

Optimalizacja składu i trwałość kompozytów cementowo-popiołowych z dodatkiem włókien stalowych poddanych korozji

Dr inż. Andrzej Rudziński

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych

Energetyka w Polsce produkuje rocznie ponad 30 mln ton popiołów, co stanowi ponad 25% wszystkich krajowych odpadów. Światowe rezerwy paliw wskazują, że w najbliższych latach węgiel będzie nadal podstawowym surowcem do wytwarzania energii [9]. Racjonalne wykorzystanie ubocznych produktów spalania, opracowywanie i upowszechnianie nowych technologii wytwarzania dóbr będzie zawsze aktualne. Popioły lotne w znacznym stopniu, ale niewystarczającym są wykorzystywane w różnych gałęziach gospodarki, szczególnie w budownictwie [13]. Stanowią cenny komponent cementów. Cementownie ze względu na ochronę środowiska mają limity wytwarzania dwutlenku węgla, co ogranicza ich zdolności produkcyjne. Istnieje więc uzasadniona konieczność szerszego stosowania popiołów, między innymi jako dodatku do drobnopopiołowych kompozytów wykonywanych z piasku, cementu i popiołów.

Coraz bardziej odczuwalny staje się też deficyt nieodtworzalnych, grubopopiołowych kruszyw mineralnych, co skłania do szerszego wykorzystania piasków. Szczególnie w Polsce północnej piaski stanowią materiał bardziej dostępny aniżeli kruszywa grube. Kompozyty wykonane z piasku i ograniczonej ilości cementu bez żadnych zabiegów technologicznych oraz dodatków i domieszek są pod wieloma względami materiałami niższej jakości od tradycyjnych betonów żwirowych. W celu poprawy właściwości technicznych piaskobetonu należy wprowadzić odpowiednie dodatki i domieszki. Dotychczasowe badania kompozytów cementowych wykazały, że dodanie do zapraw i betonów superplastyfikatorów redukuje stosunek masy wody do cementu, co pozwala na uzyskanie wyższych wytrzymałości [7].

Celem pracy było opracowanie receptur kompozytów piaskowo-cementowo-popiołowych o optymalnym składzie z niewielkim dodatkiem włókien stalowych. Popiół lotny zastosowano jako częściowy zamiennik cementu. W celu uzyskania założonych wartości badanych właściwości technicznych do drobnopopiołowych kompozytów cementowo-popiołowych, oprócz superplastyfikatora, dodano niewielkie ilości włókien stalowych. Wprowadzanie nowych technologii przyjaznych środowisku z zastosowaniem odpadów przemysłowych jest pożądane, jeżeli można uzyskać materiały o oczekiwanych właściwościach technicznych i trwałości.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Do badań zastosowano następujące materiały:

- piasek naturalny o uziarnieniu $0 \div 2$ zawierający 81,5% kwarcu, chalcedonu i opalu, 12% skał magmowych i metamorficznych, 5,3% skał osadowych o reaktywności alkalicznej równej 0,
- popiół lotny klasy F o stratach prażenia 4%, pucolaności 84%,

- cement portlandzki CEM I – 32,5 R o zawartości C_3A – 8,3%,
- superplastyfikator Muraplast FK 61 (FM),
- włókna typu „Dramix”, haczykowane, oznaczone symbolem F1 oraz proste oznaczone symbolem F2; kształt i wymiary włókien przedstawiono na rys. 1 a, b; wytrzymałość na rozciąganie stali, z których wykonano włókna wynosi minimum 1100 MPa, smukłość l/d włókien F1 – 49, smukłość włókien F2 – 29,
- 4% roztwory NaCl i $MgSO_4$
- wodę wodociągową.

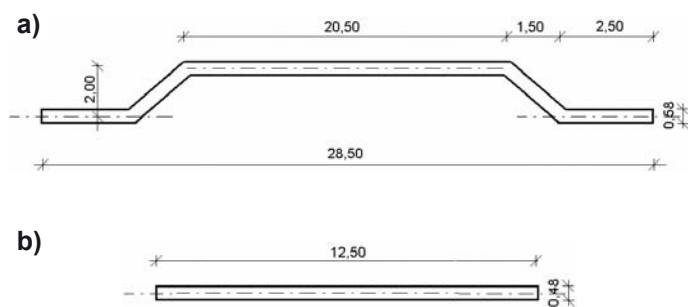
Wykonano 12 serii mieszanek cementowo-popiołowych. Jako serie 0 przyjęto skład jakościowy zbliżony do zaprawy normowej (przy określaniu klasy cementu), z tym, że piasek normowy zastąpiono piaskiem naturalnym oraz dodano superplastyfikator w ilości 1% masy spoiwa (cement + popiół), ograniczając stosunek wody do cementu ($w/c + p$) z 0,5 do 0,4. W seriach o symbolach 1P, 2P, 3P cement kolejno zastępowano popiołem 25, 50, 75% masy cementu. Do serii 0F1: 1PF1, 2PF1, 3PF1 dodano włókna stalowe o symbolu F1, do serii 0F2: 1PF2, 2PF2, 3PF2 włókna o symbolu F2 (rys. 1).

