

ZASTOSOWANIE ODPADÓW PRODUKCJI PŁYT CEMENTOWO-WIÓROWYCH DO WYTWARZANIA KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Walery JEZIERSKI^{a*}, Natalja KUZNECOVA^b

^a Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

^b Tambowski Uniwersytet Techniczny, ul. Miczurinska, 112E, 392032 Tambow, Rosja

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu dodatku z odpadów produkcji płyt cementowo-wiórowych na właściwości mechaniczne kompozytu cementowego. Zgodnie z przyjętym celem wytrzymałość na ściskanie (odpowiedź Y_1) oraz wytrzymałość na zginanie (odpowiedź Y_2) próbek wykonanych z zaprawy cementowej zbadano w zależności od udziałów cementu (czynnik z_1), piasku naturalnego (czynnik z_2) i odpadów (czynnik z_3). Przy realizacji eksperymentu zastosowano lokalne planowanie sympleksowe w warunkach ograniczenia zakresu zmienności wybranych czynników. Na podstawie wyników badań opracowano modele matematyczne analizowanych zależności oraz określono proporcje cementu, piasku naturalnego oraz dodatku odpadów, tworzące punkt bazowy przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu odpadów w produkcji kompozytów cementowych.

Słowa kluczowe: odpady produkcji, płyty cementowo-wiórowe, kompozyty cementowe, właściwości fizyko-techniczne.

1. Wprowadzenie

Perspektywicznym kierunkiem rozwoju przemysłu budowlanego jest opracowanie i wdrożenie technologii produkcji wyrobów betonowych zdolnych wytrzymać konkurencję. Obniżenie kosztów wyrobów przy zachowaniu wymaganej jakości może być osiągnięte przez zastosowanie dostępnych miejscowych kruszyw. Niektóre regiony europejskie charakteryzują się deficytem odpowiedniej jakości kruszyw do betonów. Aktualnym zadaniem jest opracowanie dla nich najlepszych receptur wieloskładnikowych betonów drobnoziarnistych i zapraw cementowych przy minimalnej materiałochłonności produkcji. Racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych można osiągnąć poprzez zagospodarowanie różnego typu odpadów, które często stają się cennym surowcem wtórnym. Celowym jest wykorzystanie jako dodatków odpadów technogennych. Pozwala to, równocześnie z rozwiązaniem problemów przemysłu budowlanego, rozwiązać również problemy ekologiczno-ekonomiczne w regionie.

Jednym z rodzajów odpadów, powstających w przedsiębiorstwach przemysłu budowlanego produkujących płyty cementowo-wiórowe (PCW), jest drewniano-cementowy proszek, który gromadzi się w dużych ilościach i tworzy wielkie problemy dla przedsiębiorstw-producentów. Magazynowanie lub transport i utylizacja tych odpadów wymagają bowiem znacznych nakładów materialnych.

W artykule przeprowadzono analizę możliwości

wykorzystania odpadów produkcji płyt cementowo-wiórowych jako dodatku w kompozytach cementowo-piaskowych. Wykonano badania eksperymentalne i opracowano modele matematyczne zależności właściwości mechanicznych uzyskanego materiału. Zaproponowano przy tym proporcje składników mieszanki, tworzące punkt bazowy przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu odpadów w produkcji kompozytów cementowych.

2. Charakterystyka PCW

Płyty cementowo-wiórowe są dosyć dobrym materiałem budowlanym dzięki swoim charakterystykom fizyczno-mechanicznym, ekologiczności i niskiej cenie. Wysoka jakość eksploatacyjna płyt określa szeroki zakres ich zastosowania. Z roku na rok, przede wszystkim w krajach Europy Wschodniej, skala produkcji płyt cementowo-wiórowych rośnie.

W procesie produkcji płyt w przedsiębiorstwach tworzy się duża ilość drewniano-cementowego proszku różnych frakcji, którego część stanowią od 5 do 10% ogólnej objętości produkcji PCW. Podstawowa masa odpadów powstaje na etapie odcinania nierównych brzegów gotowych płyt. Odcięte części są kruszone i usuwane ze strefy produkcji. Nasypowa gęstość proszku wynosi około 650 kg/m^3 . Skład granulometryczny proszku w poszczególnych frakcjach przedstawia się następująco (Il'icev i in., 2011): ponad 1 mm – 7 %, ponad 0,63 mm –

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: w.jezierski@pb.edu.pl

4%, ponad 0,32 mm – 81%, ponad 0,16 mm – 8%.

