_L; C_{Per})$  wraz z linią przęgięcia.



Rys. 4. Wykres warstwiczny funkcji regresji  $\hat{\phi}_2 = f(C_L; C_{Per})$  dla  $C_C = 150$  kg/t

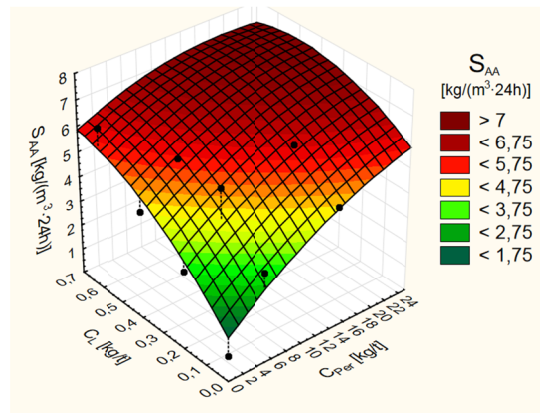
Fig. 4. Contour chart of regression function for  $C_C = 150$  kg/t

Dla przyjętej receptury zaprawy, dla której  $C_C = 150$  [kg/t], porowatość próbki niezawierającej perlitu ani domieszki napowietrzającej wynosiła 25%. Aby osiągnąć wymaganą dla podkładowego tynku renowacyjnego porowatość otwartą, która zgodnie z WTA 2-9-04/D ( $\phi = 45\%$ ), należałoby dodać do receptury zaprawy perlit w ilości min. 20 kg/t lub/i domieszkę napowietrzającą w ilości nieprzekraczającej 0,7 kg/t. Dodawanie domieszki napowietrzającej w ilości przekraczającej 0,7 [kg/t] nie wpływa na wzrost parametru  $\phi$  utwardzonych próbek zapraw renowacyjnych. Oznacza to, że występuje pewien efektywny obszar oddziaływania domieszki napowietrzającej na porowatość zaprawy. Udziały  $C_L > 0,7$  kg/t nie wpływają znacząco na wielkość porowatości  $\phi$  [%].

#### Ocena wpływu perlitu i domieszki napowietrzającej na zdolność akumulacji soli utwardzonych zapraw renowacyjnych

Jednoczesne oddziaływanie zmian udziału perlitu  $C_{Per}$  [kg/t] oraz domieszki napowietrzającej  $C_L$  [kg/t], przy  $C_C = 150$  kg/t, na zdolność akumulowania soli przez utwardzoną próbkę zaprawy pokazano na rysunku 5.



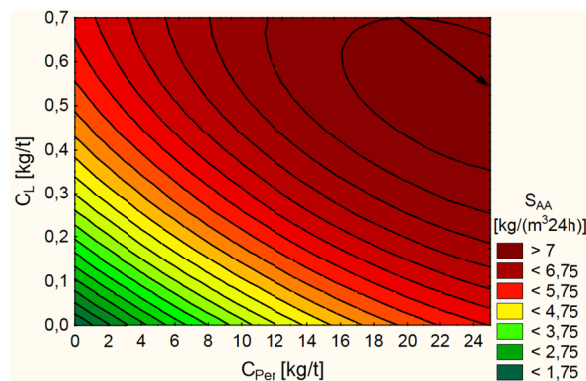


Rys. 5. Wykres powierzchniowy funkcji regresji  $\hat{S}_{AA} = f(C_L; C_{Per})$  dla  $C_C = 150$  kg/t

