

Edward Stewarski, Marek Petri**

TECHNICZNA CELOWOŚĆ STOSOWANIA MIKROZBROJENIA ZAPRAW CEMENTOWYCH Z WŁÓKNAMI POLIPROPYLENOWYMI W BUDOWNICTWIE GÓRNICZYM

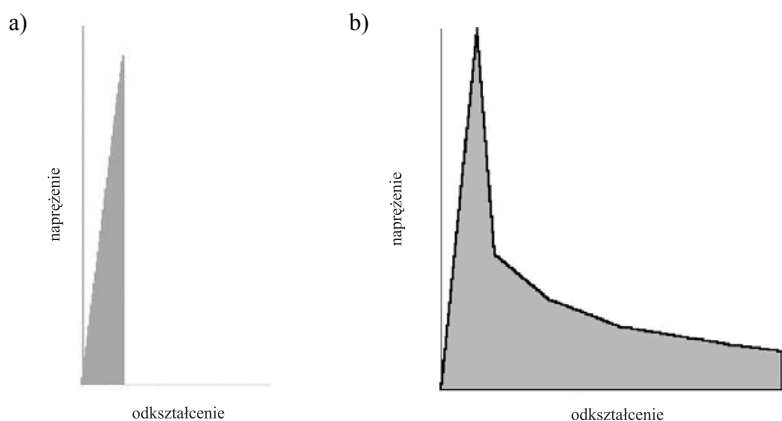
1. Wstęp

Warunki eksploatacji konstrukcji betonowych w kopalniach są skrajnie trudne. Na głębokościach poniżej 600 m występują silnie zmineralizowane wody złożowe, będące jedną z głównych przyczyn destrukcji betonu. Szczególnie niebezpieczne są występujące w nich rozpuszczalne sole, w tym chlorki i siarczany. Powodują one korozję zapraw i betonów związaną bądź z tworzeniem się związków ekspansywnych (sulfogliniany wapniowe), bądź też z utworzeniem się soli rozpuszczalnych, a więc łatwych do wyługowania (chlorki, azotany). W tych warunkach betonowe konstrukcje stosunkowo szybko tracą swoje pierwotne właściwości użytkowe, jak: wytrzymałość, odporność na uderzenia i ścieranie, szczelność, mrozoodporność itp. Zapobiec temu można, poprawiając początkową szczelność betonów i zapraw oraz eliminując, bądź poważnie ograniczając, możliwość występowania w nich mikrospekkań. Jedną z metod do tego prowadzącą jest wprowadzanie do receptur otrzymania ww. materiałów niewielkich ilości włókien stalowych bądź organicznych. Z uwagi na agresywne oddziaływanie środowiska (chlorki), zalecane są raczej włókna organiczne. Zdecydowana większość stosowanych w tym celu włókien to włókna nisko modułowe (moduł Younga poniżej 20 GPa), które kwalifikowane były do tej pory przez normę ASTM C 1116-91 (Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete) [1], jako domieszki (typ III). Znaczyło to, że w powszechnej opinii ich rola kończyła się po pierwszych godzinach reakcji cementu z wodą, gdy ich czysto fizyczne oddziaływanie sprowadzało się do ograniczenia powstawania spekkań skurczowych i segregacji składników stałych mieszanki. Stosowano włókna z polimerów odpornych na silnie alkaliczne oddziaływanie środowiska hydratyzującego cementu, a więc: polipropylenowe, poliwinylalkoholowe, poliakrylonitrylowe, nylonowe. W ostatnich latach największy wysiłek, mający na celu jak najlepsze dostosowa-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

nie właściwości włókien dla potrzeb producentów betonu, wykazali producenci włókien polipropylenowych. Ich pozytywny wpływ na trwałość betonowych konstrukcji eksploatawanych w kopalni został szczególnie opisany na przykładzie 8-letnich obserwacji skutków prac remontowych szybu Jas IV KWK „JAS-MOS”, wykonanych w latach 1993–1995 [2].

Włókna polipropylenowe, oprócz swej tradycyjnej roli jako dodatku redukującego ilość tworzących się spękań plastycznych (pierwsze godziny hydratacji), mogą również pełnić rolę włókien zbrojących, a więc brać czynny udział w redukcji spękań wysychania, spękań tworzących się jako skutek karbonizacji oraz brać udział w procesie pęknięcia betonu. Wpływają zatem na właściwości użytkowe dojrzałego betonu. Efektywnie podwyższają zdolności do pochłaniania energii betonu poddawanego granicznym naprężeniom tak wewnętrznym (skurcze), jak i zewnętrznym (obciążenie, wibracja, oddziaływanie środowiska). Efekt pęknięcia betonu zarejestrowany przykładowo dla przypadku zginania (rys. 1a) różni się w sposób istotny od pęknięcia betonu z dodatkiem włókien zbrojących (rys. 1b).