Płyty cementowo-wiórowe produkuje się metodą pólusowego prasowania mieszanki na bazie cementu portlandzkiego. Komponentami, tworzącymi mieszankę do prasowania płyt są (Rahimov i in., 2009): cement portlandzki – 65%, wióry drewniane – 24%, woda – 8,5%, dodatek hydratacyjny (krzemian sodu i inne) – 2,5%.

Zakładając, że w składzie odpadów PCW przeważa komponent mineralny, można przyjąć, że odpady produkcji płyt można użyć w charakterze wypełniacza do kompozytów cementowych. Planuje się, że przed wprowadzeniem do mieszanki kompozytu cementowego, odpady PCW będą podlegać rozdrobieniu w kulistym młynie wibracyjnym. Dzięki rozdrobieniu, cement zawierający się w odpadach, w wyniku mechanicznej aktywacji może częściowo odbudować swoją zdolność do ponownej reakcji i będzie pozytywnie wpływać na trwałość kompozytu cementowego z dodatkiem odpadów. Z drugiej strony, proszek z PCW zastępując częściowo piasek naturalny w mieszance, nie daje gwarancji podwyższenia jakości kompozytu cementowego, ponieważ pochodzenie i właściwości ich istotnie różnią się. Ocena możliwości wykorzystania odpadów produkcji PCW w charakterze dodatku do kompozytów cementowych, a także określenie możliwie najlepszych parametrów składu mieszanki, były celem badań.

3. Sformułowanie problemu i planowanie badań

Zgodnie z przyjętym celem pracy 28-dniową wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych (odpowiedź Y_1) oraz wytrzymałość na zginanie (odpowiedź Y_2) postanowiono zbadać w zależności od trzech wybranych czynników: udziału cementu (czynnik z_1), piasku naturalnego (czynnik z_2) i odpadów PCW (czynnik z_3).

Badanie zostało zrealizowane (tab. 1) według planu sympleksowego dla trzech zmiennych w układzie „skład-własność”, zawierającego $N = 7$ prób (Brodzki i in., 1982). Ten plan przewiduje określony układ realizacji pomiarów i opracowanie modelu w postaci niepełnego wielomianu trzeciego stopnia dla trzech zmiennych $z_1, z_2,$

z_3 :

$$\tilde{Y}_i = a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_{12} z_1 z_2 + a_{13} z_1 z_3 + a_{23} z_2 z_3 + a_{123} z_1 z_2 z_3 \quad (1)$$

W każdym punkcie takiego planu powinien być spełniony warunek:

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1 \quad (2)$$

Według tego planu każdy z czynników z_1, z_2, z_3 należy rozpatrywać na czterech poziomach: 0; 0,333; 0,5; 1. Ostatni warunek nie odpowiadał przyjętemu celowi, ponieważ nie miało sensu i było niemożliwe wykonywać badania w całym zakresie zmiany udziałów wybranych czynników (od 0 do 1). Praktyczne znaczenie miały jedynie takie zakresy zmienności czynników, które odpowiadały realnym składom mieszank z dodatkiem odpadów PCW. W związku z tym, przy realizacji danego eksperymentu zastosowano lokalne planowanie sympleksowe w warunkach ograniczenia zakresu zmienności wszystkich czynników (Zedginidze, 1986). Procedury realizacji tego podejścia zostały szczegółowo opisane przez jednego ze współautorów (Jeziński i Małaszkiwicz, 2015).

Na podstawie wstępnych badań został wybrany podobszar, obejmujący preferowane składy mieszanki cementu, piasku naturalnego i odpadów PCW. W tym podobszarze udziały masowe składników zmieniały się w zakresach: cementu (x_1) – od 0,143 do 0,333; piasku naturalnego (x_2) – od 0 do 0,75; odpadów PCW (x_3) – od 0 do 0,857. Wartości udziałów składników określały współrzędne wierzchołków podobszaru wybranego do badania: A_1 ($x_1 = 0,333; x_2 = 0,333; x_3 = 0,333$); A_2 ($x_1 = 0,25; x_2 = 0,75; x_3 = 0$); A_3 ($x_1 = 0,143; x_2 = 0; x_3 = 0,857$).