Fig. 5. Surface chart of regression function for  $C_C = 150$  kg/t

Na podstawie analizy wykresu zamieszczonego na rysunku 5 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału masowego zarówno perlitu, jak i domieszki napowietrzającej, zwiększa się zdolność akumulacji soli  $S_{AA}$  przez próbkę. Charakter oddziaływania perlitu  $C_{Per}$  i domieszki napowietrzającej  $C_L$  na parametr  $S_{AA}$  jest porównywalny. Stwierdzono ponadto, że dla próbek niezawierających domieszki napowietrzającej oraz perlitu wartość parametru  $S_{AA}$  jest niska i wynosi  $1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot 24 \text{ h})$ . Przy udziałach domieszki napowietrzającej  $C_L = 0,7 \text{ kg}/\text{t}$  lub/i perlitu  $C_{Per} = 20 \text{ kg}/\text{t}$  zdolność akumulacji soli przez utwardzone zaprawy renowacyjne jest największa i wynosi  $S_{AA} = 7 - 8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot 24 \text{ h})$ . Można więc przyjąć, że optymalne, ze względu na porowatość otwartą, ilości zarówno domieszki napowietrzającej, jak i perlitu odpowiadają maksymalnej zdolności akumulacji soli przez utwardzoną zaprawę.

Stwierdzono także, że funkcja  $\hat{S}_{AA} = f(C_L; C_{Per})$  ma linię przegięcia określoną równaniem:  $C_{Per} = 34,89 - 21,44 C_L$ . Na rysunku 6 zamieszczono wykres warstwiczny  $\hat{S}_{AA} = f(C_L; C_{Per})$  wraz z naniesioną linią przegięcia.



Rys. 6. Wykres warstwiczny funkcji regresji  $\hat{S}_{AA} = f(C_L; C_{Per})$  dla  $C_C = 150$  kg/t

Fig. 6. Contour chart of regression function for  $C_C = 150$  kg/t

Do określenia statystycznego związku między analizowanymi danymi –  $\phi$  i  $S_{AA}$  – zastosowano liniową korelację cząstkową. Wyniki korelacji liniowej zamieszczono w tabeli 4.

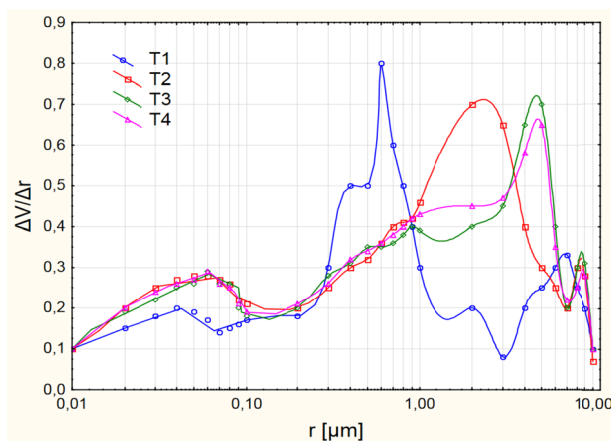
Tabela 4. Wyniki korelacji liniowej porowatości otwartej  $\Phi$  i zdolności akumulowania soli  $S_{AA}$   
 Table 4. Results of linear correlation of open porosity  $\Phi$  and salt accumulation ability

N = 16	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: $S_{AA}$ [kg/(m <sup>3</sup> ·24 h)] $R = 0,81$ $R^2 = 0,64$ , skorygowany: $R^2 = 0,58$ $F(2, 13) = 11,575$ $p < 0,0013$ . Standardowy błąd estymacji: 1,1148					
	b*	Standardowy błąd b*	b	Standardowy błąd b	t (22)	p
Wyraz wolny			-0,15973	0,015023	-10,6325	0,076
$\Phi$ [%]	0,160549	0,038608	0,003067	0,000737	4,1585	0,003

Na podstawie analizy wyników zamieszczonych w tabeli 4 można stwierdzić, że współczynnik korelacji  $R$  między zdolnością akumulacji soli  $S_{AA}$  a porowatością otwartą  $\Phi$  przyjmuje wartość 0,81, co oznacza, iż istnieje bardzo wysoka dodatnia korelacja liniowa między  $\phi$  a  $S_{AA}$ . Wynika z tego, że można z dużą statystyczną dokładnością opisać wielkość  $S_{AA}$ , posługując się wartością parametru  $\phi$ .