Składniki poszczególnych serii prób mieszano przy użyciu laboratoryjnej mieszarki do zapraw normowych. Mieszanki kompozytów przenoszono do form trójdzielnych, gdzie były zagęszczane, próbki wyjmowano z form po 24 godzinach. Uzyskane beleczki o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm przechowywano do momentu badania w komorze o wilgotności względnej powyżej 95% i temperaturze około 20°C. Skład jakościowy i ilościowy przygotowanych serii prób podano w tabl. 1.

Tabl. 1. Skład jakościowy i ilościowy kompozytów cementowo-popiołowych z włóknami stalowymi

Seria	CEM I 32,5R	Popiół	Włókna stalowe		V _f
			F1	F2	
	[g]				
0	450	–	–	–	–
1P	337,5	112,5	–	–	–
2P	225	225	–	–	–
3P	112,5	375,5	–	–	–
0F1	450	–	18,0	–	0,265
1PF1	337,5	112,5	18,0	–	0,258
2PF1	225	225	18,0	–	0,252
3PF1	112,5	375,5	18,0	–	0,246
0F2	450	–	–	18,0	0,264
1PF2	337,5	112,5	–	18,0	0,258
2PF2	225	225	–	18,0	0,254
3PF2	112,5	375,5	–	18,0	0,247

* Masa piasku we wszystkich seriach prób – 1350 g; w/c – 0,4



Rys. 1. Włókna typu „Dramix”, a) F1, b) F2

Dla wszystkich serii prób wykonano badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz ściskanie po 30 i 90 dobach wiązania i twardnienia (tabl. 2 i 3). Badania odporności korozyjnej przeprowadzono na seriach prób kompozytów, których właściwości techniczne po wstępnych badaniach uznano za optymalne. Wybrane serie 90-dniowych próbek kompozytów cementowo-popiołowych 2P, 2PF1, 2PF2 zanurzone na 710 dni w 4% roztworach chlorku sodowego i siarczanu magnezowego.

Objętości roztworów, w których zanurzone próbki stanowiły 1,5% objętości badanych próbek. Roztworów w czasie nie wymieniano, w razie odparowania uzupełniano wodą destylowaną do stałej objętości. Zmiany stężenia roztworów miały być tylko wynikiem reakcji ze składnikami kompozytów. Działanie roztworów korodujących odbywało się w układzie statycznym. Efekty długotrwałego – 710-dniowego oddziaływania roztworów NaCl, MgSO₄ na kompozyty cementowo-popiołowe określono na podstawie pomiarów:

- wytrzymałości na zginanie f_{ctmk} i ściskanie f_{cmk} ,
- energii pęknięcia E_k ,
- stanu powierzchni włókien, stref kontaktowych matryca-włókno oznaczonych na podstawie obserwacji fotografii z mikroskopu skaningowego.

Uzyskane wartości właściwości technicznych próbek po korozji porównano do analogicznych właściwości serii prób przed korozją (tabl. 2, 3, 4, rys. 4).

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonano na przygotowanych beleczkach na maszynie wytrzymałościowej ZD10Pu. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano na połówkach beleczek, które otrzymano po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na maszynie wytrzymałościowej ZD100Pu.

Wyniki badań (tabl. 2, 3) potwierdzają, że procesy hydratacji mieszanek popiołowo-cementowych zachodzą wolniej niż wykonanych z czystego cementu. Znaczne przyrosty wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie kompozytów cementowo-popiołowych uzyskano dla prób 90-dniowych w stosunku do 28-dniowych. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie $2P_{90}/2P_{28}$ wynoszą prawie 37%, podczas gdy wytrzymałość zaprawy kontrolnej po tym samym okresie czasu wzrosła tylko o niecałe 10%. Podobnie kształtuje się zmiana wytrzymałości na ściskanie; dla próby kontrolnej $0_{90}/0_{28}$ wynosi 4,1%, a dla prób $2P_{90}/2P_{28}$ – 23,6% [8, 11].

Tabl. 2. Wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} kompozytów cementowo-popiołowych z dodatkiem włókien stalowych F1 i F2

Seria	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} [MPa]			
	Wiek próbek – doby			
	28		90	
	f_{ctm}	s	f_{ctm}	s
0	7,09	0,47	7,79	0,77
1P	6,81	0,69	7,71	0,52
2P	5,34	0,54	7,31	0,55
3P	4,33	0,43	5,29	0,57
0F1	8,89	0,75	8,10	0,39
1PF1	7,90	0,70	8,61	0,70
2PF1	6,69	0,66	8,21	0,65
3PF1	5,15	0,37	6,61	0,54
0F2	8,89	0,70	8,44	0,75
1PF2	7,31	0,72	8,21	0,59
2PF2	6,83	0,72	8,80	0,68
3PF2	5,01	0,38	6,13	0,53

Liczba badanych próbek każdej serii – 5 szt.,

s – odchylenie standardowe.