Wyżej wymieniony podobszar został transformowany do pełnego planu sympleksowego poprzez wprowadzenie pseudo składników z_1, z_2, z_3 , które w każdym u -tym układzie planu są związane z czynnikami rzeczywistymi x_1, x_2, x_3 zależnością:

$$x_i^{(u)} = x_i^{(1)} + z_2^{(u)}(x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) + z_3^{(u)}(x_i^{(3)} - x_i^{(1)}) \quad (3)$$

Tab. 1. Plan eksperymentu i poziomy zmienności rozpatrywanych czynników

Numer punktu	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3
1	1	0	0	0,333	0,333	0,333
2	0	1	0	0,25	0,75	0
3	0	0	1	0,143	0	0,857
4	0,5	0,5	0	0,2915	0,5415	0,167
5	0,5	0	0,5	0,2385	0,1665	0,595
6	0	0,5	0,5	0,1965	0,375	0,4285
7	0,333	0,333	0,333	0,242	0,361	0,397
8*	0,2	0,35	0,45	0,219	0,329	0,452

Poziomy zmienności czynników z_1, z_2, z_3 oraz odpowiadających im rzeczywistych x_1, x_2, x_3 przedstawiono w tabel 1. Po uzyskaniu wyników pomiarów można było opracować modele badanych cech w zależności od pseudo składników (z_1, z_2, z_3). Chcąc otrzymać modele matematyczne z czynnikami w postaci naturalnej (x_1, x_2, x_3), należało odkodować je przez podstawienie odpowiednich zależności.

W każdym punkcie planu przyjęto powtarne pomiary na 6 (dla Y_1) i 3 (dla Y_2) próbkach. Liczba pomiarów w całym badaniu, z uwzględnieniem dodatkowego punktu 8* poza planem dla uzyskania wyników do sprawdzenia adekwatności modeli, wynosiła 54. W trakcie realizacji planów eksperymentu przy wyborze kolejności pomiarów w próbach przestrzegano zasad randomizacji (Krasovskij i in., 1982).

4. Zastosowane materiały i metodyka badań

Badania przeprowadzono w ramach Umowy o współpracy naukowo-technicznej pomiędzy Politechniką Białostocką i Tambowskim Państwowym Uniwersytem Technicznym (Federacja Rosyjska) w laboratorium TPUT. Do przygotowania próbek zostały użyte:

- cement portlandzki CEM M 500 (bez dodatków) o gęstości 3,12 kg/dm³ SA „Sjebriakowcement”, Michajłowska;
- naturalny piasek kwarcowy o gęstości 2,71kg/dm³ z modułem grubości 1,8 zgodnie z GOST 8736-93 *Piasek dla robót budowlanych* z miejscowości Krasnieńkoje, obwód Tambowski;
- proszek odpadów PCW SA "TAMAK", Tambow;
- woda wodociągowa.

Wstępnie odpady są rozdrabniane w kulistym młynie wibracyjnym w ciągu 30 minut. Rozdrobnione odpady mają uziarnienie 0,05 mm i mniejsze. Do badań według planu eksperymentu (tab. 1) przygotowano 8 różnych mieszanek betonowych. Zgodnie z planem eksperymentu, skład procentowy poszczególnych składników przedstawiał się następująco: cementu – od 14,3 do 33,3%; wprowadzanych odpadów – od 0 do 85,7%; piasku naturalnego – od 0 do 75,0%. Wodę dodawano w takiej objętości, która zapewniała równą konsystencję mieszanek dla wybranych składów we wszystkich

punktach planu. Próbkki 40×40×160 mm formowano bezpośrednio po wymieszaniu składników mieszanki. Próbkki zagęszczano na stoliku Vebe i rozformowywano po 24 godzinach dojrzewania, a następnie umieszczano w komorze o temperaturze 20°C ± 2°C i wilgotności powietrza 90% ± 5%, gdzie dojrzewały przez kolejne 27 dni.

Badanie wytrzymałości na ściskanie i zginanie przeprowadzono zgodnie z GOST 10180-2012 *Beton. Metody oznaczania ściskania i wytrzymałości na rozciąganie, elementów betonowych i żelbetowych*.