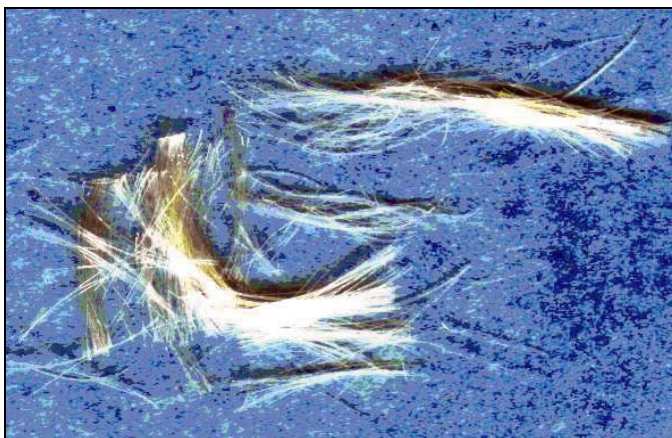
Rys. 1. Zależność naprężenie – odkształcenie podczas zginania betonowej belki bez dodatku (a) i z dodatkiem włókien zbrojących (b)

Pole pod krzywą naprężenie – odkształcenie na rysunku 1b, jest znacznie większe niż na rysunku 1a. Jest ono miarą wielkości energii pochłanianej w procesie niszczenia. Wielkość ta, zwana pracą zniszczenia (dla niekontrolowanych warunków pęknięcia) lub energią pęknięcia (dla warunków kontrolowanych), jest funkcją: ilości włókien (V_f), smukłości (l/d), własności fizycznych włókien dodawanych do betonu oraz ich przyczepności do betonowej matrycy (τ). Ta ostatnia wielkość nie jest wartością stałą, lecz zmienia się w zależności od: rodzaju cementu, współczynnika w/c , stosowanych dodatków, czasu i temperatury pielęgnacji betonu oraz warunków jego eksploatacji.

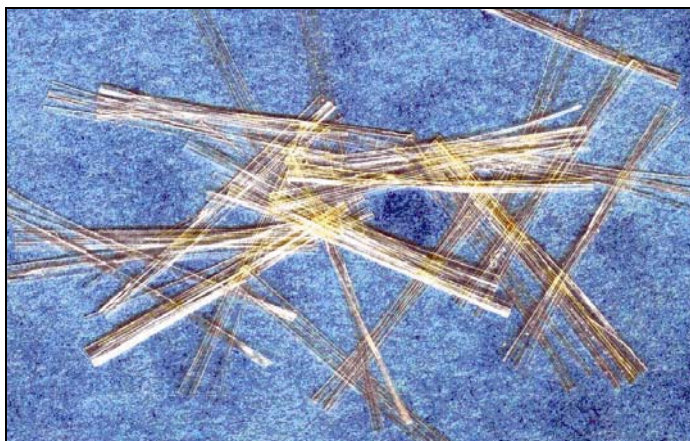
Inną metodę oceny odporności betonu na pęknięcie proponuje norma ASTM D 1557, co zostało szerzej opisane w rozdziale 4 niniejszej pracy.

2. Włókna polipropylenowe, stosowane jako mikrobrojenie betonu

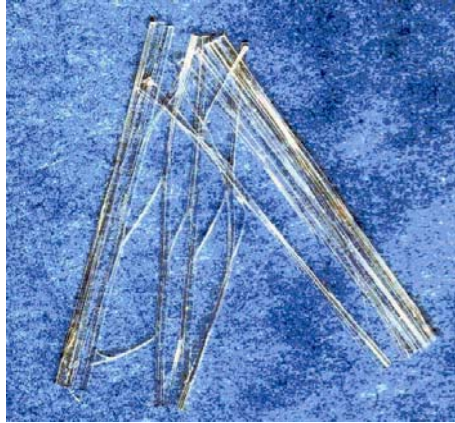
Stosowane do mikrobrojenia betonu włókna wytwarza się z czystego (nie przetworzonego uprzednio) polipropylenu, poddawanego w czasie ich wytwarzania krystalizacji ukierunkowanej; są to tzw. włókna izotaktyczne. Niezależnie od kształtu i metody produkcji (jedwab, cięta folia, profilowane pręty), posiadają one zbliżoną wytrzymałość i sztywność (wytrzymałość na rozciąganie $0,31\pm 0,42$ kN/mm², moduł Younga 3,5 kN/mm², wydłużenie przy zrywaniu 15%). Różnią się istotnie wielkością i kształtem (rys. 2–5).