Tabl. 3. Wytrzymałości na ściskanie f_{cm} kompozytów cementowych i cementowo-popiołowych z dodatkiem włókien stalowych F1 i F2

Seria	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]			
	Wiek próbek – doby			
	28		90	
	f_{cm}	s	f_{cm}	s
0	32,82	2,21	34,18	2,21
1P	26,62	1,51	31,80	1,65
2P	24,36	1,42	30,12	1,63
3P	14,18	0,90	14,88	1,11
0F1	38,72	1,97	38,84	1,94
1PF1	36,48	1,98	37,86	1,78
2PF1	29,08	1,78	38,36	1,55
3PF1	16,76	1,50	18,26	1,47
0F2	33,86	1,39	35,24	2,00
1PF2	34,12	1,75	38,26	2,00
2PF2	28,56	1,59	38,14	1,61
3PF2	15,16	1,10	17,86	1,47

Liczba badanych próbek każdej serii – 10 szt.,

s – odchylenie standardowe.

Skład serii o symbolu 2P, w której 50% cementu zastąpiono popiołem uznano za optymalny. Serie z 50% zamianą cementu popiołem uzyskiwały wytrzymałość na zginanie tylko o 6,2%, a na ściskanie 11,9% niższą, w stosunku do kontrolnej bez popiołu. Serie te poddano korozji w typowych mediach korozyjnych. Próby 90-dniowe zanurzone na 710 dni w 4% roztworach NaCl, MgSO₄.

Istotnymi czynnikami decydującymi o właściwościach technicznych fibrozapraw są zjawiska fizykochemiczne zachodzące na styku włókien z matrycą cementową lub cementowo-popiołową. Zależą one od rodzaju cementu, włókien, współczynni-

ka w/c oraz powszechnie stosowanych dodatków i domieszek, szczególnie uplastyczniających. W normie ASTM C – 1116-91 [1] rozróżnia się włókna modyfikujące i zbrojące mikrostrukturę kompozytów. W celu dokonania kwalifikacji włókien, jako dodatku zbrojącego względnie modyfikującego, należy zarejestrować krzywą obciążenie-ugięcie, obliczyć odpowiednie wartości wskaźników odporności na pękanie. W niniejszej pracy dodane do kompozytów włókna szklane spełniały tylko rolę modyfikującą, co wynika głównie z ich bardzo małej objętości w kompozycie.

Energia pękania jest definiowana jako praca sił zewnętrznych w standardowej próbie zginania niezbędna do zarysowania badanej próbki [5]. W celu jej określenia przy zginaniu próbki beleczki obciąża się dwiema siłami skupionymi jak na rys. 2 i 3. Rejestracji podlegają siła obciążająca próbkę F i wielkość ugięcia próbki – l . Uzyskane zależności obciążenie – ugięcie służą do określenia energii pękania w oparciu o obliczone pola powierzchni pod wykresami obciążenie zginające – ugięcie, obliczone dla maksymalnej siły lub po spadku do 40% maksymalnej wartości siły. Czerpunktowe zginanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Systems 810.23. Mierzone wielkości sił obciążających i ugięć rejestrowano przy użyciu komputerowego systemu zbierania danych.

Próbka 2P przedstawiona na rys. 2 pęka gwałtownie przy maksymalnej sile. Analogiczną krzywą dla serii 2PF1 przedstawia rys. 3. W próbkach z włóknami stalowymi istniała możliwość obliczenia pola powierzchni po spadku siły do 40% maksymalnej wartości (rys. 3). Wartości energii pękania dla kompozytów 2P, 2PF1 i 2PF2 przed i po korozji zawiera tabl. 5.

W ostatnich latach dużą uwagę poświęca się badaniom trwałości materiałów, szczególnie wykonanych z cementów [10, 12, 14]. Powodem zainteresowania trwałością jest duże zanieczyszczenie atmosfery i wód. Związana z tym agresywność środowiska powoduje wzrost szybkości reakcji korozji. Stosowanie do produkcji materiałów budowlanych odpadów przemysłowych zamiast surowców tradycyjnych powinno gwarantować uzyskanie finalnego materiału o założonych, wymaganych właściwo-

ściach technicznych. Istotną właściwością oprócz wytrzymałości jest ich trwałość. Obecność popiołów lotnych w materiale budowlanym nie powinna prowadzić w roztworach korozyjnych do większej destrukcji, niż ma to miejsce w materiale wykonanym z surowców tradycyjnych [4, 10]. Zastosowane w badaniach 4% roztwory NaCl, $MgSO_4$ są typowymi mediami korozyjnymi, na które są narażone materiały budowlane.