5. Wyniki badań i opracowanie modeli matematycznych

Wstępna analiza wyników badania $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}$ (tab. 2) pozwoliła zauważyć, że istnieje rozrzut wartości \bar{Y}_{ij} w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach. Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów S^2_{oji} z zastosowaniem kryterium Cochra (Krysicki i in., 2003) wykazało, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowe wartości kryterium Cochra (dla $S^2_{o1i} - G_{01} = 0,2685$; dla $S^2_{o2i} - G_{02} = 0,253$) okazały się mniejsze od wartości krytycznych: $G_{kr(1);0,05;5;7} = 0,3974$ i $G_{kr(2);0,05;2;7} = 0,5612$.

Można więc przyjąć, że wariancje prób dla wszystkich badań są jednorodne, a wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach mogą być obliczone jako wartości średnie: $S^2_{o1} = 2,530$ przy liczbie stopni swobody $\nu = 35$; $S^2_{o2} = 0,131$ przy $\nu = 14$.

Na podstawie wyników eksperymentu (tab. 2) opracowano zależności $Y_i = f(z_1, z_2, z_3)$ za pomocą wzorów podanych w pracy (Brodskii i in., 1982):

- dla wytrzymałości na ściskanie

$$\bar{Y}_1 = 9,810 z_1 + 22,070 z_2 + 7,579 z_3 - 0,790 z_1 z_2 + 8,302 z_1 z_3 - 12,920 z_2 z_3 + 79,904 z_1 z_2 z_3 \quad (4)$$

- dla wytrzymałości na zginanie

$$\bar{Y}_2 = 0,325 z_1 + 0,523 z_2 + 0,289 z_3 + 0,096 z_1 z_2 + 0,172 z_1 z_3 - 0,148 z_2 z_3 - 1,548 z_1 z_2 z_3 \quad (5)$$

Tab. 2. Plan eksperymentu, wariancje i wyniki pomiarów $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}$

Numer	x_1	x_2	x_3	\bar{Y}_{1i} MPa	S^2_{o1i}	\bar{Y}_{2i} MPa	S^2_{o2i}
1	0,333	0,333	0,333	9,810	0,6479	0,325	0,1322
2	0,25	0,75	0	22,070	6,9964	0,523	0,1550
3	0,143	0	0,857	7,579	1,2000	0,289	0,1391
4	0,2915	0,5415	0,167	15,743	8,1830	0,448	0,1202
5	0,2385	0,1665	0,595	10,770	1,5490	0,350	0,1179
6	0,1965	0,375	0,4285	11,593	4,7000	0,369	0,1642
7	0,242	0,361	0,397	15,509	0,5680	0,335	0,0901
8*	0,219	0,329	0,452	12,095	1,6600	0,263	0,0811

$$S^2_{o1} = 2,5300; \quad S^2_{o2} = 0,1312$$

Sprawdzenie adekwatności opracowanych modeli wykonano za pomocą testu *t*-Studenta (Brodskii i in., 1982) z wykorzystaniem danych z pomiarów w dodatkowym punkcie 8*. Wartości \bar{Y}_{18} , \bar{Y}_{28} mierzone w tym punkcie oraz wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach pozwoliły obliczyć *t*-kryterium dla każdej z dwóch funkcji i po porównaniu z krytyczną wartością *t*-kryterium adekwatność modeli (4) i (5) została potwierdzona. Tym samym, uznano ich przydatność do dalszej analizy.

W celu praktycznego zastosowania uzyskanych modeli może być wykonane odkodowanie przez podstawienie zależności między naturalnymi wielkościami i pseudo składnikami. W tym celu opracowano formuły związku pomiędzy naturalnymi współrzędnymi x_i i współrzędnymi z_i . Dla przeniesienia współrzędnych z jednego systemu afinicznego do drugiego zastosowano wzory (Zedginidze, 1986):

$$z_1 = z_1^{(1)} + x_2(z_1^{(2)} - z_1^{(1)}) + x_3(z_1^{(3)} - z_1^{(1)}) \quad (6)$$

$$z_2 = z_2^{(1)} + x_2(z_2^{(2)} - z_2^{(1)}) + x_3(z_2^{(3)} - z_2^{(1)}) \quad (7)$$

$$z_3 = z_3^{(1)} + x_2(z_3^{(2)} - z_3^{(1)}) + x_3(z_3^{(3)} - z_3^{(1)}) \quad (8)$$