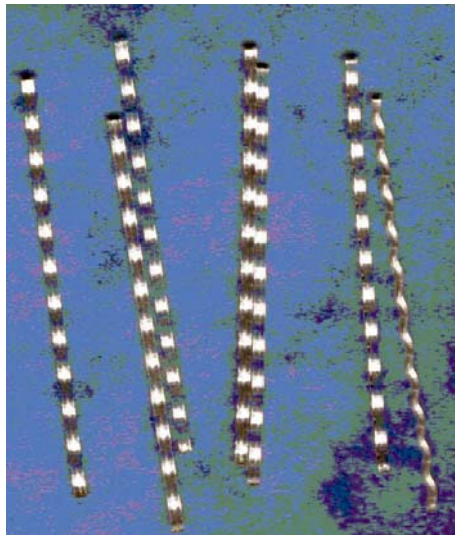
Rys. 2. Cięty jedwab „Stealth” $l = 3, 6, 12, 24$ mm, $\varnothing = 32$ μ m



Rys. 3. Cięta folia, fibrylowana „Harbourite” $l = 6, 12, 24, 48$ mm, grubość = 400 μ m



Rys. 4. Cięta folia, głęboko fibrylowana „Fibermesh” $l = 12, 19, MD, mm$, grubość = $400 \mu m$



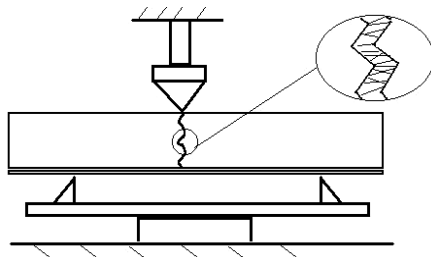
Rys. 5. Pręty profilowane „HPP” $l = 30, 40, 50 mm$, $\varnothing = 0,9 mm$

Włókna prezentowane na rysunkach 2, 3 i 4 stosowane są tradycyjnie jako domieszka ograniczająca tworzenie się w zaprawach i betonach mikrospekkań, natomiast pokazane na rysunku 5 nie tylko ograniczają mikrospekkania, ale powodują również, że betony i zaprawy z ich udziałem wykazują stosunkowo wysoką wytrzymałość resztkową już po zarysowaniu matrycy. Są one zamiennikami włókien stalowych, szczególnie przydatnymi, gdy konstrukcja betonowa ma pracować w środowisku agresywnym dla stali (woda morską, solanka, środki odladzające).

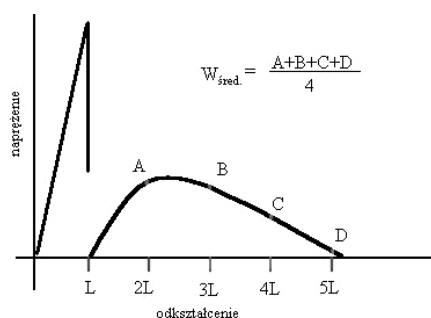
3. Badania statyczne zapraw z włóknami PP

3.1. Procedura badawcza

W roku 1998 opracowano dodatkową procedurę kwalifikacji zdolności włókien do zbrojenia betonu (ASTM C-1399: Test Methode for Obtaining Average Residual Strngth of Fiber-Reinforced Concrete) [3]. Poddano mianowicie analizie wykazywaną przez pękający fibrobeton tak zwaną wytrzymałość resztkową. Wytrzymałość resztkowa jest to zdolność do przenoszenia przez konstrukcję betonową (włókna przenoszą obciążenie) obciążeń zewnętrznych w momencie, gdy uległa już zniszczeniu matryca. Otóż norma ASTM C-1399-91 zaleca przeprowadzenie następującego testu: betonową belkę należy poddać klasycznemu zginaniu w układzie 3-punktowym (rys. 6) przy szybkości odkształcania maks. 5 mm/min z tą różnicą, że w pierwszym etapie zginaną belkę kładzie się na pasek z blachy stalowej i obciąża do pierwszego zarysowania (wartość odkształcenia-1D). Następnie wkładkę stalową należy wyjąć, a betonową próbkę ponownie należy poddać obciążeniom. Rejestrowana w drugim etapie krzywa naprężenie – odkształcenie odnosi się do przypadku, gdy obciążenie zewnętrzne (siła wymuszająca) jest przenoszone jedynie przez zawarte w betonie włókna.