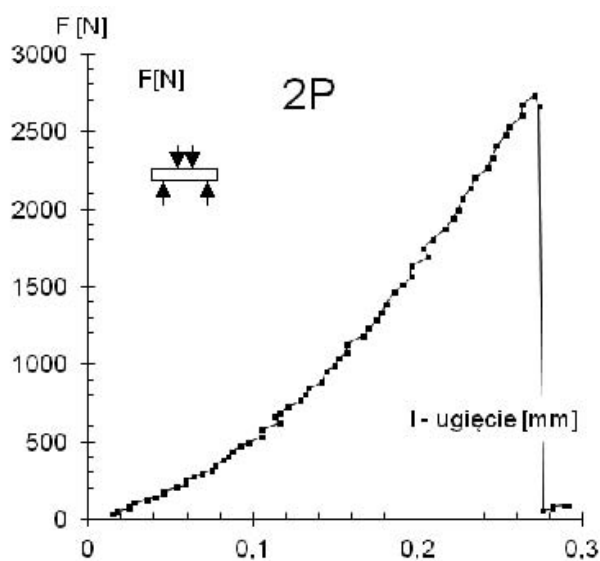
Sole chlorkowe działają szkodliwie na matryce oraz zbrojenie, które w tej pracy stanowią rozproszone włókna stalowe F1 i F2 [15]. Agresja chlorkowa wiąże się przede wszystkim z działaniem na materiały powszechnie stosowanych odladzających. Najczęściej używanymi substancjami obniżającymi temperaturę krzepnięcia są niskoprocentowe (2 i 3%) roztwo-

Tabl. 4. Wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} i ściskanie f_{cm} serii prób po 710 dobach korozji

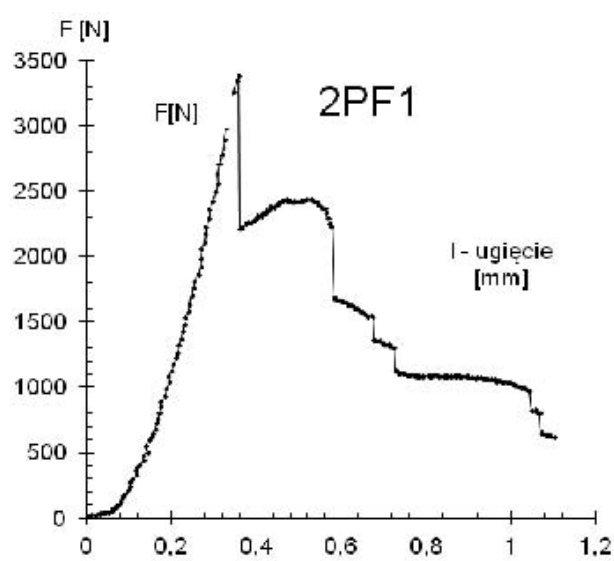
Seria	Wytrzymałość po 710 dobach korozji [MPa]			
	4% NaCl		4% $MgSO_4$	
	f_{ctm}	f_{cm}	f_{ctm}	f_{cm}
2P	6,50	30,28	7,61	31,98
2PF1	7,84	41,05	8,41	44,53
2PF2	7,95	39,55	8,04	41,58

Tabl. 5. Energia pękania serii prób przy sile maksymalnej F_{max} i przy spadku siły do 40% F_{max} przed i po korozji

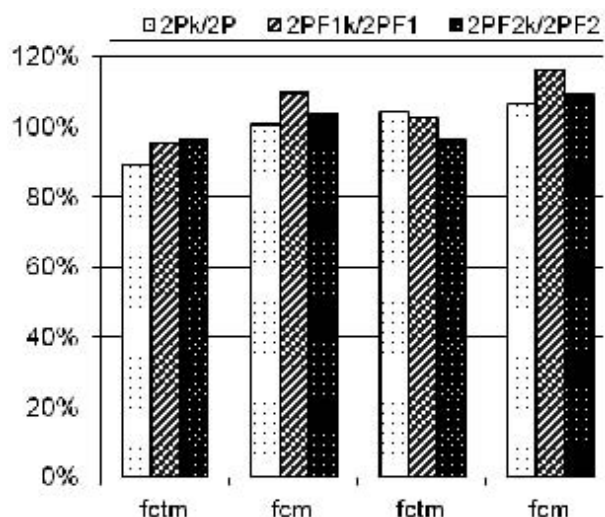
Seria	Przed korozją E_{90} [Nm]		Po korozji $E_{90} + 710k$ [Nm]			
	E_{max}	40% E_{max}	4% NaCl		4% $MgSO_4$	
			E_{max}	40% E_{max}	E_{max}	40% E_{max}
2P	0,319	–	0,392	–	0,437	–
2PF1	0,418	1,122	0,425	0,690	0,544	1,399
2PF2	0,433	1,217	0,438	0,501	0,530	1,532