Ponieważ przeniesienie współrzędnych jest możliwe tylko dla niezależnych zmiennych, to jest niezwiązanych warunkiem (2), to równania (4) i (5) należało przekształcić pomijając jedną zmienną, na przykład z_3 . Dlatego wartości $z_i^{(j)}$ wyliczono poprzez rozwiązanie dwóch układów równań:

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_1^{(1)} + x_2^{(1)} z_1^{(2)} + x_3^{(1)} z_1^{(3)} = 1 \\ x_1^{(2)} z_1^{(1)} + x_2^{(2)} z_1^{(2)} + x_3^{(2)} z_1^{(3)} = 0 \\ x_1^{(3)} z_1^{(1)} + x_2^{(3)} z_1^{(2)} + x_3^{(3)} z_1^{(3)} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_2^{(1)} + x_2^{(1)} z_2^{(2)} + x_3^{(1)} z_2^{(3)} = 0 \\ x_1^{(2)} z_2^{(1)} + x_2^{(2)} z_2^{(2)} + x_3^{(2)} z_2^{(3)} = 1 \\ x_1^{(3)} z_2^{(1)} + x_2^{(3)} z_2^{(2)} + x_3^{(3)} z_2^{(3)} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

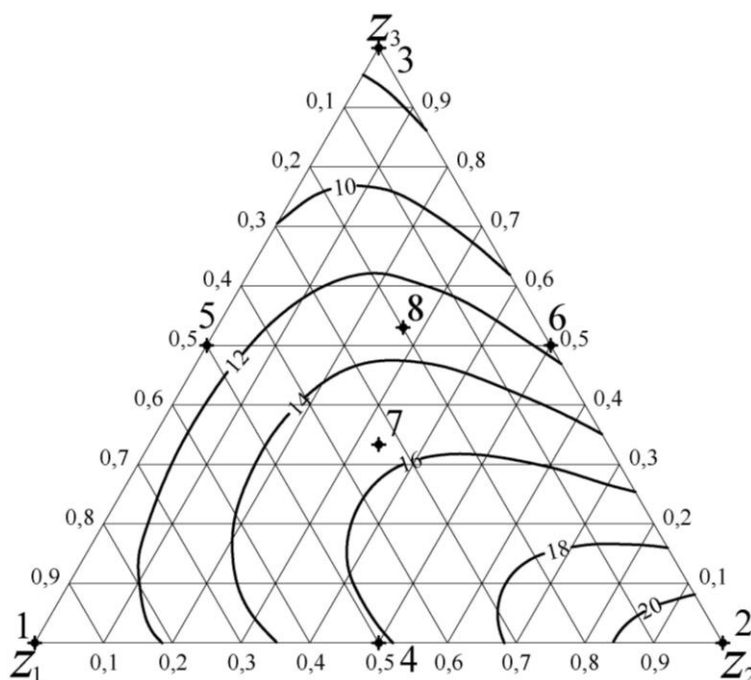
W wyniku rozwiązania układów równań (9) i (10) uzyskano wartości $z_i^{(j)}$ i po podstawieniu ich (6), (7) otrzymano formuły związku pomiędzy współrzędnymi naturalnymi x_i i systemem współrzędnych z_i :

$$z_1 = 6,0035 - 8,0047 x_2 - 7,0053 x_3 \quad (11)$$

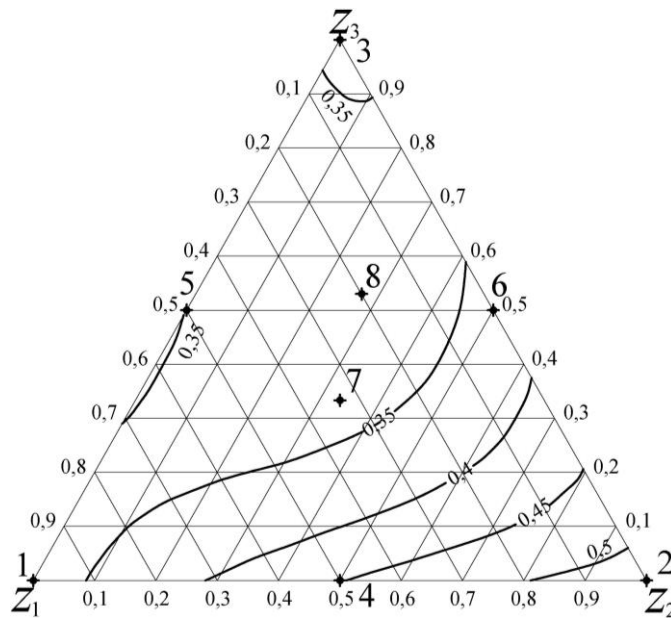
$$z_2 = -2,6680 + 4,8906 x_2 + 3,1132 x_3 \quad (12)$$