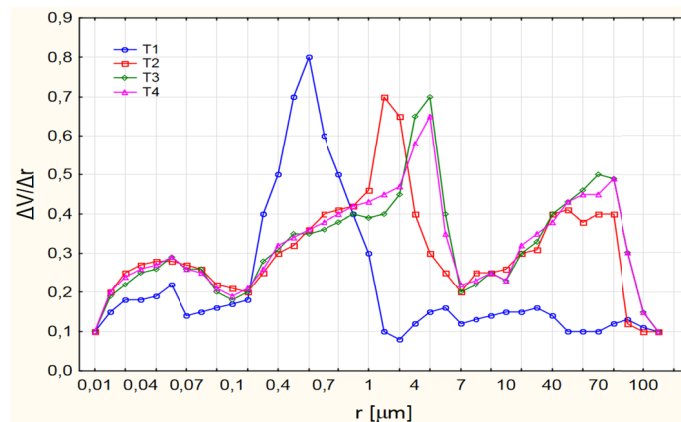
#### Analiza wpływu domieszki napowietrzającej i perlitu na rozkład objętości porów utwardzonych zapraw renowacyjnych

Na rysunkach 7 i 8 pokazano krzywe różniczkowego rozkładu objętości porów, w zależności od ich promieni zastępczych, dla utwardzonych zapraw renowacyjnych: T1 ( $C_{Per} = 0$ ;  $C_L = 0$ ), T2 ( $C_{Per} = 10$ ;  $C_L = 0,3$ ), T3 ( $C_{Per} = 15$ ;  $C_L = 0,5$ ), T4 ( $C_{Per} = 20$ ;  $C_L = 0,8$ ). Taki sposób przedstawiania uwidacznia wyraźnie, w którym zakresie wymiarów pory te najczęściej występują, a ponadto pokazuje, czy rozkład porów jest mono- czy polimodalny.



Rys. 7. Różniczkowy rozkład objętości porów w zależności od ich promieni zastępczych, dla utwardzonych zapraw renowacyjnych: T1: ( $C_{Per} = 0$ ;  $C_L = 0$ ), T2: ( $C_{Per} = 10$ ;  $C_L = 0,3$ ), T3: ( $C_{Per} = 15$ ;  $C_L = 0,5$ ), T4: ( $C_{Per} = 20$ ;  $C_L = 0,8$ ), dla promieni zastępczych porów z przedziału 0,01-10  $\mu\text{m}$

Fig. 7. Differential distribution of pore volume dependent on their equivalent radius for hardened renovation mortars: T1: ( $C_{Per} = 0$ ;  $C_L = 0$ ), T2: ( $C_{Per} = 10$ ;  $C_L = 0,3$ ), T3: ( $C_{Per} = 15$ ;  $C_L = 0,5$ ), T4: ( $C_{Per} = 20$ ;  $C_L = 0,8$ ), for equivalent radiuses between 0,01-100  $\mu\text{m}$



Rys. 8. Różniczkowy rozkład objętości porów w zależności od ich promieni zastępczych, dla utwardzonych zapraw renowacyjnych: T1: ( $C_{Per} = 0$ ;  $C_L = 0$ ), T2: ( $C_{Per} = 10$ ;  $C_L = 0,3$ ), T3: ( $C_{Per} = 15$ ;  $C_L = 0,5$ ), T4: ( $C_{Per} = 20$ ;  $C_L = 0,8$ ), dla promieni zastępczych porów z przedziału 0,01-100  $\mu\text{m}$

Fig. 8. Differential distribution of pore volume dependent on their equivalent radius for hardened renovation mortars: T1: ( $C_{Per} = 0$ ;  $C_L = 0$ ), T2: ( $C_{Per} = 10$ ;  $C_L = 0,3$ ), T3: ( $C_{Per} = 15$ ;  $C_L = 0,5$ ), T4: ( $C_{Per} = 20$ ;  $C_L = 0,8$ ), for equivalent radiuses between 0,01-100  $\mu\text{m}$

Na rysunku 9 pokazano zestaw próbek przeznaczonych do badań zdolności magazynowania soli po 8 dniach nasączenia roztworem soli. W lewym górnym rogu znajdują się próbki niezawierające domieszki napowietrzającej oraz perlitu, w prawym dolnym rogu zaś – próbki napowietrzone, zawierające perlit.