Rys. 2. Obciążenia i ugięcia l dla próbki kompozytu cementowo-popiołowego 2P (bez włókien)



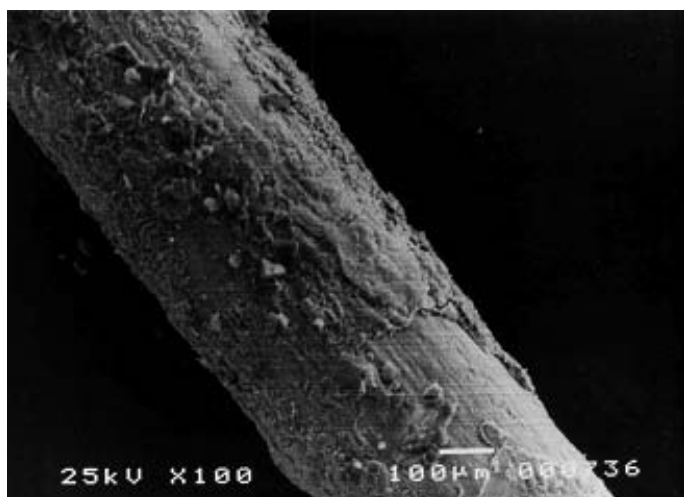
Rys. 3. Obciążenia i ugięcia l dla próbki kompozytu cementowo-popiołowego z dodatkami włókien stalowych – 2PF1



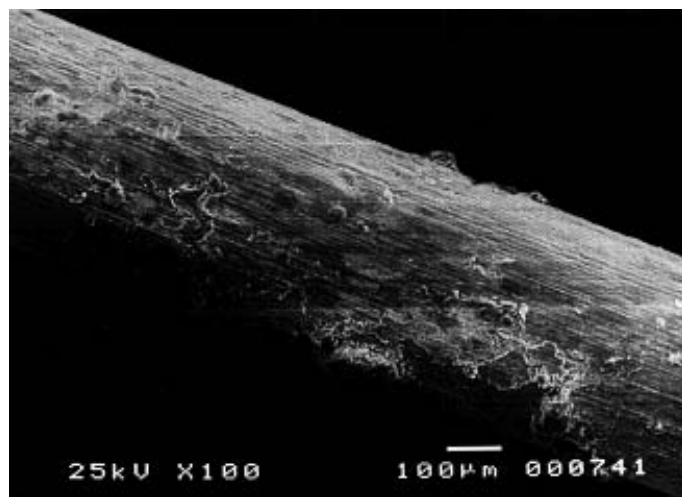
Rys. 4. Zmiana wytrzymałości na zginanie f_{ctm} i ściskanie f_{cm} serii prób 2P, 2PF1, 2PF2 po 710 dniach korozji w 4% roztworach NaCl i $MgSO_4$ w stosunku do wytrzymałości prób 90-dniowych bez korozji.

ry chlorku sodowego. Wnikanie chlorków jest uzależnione od oporu dyfuzyjnego betonu i jego zdolności wiązania jonów chlorkowych. Istnieje pogląd, że zdolność wiązania chlorków przez beton ma decydujące znaczenie, ponieważ ryzyko korozji zbrojenia (w przypadku tej pracy włókien stalowych) zależy od ilości wolnych chlorków w cieczy porowej. Dyfuzja chlorków z zewnątrz do stwardniałego zaczynu cementowego nie jest typowym procesem dyfuzyjnym, ponieważ jony chlorkowe ulegają częściowej adsorpcji na powierzchni uwodnionych minerałów cementu lub reagują z tymi fazami. Podczas ekspozycji betonów w środowisku zawierającym chlorki fazy glinianowe są prawdopodobnie przekształcane w chlorogliniany, zwłaszcza w sól Friedla $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$.