$$z_3 = -2,3356 + 3,1141 x_2 + 3,8921 x_3 \quad (13)$$

Po podstawieniu zależności (11), (12), (13) do (4) i (5) można uzyskać równania regresji w naturalnych współrzędnych. Do interpretacji wyników badań jednak zastosowano modele (4) i (5), na podstawie których opracowano wykresy w postaci izolinii badanych zależności we współrzędnych pseudo składników z_1 , z_2 , z_3 (rys. 1 i 2). Te modele pozwoliły powiększyć badany podobszar do pełnych trójkątów sympleksowych, znacznie ułatwiając interpretację wyników. Natomiast merytoryczną interpretację wykonano w oparciu o dane z tabel 1 i 2 przy zastosowaniu naturalnych współrzędnych x_1 , x_2 , x_3 .



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek w zależności od zawartości składników: z_1 – cementu, z_2 – piasku naturalnego, z_3 – dodatku odpadów PCW



Rys. 2. Wytrzymałość na zginanie Y_2 badanych próbek w zależności od zawartości składników: z_1 – cementu, z_2 – piasku naturalnego, z_3 – dodatku odpadów PCW

6. Analiza wyników badań

Jak widać z rysunku 1, najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie Y_1 badanych próbek, wynoszącą około 22 MPa, uzyskano w punkcie 2 przy udziałach składników w mieszance: cementu $x_1 = 0,25$; piasku $x_2 = 0,75$; odpadów PCW $x_3 = 0$ (tab. 1). Taki rezultat można objaśnić tym, że dla punktu 2 planu przyjęto tradycyjnie rekomendowany skład i mieszanka nie zawierała dodatku. W całej pozostałej przestrzeni czynnikowej, w której każdym punkcie do mieszanki wprowadzano dodatek odpadów PCW, wartości wytrzymałości zmniejszały się. Ten fakt świadczy o negatywnym wpływie badanego dodatku na wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych.

Przy przejściu z punktu 2 do punktu 1 zwiększa się zawartość cementu (od 0,25 do 0,333) i dodatku PCW (od 0 do 0,333) przy jednoczesnym obniżeniu zawartości piasku (od 0,75 do 0,333). W wyniku tej zmiany ma miejsce prawie równomierne obniżenie wytrzymałości na ściskanie od 22 do 10 MPa. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek, wynoszącą około 7,5 MPa, uzyskano w punkcie 3 przy zawartości dwóch komponentów w mieszance: cementu $x_1 = 0,143$ i odpadów PCW $x_3 = 0,857$. Przy przejściu z punktu 2 do punktu 3 zmniejsza się zawartość cementu (od 0,25 do 0,143) i piasku (od 0,75 do 0) przy jednoczesnym powiększeniu dodatku od 0 do 0,857. W wyniku takiej zmiany wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się najbardziej istotnie – o 2,9 razy.

Przy przejściu z punktu 1 do punktu 3 następuje jednoczesne zmniejszenie się zawartości cementu od 0,333 do 0,143 i piasku od 0,333 do 0 przy powiększeniu zawartości dodatku od 0,333 do 0,857. Uwzględniając to zauważono, że na skutek zamiany części cementu i piasku na odpady PCW wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek waha się na poziomie 10-11 MPa,

osiągając najwyższą wartość około 11 MPa w punkcie 5, odpowiadającą zawartości cementu – 0,238; piasku – 0,167; dodatku – 0,595. Natomiast pełna zamiana piasku na odpady daje najmniejszą wartość wytrzymałości Y_1 (około 7,5 MPa).