Rys. 6. Zginania 3-punktowe belki wraz z blachą podkładową



Rys. 7. Schemat liczenia średniej wytrzymałości resztkowej

Wartość średnią wytrzymałości resztkowej oblicza się jako średnią arytmetyczną dla wartości odczytanych w punktach A, B, C i D według rysunku 7.

Jako wielkość minimalną dla wytrzymałości resztkowej (tzn. włókna w zastosowanej ilości pełnią rolę czynnika zbrojącego) uznaje się wartość równą 50 psi (co odpowiada 0,35 MPa) lub nie mniej niż 20% wytrzymałości na zginanie badanego fibrobetonu.

W badaniach prowadzonych na zaprawach normę ASTM C-1399-91 zmodyfikowano, zmieniając wymiary badanych próbek i rozstaw podpór.

3.2. Skład zaprawy cementowo-piaskowej

Skład zaprawy cementowo-piaskowej jest następujący:

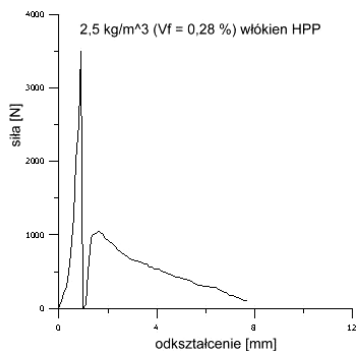
- cement portlandzki CEM I 32,5 R (o podwyższonej wytrzymałości początkowej);
- woda/cement = 0,5;
- piasek normowy o zaokrąglonych ziarnach-wielkość ziaren do 5 mm;
- włókna polipropylenowe HPP (pręty profilowane, $l = 30$ mm, $\varnothing = 0,9$ mm) w ilości 2,5 kg/m ($V_f = 0,28\%$) lub w ilości podwojonej, tzn. 5 kg/m ($V_f = 0,56\%$)

Belki o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm formowane metodą odlewania, dojrzewały w warunkach normalnych 28 dni. Następnie zginano je w układzie 3-punktowym, rozstaw podpór wynosił 100 mm, szybkości odkształcania maks. 5 mm/min; wyniki zaprezentowano w tabeli 1 oraz na rysunkach 8 i 9.

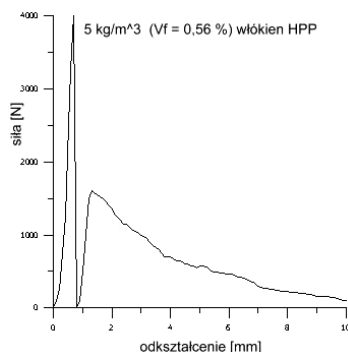
TABELA 1

Własności mechaniczne badanych zapraw, średnie z 5 pomiarów

Material	Wytrzymałość na zginanie, MPa	Praca pęknięcia, J/m^2	Maksymalna wytrzymałość resztkowa, MPa	Średnia wytrzymałość resztkowa, MPa
Zaprawa + 2,5 kg HPP	7,3	2100	2,4	1,5
Zaprawa + 5 kg HPP	7,8	3123	3,7	2,6



Rys. 8. Siła vs odkształcenie dla $V_f = 0,28\%$



Rys. 9. Siła vs odkształcenie dla $V_f = 0,56\%$

4. Odporność na uderzenie zapraw z włóknami PP

Oznaczenia wykonano zgodnie z normą ASTM D 1557-70 [4].

4.1. Skład zaprawy cementowo-piaskowej

Skład zaprawy cementowo-piaskowej jest następujący:

- cement portlandzki 32,5 R (o podwyższonej wytrzymałości początkowej);
- woda/cement = 0,5;
- piasek normowy o zaokrąglonych ziarnach — wielkość ziaren do 5 mm;
- włókna polipropylenowe „Stealth” (cięty jedwab, $l = 12$ mm) w ilości 0,9 kg/m ($V_f = 0,1\%$) lub w ilości podwojonej, tzn. 1,8 kg/m ($V_f = 0,2\%$).