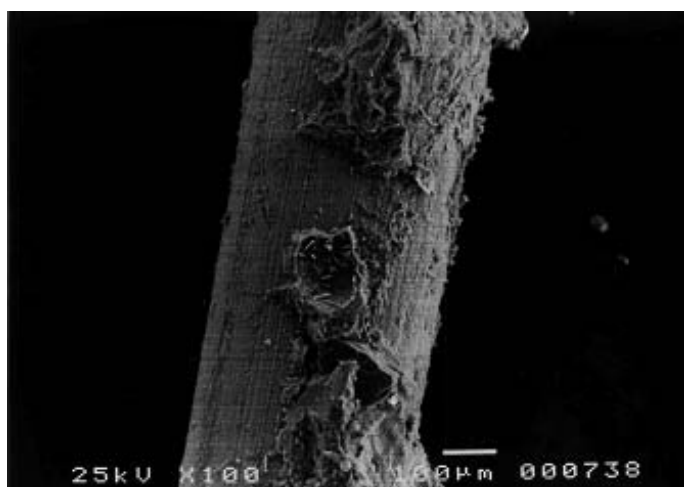
Stal zanurzona do zapraw lub betonów zostaje otulona zhydratyzowanym zaczynem cementowym. Ulega pasywacji, wytwarzając ciekłą warstewkę Fe_2O_3 ściśle przylegającą do powierzchni stali. Tak długo, jak warstewka ta jest obecna, stal pozostaje nienaruszona. Jony chlorkowe uszkadzają tę warstewkę, powodując korozję stali w obecności wody i tlenu. Na powierzchni stali powstają mikroogniwa korozyjne. Produkty



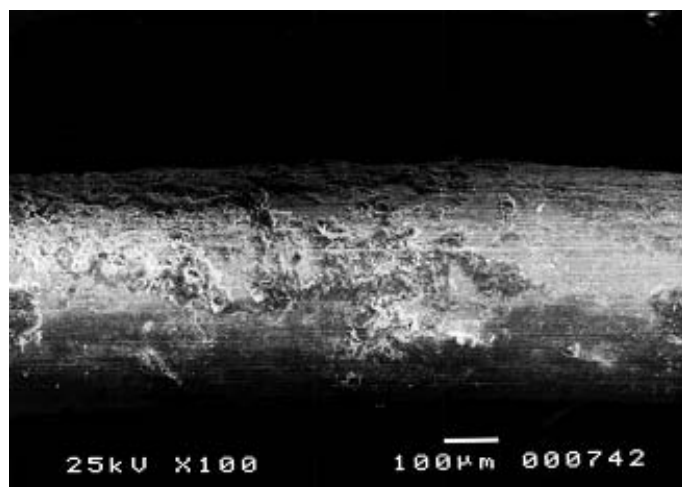
Rys. 5. Włókno stalowe F1 w kompozycie cementowym OF1 po 710 dniach korozji w 4% NaCl



Rys. 7. Włókno stalowe F1 w kompozycie 2PF1 po 710 dniach korozji w 4% roztworze NaCl



Rys. 6. Włókno stalowe F2 w kompozycie cementowym OF2 po 710 dniach w 4% roztworze NaCl



Rys. 8. Włókno stalowe F2 w kompozycie 2PF2 po 710 dniach korozji w 4% roztworze NaCl

korozji stali zajmują objętość kilka razy większą niż sama stal. Powierzchnia styku stali z zaczynem w fibrobetonach jest wielokrotnie większa niż w klasycznym żelbecie przy porównywalnej zawartości stali [2]. Uszkodzenie pasywnej warstewki tlenku na dużej powierzchni włókien stalowych stwarza niebezpieczeństwo ich korozji, teoretycznie większe niż stali prętowej. Liczne obserwacje wykazują jednak, że korozja włókien stalowych nie powoduje rozsądzania matrycy cementowej niż ma to miejsce w stali prętowej [14].

Na rys. 5 i 6 pokazano włókna w czystej zaprawie cementowej po korozji chlorkowej. Powierzchnia zarówno włókna F1, jak i F2 pokryte są wyraźnie produktami korozji o stosunkowo dużej grubości. Efekty korozji chlorkowej kompozytów cementowo-popiołowych (rys. 7, 8) są mniej wyraźne.

W betonach zawierających popiół lotny dostęp chlorków do wnętrza jest utrudniony ze względu na ich obniżoną przepuszczalność. Jak wskazują wyniki pracy Cao [6], pasywacja włókien powierzchni stalowych nie uległa pogorszeniu nawet wówczas, gdy zawartość popiołu lotnego klasy F była wysoka, wynosiła 60% masy spoiwa i stosunku w/c do 0,39. Betony takie wykazały dużą odporność na przenikanie chlorków. W betonach, które mogą być narażone na ekstremalne oddziaływanie środowiska, zaleca się stosowanie spoiwa o dużej zawartości dodatków hydraulicznych i pucolanowych lub cementy żużlowe, które w procesach hydratacji tworzą dużo fazy C-S-H [3, 8].