Z rysunku 2 wynika, że najwyższą wytrzymałość na zginanie badanych próbek $Y_2 = 0,523$ MPa także uzyskano w punkcie 2, przy składzie mieszanki bez dodatku odpadów PCW. Podobnie jak dla wytrzymałości na ściskanie Y_1 , w pozostałej części przestrzeni czynnikowej, w każdym punkcie, w którym do mieszanki wprowadzano dodatek, wartości Y_2 zmniejszały się, co świadczy o negatywnym wpływie badanego dodatku także i na wytrzymałość na zginanie.

Przy przejściu z punktu 2 do punktu 1 zwiększa się udział cementu i dodatku przy jednoczesnym obniżeniu udziału piasku. W wyniku tej zmiany ma miejsce prawie równomierne obniżenie wytrzymałości na zginanie od 0,52 do 0,32 MPa. Przy przejściu z punktu 1 do punktu 3 zmniejsza się udział cementu i piasku przy powiększeniu dodatku od 0,333 do 0,857. Zamiana części cementu i piasku na odpady PCW spowodowała, że w środkowej części odcinka 1-3 (w okolicy punktu 5) wytrzymałość na zginanie ustabilizowała się na poziomie 0,35 MPa. Przy przemieszczeniu w kierunku od punktu 2 do punktu 7 następuje praktycznie liniowe obniżenie wytrzymałości na zginanie do 0,34 MPa.

Na izoliniach, pokazanych na rysunku 1, wykryto kierunek, dla którego charakterystyczna jest najmniejsza prędkość obniżenia wytrzymałości Y_1 . Ten kierunek pokrywa się z prostą prowadzoną przez punkty 2-7-5. Wyróżnia się tu zwłaszcza otoczenie punktu 7. Porównując składy mieszanek w punktach 2 i 7, zauważono, że zawartość cementu w nich jest praktycznie jednakowa i wynosi około 0,25. Jednocześnie w punkcie 7 około 50% piasku, zawierającego się w mieszance w punkcie 2 ($x_2 = 0,75$), zamienia się na odpady PCW

($x_2 = 0,361$; $x_3 = 0,397$). Ta zamiana spowodowała obniżenie wytrzymałości Y_1 materiału od 22,07 do 15,51 MPa, to znaczy o 29,7 %. Tak więc, na odcinku 2-7 przy zawartości cementu do mieszanki około 0,25, wprowadzenie w mieszankę dodatku odpadów PCW zamiast piasku powoduje najmniejsze straty wytrzymałości Y_1 , a mianowicie – każdy procent masowy wprowadzonego dodatku odpadów PCW powoduje straty wytrzymałości Y_1 w wysokości około 0,75% w stosunku do wytrzymałości materiału bez dodatku odpadów. Pozwala to, przy podjęciu decyzji o zastosowaniu dodatku odpadów PCW, oszacować straty wytrzymałości na ściskanie kompozytu cementowego oraz przyjąć punkt 7 jako punkt bazowy dla planowania dalszych badań na temat modyfikacji składu omówionych wyżej mieszanek poprzez zastosowanie innych dodatków lub domieszek w celu podwyższenia wytrzymałości kompozytów przy utylizacji odpadów PCW.

W taki sposób ustalono, że wykorzystanie odpadów PCW w charakterze dodatku dla kompozytów cementowych, wynikające z konieczności ich utylizacji albo częściowej zamiany piasku, przy nieobecności modyfikacji kompozytu innymi dodatkami, zawsze związane jest z obniżeniem się wytrzymałości materiału.

Nie potwierdziła się sformułowana hipoteza o możliwym wpływie mechanicznej aktywacji odpadów na rekonstrukcję reakcyjnej zdolności zawierającego się w nich cementu i jego pozytywnej roli w wzmocnieniu kompozytu z dodatkiem odpadów PCW. Obniżenie się wytrzymałości kompozytu cementowego przy wprowadzeniu tego dodatku oczywiście można wyjaśnić brakiem możliwości utworzenia gęstej i trwałej struktury materiału z powodu zawartości w nim dodatku składnika organicznego, to jest cząstek drewna.

Optymalizując parametry mieszanek z dodatkiem odpadów PCW należy podejmować kompromisową decyzję, zestawiając możliwe straty wytrzymałości materiału i zyski z utylizacji i/lub zamiany części piasku odpadami produkcji PCW.