Do badań wykonano trzy serie próbek i badano je po 1, 3, 7, 14, 28 dniach dojrzewania:

- 1) próbki wykonane z piasku, cementu i wody;
- 2) próbki wykonane z piasku, cementu, wody i włókien polipropylenowych;
- 3) próbki wykonane z piasku, cementu, wody z podwójną zawartością włókien polipropylenowych.

Efektom pomiarowym jest ilość uderzeń, jaką przetrwa próbka do chwili uszkodzenia (pęknięcia). Próbki zostały wykonane w postaci walców, o średnicy wewnętrznej 150 mm i wysokości 63,5 mm.

4.2. Procedura badawcza

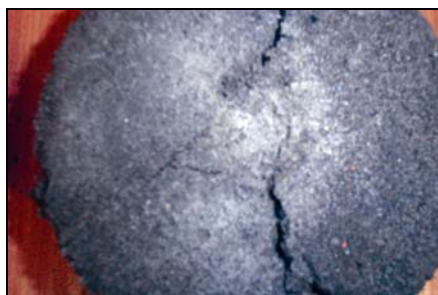
Procedura badawcza (rys. 10–12) polega na uderzeniu bijakiem w stalową kulę z góry na próbkę badaną. Bijak jest zrzucany z wysokości 18 cali (457 mm) i uderzając w kulę, powoduje za jej pośrednictwem obciążenie udarowe badanej próbki. Masa bijaka wynosi 4,54 kg. Na próbce umieszcza się stalową kulę o średnicy 2,5 cala (63,5 mm), która jest utrzymywana na próbce dokładnie w jej osi za pomocą uchwyty stabilizującego jej położenie.



Rys. 10. Umieszczenie próbki w aparacie badawczym

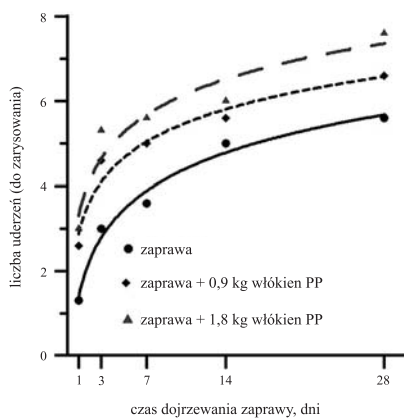


Rys. 11. Widok badania



Rys. 12. Próbki w chwili uszkodzenia

Wyniki badań zaprezentowano na rysunku 13.



Rys. 13. Odporność na uderzenie badanych fibrobetonów w funkcji czasu ich dojrzewania i ilości stosowanego mikrobrojenia

5. Podsumowanie i wnioski

1. Mikrobrojenie zaprawy cementowej włóknami polipropylenowymi w ekonomicznie uzasadnionej ilości nie poprawia właściwości wytrzymałościowych kompozytu, ale podwyższa odporność na obciążenia uderzeniowe i powoduje korzystny wzrost wartości pracy pęknięcia kompozytu, co stanowi istotny pozytywny efekt dla zastosowań w budownictwie podziemnym.
2. Włókna polipropylenowe HPP (pręty profilowane) mogą stanowić zamiennik włókien stalowych, co jest bardzo istotne, gdy fibrobeton ma pracować w warunkach agresywnego, korozyjnego dla stali środowiska (a takie jest w budownictwie podziemnym).
3. Badania statyczne:
 - Stwierdzono zależność własności mechanicznych i procesu pęknięcia zapraw zbrojonych włóknami HPP od ich ilości. Tak praca zniszczenia, jak i wartość wytrzymałości resztkowej badanych kompozytów są funkcją ilości stosowanych włókien.
 - W wyniku przeprowadzonych badań (tab. 1), włókna polipropylenowe HPP można uznać za włókna zbrojące (wg ASTM C-1399), stanowiące zamiennik włókien stalowych.
4. Badania dynamiczne:
 - Mikrobrojenie włóknami polipropylenowymi jest najbardziej efektywne w pierwszych (siedmiu) dniach wiązania zaprawy.
 - Wpływ ilości mikrobrojenia jest proporcjonalny do uzyskanych wartości odporności na uderzenie

LITERATURA

- [1] ASTM C 1116-91: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete
- [2] *Lubryka M., Porowski J., Witosiński A.*: Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, r. 27, z. 3–4, 2003, 395
- [3] ASTM C-1399: Test Method for Obtaining Average Residual Strength of Fiber-Reinforced Concrete
- [4] ASTM D 1557-70: Standard Test Methods for Moisture-Density Relations of soils and soil — Aggregate Mixtures Using 10-lb (4,54 kg) Rammer and 18-in (475-mm) Drop