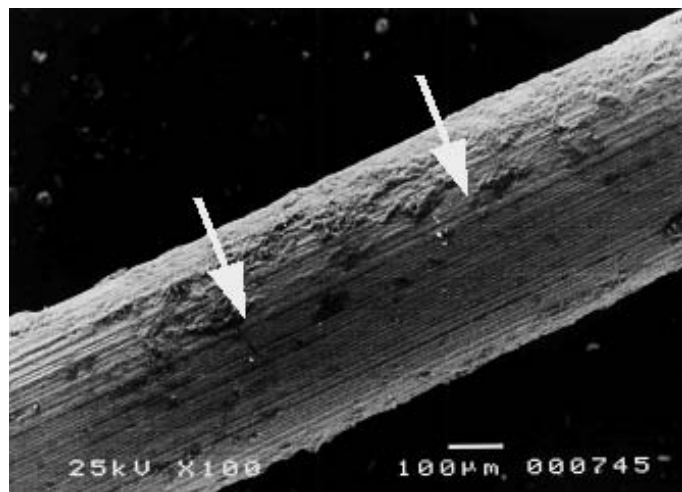
W niniejszych badaniach stosowano cement portlandzki CEM I 32,5R o zawartości alitu około 50% i zawartości C_3A – 8,3%. Zamiana popiołem części masy cementu prawdopodobnie spowodowała zmiany struktury zaczynu, uszczelniając go. Działanie korodującego roztworu $MgSO_4$ powoduje korozję nie tylko siarczanową, ale również magnezową.

Wszystkie serie prób po 710 dniach korozji siarczanowo-magnezowej minimalnie obniżyły wartości wytrzymałości na zginanie w porównaniu z próbami 90-dniowymi o analogicznym składzie nie poddanymi korozji. Zmiany wytrzymałości na ściskanie po korozji są także niewielkie. Istotny wzrost wynoszący 16% zanotowano tylko dla serii 2PF1. Wartości wytrzymałości na ściskanie dla pozostałych serii są tylko nieznacznie wyższe (o kilka procent) od wartości dla serii prób przed korozją (tabl. 3, 4).

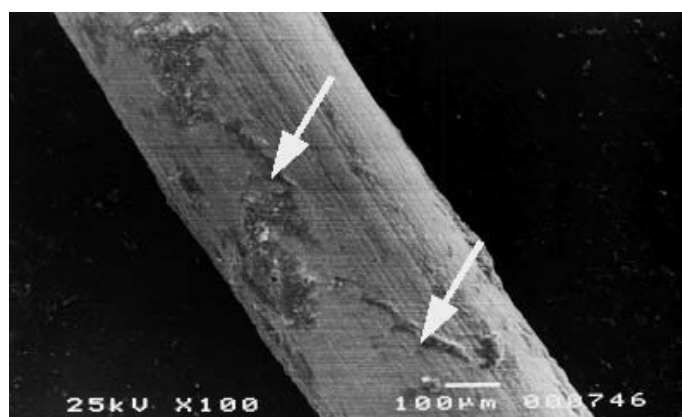
Wartości energii pęknięcia dla wszystkich serii prób po korozji siarczanowej są wyższe od uzyskanych dla serii przed korozją. Dotyczy to wartości energii uzyskanych dla maksymalnej siły – w przypadku wszystkich serii oraz dla serii z włóknami stalowymi 2PF1 i 2PF2 po spadku siły do 40% jej wartości maksymalnej (tabl. 5).

Produktami reakcji siarczanu magnezowego z wodorotlenkiem wapnia, który powstaje w procesie wiązania alitu i belitu są kolejno siarczan wapnia, dwuwodny siarczan wapnia, który w obecności C_3A przechodzi w ettringit. Ponadto powstaje także brucyt. Brucyt odkłada się w porach, tworząc w ten sposób na powierzchni zabezpieczającą warstwę, która uniemożliwia dalsze wnikanie do wnętrza jonów magnezowych i siarczanych.

Przy penetracji kompozytów z popiołem przez roztwory zawierające jony siarczane istotną rolę odgrywają: wielkość porów, zawartość tlenku glinu i tlenku wapnia wchodzących w skład popiołów. Mogą one brać udział w reakcji z siarczana-



Rys. 9. Włókno stalowe F1 w kompozycie 2PF1 po 710 dniach korozji w 4% roztworze $MgSO_4$



Rys. 10. Włókno stalowe F2 w kompozycie 2PF2 po 710 dniach korozji w 4% roztworze $MgSO_4$

mi, szczególnie gdy Al_2O_3 i CaO występują w szkliwie popiołu lotnego, stanowiąc tym samym źródło materiału, który reaguje z siarczanami. Wysoki stosunek krzemionki do tlenku glinu zmniejsza prawdopodobnie wrażliwość spoiwa z popiołem na agresję siarczanową, ale nie jest to według Neville'a całkowicie udowodnione [8, 10].