7. Wnioski

Z przeprowadzonych badań oraz analizy opracowanych modeli matematycznych i wykresów wynikają następujące wnioski:

1. Przy badaniu próbek kompozytu cementowego w postaci beleczek 40×40×160 mm po 28 dniach dojrzewania, wykonywanych z cementu, piasku naturalnego i odpadów PCW, wykryto obniżenie ich wytrzymałości na ściskanie i zginanie w porównaniu z próbkami, przygotowanymi z cementu i piasku bez dodatku odpadów PCW.
2. Opracowane modele matematyczne i wykresy pozwoliły wykryć związek między wahaniami badanych właściwości i udziałem dodatku odpadów PCW w mieszance. Ujawnione efekty można wytłumaczyć obecnością cząstek drewna w odpadach PCW.

3. Przy utylizacji odpadów PCW poprzez ich zastosowanie w produkcji kompozytów cementowych należy uwzględnić, że dla kompensaty strat związanych z obniżeniem charakterystyk wytrzymałościowych materiału konieczna jest jego modyfikacja innymi dodatkami lub domieszkami, poprawiającymi właściwości mieszanki i wzmacniającymi strukturę materiału z dodatkiem odpadów PCW.
4. Określono punkt bazowy dla dalszych badań w kierunku modyfikacji kompozytu cementowego z dodatkiem odpadów PCW, któremu odpowiada skład mieszanki: cement – 0,237; piasek – 0,422; odpady PCW – 0,341. W tym punkcie wykonana zamiana około 50% piasku w mieszance na odpady PCW stanowi rozwiązanie problemu utylizacji (pozytywny efekt z punktu widzenia możliwości utylizacji odpadów), jednakże przy tym wykryto obniżenie wytrzymałości na ściskanie próbek na 30% (negatywny efekt z punktu widzenia obniżenia jakości materiału).

Literatura

- Brodskii V.Z., Brodskii L.I., Golikova T.I., Nikitsina E.P., Pančenko A.A. (1982). Tablice Planov Eksperimenta dla Faktornyh i Polinomial'nyh Modelej. *Metallurgija*, Moskwa.
- GOST 8736-93 Piasek dla robót budowlanych. *Rosstandard*, FGUP Standartinform, Moskwa, 1993.
- GOST 10180-2012 Beton. Metody oznaczania ściskania i wytrzymałości na rozciąganie, elementów betonowych i żelbetowych. *Rosstandard*, FGUP Standartinform, Moskwa, 2013
- Il'icev V.A., Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. (2011). O razvitii proizvodstva stroitel'nykh materialov na osnove vtorichnykh produktov promyshlennosti. *Stroitel'nie materialy*, No. 4, 36-42.
- Jeziński W., Małaszkiwicz D. (2015). Zastosowanie lokalnego planowania sympleksowego do oceny właściwości betonu z kruszywem z recyklingu. W: *Budownictwo ogólne: zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie*, UTP, Bydgoszcz, 133-140.
- Krasovskij G.I., Filaretov G.F. (1982). Planirovanie Eksperimenta. *BGU*, Minsk.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. (2003). Rachunek Prawdopodobieństwa i Statystyka Matematyczna w Zadaniach. Część II. Statystyka Matematyczna. *PWN*, Warszawa.
- Rahimov R.Z., Magdeev U.H., Yarmakovskii V.N. (2009). Ekologija, naučnie dostiženija i innovacii v proizvodstve stroitel'nykh materialov na osnove i s primeneniem tehnogenno go sir'a. *Stroitel'nie materialy*, No. 12, 8-12.
- Zedginidze I.G. (1986). Matematičeskoe Planirovanie Eksperimenta dla Issledovaniâ i Optimizacii Svoisty Smesej. *Mecniereba*, Tbilisi.

APPLICATION OF WASTES FROM CHIP-CEMENT BOARD PRODUCTION IN CEMENT COMPOSITES

Abstract: The paper presents the experimental results of the effect of addition of wastes from chip – cement board production on mechanical properties of cement composites. In accordance with the intended objective, compressive strength (answer Y_1) and the bending strength (answer Y_2) of cement mortar specimens were tested. The variable parameters were: cement contents (factor z_1), natural sand contents (factor z_2) and waste contents (factor z_3). Local simplex planning with limited variation range of the factors was applied

in the experiment. Based on the research results, mathematical models of the analyzed dependencies were developed. Proportions between cement, natural sand and wastes were determined. It gave a starting point in determining the use of wastes in the production of cement composites.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WBiŚ/3/16 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.