Rys. 9. Zestaw próbek przeznaczonych do badań zdolności magazynowania soli po 8 dniach nasączenia roztworem soli

Fig. 9. Set of samples for testing their ability to store salts after 8-days of soaking in salt solution

Na podstawie analizy wyników przedstawionych na rysunkach 7 i 8 można stwierdzić, że istnieje znaczna różnica między krzywymi rozkładu wielkości porów utwar-

dzonych zapraw niezawierających domieszki napowietrzającej lub/i perlitu a zaprawami porowatymi. W przypadku zaprawy T1, dla której  $C_{Per} = 0$  i  $C_L = 0$ , krzywa różniczkowego rozkładu porów ma charakter jednomodalny. Największą objętość porów zaobserwowano dla porów o średnicy 0,2-1  $\mu\text{m}$ . Pochodzą one od porów utworzonych w przestrzeni międzyziarnowej, którą częściowo wypełniają hydraty powstałe podczas wiązania cementu.

Dla utwardzonych zapraw utworzonych z receptur zawierających domieszki napowietrzające i perlit, reprezentowane krzywymi T2, T3 i T4 (rys. 7 i 8), krzywe różniczkowe rozkładu objętości porów mają kształt bimodalny, w którym pierwszy pik odpowiada średnicom porów zawartych w przedziale 1-10  $\mu\text{m}$ , a drugi – w przedziale 10-100  $\mu\text{m}$ . Zestawiając uzyskane wyniki ze zdjęciem przedstawionym na rysunku 9 można stwierdzić, że:

- próbka utwardzonej zaprawy T1, o porowatości otwartej:  $\Phi \sim 25\%$ , dla której największa objętość porów odpowiada średnicom zastępczym z przedziału 0,1-1,0  $\mu\text{m}$  (lewy górny róg zdjęcia na rysunku 9), ma suchą powierzchnię i nie zaobserwowano na niej występowania skryształizowanych soli. Oznacza to, że aktywność kapilarna takich zapraw jest bardzo niska. Również jej zdolność akumulacji soli jest niewielka i wynosi ok. 1  $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 24 \text{ h}$ ;
- próbka T2, leżąca na przekątnej między lewym dolnym rogiem a prawym górnym (rys. 9, o porowatości otwartej:  $\Phi \sim 35\%$ , dla której największa objętość porów odpowiada średnicy zastępczej z przedziału 1-7  $\mu\text{m}$  po 8 dniach nasączenia roztworem soli, ma wilgotną powierzchnię i zaobserwowano na niej występowanie skryształizowanych soli. Oznacza to, że utwardzone zaprawy w porach o średnicy 17  $\mu\text{m}$  wykazują wysoką aktywność kapilarną. Sole na powierzchni próbek wystąpiły tu najszybciej, tj. już po 3 dniach nasączenia roztworem soli;
- próbki T2 i T3, znajdujące się w prawym dolnym rogu (rys. 9), mają porowatość otwartą  $\Phi \sim 45\%$ , a największa objętość ich porów odpowiada średnicy zastępczej zawartej w przedziale 3-10  $\mu\text{m}$  oraz 15-100  $\mu\text{m}$ . Dla tych próbek, mimo wysokiej zdolności akumulacji soli ( $S_{AA} = 7 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 24 \text{ h}$ ), po 8 dniach nawilżania, na powierzchni próbek nie zaobserwowano wykryształizowanych soli. Oznacza to, że próbki te mają wysoką aktywność kapilarną oraz wysoką zdolnością magazynowania soli.

## 7. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań przedstawiających zależność między podstawowymi składnikami receptur zapraw renowacyjnych, które są odpowiedzialne za kształtowanie porów, takimi jak lekkie kruszywo (lekki perlit) oraz domieszka napowietrzająca. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że oba te składniki wywierają wpływ na porowatość utwardzonych zapraw, ich zdolność magazynowania soli oraz rozkład wielkości porów.