Włókna stalowe F1 i F2 po długotrwałym działaniu siarczanu magnezowego mają powierzchnię tylko nieznacznie zmienioną (rys. 9, 10). Działanie tego roztworu nie spowodowało uszkodzeń ochronnej warstewki tlenku żelazowego. Generalnie betony wykonane z cementu z popiołami charakteryzują się zwiększoną odpornością na czynniki agresywne, co wiąże się ze zmniejszeniem zawartości $Ca(OH)_2$ w zaczynie (przede wszystkim zmniejszeniem dużych porów, tj. wzrostem szczelności spowodowanym obecnością kulistych form ziaren popiołu). Właściwości te nasilają się ze wzrostem zawartości popiołów, a w przypadku korozji siarczanowej ze zmniejszeniem zawartości C_3A [8]. W przedstawionej pracy zawartość C_3A w cemencie wynosiła 8,3%, a popiół stanowił aż 50% masy cementu. Prawdopodobnie dlatego nie zanotowano negatywnych skutków długotrwałej korozji siarczanowo-magnezowej.

PODSUMOWANIE

Badano kompozyty cementowo-popiołowe, w których popiołem klasy F zastąpiono 25, 50, 75% masy cementu. Do wszystkich serii prób dodano niewielką ilość włókien stalowych o dwóch kształtach: haczykowatych i prostych o objętości V_f około 0,25%. Na podstawie zbadanych właściwości technicznych jako optymalną uznano serię z 50% zamianą cementu popiołem.

Próby o optymalnym składzie poddano przez okres 750 dni korozji w 4% roztworach NaCl i $MgSO_4$. Po korozji zbadano wytrzymałości na zginanie f_{cmk} , ściskanie f_{cmk} , energię pękania E_k oraz wykonano fotografie z mikroskopu skaningowego powierzchni włókien po korozji. Działanie chlorku sodowego spowodowało po 710 dniach korozji niewielkie obniżenie wytrzymałości na zginanie, natomiast nieznacznie wzrosła wytrzymałość na ściskanie. Powierzchnia włókien stalowych po korozji w NaCl w zaprawie cementowej była bardziej skorodowana niż powierzchnie włókien w kompozytach cementowo-popiołowych.

Siarczan magnezowy, poza jedną serią, praktycznie nie obniżył wytrzymałości na zginanie, a wytrzymałość na ściskanie wzrosła od kilku do kilkunastu procent. Na powierzchni włókien zanotowano tylko niewielkie ślady korozji. Energia pękania wszystkich serii prób z włóknami stalowymi, zarówno przed korozją, jak i po korozji, jest wyższa niż w serii kontrolnej bez włókien.

Stosowanie niewielkiego dodatku włókien do drobnoziarnistych kompozytów cementowo-popiołowych jest wskazane zarówno ze względów technicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Na bazie piasku uzyskuje się wytrzymałości kompozytów odpowiadające betonom średniej klasy.

LITERATURA

1. ASTM C – 1116-91, Standard Specification Fiber – Reinforced Concrete and Shotcrete.

2. Baille C., Emanuelsson J., Marton F.: Building knowledge about the interface composites. *Materials Structures*, 2001, A-32, 305-312.

3. Bensted J.: Stosowanie dodatku popiołu lotnego dla zwiększenia odporności na traumatyczny rodzaj agresji siarczanowej. *Cement Wapno Beton*, 1, 2000, 29-31.

4. Bouzoubaa N., Fournier B.: Optimization of fly ash content in concrete, Part I Non-air-entrained concrete made without superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, No 33, 2003, 1029-1037.

5. Brandt A. M.: Zastosowanie włókien do uzbrojenia w elementach betonowych. *Beton u progu nowego millenium*, Kraków 2002, 433-444.

6. Cao H. T.: Corrosion behaviours of steel embedded in fly ash blended cements. *Durability of Concrete Ed., V. M. Malthora*, ACI SP-145, 1994, 215-227.

7. Kucharska L.: Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zawierające ilość wody zarobowej. *CWB* 2000, 46-61.

8. Kurdowski W.: *Chemia cementu*. PWN, Warszawa 1991.

9. Laskowski J.: *Logistyka popiołów. Popioły z energetyki*, 2004, 7-12.

10. Neville A. M.: Rozważania na temat trwałości konstrukcji betonowych wczoraj, dziś, jutro. *Beton u progu nowego millenium*, Kraków 2000, 7-14.

11. Owsiak Z.: Hydratacje cementu z popiołem lotnym. *CWB*, 1, 2000, 29-31.

12. Rudziński A.: Trwałość zapraw z dodatkiem rozdrobnionych odpadów wełny mineralnej poddanych działaniu zasolonego środowiska wodnego. *Inżynieria Morska i geotechnika*, nr 6/2011, 492-495.

13. Svoboda M., Ledederova J., Suchardova M., Leber P.: Wykorzystanie produktów spalania węgla w przemyśle budowlanym i pokrewnych branżach w związku z europejską regulacją REACH. *Popioły z energetyki*, 2007, 151-162.

14. Śliwiński J., Zych T.: Czynniki kształtujące trwałość fibrobetonów z matrycą cementową. *CWG*, 1994, 139-143.

15. Wieczorek G.: *Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2002.