Ponadto ustalono, że:

- wraz ze wzrostem porowatości otwartej utwardzonej zaprawy zwiększa się jej zdolność akumulacji soli;
- średnica porów zapraw uzależniona jest od zawartości perlitu i domieszki napowietrzającej w recepturze tych zapraw;
- najmniejszą średnicę porów, wynoszącą 0,1-1,0  $\mu\text{m}$ , mają zaprawy nienapowietrzane.

- Wykazują się one niską aktywnością kapilarną i niską zdolnością akumulowania soli;
- zaprawy porowate, w których skład wchodzi domieszka napowietrzająca lub/i perlit, mają bimodalny różniczkowy rozkład wielkości porów. Dla tych zapraw największa objętość porów odpowiada średnicy zawartej w przedziałach 1-10  $\mu\text{m}$  oraz 10-100  $\mu\text{m}$ ;
- największą zdolność akumulacji soli mają zaprawy o porowatości otwartej  $\Phi \geq 45\%$ , o bimodalnym różniczkowym rozkładzie porów o średnicach zawartych w przedziałach 3-10  $\mu\text{m}$  oraz 15-100  $\mu\text{m}$ .

Zaprawy renowacyjne otrzymane z receptur zawierających domieszkę napowietrzającą w ilości ok. 0,6 kg/t, lekkie kruszywo w postaci perlitu w ilości ok. 20 kg/t, przy zawartości cementu 150 kg/t w stosunku do wszystkich składników w stanie suchym, mogą być odpowiednim rozwiązaniem do wykonywania tynków renowacyjnych podkładowych, względnie tynków magazynujących w systemie tynków renowacyjnych.

## LITERATURA

- [1] Anwendung von Sanierputzen in der baulichen Denkmalpflege, 1995. WTA Schriftenreihe Bd. 14, eds. Venzmer H., Kollmann H., Aedificatio Freiburg.
- [2] Dettmering T., Kollmann H., 2012. Putze in Bausanierung und Denkmalpflege. Beuth Verlag Berlin.
- [3] Lubelli B., De Rooij M.R., 2009. NaCl crystallization in restoration plasters. Constr. Build. Mater. 23, 1736-1742.
- [4] Lubelli B. van Hees R.P.J., Groot C.J.W.P., 2006. Sodium chloride crystallization in a „salt transporting” restoration plaster. Cem. Concr. Res. 36, 1467-1474.
- [5] Pavliková M. et al., 2011. Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings’ walls, Constr. Build. Mater. 25, 1205-1212.
- [6] Petković J. et al., 2010. Moisture and salt transport in three-layer plaster/substrate systems. Constr. Build. Mater. 24(1), 118-127.
- [7] Petković J. et al., 2007. Salt transport in plaster/substrate layers. Mater. Struct. 40, 475-490.
- [8] PN-EN 998-1:2012P. Wymagania dotyczące zapraw do murów. Cz. 1. Zaprawa tynkarska.
- [9] WTA Merkblatt 2-9-04/D:2005-10. Sanierputzsysteme.

## RESTORATION PLASTERS CURRENT ISSUES

*Summar.* A common cause of damage during the renovation of buildings of historical interest, is poorly functioning horizontal and vertical isolation. At the time the wall is penetrated by subsoil moisture, due to capillary rising, through the porous structure of the walls. The best results for removing the effects of capillary rising of water, are obtained by using complex methods involving physical or chemical re-creation of anti-moisture barrier and drying and desalting of damp walls using a restoration plaster. The efficiency of restoration plasters in drying and desalination of the walls depends on the porosity and particularly the size of the pores. The paper presents the results of research showing the relation between basic components of the recipes, which are responsible for the formation of pores, i.e. light perlite, lightweight aggregate and aeration admixtures based on  $\alpha$ -sodium olefin, at open porosity, pore volume distribution and storage capacity of salt.